

Lecturas de Cátedra

Física IA

De las galaxias a los quarks

Arturo López Dávalos

Hernán Asorey

Carola Graziosi


EDITORIAL
UNRN

Física IA

De las galaxias a los quarks

Lecturas de Cátedra

Física IA

De las galaxias a los quarks

Arturo López Dávalos

Hernán Asorey

Carola Graziosi



**EDITORIAL
UNRN**



Utilice su escáner de
código QR para acceder
a la versión digital

Índice

9		Prólogo Arturo Menchaca Rocha
11		Presentación
19		Capítulo 1 INTRODUCCIÓN
29		Capítulo 2 BREVE HISTORIA DE LAS IDEAS EN LA FÍSICA
47		Capítulo 3 EL TAMAÑO DE LAS COSAS (EL SEÑOR TALES)
75		Capítulo 4 ASTRONOMÍA (EL SEÑOR GALILEO)
129		Capítulo 5 ENERGÍA (EL SEÑOR JOULE)
175		Capítulo 6 LAS FUERZAS Y EL MOVIMIENTO (EL SEÑOR NEWTON)
211		Capítulo 7 ESTRUCTURA DE LA MATERIA (EL SEÑOR GELL-MANN)
243		Capítulo 8 LOS ELEMENTOS QUÍMICOS (EL SEÑOR MENDELEIEV)
271		Capítulo 9 EVOLUCIÓN ESTELAR (EL SEÑOR HOUTERMANS)
303		Capítulo 10 ORIGEN DEL UNIVERSO (EL SEÑOR GAMOW)
331		Autorías y colaboraciones

PRÓLOGO

Esta obra tiene como autores a tres distinguidos profesores de la Universidad Nacional de Río Negro (UNRN), en la Argentina.

Carola Graziosi, exdirectora del Profesorado de Física y actualmente a cargo de la Escuela de Producción, Tecnología y Medio Ambiente de la Sede Andina de la UNRN, ha dedicado su vida a la docencia, estimulando la creatividad. Su prestigio la llevó a presidir la Asociación de Profesores de Física de Argentina, con la que organizó las actividades del Año Internacional de la Física, en 2005. Fue responsable de llevar a la Argentina a las International Junior Science Olympiads (IJSO) y fue elegida vicepresidenta para el Continente Americano del Comité Internacional de las IJSO (2001-2010).

Hernán Asorey se formó como físico experimental, desde la licenciatura hasta el doctorado, en el Instituto Balseiro (IB) de Bariloche. Posteriormente tuvo una estancia posdoctoral en la Universidad de Santander, en Colombia. Participó en el desarrollo de los sensores que integran el proyecto internacional Pierre Auger, el sistema de detección de rayos cósmicos más grande del mundo, instalado en la provincia de Mendoza, Argentina. Actualmente es jefe de Física Médica en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) Argentina. El doctor Asorey también es un apasionado por la enseñanza de la ciencia y mereció el reconocimiento como Mejor Profesor en varias ocasiones en el IB.

Por su parte, Arturo López Dávalos es profesor emérito, ex vicerrector de la UNRN y actualmente dirige el Laboratorio de Investigación en Formación de Formadores (LIFF). También fue director del IB, donde obtuvo su licenciatura y su doctorado como físico teórico, experto en magnetismo y superconductividad. Su formación científica posterior incluyó estancias en las prestigiosas universidades de Viena, Grenoble, Ginebra, California y Autónoma de Madrid. Su amplia obra, además de importantes y numerosas publicaciones científicas, incluye una interesante producción literaria, en la forma de cuentos, además de una biografía y una obra de teatro, cuya intención es la divulgación científica. Ha publicado con Damían Zannette el libro *Fundamentals of Electromagnetism, Vacuum Electrodynamics, Media and Relativity*, editado por Springer Verlag.

El presente libro está dirigido a futuros profesores de Física de nivel medio. Con un estilo original y una diagramación atractiva, los autores abordan cada tema a partir de una introducción histórica en la que se hace honor a alguno de los personajes principales. Los capítulos proponen al lector una serie de actividades para despertar la curiosidad, además de ejercicios conceptuales y numéricos y una bibliografía extensa. Luego de un primer capítulo introductorio y un segundo provisto de una amena revisión histórica, queda claro que uno va a aprender los elementos de la física moderna con un propósito específico: entender los avances de la astrofísica y de la cosmología. Así, en los siguientes dos capítulos se revisa la física clásica, la termodinámica, la estática, la dinámica y la relatividad, para terminar con la colisión de las partículas. Luego, el lector se entera sobre cómo hacen los astrónomos para cuantificar las distancias entre las estrellas así como su movimiento,

utilizando el efecto Doppler. Como en una novela de misterio, de pronto la temática cambia para entender aspectos de la estructura corpuscular por la vía del modelo estándar, empezando por los cuarks y las reglas básicas de la cromodinámica, hasta llegar al bosón de Higgs. El siguiente capítulo se dedica al dominio de la química con su tabla periódica, para después ofrecer elementos de mecánica cuántica, al nivel de Bohr. Luego se aborda la astrofísica para aplicar lo aprendido y entender las bases de la física nuclear, la síntesis de los elementos al interior de las estrellas por medio de la fusión y cómo esto determina la vida de las estrellas desde que nacen hasta que mueren, llegando, incluso, algunas de ellas, a formar hoyos negros. El libro concluye integrando de manera grandiosa todo lo aprendido para explicar el origen explosivo del universo, el Big Bang.

En resumen, esta obra ha sido escrita por una pedagoga profesional de alto nivel, un astrofísico también apasionado por la docencia y la aplicación de la ciencia, y un muy distinguido investigador y profesor de proyección nacional e internacional, poseedor de una pluma privilegiada para la extensión de la ciencia.

El orden de los temas y el desarrollo de los respectivos capítulos están dictados por el objetivo final de entender la estructura de la materia y el origen del Universo.

Si bien el libro tiene un objetivo ambicioso, su diseño permite que sea utilizado por los docentes de nivel medio para enfrentar a los alumnos con los temas de los que se ocupa la física actual. Como dicen los autores:

Se busca transmitir a los actuales o futuros profesores la idea de que las clases, además de ser sólidas y rigurosas deben captar la atención de los alumnos, por lo cual y ante todo, deben ser interesantes para el profesor. Sólo así podrán ayudar a los alumnos a ver el mundo que los rodea de una forma distinta, entusiasmarlos para que aprecien la belleza del mundo físico y entiendan que la física está en todas partes.

Arturo Menchaca Rocha
Investigador Nacional Emérito
Instituto de Física, UNAM
Ciudad de México, abril 2018

PRESENTACIÓN

Este libro surgió de la experiencia de desarrollar, desde 2009, un curso anual de física con los alumnos del primer año de los profesorados en Física y en Química de la Universidad Nacional de Río Negro. Representa un intento por exponer aspectos de la disciplina que normalmente no se presentan en esta etapa, pero que decidimos incorporar para facilitar a los futuros docentes los conocimientos y las herramientas que les permitan abordar en la escuela media los temas de física moderna que forman parte del diseño curricular vigente.

El curso está dividido en dos partes, que se desarrollan durante el primer y segundo cuatrimestre, Física IA (Materia) y Física IB (Energía), respectivamente. La primera cubre temas relacionados con la estructura de la materia, incluyendo las partículas fundamentales y el origen del universo. La segunda, abarca temas básicos de energía, mostrando las propiedades de transformación de una forma de energía en otra y ampliando las leyes de conservación a todas las formas de energía (primer principio de la termodinámica). Se presentan aplicaciones a la vida cotidiana y se discuten las fuentes de energía convencionales y alternativas y temas vinculados al ahorro de energía.

Como fundamento del punto de vista adoptado tanto en el diseño curricular de Río Negro como en este curso, vale la pena citar una frase de Marco Antonio Moreira:

Estamos en pleno siglo XXI, pero la física que se enseña en la escuela es del siglo XIX. Un verdadero absurdo. Por más importante que sea la Mecánica Newtoniana dentro de la física, comenzar con ella la enseñanza de la física, y desde una perspectiva formulista, ha sido un gran fracaso. Solo no lo reconoce quien no quiere.

Para cubrir los temas mencionados debimos adoptar una manera no tradicional de presentar la física por lo que es necesario explicar aquí la organización de los contenidos del curso. El cambio se fundamenta en las nuevas propuestas de enseñanza de las ciencias, que toman en cuenta los requerimientos sociales de la juventud y la necesidad de alfabetización en ciencias del ciudadano común, (OREAL UNESCO, 2005) en vista del impacto que las aplicaciones de la ciencia tienen en todos los aspectos de nuestra vida cotidiana, como los teléfonos celulares, la televisión por aire o por cable y otros. A esto se une la necesidad de que el ciudadano común pueda comprender el alcance de los frecuentes anuncios en los medios de comunicación sobre los progresos de la ciencia y sus aplicaciones, que muchas veces resultan incomprensibles.

Durante las visitas a los museos interactivos de ciencias y en otros espacios de divulgación, se puede apreciar que la física entusiasma a grandes y chicos, pero es frecuente que su estudio produzca en los alumnos, en algunos casos, pánico y en otros, aburrimiento. El éxito de estos museos muestra un camino alternativo para la didáctica de la física.

Sin perder rigurosidad ni calidad, nos proponemos dar tratamiento a los temas de física que todo profesor debe conocer, pero cambiando el orden clásico y fundamentalmente el enfoque. Así es como tratamos de ir de lo general a lo particular, de lo conocido a lo desconocido, con el propósito de mostrar al futuro profesor algunas maneras diferentes de enseñar física.

Se busca que los futuros docentes comiencen su contacto con la física a través de aquellos temas que desde la Antigüedad fascinaron e interesaron a la humanidad como la astronomía y el origen del universo. También buscamos enfrentar a los estudiantes con temas relacionados con la vida diaria.

La propuesta de abordaje que mencionamos es un desafío tanto para el que enseña como para los alumnos, pues se enfrentarán a situaciones en que aparecen conceptos desconocidos que deberán asimilar y comprender hasta familiarizarse con ellos, tarea que también les cabe si se adopta el enfoque tradicional.

Los fenómenos naturales se nos presentan sin explicarnos a qué capítulo de la física pertenecen y somos nosotros los que debemos observarlos para comprenderlos; así es como los investigadores debieron recorrer el camino para conocerlos. Por ello tratamos de plantear los temas a partir de conceptos abarcadores y de fenómenos y/o aparatos de la vida diaria con el propósito de intentar que la física deje de ser el terror del aula.

Con la idea de presentar los temas desde ese enfoque y preocupados por la ausencia de libros que sigan el orden aquí propuesto, hemos encarado la redacción de este texto. Por otra parte, creemos que se debe incentivar a los estudiantes a aprovechar la bibliografía hoy disponible en Internet para estudiar en su carrera y para que se entrenen en el diseño de materiales, cuadernillos, experimentos, guías, videos y todo otro material didáctico para sus clases, desterrando el uso de fotocopias; además, insistimos en el desarrollo de clases experimentales, que realmente hacen falta en muchas escuelas.

Las cifras alarmantes del fracaso escolar evidencian la necesidad de focalizar la enseñanza en la franja poblacional que accede en la actualidad al nivel medio, muy diferente a la que accedía en los tiempos en que se creó la escuela secundaria, orientada originariamente a la formación de los jóvenes para continuar estudios terciarios y/o universitarios.

Por ello el futuro profesor debe recibir una preparación que lo capacite para dar respuesta a las expectativas de los jóvenes en la sociedad moderna y, a la vez, que pueda darles las herramientas para desenvolverse en esa sociedad, ya sea para aquellos que buscan una salida laboral luego de finalizada la escuela secundaria o para los que continúen estudios superiores, o simplemente para que conozcan los alcances, las limitaciones y los riesgos de las aplicaciones de la ciencia.

La comprensión de la física, como la de otras ramas de la ciencia, posibilita el desarrollo creativo de la imaginación, ejercita la lógica del pensamiento y enfrenta a situaciones de decisión en las que se involucra la ética. Estos son aspectos que todo profesor debe saber transmitir a sus alumnos para que no solo les sirva de herramienta para aprender sino también para incorporar en la formación integral del futuro ciudadano; por ello estos aspectos deben ser parte de la formación del futuro profesor.

Pretendemos que el egresado del profesorado cuente con una sólida formación disciplinar, complementada por los conocimientos y habilidades requeridos para desempeñarse de manera competente en el ámbito de la docencia. La formación propende a un docente que sea capaz de:

- Ser un facilitador de los aprendizajes de sus alumnos, para que la física les dé herramientas para desempeñarse con éxito en los estudios y tener mayores posibilidades de lograr una mejor calidad de vida.
- Generar el hábito de la reflexión de su propia práctica como objeto de investigación, para su actualización continua en contenidos temáticos, metodologías, bibliografía y recursos didácticos innovadores.
- Lograr que la formación recibida en física sea un medio para educar a los jóvenes estimulando el desarrollo de habilidades que son propias del procedimiento de la física estimulando la imaginación, desarrollando la creatividad y ejercitando el razonamiento lógico.

- Estimular en los alumnos el interés por comprender los fenómenos naturales y el interés por estudiar física con el fin de participar en los avances de la ciencia por un mundo mejor para todos.

Hemos seleccionado el contenido y el orden de los temas que se tratan en el libro con la idea de dotar al futuro docente de las herramientas necesarias para responder a las inquietudes de los alumnos, que reciben una gran cantidad de información a través de los medios de comunicación y de Internet. La visión tradicional de la enseñanza de la física es la de encarar, primero, el estudio de la física del siglo XIX. Ese enfoque, si bien puede ser útil para aquellos que esperan seguir una carrera científica, significa un camino demasiado largo para el ciudadano común, destino al que convergerá la mayoría de los estudiantes que, en un dado momento, ocupan un aula de la escuela media. Allí estarán tanto los futuros médicos, quienes deberán usar tecnologías de última generación, como potenciales políticos, quienes deberán tomar decisiones sobre la política científica y sobre las aplicaciones de la ciencia y también los ciudadanos que decidirán con su voto sobre el destino de la ciencia y la tecnología del país.

Somos conscientes de que aún si se tratara de enseñar la física del siglo XIX, es importante despertar en los alumnos el interés por la observación del mundo que nos rodea, que normalmente miramos sin comprender.

Simplemente si miramos al cielo durante el día con ojos inquisitivos, nos surgen multitud de preguntas. Quizás la primera sea ¿por qué el cielo es azul, los atardeceres rojos y las nubes blancas?

También si miramos al cielo durante la noche nos encontramos con otro espectáculo maravilloso. La astronomía es física, escrita a gran escala sobre el cielo nocturno: eclipses, cometas, estrellas fugaces, cúmulos globulares, estrellas de neutrones, erupciones de rayos gamma, chorros, nebulosas planetarias, supernovas, cúmulos de galaxias, agujeros negros y también el brillo de satélites artificiales iluminados por la luz solar.

Pensamos que un punto importante en la formación de los futuros profesores es transmitirles la idea de que las clases, además de ser sólidas y rigurosas, deben captar la atención de los alumnos, por lo cual y ante todo, deben ser interesantes para el profesor. Solo así podrán ayudar a los alumnos a ver el mundo que los rodea de una forma distinta, entusiasmarlos para que aprecien la belleza del mundo físico y entiendan que *la física está en todas partes*.

El orden de los temas y el desarrollo de los respectivos capítulos están dictados por el objetivo final de entender la estructura de la materia y el origen del universo.

Capítulo 1. Introducción

Es una presentación general de la física como ciencia natural, el método de trabajo, sus alcances y sus limitaciones.

Capítulo 2. Historia de las ideas en la física.

En cada uno de los temas tratados en el curso se exponen los aspectos históricos relevantes, con la intención de mostrar cómo fueron evolucionando las ideas y cuál fue el contexto histórico en que se dieron. Se hace un repaso general de la evolución de las principales ideas, como la teoría atómica, la naturaleza de la luz y del calor, la estructura del universo, los principios de conservación, y otros.

Capítulo 3. El tamaño de las cosas (El señor Tales)

En este capítulo se presentan los conceptos de *magnitud* y de *unidad de medida* y algunos métodos de medición indirecta de distancias como introducción a las mediciones astronómicas. A partir de las semejanzas entre un microscopio óptico y

un microscopio electrónico, se muestra cómo se pueden observar imágenes del orden de los micrómetros, como el ala de una abeja. La introducción de la hipótesis de de Broglie para este caso nos permite avanzar en la descripción del estudio de las partículas elementales usando los aceleradores de partículas como gigantes microscopios para «ver» el interior de otras partículas.

Capítulo 4: Astronomía (El señor Galileo)

La presencia de este capítulo en este lugar del libro cumple un doble propósito. Por una parte está aquí porque como dice Walter Lewin (2012),

La astronomía es física, escrita a gran escala sobre el cielo nocturno: eclipses, cometas, estrellas fugaces, cúmulos globulares, estrellas de neutrones, erupciones de rayos gamma, chorros, nebulosas planetarias, supernovas, cúmulos de galaxias, agujeros negros. Basta con que mires al cielo y te hagas unas preguntas obvias: ¿Por qué los colores del cielo? ¿La física tiene las respuestas!

También sirve de base para la discusión sobre el origen del universo que presentamos en los próximos capítulos.

Este capítulo se completa con una introducción al conocimiento de nuestro universo próximo, el Sistema Solar, constituido por el Sol y ocho planetas, sus lunas y otros objetos no estelares. Las primeras teorías sobre el origen del Sol y los planetas se remontan al siglo XVIII. Los viajes espaciales y las sondas que exploran el sistema solar permitieron completar nuestro conocimiento sobre el mismo a la vez que los avances en la física nuclear nos permiten entender las bases de los procesos que se desarrollan en las estrellas, lo que facilita la comprensión de los detalles de la formación y evolución estelar en general y del sistema solar en particular.

Capítulo 5. Energía (El señor Joule)

Es sabido que en la enseñanza de la física, el desarrollo de la dinámica generalmente choca con los preconceptos de los estudiantes debido a la concepción aristotélica de la física que todos naturalmente tenemos. En ese caso la mayor dificultad radica en la comprensión de que la fuerza actúa sobre la aceleración y solo indirectamente sobre la velocidad. Nuestra experiencia con alumnos del primer año del profesorado y ciertamente con alumnos de la escuela media es que, en el caso de la energía, los preconceptos no son un obstáculo para desarrollar el tema, si se van clarificando las ideas sobre las distintas clases de energía a medida que se avanza.

Por otra parte, la energía es un concepto unificador en la física. La validez de los principios de la energía se extiende desde la física clásica a la física moderna. Incluso aquellos procesos que son demasiado complejos o están muy lejos de la física newtoniana pueden describirse de manera precisa en términos de energía. Por lo tanto, podemos decir que la energía es un principio central útil en la enseñanza de la física. Todo proceso físico es una transformación de energía de una forma en otra. Al respecto, nuestra experiencia coincide con la de algunos grupos interesados en la didáctica de la física en el sentido de que resulta relativamente más fácil introducir el concepto de energía que el de fuerza.

Capítulo 6: Las fuerzas y el movimiento (El señor Newton)

En este capítulo se presentan las leyes de Newton, se retoman los conceptos básicos de energía cinética y potencial introducidos en el capítulo anterior y se relacionan con el trabajo de una fuerza. La experiencia nos indica que los alumnos pueden manejar estos conceptos, así como las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento, sin haber profundizado demasiado las definiciones de la cinemática. En este punto compartimos las ideas de Paul Hewitt en su libro *Física conceptual* (2010):

La cinemática carece de leyes, solo tiene definiciones, principalmente para rapidez, velocidad y aceleración, que son quizás los conceptos menos excitantes que ofrecerá este curso. Con frecuencia, la cinemática se convierte en el «agujero negro» de la enseñanza, pues se le dedica mucho tiempo y a cambio ofrece poca física.

Daremos una breve visión de la dinámica, es decir aquella parte de la física que estudia el movimiento de los cuerpos y su relación con las fuerzas que lo producen.

Interludio 6I Newton explica a Kepler

Se muestra cómo las leyes de Newton y la ley de gravitación universal pueden explicar las tres leyes de Kepler.

Capítulo 7. Estructura de la materia (El señor Gell-Mann)

Como dice Marco Antonio Moreira:

El tema de la física de partículas es posiblemente el mejor ejemplo de la física que sucede en la actualidad. En este tema se muestra con claridad el proceso de construcción del conocimiento en física y el carácter provisorio de las teorías. El modelo estándar es una excelente teoría, la más completa jamás producida por el hombre sobre la estructura del universo, pero es provisorio. Seguramente habrá otra, también no definitiva, que tampoco será la última. Por otra parte, en esta área se pone en evidencia el proceso de construcción del conocimiento en física y el carácter provisorio de las teorías. En la física de partículas resulta explícita la interdependencia entre teoría y experimentación. Una orienta a la otra, a veces una precede a la otra, a veces esa misma sigue a la otra.

En este capítulo se presenta un resumen histórico de las hipótesis sobre la estructura de la materia, comenzando por las ideas de los griegos y pasando por las teorías de los químicos hasta llegar a la moderna teoría atómica. En el intento de avanzar siempre hacia lo más pequeño, se retoma la idea de la microscopía electrónica para describir los aceleradores que permitieron explorar el interior del protón y del neutrón, detectando los componentes fundamentales de esas partículas. Tomando como modelo el trabajo sistemático de Mendeleiev para ordenar los elementos químicos, se da una idea de cómo los físicos consiguieron, en la década de 1960, ordenar un verdadero zoológico de partículas que se creían elementales, hasta llegar a las quince que hoy son aceptadas como las verdaderas *partículas fundamentales*, de lo que está hecho todo lo demás. Este capítulo remata presentando una somera idea sobre el *bosón de Higgs*.

Capítulo 8. Los elementos químicos (El señor Mendeleiev)

La tabla periódica es un ordenamiento de los elementos químicos, organizado sobre la base de los números atómicos, configuraciones electrónicas y propiedades químicas periódicas. La forma estándar de la tabla consiste en una cuadrícula de elementos, con filas denominadas *períodos* y columnas llamadas *grupos*.

Representa más de un siglo de avances en la comprensión de las propiedades químicas. Un acontecimiento muy importante se produjo en 1869, cuando Dimitri Mendeleiev publicó una versión de la tabla, sobre la base de descubrimientos propios y anteriores de Antoine-Laurent de Lavoisier y John Newlands, donde los elementos se organizaban por peso atómico.

Es un gigantesco triunfo de la teoría atómica que la mecánica cuántica pudiera explicar, alrededor de 1925, las razones físicas subyacentes en el ordenamiento de los elementos químicos, descubierto empíricamente a lo largo de tantos años.

Capítulo 9. Evolución estelar (El señor Houtermans)

La formación y el desarrollo de las estrellas ha sido objeto de muchas hipótesis y conjeturas por parte de los científicos. Sobre la base del conocimiento acumulado hasta hoy podemos decir que una estrella es *una esfera luminosa de gas ionizado que se mantiene unida por su propia gravedad y que produce energía mediante procesos de fusión nuclear*.

Las teorías de la evolución estelar se basan principalmente en las pistas obtenidas a partir de estudios relacionados con la masa, la luminosidad, el brillo y el espectro de la radiación que emiten. La observación ha demostrado que las estrellas conocidas pueden ser sistematizadas en una serie regular, en que las estrellas más brillantes son las más calientes y las más débiles, las más frías.

Un gran avance para entender el desarrollo de las estrellas se produjo a partir de la introducción de un diagrama de temperatura-luminosidad desarrollado independientemente por Ejnar Hertzsprung y Henry Russell, conocido como el *diagrama de Hertzsprung-Russell* (HR). Como ocurrió en su momento con el caso de los elementos químicos, para los cuales un sistema de clasificación encarado por Mendeleiev y otros, resultó fundamental para entender su sistemática, el diagrama HR permitió avanzar en la comprensión de la evolución estelar.

Capítulo 10. Origen del universo (El señor Gamow)

La cosmología moderna, que ha pasado a ser parte de la física, logró desentrañar –en parte– el misterio del origen del universo, algo que ha preocupado a la humanidad desde siempre. Los descubrimientos científicos vinculados con la teoría del Big Bang son mencionados frecuentemente por los medios de comunicación. Por eso parece natural que el tema se haya incluido en la currícula de la escuela media en algunas provincias, razón por la que forma parte de este libro, como una modesta ayuda para facilitar la comprensión de un tema tan interesante.

Los importantes logros científicos en esta área deben ser tomados como un triunfo notable de la ciencia –que no es otra cosa que un triunfo de la humanidad– que nos acercan al conocimiento de nuestro propio origen. Algunas ideas fundamentales de la teoría del Big Bang están al alcance de los estudiantes de la escuela secundaria ya que pueden ser entendidas en ese nivel sin perder rigor, como por ejemplo:

- Que el fenómeno de *corrimiento al rojo* de la luz emitida permite medir la velocidad de una galaxia que se aleja; esto se convierte en *corrimiento al azul* en caso de que la galaxia se acerca a nosotros.
- Que las galaxias parecen alejarse cada vez más y están cada vez más separadas entre sí, sugiriendo que hace millones de años estaban todas juntas en un mismo lugar.
- Que las galaxias más distantes se están alejando a una velocidad mayor.
- Que el espacio, el tiempo, la energía y la materia fueron creados en el evento inicial, ahora conocido como el *Big Bang* (Keeley y Sneider, 2012).

En cada capítulo hemos insertado un cierto número de ejercicios y problemas; creemos que en la discusión de esos ejercicios –o de otros que el docente quiera plantear– hay un amplio campo para que los estudiantes se demuestren a sí mismos cuál es el grado de comprensión de los temas tratados. Al guiar a los alumnos en la solución de problemas, podemos recordar una frase de Albert Einstein:

Ningún científico piensa con fórmulas. Antes de que el físico comience a calcular ha de tener en su mente el curso de los razonamientos. Estos últimos, en la mayoría de los casos, pueden expresarse con palabras sencillas. Los cálculos y las fórmulas constituyen el paso siguiente.

Una vez resuelto un problema podemos meditar sobre esta frase de Richard Feynman: «Cuando estés resolviendo un problema, no te preocupes; el momento de preocuparse llega después de que hayas resuelto el problema».

Agradecimientos

Hemos recibido sugerencias y generosos aportes de Diego Mazzitelli (CAB-CONICET) y Santiago Ibáñez (UNRN-CONICET) que nos han sido de mucha ayuda, como así también los comentarios de Marcelo Álvarez y Gabriela Lerzo, ambos de la UNRN. Agradecemos, además, los aportes de José I. Castro (Universidad Nacional de San Juan) y Carlos Wörner Olavarría (Universidad Católica de Valparaíso) y los comentarios de Marco Antonio Moreira (Universidad Federal Río Grande del Sur). Y muy especialmente al profesor Arturo Menchaca Rocha por el prólogo que acompaña esta edición.

Los autores agradecen el trabajo de la Editorial de la UNRN por su paciencia y profesionalidad.

En todo caso, la responsabilidad por los errores es solo de los autores.

Lista de referencias bibliográficas

Hewitt, P.: *Física conceptual*, Décima edición, Addison Wesley, México 2010.

Keeley, P. y Sneider, C. I. (2012). *Uncovering Student Ideas in Astronomy: 45 NEW Formative Assessment Probes*.
Arlington: National Science Teachers Association Press.

Lewin, W. (2012). *Por amor a la física*. Madrid, España: Penguin Random House.

OREAL UNESCO (2005). ¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000139003>

INTRODUCCIÓN

La enseñanza solo se produce cuando ocurre el aprendizaje
Kenneth Bain

1.1. La física

La palabra *física* deriva del griego *physis* (φύσις) que significa ‘naturaleza’. Es la ciencia que –en un sentido amplio– estudia la naturaleza con el objeto de comprender el comportamiento del mundo a nuestro alrededor y del universo en general. Antiguamente, la astronomía y la física eran parte de la misma ciencia y por eso puede considerarse a la física como una de las disciplinas académicas más antiguas. En tiempos remotos era sinónimo de filosofía e incluía la química y ciertas ramas de la matemática y de la biología. A partir de la revolución científica del siglo XVI, se convirtió en una ciencia moderna y única, pero cuyas fronteras no están bien definidas pues comparte espacios con la química, la física matemática y la biología molecular, entre otras.

La inquietud por entender el mundo que nos rodea aqueja a la humanidad desde hace mucho tiempo, no solo por la utilidad que ese conocimiento puede representar, sino porque no queremos pasar ciegamente por el mundo. Necesitamos una perspectiva cósmica para entender cuál es nuestro lugar en él. Las preguntas fundamentales al respecto involucran cuestiones astronómicas, que aparecen cuando nos maravillamos ante la vista del cielo estrellado, sensación que crece en proporción a nuestra comprensión de las inmensas distancias del espacio y la naturaleza interna de las estrellas.

En muchos sentidos, la física deriva de la filosofía griega antigua. Desde el primer intento de Tales por caracterizar la materia, a la deducción de Demócrito de que la materia debía reducirse a un estado invariable, pasando por la astronomía de Aristarco y de Tolomeo con un firmamento cristalino, hasta el libro de Aristóteles, que trató de analizar y definir el movimiento desde un punto de vista filosófico, varios filósofos griegos avanzaron en sus propias teorías de la naturaleza. La física era conocida como *filosofía natural* hasta el siglo XVIII. En el siglo XIX surge como una disciplina diferente de la filosofía y de otras ciencias.

La ciencia, en su intento por explicar el mundo, respondió a muchas preguntas de los primeros filósofos, pero también planteó nuevos interrogantes. El estudio de los problemas filosóficos que rodean la física, la *filosofía de la física*, implica cuestiones tales como la naturaleza del espacio y del tiempo, el determinismo y las perspectivas epistemológicas y ontológicas como el empirismo, el naturalismo, el racionalismo y el realismo.

Descubrimientos y avances de la física se han convertido muchas veces en aplicaciones prácticas que luego influyen en nuestra vida diaria. También las necesidades tecnológicas de una época determinada han dado impulso frecuentemente al desarrollo de conocimientos básicos en la física.

Así, por ejemplo, el progreso en la comprensión de los fenómenos asociados a las máquinas térmicas, vinculadas a las necesidades de la Revolución Industrial, impulsó avances en la termodinámica a la vez que condujo al desarrollo de los motores y del transporte automotor. La necesidad de avanzar en el conocimiento de las

propiedades de los cuerpos incandescentes, requerida para aumentar la eficiencia de las lámparas eléctricas, impulsó los estudios de las propiedades del *cuerpo negro* que luego fueron la base de la mecánica cuántica que revolucionaría toda la física.

La comprensión de los fenómenos electromagnéticos condujo al desarrollo de nuevos productos que cambiaron drásticamente la sociedad moderna a través del uso masivo de la electricidad en los hogares y en la industria. El avance en el conocimiento de los materiales y sus propiedades marcó el desarrollo del siglo xx. El descubrimiento del transistor en 1948 dio pie a los avances en electrónica, que en la actualidad domina nuestros medios de comunicación. El nuevo dispositivo permitió reducir dramáticamente el tamaño de los aparatos electrónicos y dio lugar a la creación de otros nuevos. Sin el transistor, los teléfonos celulares, los aparatos GPS y los viajes espaciales, por nombrar solo algunos, no hubieran sido posibles.

La física estudia un amplio rango de fenómenos, desde las más pequeñas partículas subatómicas hasta las galaxias más grandes. Esto incluye los objetos básicos a partir de los cuales están hechas todas las cosas; por eso es llamada a veces *la ciencia fundamental*.

Algunas ideas novedosas del campo de la física han impactado en la matemática y en la filosofía. La teoría de la relatividad, la mecánica cuántica y la teoría del caos han permeado a otras ciencias, aunque a veces los conceptos físicos son adaptados demasiado libremente en otros campos.

La física trata de explicar los diversos hechos que ocurren en la naturaleza en términos de fenómenos más simples y, por lo tanto, busca conectar las cosas que vemos a nuestro alrededor con causas fundamentales y luego conectar estas causas entre sí en un intento por encontrar la razón última por la cual la naturaleza se nos presenta de la manera en que la conocemos.

Así por ejemplo, los antiguos chinos encontraron que ciertas rocas eran atraídas entre sí por fuerzas invisibles. Los griegos realizaron estudios del mismo fenómeno y llamaron *magnetismo* a este efecto. Esta palabra deriva de Magnesia (en griego *Μαγνησία*, *Magnisia*), un lugar en Grecia donde abundan rocas magnéticas, constituidas por óxido de hierro.¹

En otro orden de cosas, los griegos ya sabían, un poco antes que los chinos, que algunos objetos como el ámbar –una resina natural fosilizada– se atraían entre sí cuando eran frotados con un trozo de piel. Esto fue estudiado sistemáticamente en el siglo xvii y se hizo conocido como electricidad, nombre que deriva de la palabra griega electrón (*ἤλεκτρον*, ámbar: resina fosilizada). En el siglo xix pudo demostrarse que ambas fuerzas eran expresiones diferentes de un mismo fenómeno, el *electromagnetismo*. Veremos más adelante que estos procesos de unificación continúan en la actualidad en otros campos de la física.

1.2. El método de trabajo

La forma en que los físicos deciden entre la validez de una teoría o la explicación de un determinado fenómeno tiene relación con el acuerdo o desacuerdo de esa teoría con las evidencias que surgen de los experimentos o de las observaciones. Se trata de la utilización de un punto de vista sistemático para comparar las implicancias de una teoría, con las conclusiones que se deducen de los experimentos, o de las observaciones. A su vez para que sean aceptados estos experimentos y observaciones deben ser reproducibles, es decir que otra persona en otro laboratorio, trabajando en las mismas condiciones, debe ser capaz de obtener los mismos resultados.

¹ La magnesia es una forma natural del óxido de magnesio (MgO). Estas piedras de la región de Magnesia, en Tesalia, contenían tanto óxido de magnesio como carbonato de magnesio hidratado, así como óxido de hierro (magnetita).

Las predicciones hechas por una teoría deben coincidir con esas determinaciones experimentales que, de ese modo, ayudan a determinar los límites de su validez. Aquellas teorías que están bien apoyadas por datos experimentales y que nunca han fallado en sus predicciones empíricas son llamadas a veces *leyes físicas*, o *leyes naturales*. En el caso de que se encuentren desacuerdos amplios o sistemáticos entre la teoría y el experimento, algunas teorías pueden eventualmente ser reemplazadas por otras afirmaciones más generales y más precisas. En general, las nuevas leyes contienen a las anteriores como caso límite. Siempre debemos recordar que la física es una *ciencia natural* y no una ciencia exacta, como a veces erróneamente se la califica y por tanto está en una constante interrogación de la naturaleza.

El desarrollo de la física reconoce muchos aportes individuales, pero los avances requieren del intercambio entre quienes trabajan en temas afines. El industrial belga Ernest Solvay financió, a partir de 1911, los Institutos Internacionales Solvay de Física y Química (Conseils Solvay), con sede en Bruselas. Hendrik A. Lorentz presidió la primera de estas conferencias, celebrada en Bruselas en el otoño de 1911. El tema era la *radiología* y los *cuantos*. En la conferencia se analizaron los problemas que surgían de la existencia de dos enfoques, la física clásica, por un lado, y la teoría cuántica que recién nacía, por otro.

Albert Einstein era uno de los físicos más jóvenes allí presentes. Otros miembros del Congreso incluían a Marie Sklodowska-Curie y Henri Poincaré. Esa histórica reunión admitía participantes solo por invitación y fue considerada un punto de inflexión en el mundo de la física. Tras ese éxito inicial, estas conferencias se han dedicado a los problemas abiertos pendientes, tanto en física como en química. La tradición de las reuniones temáticas se ha mantenido hasta el presente en otros formatos.

Figura 1.1. Participantes de la primera Conferencia Solvay en Bruselas, en 1911



Nota: Sentados (de izq. a der.): Walther Nernst, Marcel Brillouin, Ernest Solvay, Hendrik Lorentz, Emil Warburg, Jean Baptiste Perrin, Wilhelm Wien, Marie Curie y Henri Poincaré.

De pie: (I-D): Robert Goldschmidt, Max Planck, Heinrich Rubens, Arnold Sommerfeld, Frederick Lindemann, Maurice de Broglie, Martin Knudsen, Friedrich Hasenöhr, Georges Hostelet, Edouard Herzen, James Hopwood Jeans, Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein y Paul Langevin.

Fuente: Benjamin Couprie, 1911.

Los poetas miran el mundo que nos rodea: Doña Elvira

Yo os quiero confesar, Don Juan, primero
que aquel blanco y color de Doña Elvira
no tiene de ella más, si bien se mira,
que el haberle costado su dinero.

Pero tras eso, confesaros quiero
que es tanta la beldad de su mentira,
que en vano a competir con ella aspira
belleza igual de rostro verdadero.

Mas, ¿qué mucho que yo perdido ande
por un engaño tal, pues que sabemos
que nos engaña así Naturaleza?

Porque ese cielo azul que todos vemos
ni es cielo ni es azul. ¡Lástima grande
que no sea verdad tanta belleza!

Bartolomé Leonardo de Argensola
(1561-1631)

El secreto de cómo este poeta español del 1500 sabía que «ese cielo azul que todos vemos, ni es cielo ni es azul» es que este hombre vivió un tiempo en Italia, donde conoció a Galileo. Al final de este capítulo veremos qué tienen que decir los físicos acerca de este asunto.

Actividad 1.1.

Para comenzar a familiarizarse con los científicos mencionados en el capítulo, ubíquelos en un cuadro por orden creciente de fechas de sus descubrimientos y en otra columna describa el campo de la ciencia en el cual se destacaron; puede agregar, en una tercera columna, observaciones personales sobre aspectos que le hayan llamado la atención.

1.3. Los colores del cielo

Todos podemos observar los fenómenos físicos a nuestro alrededor y diferentes personas podrán ver distintas cosas en un mismo fenómeno, pero está en la naturaleza humana maravillarnos por esos fenómenos. Un amanecer o una puesta de sol, un arcoíris después de la lluvia, o el estruendo de una tormenta eléctrica llaman la atención en mayor o menor medida a todos los seres humanos. Las características del cielo, de día o de noche, dieron lugar a las primeras observaciones realizadas sobre la naturaleza. El azul del cielo y los colores rojos del amanecer o del atardecer son fenómenos que hoy, como antes todos los hombres de todos los tiempos podemos disfrutar a diario. El brillo del Sol y de las estrellas está ahí para sorprendernos y atraparnos con su belleza. Los físicos se maravillan con esos colores al igual que el resto de los mortales, pero a su vez tratan de explicar su origen y muchas veces pueden pasar muchos años, incluso siglos, desde que se observa un fenómeno de la naturaleza hasta que recibe una explicación satisfactoria.

En el cuadro hemos incluido un soneto de un poeta que se ha maravillado con los colores del cielo y nos transmite sus impresiones.

A veces, las teorías que se desarrollan sobre algunos fenómenos son aceptadas de inmediato, mientras que la aceptación de otras requiere de un largo tiempo. El físico vienés Fritz Houtermans tenía solo veintiséis años cuando tuvo una idea extraordinaria sobre el origen de la luz que emiten las estrellas y el Sol. Una noche, mientras paseaba con su novia ella comentó: «Mira cuán hermosas brillan las estrellas», y él respondió: «Desde hoy solo yo sé por qué aún no se apagaron». Por aquellos años la física nuclear no se había desarrollado aún por lo que las ideas de Houtermans resultaban prematuras y cayeron en el olvido.² Su teoría sobre el origen de la energía de las estrellas fue reformulada varios años después por otros y esa teoría es la que se acepta en la actualidad.

² Ver *The Eventful Life of Fritz Houtermans* (Khriplovich, 1992).

1.4. La ley de gravedad y el comportamiento de los líquidos

Como veremos más adelante, en las teorías sobre el origen del universo la fuerza de la gravedad juega un papel fundamental. Desde Newton sabemos que la Luna se mantiene en su órbita alrededor de la Tierra –y la Tierra se mantiene en su órbita alrededor del Sol– a causa de la misma fuerza que hace caer una manzana y los demás cuerpos en la Tierra.

El poeta francés Frances Ponge escribió el poema en prosa sobre el agua que transcribimos parcialmente a continuación. Podemos reconocer cómo expresa de manera sutil la física presente en diversos fenómenos.

El agua (fragmento)

Es blanca y brillante, informe y fresca, pasiva y obstinada en su único vicio: la gravedad; disponiendo de medios excepcionales para satisfacer este vicio: rodeando, traspasando, erosionando, filtrando.

En el interior de ella misma este vicio también juega: se hunde sin cesar, renuncia a cada instante a toda forma, solo tiende a humillarse, se tiende sobre el suelo boca abajo, casi cadáver, como los monjes de ciertas órdenes (...)

Casi podría decirse que el agua está loca, a causa de esta histérica necesidad de no obedecer más que a su gravedad, que la posee como una idea fija. (...)

«Líquido» es, por definición, aquello que prefiere obedecer tan solo a su gravedad, más que mantener su forma, aquello que rechaza toda forma para obedecer a su gravedad. Y que pierde toda dignidad a causa de esta idea fija, de este escrúpulo enfermizo (...)

Inquietud del agua: sensible al mínimo cambio del declive. Saltando las escaleras con los dos pies a la vez. Juguetona, de obediencia pueril, volviendo enseguida cuando se la llama cambiando la pendiente desde este lado.

Este poema muestra la complementación entre el poeta y el físico en la visión de un mismo fenómeno. El hecho de que el científico comprenda el origen o la causa del fenómeno no le impide emocionarse con la descripción que hace el poeta. En la poesía de Ponge se ve cómo el artista encuentra palabras armoniosas para describir un fenómeno físico, sin apartarse de la necesaria precisión.

En este libro los invitamos a admirar cómo la humanidad ha avanzado en el conocimiento del universo y de su estructura, construyendo como dice C. P. Snow (2000):

Un edificio científico que es, por su profundidad, complejidad y articulación intelectual, la obra colectiva más bella y maravillosa de la mente humana. Sin embargo, la mayoría de los no científicos no tiene concepción alguna de este edificio... [pareciera] que en una inmensa gama de experiencias intelectuales todo un grupo [de la humanidad] careciera de oído... esta falta de oído no es un defecto natural sino obra de la formación, o más bien de la falta de ella.

Una de las misiones del profesor de enseñanza media es atender a la alfabetización científica de los futuros ciudadanos. Por eso a lo largo de este libro trataremos de responder a las inquietudes que se derivan de las observaciones cotidianas, preparándonos para dar respuesta a las preguntas de los jóvenes que pueden algún día interrogarnos sobre estas cosas o sobre otras, más o menos fascinantes.

Aquellos que estudian para ser profesores tienen la doble responsabilidad de *aprender para saber*, al mismo tiempo que *aprender para enseñar* y es bueno que tengan presente lo que dijo Douglas Osheroff, Premio Nobel de Física 1996: «Un niño siempre espera respuestas a sus preguntas; cuando no obtiene más respuestas, deja de preguntar».

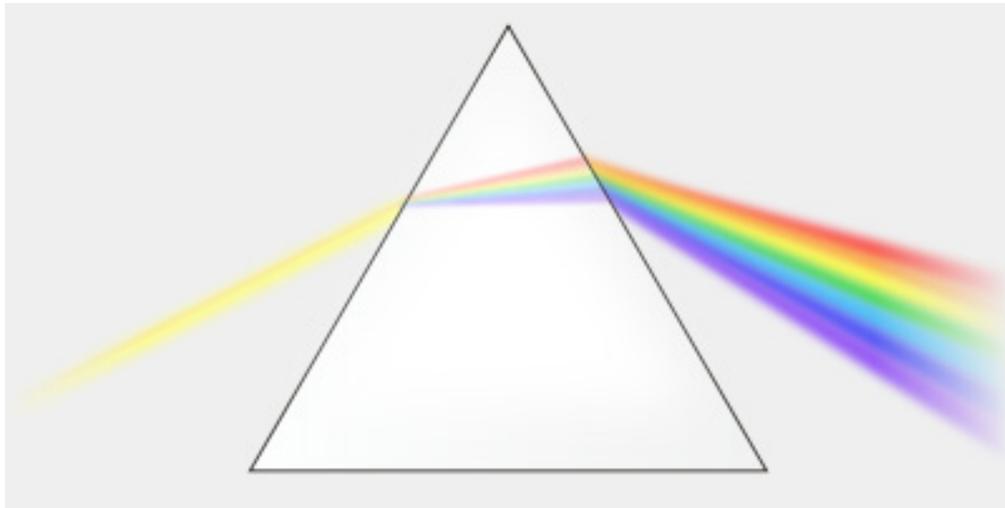
Por otra parte, también es importante tener presente la mala prensa que tiene la física en las escuelas y entre el público en general. En una pared de Buenos Aires

había hace tiempo un cartel que podría servirnos como un llamado de atención permanente a quienes enseñamos física. A fin de atraer el interés de sus potenciales alumnos, un profesor que daba clases particulares escribió: «El que dijo que la matemática es un plomo, no sabía nada de física»

1.5. La luz

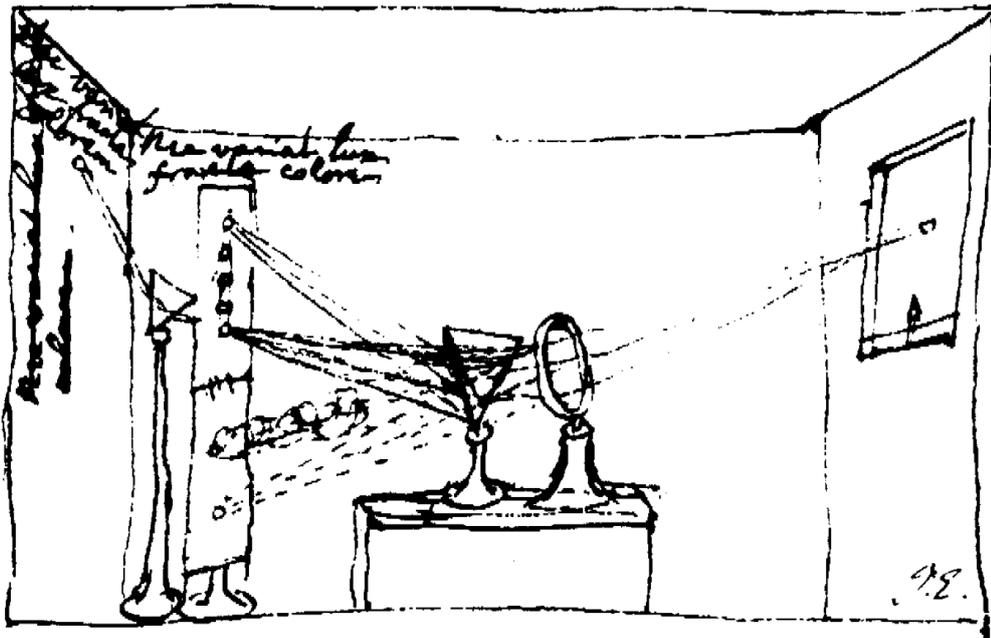
La luz que nos llega del Sol es blanca, color que resulta de la suma de todos los colores que vemos en el arcoíris. Newton demostró que la luz se descompone en esos colores cuando atraviesa un prisma.

Figura 1.2. Descomposición de la luz blanca por un prisma



Fuente: Suidroot, 2008.

Figura 1.3. Un dibujo de Newton sobre su experimento de descomposición de la luz



Hoy se sabe que la luz es un fenómeno ondulatorio y que cada color corresponde a determinada longitud de onda,³ que disminuye cuando vamos del rojo hacia el azul. En la figura 1.2 vemos cómo un haz de luz blanca se descompone en los colores primarios, es decir aquellos que no pueden obtenerse por la mezcla de otros. La figura 1.3 muestra un dibujo de Newton describiendo su experimento de descomposición de la luz blanca.

Actividad 1.2.

Para mostrar el fenómeno de la descomposición de la luz, construir un prisma con tres placas de vidrio y una tapa, pegada con un pegamento vinílico, y llenar con agua.

Cómo hacer un prisma de Newton

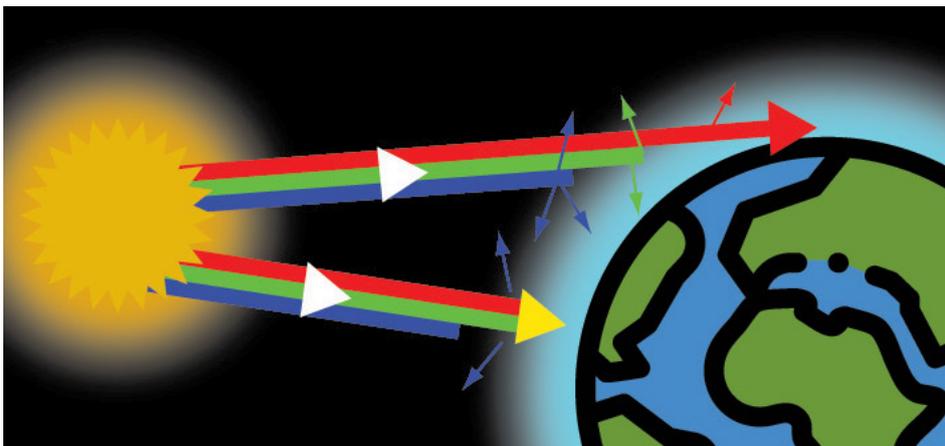
Ver <https://www.youtube.com/watch?v=LZ4E8MkCfk4>
Autor: Kouta Blacksmith



El azul del cielo es consecuencia de la *dispersión* de la luz solar por las moléculas de los gases de la atmósfera. Este fenómeno (dispersión de Rayleigh) es más eficaz a longitudes de onda cortas (el extremo azul del espectro visible), como la luz que atraviesa el prisma de la figura 1.2, donde vemos que el azul es más desviado que los demás colores. Esto implica que las ondas del azul interactúan con las moléculas, más fuertemente que los demás. Por eso, un haz de luz solar blanca se *empobrece* en azul cuando atraviesa la atmósfera y la luz azul dispersada ilumina todo el cielo. El haz que continúa viaje en forma directa, al perder el azul, se torna más rojo y tiñe con ese color las nubes, cuando las ilumina.

La figura 1.4 muestra porqué el efecto de enrojecer las nubes es más notable al amanecer o al atardecer que al mediodía: simplemente porque a esa hora la luz solar atraviesa un menor espesor de atmósfera, para llegar a nosotros, que al amanecer o al atardecer.

Figura 1.4. Al mediodía, la luz solar atraviesa un menor espesor de atmósfera, para llegar a nosotros, que al amanecer o al atardecer, como se ve en la figura. En el segundo caso, la luz que se propaga tiñe las nubes de rojo.

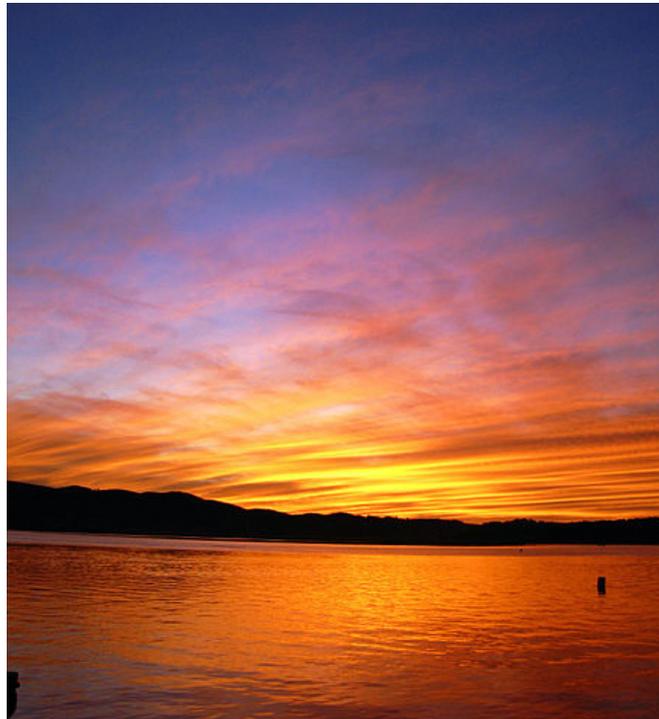


Fuente: Adaptado de Dave Ansell, 2010.

³ La luz consiste en *ondas electromagnéticas*, cuya longitud de onda es la distancia espacial entre dos máximos. A escala microscópica, por ejemplo cuando es emitida o absorbida, aparece constituida por partículas, fotones.

Las gotas de agua que forman las nubes son mucho más grandes que las moléculas del aire y la dispersión en ellas, en la zona del visible, es casi independiente de la longitud de onda: por esta razón las nubes no se ven de color azul, sino blancas.⁴

Figura 1.5. Puesta de sol que muestra los colores naranja que mantienen su dirección recta desde el Sol, separados de las componentes azules, dispersadas en el cielo circundante



Fuente: Gerald Browne, 2007.

Actividad 1.3.

La siguiente demostración permite ver los efectos de la dispersión de Rayleigh por pequeñas partículas que flotan en un líquido. Para ello, a partir de un retroproyector común⁵ preparamos un *retroproyector de haz colimado*, cubriendo el plano de proyección (lente de Fresnel) con un trozo de cartón negro que oculte toda la luz emitida, salvo un orificio de 1,5 cm de diámetro en el centro. Llenamos con agua pura y limpia un vaso alto de vidrio liso—con fondo liso—y lo colocamos sobre el agujero.

Veremos que la luz que pasa directamente a través del agua y se proyecta en la pantalla, forma una imagen brillante del haz de luz porque el agua pura es transparente e incolora. Si ahora agregamos una pequeña cantidad de leche al agua (aproximadamente 1/8 de cucharadita o menos, por litro de agua), las pequeñas partículas de grasa y proteína que contiene la leche homogeneizada se dispersan en el agua y forman una *suspensión coloidal*, es decir, flotan en el agua del mismo modo que los gases de la atmósfera flotan en el aire.

4 Una onda sonora de una frecuencia determinada produce un sonido puro (ejemplo, las notas musicales). La superposición armónica de ondas sonoras de distintas frecuencias produce *música*, mientras que la superposición de ondas sonoras sin un esquema ordenado produce *ruido*; cuando esa superposición contiene todas las frecuencias con similar amplitud el ruido producido se denomina *ruido blanco*, similar al sonido de una radio mal sintonizada.

5 Asegúrese de que la lámpara del proyector sea incandescente, las lámparas LED tienen un espectro diferente al de la luz solar.

Si ahora nos fijamos en la luz que atraviesa el agua y llega a la pantalla, veremos que la imagen tiene un color levemente rojizo, diferente al que tenía cuando la luz atravesaba el agua clara. Si prestamos atención al agua del vaso, veremos que esta aparece con un tinte azulado. La componente azul de la fuente de luz se dispersa más que la componente roja y por eso parte de la luz azul llega a las paredes del vaso, y a nuestros ojos, mientras el haz que continúa su trayectoria es más rojizo –perdió el azul. El experimento puede también hacerse con una linterna o lámpara muy intensa, aunque el tono rojizo del haz transmitido es más difícil de ver que el tono azulado de la solución líquida. Como alternativa, el haz de luz de un láser rojo nos permite ver que ese color es menos dispersado por el agua.

¿Por qué el cielo es azul?

Ver el video Efecto Tyndall 2: Atardecer químico
<https://www.youtube.com/watch?v=1KZnEcWRMV8>
Autor: Sergio Paredes



Actividad 1.4.

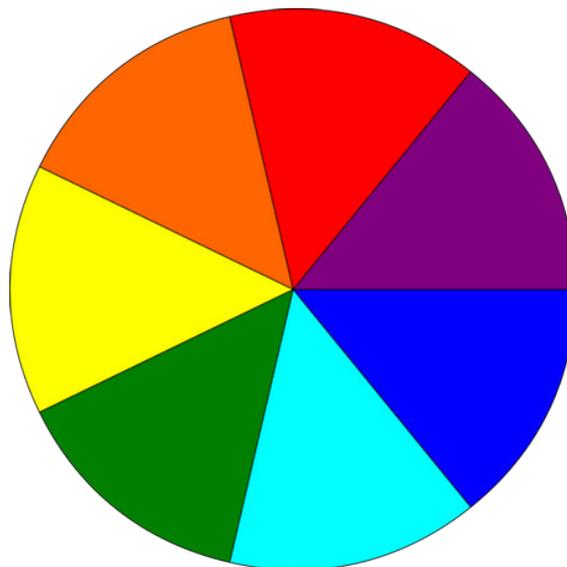
Descargue el archivo PDF que contiene la figura 1.6, imprímalo en color, adhiéralo a un CD en desuso o un cartón rígido. Vínculo bit.ly/disco-newton
Al hacerlo girar rápidamente, nuestro cerebro suma los colores que percibimos y, como resultado, vemos al disco blanco. El efecto se debe al tiempo que cada imagen queda grabada en la retina, lo que permite que nuestro cerebro sume los sucesivos colores, suma que el cerebro interpreta como color blanco.

Disco de Newton casero

Ver <https://www.youtube.com/watch?v=ePz6aNh0FQc>
Autor: Club Peques Lectores (Judith Franch)



Figura 1.6. Disco de Newton



Fuente: Cyrille Bernizet y Adam Rędzikowski, 2009.

Lista de referencias bibliográficas

- Alonso, M. y Finn, E. (2010). *Física Vol. I: Mecánica*. Pearson: Addison Wesley.
- Alonso, M. y Finn, E. (2010). *Física Vol. II: Campos y ondas*. Pearson: Addison Wesley.
- Young, H. y Freedman, R. (2003). *Física universitaria, vols. I y II*. New York: Addison Wesley.
- Ingar, U. y Kraushaar, W. (2004). *Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas*. Reverté: Madrid.
- Khriplovich, I. B. (1992). The Eventful Life of Fritz Houtermans. *Physics Today*, 45(7). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.881313>.
- Merleau-Ponty, M. (2009). *El Mundo de la percepción: siete conferencias*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. (2010). *Física I y Física II*. México: Grupo Editorial Patria.
- Roederer, J. G. (2008). *Mecánica elemental*, 2a ed. Buenos Aires: Eudeba.
- Sextl, R., Raab, I. y Streeruwitz, E. (1994). *Physik*. Viena: Carl Hanser Verlag.
- Snow, C. P. (2000). *Las dos culturas*. Buenos Aires: Ediciones Nueva Visión.
- Tipler, P. y Mosca, G. (2002). *Física para la ciencia y la tecnología, Vol. 1 y 2 (edición en 2 volúmenes) y Vol. 1A, 1B, 1C, 2A y 2B (edición en 6 volúmenes)*. Madrid: Reverté.

Recursos complementarios

- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>
- <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/>
- <http://experimentoscaseros.net/>

Lista de figuras

- Ansell, Dave. (2010). Blue sky sunset [Diagrama]. <https://www.sciansell.co.uk/>
- Bernizet, Cyrille y Rędzikowski, Adam. (2009). Disque Newton [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disque_newton.svg. CC BY-SA 3.0
- Coupric, Benjamin. (1911). Solvay conference [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1911_Solvay_conference.jpg. Dominio público.
- Usuario: Geraldbrowne. (2007). Colourful sunset [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Knysnasunset.jpg>. CC BY-SA 3.0
- Usuario: Suidroot. (2008). Descomposición de la luz blanca por un prisma [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prism-rainbow.svg>. CC BY-SA 4.0



NOTA

Como la publicación de un texto en Wikipedia está abierta a contribuciones voluntarias y carece de un editor responsable, sus contenidos no son siempre confiables. Los textos citados en la presente obra han sido revisados por los autores.

BREVE HISTORIA DE LAS IDEAS EN LA FÍSICA

Aprender del pasado para avanzar hacia el futuro
CICR (Comité Internacional de la Cruz Roja)

2.1. La antigüedad, los griegos y los árabes

Como decía el físico paquistaní Abdus Salam (1984): «Desde tiempos inmemoriales, el hombre ha querido comprender la complejidad de la naturaleza en términos del menor número posible de conceptos elementales».

En la Antigüedad las teorías físicas se presentaban muchas veces en términos filosóficos y no eran verificables por medios experimentales u observacionales, como se hace en la actualidad. A pesar de ello, el aporte de los filósofos griegos contribuyó de manera importante al desarrollo de la ciencia.

Aristóteles consideraba que cada cosa se mueve naturalmente hasta cierta posición preferida. Así, por ejemplo, una piedra cae porque es natural que la piedra esté sobre el suelo, pues ambos son de naturaleza semejante; el movimiento de las piedras tiende a llevarlas hacia el suelo. Sin embargo distinguía entre los *movimientos naturales*—el agua que baja por una ladera— y los *movimientos violentos*—el disparo de una flecha—. Pensaba que en este último tipo de movimiento, provocado por personas o por otro ser vivo, siempre debía actuar una fuerza. En el caso de la flecha, la fuerza inicial era provista por el arquero, pero Aristóteles creía que luego la flecha se mantenía en movimiento a causa de la fuerza del aire que la empujaba continuamente desde atrás. Es decir que su idea era que la existencia de un movimiento requiere de una fuerza. Las ideas físicas de Aristóteles fueron consideradas únicas durante muchos años a pesar de que no siempre se ajustaban a las observaciones. Por su parte Arquímedes, otro griego, dio descripciones correctas en mecánica e hidrostática.

También los filósofos y los astrónomos de Egipto, la India y Persia aportaron representaciones acertadas en astronomía y en teoría atómica, algunas de las cuales son poco conocidas en Occidente.

El comercio con los pueblos de Oriente llevó a los griegos hasta Persia, Babilonia y la India, contacto que luego se intensificó con las campañas militares de Alejandro Magno. Por ese motivo hubo intercambios filosóficos y científicos entre esos pueblos que perduraron en el tiempo, lo que hace difícil reconocer el origen de algunas ideas.

Los árabes tuvieron un gran desarrollo científico a partir del siglo IX, parcialmente basado en las obras de los griegos, que tradujeron y ampliaron con aportes propios. Preservaron los trabajos de Aristóteles y gran parte de la tradición científica griega, como también los trabajos de los indios y de los persas. Este conocimiento fue llevado a Europa en los siglos XII y XIII gracias a la influencia del califato

árabe de Córdoba, cuando gobernaba Alhakén II. A él se le atribuye haber creado una biblioteca que pudo haber alcanzado los 400.000 volúmenes y apoyado a los pensadores árabes de la época como Alfarganí y el judío Maimónides, quienes se destacaron en filosofía, astronomía y medicina, respectivamente.

En esa época, la Universidad de Córdoba en España era visitada por estudiantes de toda Europa (Hassan y Lai, 1984). Las traducciones al latín de los textos científicos se hacían en la Escuela de Traductores de Toledo, un centro de estudios que reunía a cristianos, árabes y judíos en un ambiente de recíproca tolerancia. Esas traducciones permitieron que muchos textos griegos reingresaran a Europa; de hecho, algunas cortes europeas enviaban a sus científicos a colaborar en estas traducciones para que regresaran a sus países con copias en latín de los escritos de Aristóteles y de su maestro Platón, este último discípulo de Sócrates.

Figura 2.1. Ibn al-Haytham



Fuente: Anónimo, Sopianwar, 2015.

Durante la Edad Media surgió un método de trabajo en física que ponía énfasis en el papel de la experimentación y de la matemática, gracias al aporte de Ibn al-Haytham (Alhazen) nacido en Basra, Iraq. Este avance transformó la física, que pasó de ser una actividad filosófica a convertirse en una ciencia experimental. En esa época se debatían ideas sobre la naturaleza de la luz y del fenómeno de la visión. Empédocles había postulado que la vista era una especie de tacto que tocaba los objetos con una mano muy larga. Creía que de los ojos salían emanaciones que hacían contacto con los objetos y recogían su forma. Esta teoría se llamaba *extramisión* y había sido apoyada por pensadores notables como Euclides y Tolomeo. Leucipo, en cambio, creía que los objetos emitían algo que contenía su forma y color, y que los ojos captaban; esta teoría se llamaba *intromisión*. En un libro de óptica editado en 1021, Alhazen desarrolló un primer intento de método científico con el objeto de probar la llamada *teoría de la intromisión* y refutar la *teoría de la extramisión*. Los

experimentos más famosos de Alhazen implicaban el desarrollo y la aplicación de la cámara oscura para probar hipótesis tales como la propagación rectilínea de la luz.

Unos doscientos años después, los fundamentos de la óptica fueron desarrollados en Europa con aportes de científicos de diversos países:

- Ingleses: Robert Grosseteste escribió un tratado sobre el arcoíris y Roger Bacon estudió las leyes de reflexión y los fenómenos de refracción, comprendió el funcionamiento de los espejos esféricos, ideó una teoría del arcoíris.
- Polacos: Erazmus Ciolek Witelo. Su obra *Perspectiva* (1270-1278) estaba influenciada por el trabajo de Alhazen y a su vez influenció a otros como Kepler y también a las teorías renacentistas de la perspectiva.
- Holandeses: Willebrord Snellius (Snell) encontró la ley de la refracción que lleva su nombre y Christiaan Huygens escribió el *Tratado de la luz* en el que usa el llamado principio de Huygens –cada punto luminoso de un frente de ondas actúa como nueva fuente de ondas– para explicar la reflexión y la refracción de la luz. Esta teoría quedó confirmada por los experimentos de Young, a principios del siglo XIX.
- Franceses: René Descartes trabajó en la formulación de la ley de la refracción.

2.2. La revolución científica

Normalmente se fija el año 1543 como el inicio de la revolución científica; esto se debe a que ese año llegó a manos de Copérnico, desde Nüremberg, la primera copia impresa de su libro, *De Revolutionibus Orbium Celestium* (*Sobre el movimiento de las esferas celestes*). El texto principal había sido escrito varios años antes pero su publicación se vio demorada por distintos motivos. Copérnico murió poco después.

La obra ratificó la idea de un *sistema heliocéntrico* en contraposición con el *sistema geocéntrico* que dominaba hasta entonces la concepción del universo, por lo que es considerada una revolución científica. La fuerza de la nueva idea se transmitió a otros ámbitos del pensamiento, al punto que muchas veces para resaltar cuán novedosa es una idea se dice que se trata de *un giro copernicano*, una expresión acuñada por el filósofo alemán Emanuel Kant.

2.3. Galileo

Otros avances importantes fueron hechos por Galileo Galilei quien, a comienzos del siglo XVII, lideró el uso de la observación y la experimentación para poner a prueba las teorías físicas. Enunció el *principio de inercia*, que luego Newton incluiría como la primera ley de la mecánica. También formuló el principio de relatividad que lleva su nombre y mediante el cual se analizó por primera vez el concepto de *sistema de referencia inercial* (ver cuadro en página siguiente).

Una contribución importante de Galileo consistió en medir con precisión el efecto de la gravedad sobre los cuerpos en caída libre. Planteó la hipótesis de que un objeto que cae adquiere cantidades iguales de velocidad en iguales intervalos de tiempo, lo que significa que su velocidad aumenta a un ritmo constante a medida que cae.

Figura 2.2. Moneda conmemorativa del Año Internacional de la Astronomía con la efigie de Galileo



Fuente: NobbiP, 2011.

La demostración de esta hipótesis no era fácil pues los medios disponibles en esa época no permitían registrar velocidades demasiado altas. Por ello, trató de lentificar el movimiento de caída estudiando un objeto que se desliza sobre un plano inclinado, en lugar de uno que cae libremente. A partir del uso de un reloj de agua, midió el tiempo necesario para que el cuerpo caiga a una distancia conocida sobre el plano inclinado. Así observó que el tiempo requerido para que el cuerpo se deslice a lo largo de toda la longitud de la rampa era igual al doble del tiempo que le tomó al mismo

Relatividad de Galileo

Se denomina *invariancia galileana* al hecho de que las leyes fundamentales de la mecánica clásica son las mismas en todos los sistemas de referencia *inerciales* (aquellos en los que vale el *principio de inercia*, es decir en los que un cuerpo libre de fuerzas permanece en reposo o en movimiento uniforme). Describió este principio en su libro *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, con el ejemplo de una nave que viaja a velocidad constante, sin balanceo, en un mar en calma:

Encerraos con un amigo en la habitación más grande que encontréis bajo la cubierta de cualquier gran buque, y llevad allí moscas, mariposas y otros animales voladores similares; también tendréis un gran recipiente con agua y dentro del mismo, pequeños peces.

Suspenderéis un cubo con un poco de agua, que gota a gota se vierta en otro recipiente de boca estrecha, colocado debajo. Estando la nave inmóvil observad atentamente como los animales vuelan con la misma velocidad hacia todas partes de la sala; veréis los peces nadar indiferentes en todas direcciones; las gotas que caen entrarán todas en el vaso que está debajo; y si vosotros arrojáis al amigo algún objeto, no debéis arrojarlo con más fuerza en una dirección que en otra, cuando las distancias sean iguales. Saltando, como dicen «con los pies juntos», avanzaréis igual distancia en todas direcciones. Observad atentamente todas estas cosas, para que no haya ninguna duda que, mientras el barco está quieto, debe suceder así. Haced mover ahora el barco con la mayor velocidad posible, ya que (mientras el movimiento sea uniforme y no fluctuante de aquí para allá) vosotros no reconoceréis el más mínimo cambio en todos los efectos mencionados ni por ninguno de ellos podréis deducir si la nave camina o en cambio, está quieta.

cuerpo deslizar una cuarta parte de esa distancia. En otras palabras, si se duplicaba el tiempo en el que el cuerpo caía, viajaría cuatro veces más lejos. Llegó a la conclusión de que si un objeto se deja caer desde el reposo (en caída libre o deslizando por un plano inclinado), incrementa su velocidad a un ritmo constante y la distancia total S que viaja es proporcional al cuadrado del tiempo t que necesita para ello:

$$S \propto t^2$$

También encontró que la ley de caída es independiente de la masa de los cuerpos, es decir que un cuerpo pesado cae con la misma aceleración y por tanto, si parte del reposo, con la misma velocidad que un cuerpo liviano, independientemente de su masa. Para verificar esto en un experimento casero, debemos experimentar con cuerpos de diferente masa pero que tengan la misma forma pues la resistencia del aire depende fuertemente de la forma de los cuerpos.

Actividad 2.1.

El experimento de Galileo

Como dijimos, Galileo demostró que la velocidad de caída de los cuerpos atraídos por la gravedad terrestre depende muy poco de su masa. En la actividad que proponemos se logra que las fuerzas de roce con el aire—de dos cuerpos de distinta masa— sean iguales. Para ello, tomamos dos pelotas de tenis y con la ayuda de un objeto de punta afilada hacemos un pequeño agujero en una de ellas, de unos dos milímetros de diámetro. A través de este, introducimos una cierta cantidad de perdigones de plomo o bolitas de rodamiento, de forma que el peso de una pelota aumente respecto al de la otra. De esta forma tendremos dos pelotas del mismo tamaño y forma, pero de diferente masa. Ahora tomamos una pelota en cada mano y las dejamos caer simultáneamente, observando cómo llegan al suelo. Poniendo una mesa de madera o metal para que caigan sobre ella, podemos incrementar el volumen del sonido que se produce cuando cada pelota llega abajo, que nos sirve para detectar si caen al mismo tiempo. También se puede hacer este experimento inyectando agua con una aguja en una de las pelotas.

Una bola de bolos y una pluma caen al mismo tiempo al vacío

<https://www.fayerwayer.com/2014/11/bola-de-bolos-pluma-caen-sin-gravedad/>

Autor: Manu Contreras

Ver videos en: <https://www.youtube.com/watch?v=mrVT3r2Yonc&t>

Autor: Angerl B. B.



Actividad 2.2.

Se sugiere buscar la historia de los métodos desarrollados para la medición del tiempo.

2.4. La mecánica

En 1687 Isaac Newton publicó su obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*, conocida como los *Principia*) que marcó un punto de inflexión en la historia de la ciencia. Este trabajo es considerado como la obra científica más importante jamás publicada. En ella se presentan dos teorías físicas completas: por un lado, las leyes del movimiento, de

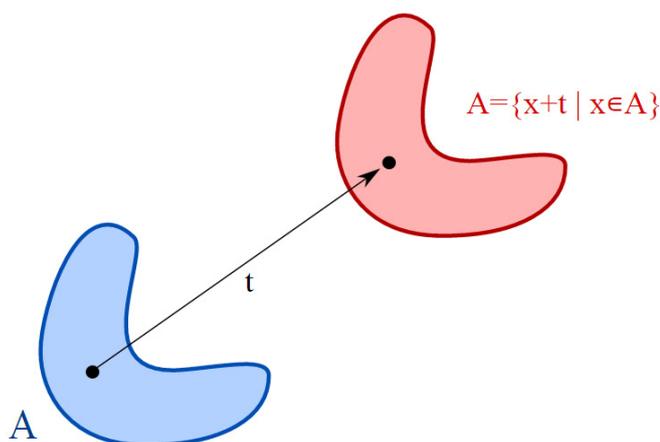
las cuales se deriva toda la *mecánica clásica*, y por otro la *ley de gravitación universal*, ambas reconocidas por el buen acuerdo que guardan con las observaciones y los resultados experimentales.

En el capítulo 6 estudiaremos en detalle las leyes de Newton y sus consecuencias.

Una consecuencia que surge de las leyes de Newton es la confirmación formal de las leyes de *conservación de la energía mecánica* y de *la cantidad de movimiento*. La primera ya había sido postulada por Leibniz sobre la base de sus experimentos, con el nombre de *conservación de la vis viva*, nombre que le daba a la energía cinética. La segunda surge de la formulación de Newton para la dinámica de un sistema aislado. Posteriormente se demostró que ambas leyes están vinculadas a *propiedades de simetría* de las leyes de Newton.

Cuando se menciona una propiedad de simetría (del griego *συμμετρία*) se refiere a la característica de un objeto que no cambia cuando hacemos una transformación de este a través de una reflexión, traslación o rotación. La figura 2.3 muestra el *efecto de una traslación* según el vector \vec{t} aplicada a la figura celeste; vemos que en este caso la figura es invariable.

Figura 2.3. Invariancia ante traslaciones espaciales



Fuente: Stephan Kulla, 2012.

Generalizando esta idea, se dice que *las leyes de Newton son invariantes ante traslaciones en el tiempo*. En términos simples, eso significa que el resultado de un experimento de dinámica debe ser el mismo independientemente de que lo realicemos hoy, mañana o en cualquier otro momento. Puede demostrarse que esta invariancia ante traslaciones temporales implica *la conservación de la energía*.

De la misma manera, también puede demostrarse que las leyes de Newton son invariantes ante traslaciones en el espacio, lo que significa que el resultado de un experimento es independiente de que lo realicemos en el laboratorio, en nuestra casa o en cualquier otro lugar. En forma similar al caso anterior, puede demostrarse que esta invariancia ante traslaciones espaciales implica la conservación de la cantidad de movimiento.

La relación entre simetría y leyes de conservación se ha extendido a toda la física moderna y la búsqueda de simetrías siempre guía la búsqueda de leyes de conservación. La dificultad radica en que las simetrías muchas veces se manifiestan en propiedades que no son fácilmente comprensibles sin una formación especializada.

La mecánica de Newton fue reformulada y extendida, en el siglo XVIII por varios científicos, entre ellos el alemán Leonhard Euler, el francés Joseph-Louis Comte de Lagrange, el irlandés William Rowan Hamilton y otros.

Por su parte, la ley de gravitación universal, formulada por Newton permitió dar inicio a los estudios en astrofísica, lo que abrió las puertas a la descripción de los fenómenos astronómicos utilizando las leyes físicas. Esto implicaba la posibilidad de calcular las trayectorias de los planetas y así predecir muchos de los fenómenos astronómicos, como los eclipses, que hasta entonces eran solo objeto de observación pasiva.

2.5. La electricidad

Luego del triunfo de Newton en la mecánica, el próximo gran campo en el que hubo avances notables fue el de la electricidad. Observaciones realizadas en los siglos XVI y XVII por los ingleses Robert Boyle y Stephen Gray y los franceses Charles-Augustin de Coulomb, Jean-Baptiste Biot y Félix Savart sentaron las bases para el trabajo posterior. Esas observaciones establecieron los fundamentos para la comprensión de la naturaleza de la carga y de la corriente eléctrica.

La fuerza eléctrica fue tratada de manera semejante a la fuerza gravitatoria, es decir como una acción a distancia; ambas variaban con la misma potencia de la distancia. La única diferencia parecía estar en el hecho de que las masas siempre se atraen mientras que las cargas eléctricas se atraen o se repelen según su signo. La fuerza magnética resultaba algo más complicada pero finalmente fue incluida en una descripción coherente.

En 1820 el físico danés Hans Christian Ørsted descubrió que una corriente eléctrica era capaz de desviar la aguja de una brújula que se encontrara próxima, confirmando la existencia de una relación directa entre electricidad y magnetismo.

Este descubrimiento no fue casual, ya que Ørsted estuvo buscando una relación entre electricidad y magnetismo durante varios años. Su primera interpretación fue que los efectos magnéticos se irradian desde la superficie del alambre que lleva una corriente eléctrica, de la misma manera que lo hace el calor. Unos meses más tarde comenzó investigaciones más detalladas y publicó los resultados donde evidenciaba que una corriente eléctrica que fluye por un cable produce un campo magnético circular centrado en el cable.

Figura 2.4. Hans Christian Ørsted

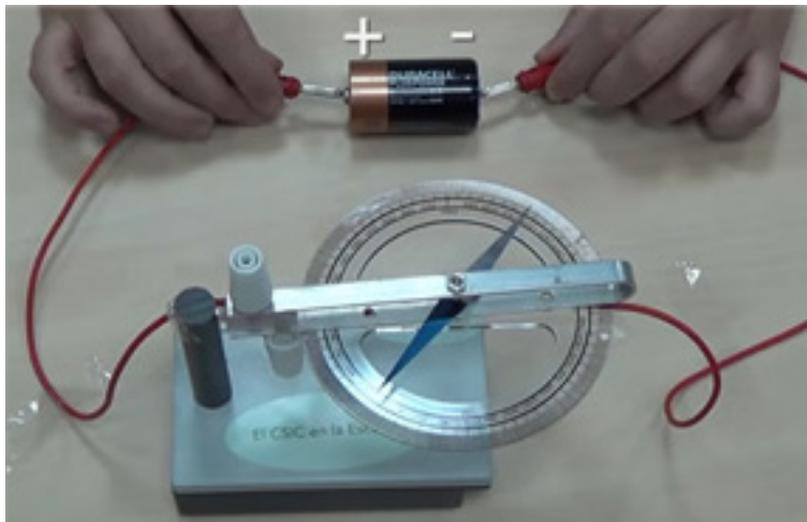


Fuente: Anónimo, ca. 1830.

Demostración

En esta demostración buscamos recrear el experimento de Ørsted. Para ello usamos una brújula (una aguja imantada que puede girar en torno a un eje que pasa por su centro).

Figura 2.5. Experimento de Ørsted



Fuente: Museo Virtual de la Ciencia del CSIC, 2004.

Cuando la brújula está en reposo actúa sobre ella solo el campo magnético terrestre, que orienta la aguja en la dirección norte-sur. Para la demostración armamos un circuito eléctrico con una pila, una lamparita y un cable de unos 20 cm de longitud; hacemos que un trozo del conductor quede paralelo a la aguja de la brújula, lo más cercano a esta como sea posible. Cerrando el circuito eléctrico, la lamparita encendida nos indicará que circula una corriente por el mismo. La aguja debería desviarse de su posición de equilibrio, oscilando en torno a las direcciones paralela y perpendicular al conductor. Si no sucede eso, deberá incrementarse el valor de la corriente que circula y agregar una nueva pila en serie con la primera. Una vez que la aguja se mueva, veremos que al eliminar la corriente, la aguja vuelve a oscilar en torno a la dirección paralela al conductor (norte-sur) hasta que se detiene. Si ahora invertimos el sentido de la corriente (invirtiendo la polaridad de las pilas) observaremos que la desviación de la aguja es en sentido contrario. Esto nos permite concluir que cuando circula corriente por el conductor, la aguja magnética se encuentra bajo la acción de dos fuerzas: una debida al campo magnético terrestre y otra producida por el campo magnético creado por la corriente en el conductor.

A partir de este hallazgo, diversos investigadores contribuyeron con leyes específicas a la comprensión de los fenómenos electromagnéticos. En particular, el físico y químico inglés Michael Faraday demostró que un imán que se mueve en las vecindades de un conductor induce una corriente eléctrica en este. Faraday era un notable experimentador y contribuyó mucho a la introducción de conceptos modernos de la física como el de campo electromagnético.

Sobre él dice Maxwell (Babin A. y Figotin A., 1984)

Faraday, con los ojos de su mente, vio las líneas de fuerza que atraviesan todo el espacio, donde los matemáticos veían centros de fuerza que se atraen a distancia, Faraday veía un medio donde los demás no veían nada más que distancia: Faraday buscaba el lugar donde se situaban los fenómenos en acciones reales que ocurrían en ese medio.

El concepto de campo se extendió a otras áreas y es así como aparece la idea de *campo gravitatorio*, que reemplaza la idea de *acción a distancia* que había dominado hasta entonces. La idea de campo es que una carga eléctrica o una masa –según el caso– altera el espacio a su alrededor, creando un campo que es percibido por otras cargas –o por otras masas– como una fuerza.

A partir de los avances previos, el escocés James Clerk Maxwell formuló en 1864 un conjunto de cuatro ecuaciones vectoriales interrelacionadas que explican la interacción entre los campos eléctricos y magnéticos, conocidas como *las ecuaciones de Maxwell*.

La teoría de Maxwell predijo la existencia de *ondas electromagnéticas*, confirmadas en 1888 por las observaciones de Heinrich Hertz (1857-1894). De allí se pasó inmediatamente a las aplicaciones en la óptica, ya que se mostró que las leyes de Maxwell contenían la explicación de todas las leyes empíricas conocidas hasta el momento en ese campo.

Figura 2.6. James Clerck Maxwell



Fuente: G. J. Stodart, ca. 1865.

2.6. El calor

La termodinámica fue desarrollada por distintos investigadores, físicos y químicos a partir de fines del siglo XVII. En 1733 el suizo-holandés Daniel Bernoulli, miembro de una familia de prominentes científicos, utilizó argumentos estadísticos combinados con la mecánica para deducir algunos resultados termodinámicos, dando inicio así al área de la mecánica estadística. En 1798 Benjamin Thompson demostró la conversión de trabajo mecánico en calor y luego en 1847 James Joule estableció la ley de conservación de la energía para el calor y la energía mecánica. Sobre la base de los resultados empíricos de James Watt, Rudolf Clausius (1822-1888) y William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) enunciaron independientemente el segundo principio de la termodinámica; estos trabajos se complementaron con los aportes del francés Sadi Carnot.

Originariamente los fenómenos térmicos trataban de explicarse sobre la base de la llamada *teoría del calórico*, que explicaba el calor como un *fluido hipotético* –el

calórico— que, se creía, impregnaba la materia y era responsable de elevar su temperatura. Se pensaba que el calórico se difunde entre los cuerpos y pasa de uno a otro por contacto. Se suponía que se hacía visible en las llamas, que estaban formadas en su mayor parte por ese fluido que se desprende de los cuerpos. Se asignaba a las distintas sustancias distinta capacidad de disolver el calórico, lo que explicaba las diferencias en calor específico. Esta teoría fue ampliamente aceptada, ya que incluso aclaraba los experimentos de James Joule sobre la equivalencia entre calor y trabajo, interpretando que al frotar un cuerpo, se romperían las vesículas microscópicas que contienen el calórico, liberando calor. Sin embargo, la teoría fue perdiendo adeptos, al no poder explicar diversos problemas, como la masa nula del calórico, por lo que finalmente fue abandonada.

En el siglo XIX James Maxwell y Ludwig Boltzmann establecieron independientemente la *teoría cinética de los gases* y luego Boltzmann desarrolló la forma moderna de la mecánica estadística, que dio un fundamento microscópico a las leyes de la termodinámica. En particular desde entonces se asocia el concepto de *temperatura* con la *energía cinética de las moléculas* o átomos de la materia y el calor con energía en tránsito entre un cuerpo y otro.

2.7. El interior de la materia

En 1895 Wilhelm Röntgen descubrió los *rayos x*, que fueron identificados como *radiación electromagnética de alta frecuencia*, es decir, luz de un color más allá del espectro visible. Un fenómeno vinculado, el de la *radioactividad*, fue descubierto en 1896 por Henri Becquerel y estudiado en detalle por Marie Sklodowska-Curie y Pierre Curie, entre otros. Estos estudios iniciaron el campo de la *física nuclear*.

La existencia del átomo había sido postulada en Grecia por Demócrito y Leucipo 400 años a. C. Estos pensadores griegos utilizaron la palabra *átomo* (del griego *a* que significa negación y *tomo*, parte, es decir, sin partes). Demócrito postulaba átomos indivisibles y explicaba las propiedades de los diferentes materiales sobre la base de la forma, el tamaño, el orden y la posición de los átomos. Suponía que pueden ensamblarse entre sí, aunque no fusionarse y también pensó que subsiste una cantidad mínima de vacío entre ellos que permite su diferenciación. Así podían formar cuerpos, que pueden luego separarse nuevamente de manera que los átomos quedan libres para formar otro cuerpo.

Una idea similar fue postulada nuevamente en 1808 por John Dalton para explicar las *leyes de combinación de los elementos en las reacciones químicas*. Esa imagen tuvo detractores e impulsores y fue muy resistida hasta fines del siglo XIX; uno de los más fuertes promotores de la idea fue el químico italiano Amedeo Avogadro. La primera demostración empírica de la existencia de los átomos fue posible gracias a los trabajos de Einstein de 1905 sobre el movimiento browniano, el movimiento aleatorio que se observa cuando se suspenden partículas microscópicas en un medio fluido (por ejemplo, polen en una gota de agua). Recibe su nombre en honor al biólogo y botánico escocés Robert Brown, quien descubrió este fenómeno en 1827 y observó que pequeñas partículas de polen se desplazaban en movimientos aleatorios sin razón aparente.¹

En 1897 Joseph J. Thomson descubrió el *electrón*, la partícula elemental que transporta la corriente en los circuitos eléctricos. Thomson encontró que los llamados rayos catódicos estaban constituidos por partículas cargadas emitidas por un filamento caliente (el cátodo); determinó la carga y la masa de esas partículas y las

¹ Einstein postuló que el movimiento se debe a las colisiones de las moléculas del fluido con la partícula suspendida, que así se vuelven indirectamente observables.

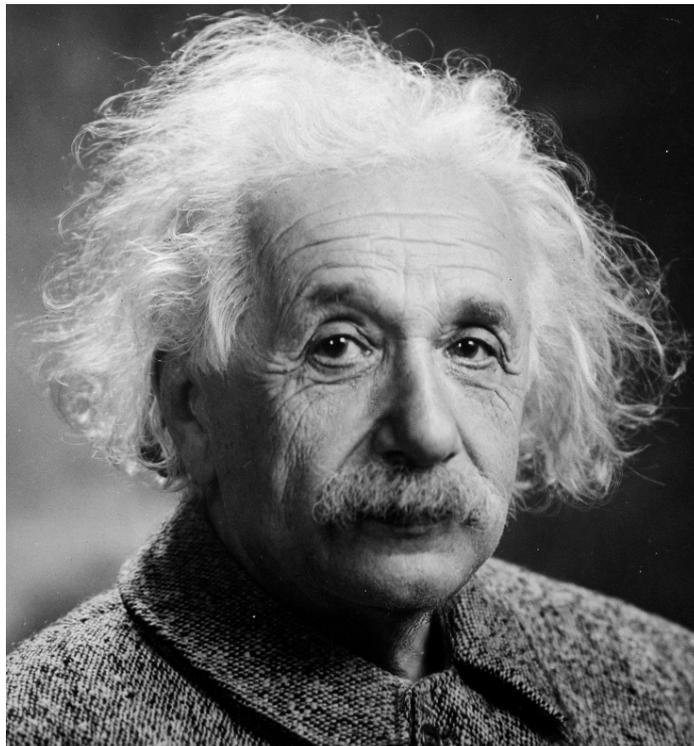
identificó como uno de los componentes del átomo. A partir de este descubrimiento, en 1904 propuso el primer modelo del átomo, conocido luego como *el modelo del budín de ciruelas*. Se imaginaba al átomo como una especie de budín en el que los electrones estaban incrustados como las ciruelas de un postre.

Estos descubrimientos demostraron que la suposición de que el átomo es la parte última de la materia es incorrecta, e impulsaron las investigaciones sobre su estructura. Así, en 1911 Rutherford dedujo a partir de experimentos de colisión de partículas alfa sobre delgadas láminas de oro, la *existencia de un núcleo atómico compacto* que concentra la carga eléctrica positiva. Se suponía que los núcleos de los distintos elementos químicos estaban formados por partículas de carga positiva que se denominaron *protones* (del griego *πρωτον*, primero). El número de estos protones debía ser igual al número de los electrones de cada átomo, a fin de asegurar la neutralidad eléctrica observada para la materia. Los constituyentes neutros del núcleo atómico, *los neutrones*, fueron descubiertos recién en 1932 por James Chadwick.

En 1900, Max Planck (1900) publicó un trabajo que explicaba el comportamiento de la llamada radiación del cuerpo negro, esto es, el espectro de la radiación emitida por un cuerpo caliente. La relación encontrada suponía que la radiación de calor se origina en irradiadores ubicados en la pared del cuerpo, que solo podían ocupar estados *cuantificados* de energía. Esta hipótesis demostró ser la puerta de entrada al enorme y fantástico edificio que luego se convertiría en la *mecánica cuántica*.

2.8. Relatividad

Figura 2.7. Albert Einstein



Fuente: Orren Jack Turner, 1947.

En el transcurso del año 1905 Albert Einstein publicó cinco trabajos en la revista *Annalen der Physik*. El primero era un resumen de su tesis doctoral por la Universidad de Zúrich. Los cuatro restantes abrieron las puertas a los grandes cambios que

vivió la ciencia en el siglo xx. Uno de esos trabajos proporcionaba una explicación teórica, en términos estadísticos, del *movimiento browniano*; el segundo daba una interpretación del *efecto fotoeléctrico*, basada en la hipótesis de que la luz está integrada por cuantos individuales, más tarde denominados fotones, cuya energía vale $E = h\nu$; los dos trabajos restantes sentaban las bases de la *teoría restringida de la relatividad*, estableciendo la equivalencia entre la energía E de una cierta cantidad de materia y su masa m , en términos de la famosa ecuación $E = mc^2$, donde c es la velocidad de la luz, que se supone constante. Dada la importancia de estos trabajos el año 1905 fue denominado *Annus Mirabilis* (año milagroso).

La teoría *restringida* también llamada *especial* de la relatividad de Einstein se basa en dos postulados:

- Las leyes físicas se escriben de la misma forma en todos los sistemas de referencia inerciales.
- La velocidad de la luz es independiente del estado de movimiento de la fuente y del observador.

El primer postulado extiende a todas las leyes físicas las ideas de Galileo sobre la relatividad en la mecánica. Ambos postulados quedan demostrados *a posteriori* por la verificación experimental de las consecuencias que se derivan de estos. Una consecuencia de la teoría es la ley de transformación entre las coordenadas de distintos sistemas de referencia, que resulta diferente a la que se usa en la mecánica clásica.

La física había utilizado el concepto de tiempo introducido por Aristóteles, que consideraba que tanto el espacio como el tiempo eran absolutos. Estudió la noción de instante, al que declara respecto del tiempo, análogo al punto respecto del espacio.

Newton tomó estas ideas y afirmó que «el tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí mismo, y por su propia naturaleza, fluye imperturbable y uniformemente sin relación con nada externo». En forma similar respecto al espacio afirma Newton:

- El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece siempre igual e inamovible.
- El movimiento absoluto es la traslación de un cuerpo desde un lugar absoluto a otro.
- El reposo real, absoluto, es la permanencia de un cuerpo en el mismo lugar del espacio inmóvil.
- Como el orden de las partes del tiempo es inmutable, así también lo es el orden de las partes del espacio.

El filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804) hizo suyas las ideas de Newton sobre el espacio y el tiempo y negó que estos sean conceptos empíricos, es decir originados en la experiencia «ya que toda experiencia presupone el tiempo», Einstein (1916).

En cambio, en los fundamentos de la teoría de la relatividad, dice Einstein respecto a nuestro concepto de tiempo y espacio, que los físicos se han visto obligados, por los hechos, a bajar (estos conceptos) del Olimpo del *a priori* con el fin de ajustarlos y hacerlos utilizables.

Uno de los resultados de la teoría de la relatividad es que tanto el espacio como el tiempo dependen del sistema de referencia en que se encuentre el observador. Una consecuencia es que la *simultaneidad de dos sucesos es un concepto relativo*, es decir que depende del observador: dos sucesos que son simultáneos para un observador pueden no serlo para otro que se mueve respecto al primero. Esto contradice el fundamento de la afirmación número 4 de Newton.

Otra consecuencia de la teoría de la relatividad –deducida por el propio Einstein también en 1905– es la *equivalencia entre masa y energía* que fue demostrada experimentalmente en 1932, por John Douglas Cockcroft y Ernest Walton en el Laboratorio

Cavendish de Cambridge, quienes lograron, por primera vez, desintegrar un núcleo atómico. En el análisis de los resultados quedaba demostrada la relación de Einstein.²

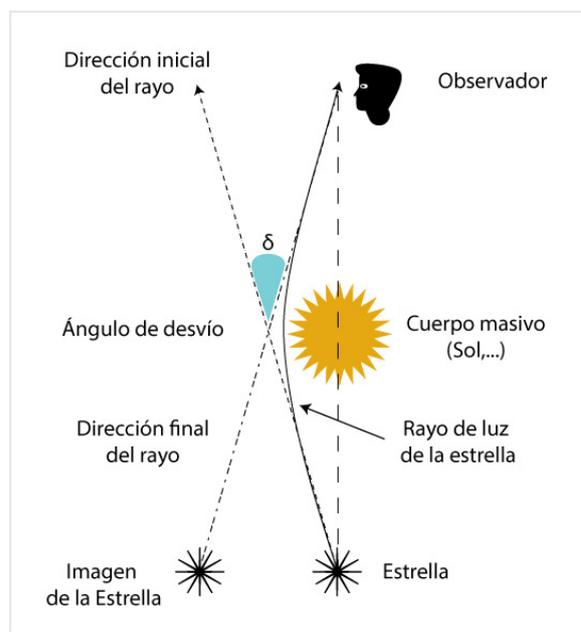
En 1915, Einstein desarrolló la *teoría general de la relatividad*, que unifica espacio y tiempo en una sola entidad, el espacio-tiempo, y permite describir los fenómenos gravitatorios en términos de la curvatura del espacio-tiempo. El físico inglés Arthur Eddington se interesó en la teoría de Einstein porque, a su oficio de astrónomo, unía una gran habilidad matemática lo que le permitió entenderla. Durante la Primera Guerra Mundial, Einstein y Eddington, cada uno en su país, habían desarrollado actividades pacifistas y actuaban en consecuencia. Eddington se vio envuelto en una controversia en el seno de la comunidad científica británica. Muchos astrónomos argumentaban que las relaciones científicas con Alemania y Austria debían interrumpirse, ya que eran consideradas *potencias agresoras*. Eddington, un cuáquero pacifista, luchaba para que esos sentimientos no dañaran las buenas relaciones preexistentes en el ámbito científico.

Einstein, por su parte, era un ferviente antibelicista. Ante la aparición de un manifiesto que defendía la posición de Alemania, firmó, junto a otros tres, un contra-manifiesto pacifista. Además, ayudó a formar una coalición no partidaria que luchó por una paz justa y por una organización supranacional que ayudara a prevenir futuras guerras.

Eddington, por razones científicas y humanitarias se convirtió en el principal defensor y difusor de la relatividad en Gran Bretaña. En ese marco viajó a la isla Príncipe cerca de África para observar el eclipse solar del 29 de mayo de 1919. Durante el eclipse, tomaron fotografías de las estrellas en la región alrededor del Sol.

De acuerdo con la teoría de la relatividad general, estrellas que no serían visibles por encontrarse detrás del disco solar, se hacen visibles porque *los rayos de luz que pasan cerca del Sol son ligeramente desplazados* dado que la luz se curva en el campo gravitatorio. Este efecto se nota solo durante los eclipses, ya que de otro modo el brillo del Sol oculta las estrellas afectadas.

Figura 2.8. La observación de Eddington



Fuente: Adaptado de Antoni Salvà i Tomàs, 2007.

2 Ver Cockcroft y Walton, 1943.



Fuente: *London Times*, 6 de noviembre de 1919.

El análisis de los resultados mostró la validez de la teoría. La figura 2.8 muestra arriba, un esquema del fenómeno de desviación de la luz por el campo gravitatorio del Sol y, abajo la tapa del diario *The London Times* del 7 de noviembre de 1919 con el anuncio, en el que se destaca la frase: «Las ideas newtonianas son derrocadas».

Trabajos posteriores sobre las ecuaciones de Einstein resultaron en la predicción de la expansión del universo y de los agujeros negros. Sin embargo, Einstein creía en un universo estático y trató de ajustar sus ecuaciones para que dieran ese resultado.

2.9. Universo en expansión

En 1929 las observaciones astronómicas de Edwin Hubble indicaban que el universo está en expansión. Esta conclusión se basaba en el hecho de que la luz proveniente de las galaxias lejanas aparece más rojiza que la luz del mismo origen atómico pero proveniente de galaxias más cercanas o de fuentes luminosas terrestres. Este resultado permitió postular que en el pasado, el universo debió haber sido más pequeño y más caliente.

Alrededor de 1940 algunos investigadores como Georges Lemaître (1894-1966) y posteriormente George Gamow, propusieron la idea de que el universo podría haberse originado en una gran explosión. La evidencia sobre esta teoría fue descubierta en 1964. Anteriormente, entre 1940 y 1950, varios físicos reconocidos como Enrico Fermi y Fred Hoyle pusieron en duda la idea de la explosión inicial y así Hoyle, a modo de burla, la bautizó como *big bang*. Como veremos en el capítulo 8, es una idea dominante en la cosmología moderna.

2.10. La teoría cuántica

A partir de 1900, Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr y otros desarrollaron *teorías cuánticas heurísticas* como un intento por explicar diversos resultados experimentales anómalos.³ Una idea básica en esas teorías fue la introducción de *niveles discretos de energía*.⁴ Más tarde, en 1925, Werner Heisenberg y en 1926 Erwin Schrödinger y Paul Dirac formularon la *mecánica cuántica*, que daba un fundamento teórico a esas ideas y explicaba los resultados anteriores. En esta teoría, los resultados de las mediciones físicas son intrínsecamente probabilísticos y la teoría permite calcular esas probabilidades. La teoría también brinda una descripción exitosa del comportamiento de las partículas atómicas y subatómicas a distancias microscópicas. A partir de 1926 Schrödinger, Heisenberg y Max Born pudieron presentar una idea consistente de la estructura de los átomos que dio fundamento a las leyes químicas que hasta entonces eran empíricas.

En 1926 Born, Heisenberg y Pascual Jordan construyeron una nueva teoría que expresaba los grados de libertad del campo electromagnético como un conjunto de osciladores a los que aplicaron las reglas conocidas de la mecánica cuántica de partículas. Esto fue seguido por una teoría más completa desarrollada por Heisenberg y Paul Dirac en 1927, que podía ser usada para modelar el proceso de emisión de luz por los electrones o por los átomos y otros sistemas.

En la década de 1940 estos avances se completaron con el trabajo de Richard Feynman, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga y Freeman Dyson que permitió eliminar algunas inconsistencias de la teoría previa. El resultado es la teoría cuántica de campos que constituye la base de las modernas teorías de las partículas fundamentales.⁵

La mecánica cuántica también proveyó herramientas para entender el comportamiento de la materia condensada, es decir de sólidos y líquidos, incluyendo fenómenos como la estructura cristalina, la conducción eléctrica, el magnetismo, los semiconductores y los superconductores. Los pioneros en estas áreas fueron Felix Bloch, Lev Landau, Rudolf Peierls y Eugene Wigner quienes en 1928, trabajando en Leipzig junto a Heisenberg, diseñaron una descripción del comportamiento de los electrones en cristales.

Los dos logros más importantes del siglo xx, la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad, en particular la relatividad general, aparecen en principio como incompatibles. La relatividad general describe el universo en la escala de los planetas, del sistema solar y de las galaxias, mientras que la mecánica cuántica se ocupa de las escalas atómicas y subatómicas. Hubo distintos intentos de unificar estas teorías, que incluyen la llamada *teoría de cuerdas*, que ha producido algunos resultados.

2.11. Cronología del descubrimiento de las partículas elementales

El neutrón fue descubierto en 1932 cuando James Chadwick utilizó datos de dispersión para calcular la masa de esta partícula neutra. Desde los tiempos de Rutherford se sabía que el número de masa atómica A de los núcleos es algo más de dos veces el número atómico Z para la mayoría de los átomos y que, esencialmente, toda la masa del átomo se concentra en un núcleo relativamente pequeño. A partir

3 Manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como tanteos o reglas empíricas. Este es el caso de la teoría cuántica que postuló Niels Bohr, en 1913.

4 Según el Diccionario RAE, significa que toma valores distintos y separados.

5 Ver más en *Teoría cuántica de campos* (s. f.). En Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_cu%C3%A1ntica_de_campos

de aproximadamente 1930, se pensaba que las partículas fundamentales eran protones y electrones, pero eso requería que algunos electrones se unieran al núcleo para cancelar parcialmente la carga de los protones. La mecánica cuántica, ya conocida por entonces predecía, a través del *principio de incerteza*, que eso era energéticamente imposible. El descubrimiento del neutrón resolvió el enigma.

Esta etapa de avance sobre la estructura interna de los átomos se completó con la explicación dada por Fermi al decaimiento beta de los núcleos, basada en la hipótesis de Pauli, de 1931, sobre la existencia del neutrino, responsable del balance de energía en ese decaimiento. También en 1932 C. D. Anderson descubrió el *positrón*, que había sido propuesto por Dirac en 1927, como una *necesidad* en el marco de la coherencia de la mecánica cuántica relativista. En su momento, esta idea fue recibida con cierto escepticismo, pero la reafirmación experimental afianzó la confianza en las predicciones teóricas en este campo. La confirmación de la existencia de ambas partículas, a pesar de la imposibilidad de detectar el neutrino, dio fuerza a la solidez del marco teórico. La situación se repitió años más tarde cuando la teoría *predijo la existencia de los quarks*, componentes internos del neutrón y del protón, cuya confirmación experimental llevó varios años. En el capítulo 7 se presenta la visión actual sobre la estructura de la materia.

El siguiente listado resume la historia de los avances hacia el interior de la materia:

- 1895. Rayos x (W. Röntgen) (posteriormente identificados como fotones).
- 1897. Electrón (J. J. Thomson).
- 1899. Partículas α (E. Rutherford).
- 1900. Rayos gamma (fotón de alta energía) (P. U. Villard).
- 1932. Neutrón (J. Chadwick) (predicho por Rutherford en 1920).
- 1932. Positrón (C. D. Anderson) (propuesta por Dirac en 1927).
- 1937. Muón (S. Neddermeyer, C. Anderson, J. C. Street, y E. C. Stevenson).
- 1947. Pión (C. Powell) (predicho por H. Yukawa en 1935).
- 1947. Kaón (G. D. Rochester y C. C. Butler).
- 1947. Λ_0 descubierto en el estudio de la interacción de los rayos cósmicos.
- 1955. Antiprotón (O. Chamberlain, E. Segrè, C. Wiegand y T. Ypsilantis).
- 1956. Neutrino (F. Reines y C. Cowan).
- 1962. Neutrino del muón, distinto al neutrino del electrón (grupo de L. Lederman).
- 1969. Partón (constituyente interno de hadrones) (experimentos SLAC), luego asociado con los quarks (M. Gell-Mann y G. Zweig en 1963). Por tanto constituye el descubrimiento de los quarks up, down y strange)
- 1974. Mesón J/ψ , llamado psión (B. Richter y S. Ting, demostrando la existencia de los quark charm) (propuestos por Bjorken y Glashow en 1964).
- 1975. Leptón Tau (descubierto por un grupo encabezado por M. Perl).
- 1977. Mesón Y (y griega ó *ypsilon*) (descubierto en Fermilab, demuestra la existencia del quark bottom) (propuestos por M. Kobayashi y T. Maskawa en 1973).
- 1979. Gluón observado indirectamente en los eventos de 3 jets en el DESY (Sincrotrón Alemán de Electrones, el mayor centro de investigación alemán de física de partículas, con sedes en Hamburgo y Berlín).
- 1983. Bosones W y Z descubiertos (C. Rubbia, S. van der Meer, con la colaboración del CERN UA-124) (predichos por S. Glashow, A. Salam, y S. Weinberg).
- 1995. Quark top, descubierto en el Fermilab.
- 2000. Neutrino del tau (observado directamente por primera vez en Fermilab).
- 2012. Bosón de Higgs descubierto en el CERN.

Actividad 2.3.

1. Marque en el listado anterior cuáles son las partículas que ya conocía.
2. Agregue junto al nombre de cada partícula mencionada qué fenómeno pudo explicarse a partir del conocimiento de esa nueva partícula.

Lista de referencias bibliográficas

- Hassan, Z. y Lai, C. H. (Eds.) (1984). *Ideals and realities: Selected essays of Abdus Salam*. Singapur: World Scientific.
- Babin, A. y Figotin, A. (1984). *Neoclassical Theory of Electromagnetic Interactions*. Springer: Heidelberg.
- Cockcroft, J. D. y Walton, E. T. S. (1943). Artificial Production of Fast Protons. *Nature*, 129, pp. 241-649.
- Einstein, A. e Infeld, L. (1961). *La física, aventura del pensamiento*. Buenos Aires: Losada.
- Einstein, A. (1920). *Relativity: The special and general theory*.
- Galileo Galilei. (1632). *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*.
- Hewitt, P. G. (2007). *Física conceptual* (10ª edición). México: Prentice Hall.
- Menchaca Rocha, A. (2017). *El discreto encanto de las partículas elementales*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Moledo, L. y Olszewicki, N. M. (2014). *Historia de las ideas científicas*. Buenos Aires: Planeta.
- Moreira, M. A. (2009). The Standard Model of Particle Physics. *Revista Brasileira da Ensino da Física*, 31(1), p. 1306.
- Planck, M. (1900). Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*.

Lista de figuras

- Anónimo, Usuario:Sopianwar. (2015). Ibn al-Haytham [Grabado]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ibn_al-Haytham.png. CC BY-SA 4.0
- Anónimo. (ca 1830). Hans Christian Ørsted [Grabado]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ETH-BIB-Oersted,_Hans_Christian_\(1777-1851\)-Portrait-Portr_08146.tif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ETH-BIB-Oersted,_Hans_Christian_(1777-1851)-Portrait-Portr_08146.tif). Dominio público.
- Kulla, Stephan. (2012). Translation of a set. Invariancia ante traslaciones espaciales [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Translation_of_a_set.svg. CC BY-SA 3.0
- Museo Virtual de la Ciencia del CSIC, López Sancho, José María, Moreno Gómez, Esteban y Gómez Díaz, María José. (2004). El experimento de Oersted [Audiovisual]. <http://museovirtual.csic.es/salas/magnetismo/mag8.htm>
- Salvà Tomàs. (2007). La observación de Eddington [Diagrama]. http://perso.wanadoo.es/antoni.salva/microlent_cas.html
- Stodart, G. J. (ca 1865). James Clerk Maxwell [Grabado sobre fotografía de Fergus of Greenock]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ETH-BIB-Maxwell,_James_Clerk_\(1831-1879\)-Portrait-Portr_05525.tif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ETH-BIB-Maxwell,_James_Clerk_(1831-1879)-Portrait-Portr_05525.tif). Dominio público.
- Turner, Orren Jack. (1947). Retrato de Albert Einstein [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_Head.jpg. Dominio público.
- Usuario:NobbiP. (2011). 25 Euro Österreich 2009 Astronomie 85. Moneda conmemorativa del Año Internacional de la Astronomía [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:25_Euro_Österreich_2009_Astronomie_85.jpg. CC BY-SA 3.0.

EL TAMAÑO DE LAS COSAS

(EL SEÑOR TALES)

Todo en su medida y armoniosamente
Frase en el frontispicio del templo de Apolo en Delfos

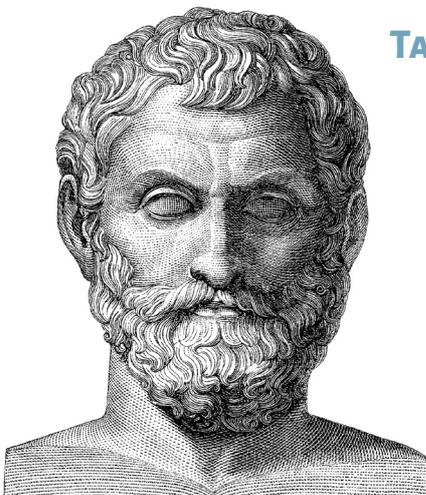
3.1. Introducción

La física busca explicar los fenómenos naturales y para ello es necesario cuantificar los hechos observados, es decir, debemos saber no solo de qué estamos hablando, sino también de cuánto. Nuestro afán por medir, sin embargo, nunca debe hacernos perder de vista que el objetivo de las ciencias es *entender* la esencia de los fenómenos naturales.

En este capítulo se presentan los conceptos de *magnitud* y de *unidad de medida*. Se exponen algunos métodos de medición indirecta de distancias como introducción a las mediciones en el universo. Aprovechando las semejanzas entre un microscopio óptico y un microscopio electrónico, se muestra cómo pueden observarse imágenes del orden de los micrómetros, como los detalles del ala de una abeja. La hipótesis de de Broglie que introduciremos, nos permite avanzar en la descripción del estudio de las partículas elementales usando los aceleradores de partículas como gigantes microscopios para ver el interior de otras partículas.

3.2. Magnitudes físicas

Una *magnitud física* es toda propiedad física susceptible de ser medida, como por ejemplo el tiempo t , la velocidad v , la masa m , la temperatura T , la fuerza F . Las magnitudes físicas se clasifican en escalares y vectoriales.



Fuente: W. Meyer, ca 1875.

TALES

Tales (624 a. C. – 546 a. C.) filósofo presocrático griego de Mileto en Asia Menor, uno de los siete sabios de Grecia. Es considerado el primer filósofo en la tradición griega. Dice Bertrand Russell «la filosofía occidental comienza con Tales». Intentó explicar los fenómenos naturales sin hacer referencia a la mitología y fue muy influyente en este respecto. Muchos filósofos presocráticos lo siguieron en su intento de dar una explicación racional de la naturaleza. Con el tiempo, el rechazo a las explicaciones mitológicas por parte de Tales se convirtió en una idea esencial de la revolución científica. Fue el primero en definir principios generales y establecer hipótesis. Utilizó la geometría para resolver problemas como el cálculo de la altura de las pirámides y la distancia de los barcos a la costa. Se le atribuye el primer uso del razonamiento deductivo aplicado a la geometría, derivando cuatro corolarios del llamado *teorema de Tales*. Como resultado, ha sido aclamado como el primer matemático verdadero y es la primera persona a la que se le atribuye un descubrimiento matemático.

- *Magnitudes escalares*: son aquellas que quedan completamente determinadas a partir del conocimiento de su valor expresado como una cantidad (un número real) seguida de una unidad. Por ejemplo, si decimos que la masa de un objeto es 3 kg (tres kilogramos), la misma está completamente definida.
- *Magnitudes vectoriales*: son aquellas que no quedan completamente determinadas por su valor (cantidad y unidad), sino que es necesario indicar la dirección y el sentido de su actuación y su punto de aplicación. Cuando decimos que sobre un objeto actúa una fuerza de 3 N (tres newton) no estamos dando toda la información; nos falta decir hacia dónde está dirigida esa fuerza. Esto significa que necesitamos utilizar vectores.

3.3. Mediciones

Las mediciones son una parte fundamental del proceso científico que debe continuar con una explicación cualitativa de lo que estamos observando. Así, por ejemplo, el análisis de la precisión con que medimos el período de un péndulo no nos debe hacer olvidar cuál es el fenómeno físico que estudiamos.¹ En ese caso, se trata de una masa suspendida por un hilo delgado que oscila alrededor de una posición de equilibrio y que presenta propiedades que facilitan el estudio del movimiento armónico simple, el intercambio de energía mecánica, la composición y descomposición de las fuerzas y la dinámica de un cuerpo en movimiento. También es un instrumento que nos permite medir la aceleración de la gravedad g , en cada lugar.

¹ Si medimos cuidadosamente el período de un péndulo podemos descubrir que, para oscilaciones pequeñas, el período no depende de la amplitud de las oscilaciones. Si esta amplitud aumenta, el período sí depende de la amplitud.

Las magnitudes

El largo de una varilla, el ancho de una habitación, la altura de una persona son ejemplos de cantidades que se miden utilizando el mismo procedimiento (por ejemplo, empleando una regla). Todas esas cantidades pertenecen a una misma clase de magnitud, la longitud.

El espesor de una moneda y la duración de un partido de fútbol no son cantidades de una misma clase de magnitud: el primero se mide con una regla y es una longitud; la segunda se mide con un reloj y es un tiempo. Longitud y tiempo son magnitudes de distinta clase. Cada clase de magnitud tiene un procedimiento característico que nos permite medirla. Para hacerlo es necesario definir, para cada clase de magnitud, una unidad: el metro (para longitudes), el segundo (para tiempos) y el kilogramo (para masas) son las unidades fundamentales del llamado Sistema Internacional de Unidades (si), empleado actualmente por los científicos (Maiztegui, 2001).

A partir del 20 de mayo de 2019 las unidades elegidas para las cantidades base se han definido en términos de constantes invariantes de la naturaleza, como la velocidad de la luz en el vacío y la carga del electrón, que se puede observar y medir con gran precisión.

Este sistema reemplaza el de los patrones, que se guardaban con sumo cuidado en algún lugar, tales como el prototipo del kilogramo o de metro patrón que se guardaban en París. La preocupación por la estabilidad de estas muestras llevó a una revisión de la definición de las unidades base en términos de constantes de la naturaleza.

La fiabilidad del SI depende no solo de la medición precisa de los estándares para las unidades base en términos de varias constantes físicas de la naturaleza, sino también de la definición precisa de esas constantes. El conjunto de constantes subyacentes se modifica a medida que se encuentran constantes más estables, o puede medirse con mayor precisión. Por ejemplo, en 1983 el patrón de distancia se redefinió como la distancia que la luz se propaga en el vacío en una fracción dada de segundo, por lo que el patrón puede reproducirse en cualquier laboratorio del mundo.

Medir es una operación importante no solo para la ciencia, sino también para la vida diaria. La medición de distintas cantidades ha sido una necesidad básica desde el comienzo de los tiempos. De hecho, la historia de la humanidad muestra que el interés por medir surge en primer lugar a partir de la necesidad de cuantificar los bienes que el hombre intercambiaba con sus semejantes. Por otra parte, los griegos y otros pueblos antiguos vieron la importancia de medir terrenos y campos para ordenar las actividades agrícolas. Un ejemplo de los significativos resultados que se derivan de esas inquietudes es el desarrollo de la geometría, en particular, el conocido teorema de Pitágoras.

El comercio de bienes también requería de mediciones precisas. Así para el trueque era necesario medir las cantidades que se intercambiaban entre las personas, lo que se hacía, por ejemplo, pesando los objetos. Supongamos que un pueblo cultivaba trigo y sus vecinos cultivaban cebada. Para intercambiarlos, era necesario establecer los valores relativos y luego medir las cantidades a intercambiar. Aun cuando se utilizara algún tipo de moneda para efectuar los pagos, como polvo o pepitas de oro o sal, para hacer pagos justos era necesario pesar el oro o la sal.²

La medición es un proceso básico que consiste en comparar una determinada magnitud física con un patrón seleccionado. Así se determina cuántas veces el patrón está contenido en esa magnitud. Por ejemplo cuando decimos que la distancia desde Bariloche hasta Llao Llao es de 26.000 *metros* (26 *km*) queremos decir que la unidad de medida metro cabe 26.000 veces en la distancia considerada. La magnitud que nos interesa queda expresada en función de cuántas veces ella contiene a la unidad elegida. Por ejemplo, si tomamos como unidad una vara que mide 1 *m* y decimos que un árbol mide 3 *m* de altura es porque la unidad de medida 1 *m* cabe tres veces en la altura del árbol.

Las unidades elegidas para medir las distintas magnitudes estuvieron en el pasado ligadas a la anatomía humana o a experiencias de la vida cotidiana. En varios países la longitud se medía en codos, que era la longitud desde el codo hasta el extremo de la mano abierta (codo real) o del puño cerrado (codo vulgar) o también en pies, que perdura hasta nuestros días en los países anglosajones y en, aquel entonces, correspondía a la longitud del pie de algún rey. Según la longitud que quisiera medirse, muchas veces debían inventarse otras unidades más grandes o más pequeñas. Por ejemplo, en Inglaterra para expresar una distancia corta se inventaron las pulgadas, que corresponden a la distancia entre los nudillos del dedo pulgar; para distancias intermedias en España se usaba la *cuarta* (distancia entre los extremos del pulgar y el meñique con la mano extendida) o el *jeme* (distancia entre los extremos de los dedos pulgar e índice).

En España y demás países de habla hispana, incluido el nuestro, cuando no existían medios de transporte motorizados y la gente se movía a pie o caballo, era común medir las distancias grandes en *leguas*, equivalente a 5.572 *m* (una hora de marcha a pie). Por su parte en los países de habla inglesa se usa aún hoy la *milla*, que es la distancia recorrida en mil pasos. Estos usos produjeron malos entendidos y dificultades ya que estas definiciones daban lugar a medidas diferentes en cada lugar. Después de una larga evolución hoy se usa cada vez más el llamado Sistema Internacional (SI) que define las siguientes unidades fundamentales:

2 La palabra *salario* deriva de que en algunas culturas de la Antigüedad el medio de pago del trabajo, era la sal.

Tabla 3.1. Sistema Internacional

Magnitud física básica	Símbolo dimensional	Unidad básica	Símbolo	Observación
Longitud	L	metro	m	Definido a partir del valor de la velocidad de la luz en el vacío y la definición del segundo (ver más abajo).
Tiempo	T	segundo	s	Se define a partir del valor de la frecuencia de una determinada transición electrónica en un isótopo del cesio.
Masa	M	kilogramo	kg	Es la masa del cilindro patrón custodiado en la OIPM, Sèvres. Equivale a la masa de un litro de agua pura a 14,5°C o 286,75 K.

Estas unidades tienen aceptación universal y se establecen en las reuniones periódicas de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). Analizaremos ahora la medición de las magnitudes longitud, masa y tiempo.

3. 4. Medición de longitudes

La unidad de longitud del Sistema Internacional (SI) es el metro, establecido por primera vez por la Academia de Ciencias de Francia en 1791 y definido como *la diezmillonésima parte de la cuarta parte del meridiano terrestre* (distancia que separa el polo de la línea del ecuador terrestre). En 1889 una expedición francesa realizó averiguaciones para obtener el valor de dicha longitud, a partir de entonces se fabricó el *metro patrón*, una barra de platino e iridio que se encuentra depositada en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (París).

En 1889 la CGPM adoptó nuevos prototipos para el metro y, después, para el kilogramo, que se materializaron en un metro patrón de platino e iridio depositados en la Oficina de Pesos y Medidas, en Sèvres, en las afueras de París. La existencia de

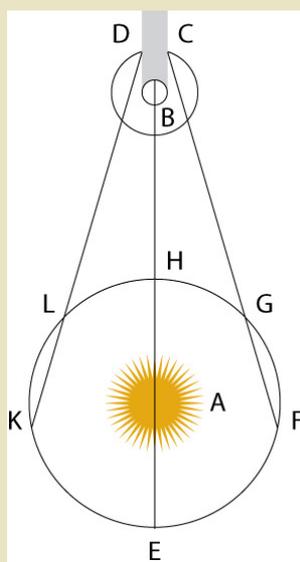


Figura del trabajo de Römer en la Academia de Ciencias de París, en 1676. Digitalización de Gregors, 2011.

La velocidad de la luz: 1675-1983

Galileo intentó medir la velocidad de la luz y concluyó que solo podía afirmarse que es mayor que la del sonido. Dado su elevado valor, se necesitaban grandes distancias para medir el tiempo que tarda en recorrerlas. La primera estimación fue realizada por Römer en 1675, usando un método astronómico.

Observó el eclipse, D, y la reaparición, C, de la luna de Júpiter I o, B, desde diferentes posiciones (E, F, G, H, L, K) de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, A. Notó que los instantes de ocultamiento por Júpiter se anticipaban o retrasaban respecto de los tiempos calculados, según Júpiter estuviera más cerca o más lejos de la Tierra. Atribuyó esto a que la luz tarda menos en llegar a la Tierra cuando Júpiter está más próximo. Como el valor aproximado del diámetro de la eclíptica y de la distancia Tierra-Júpiter era conocido, estimó para C el valor $2,25 \times 10^8 \text{ m/s}$. Hubo posteriores mediciones de Bradley (1728, aberración estelar) y Fizeau (1849, primer método terrestre, rueda dentada). Foucault (1862, espejo giratorio), Michelson (1882 interferometría) y en 1927 aumentó la precisión del método de Foucault y obtuvo $2,99798 \times 10^8 \text{ m/s}$. Como la luz es radiación electromagnética, a partir de 1940, pudieron hacerse mediciones precisas, usando radiación con λ del orden de los centímetros, en cavidades resonantes (como el horno de microondas) con frecuencias del orden de 10^{10} Hz . Actualmente la velocidad de la luz se considera una constante universal, y el metro se define como la distancia que recorre la luz en 299.792.458 ésimos de segundo.

un patrón custodiado en París obligaba a los países adherentes al sistema métrico a contar con sus propios patrones, copias del patrón o estándar de París. Estos estándares nacionales debían viajar a París para ser calibrados.

Mientras tanto, los físicos avanzaron en la medición de la velocidad de la luz. En 1983 la misma convención adoptó la velocidad de la luz como una constante de referencia. Habiendo establecido una unidad de tiempo mediante el uso de un reloj atómico, la velocidad de la luz permitió definir con gran precisión una unidad de longitud, el metro.

La definición adoptada en la decimoséptima CGPM en 1983 es que el metro corresponde a la distancia recorrida por la luz en el vacío en $1 / 299\,792\,458$ partes de un segundo (Recordemos que: $v = e / t \rightarrow e = vt \rightarrow 1\text{ m} = (299\,792\,458\text{ m/s}) / (299\,792\,458\text{ s})$). La tabla 3.2 muestra los submúltiplos del metro en el SI.

Tabla 3.2. Submúltiplos del metro en el SI

Valor	Símbolo	Nombre
10^{-1} m	dm	decímetro
10^{-2} m	cm	centímetro
10^{-3} m	mm	milímetro
10^{-6} m	μm	micrómetro
10^{-9} m	nm	nanómetro
10^{-12} m	pm	picómetro
10^{-15} m	fm	femtómetro
10^{-18} m	am	attómetro
10^{-21} m	zm	zeptómetro
10^{-24} m	ym	yoctómetro

Actividad 3.1.

¿Qué unidades son apropiadas para expresar el radio atómico?

La tabla 3.3 muestra un panorama de las distintas longitudes que pueden medirse en la vida diaria, en la física microscópica y en la astronomía, que van desde 10^{-17} metros (el radio de los quarks, partículas fundamentales de las cuales están hechos los protones y los neutrones) hasta 10^{26} metros (radio del universo). Analizaremos cada una de estas escalas, comenzando por las dimensiones del cosmos, es decir de los objetos que son accesibles a nuestra observación directa.

Tabla 3.3. Longitudes

Óptica	Instrumento	Metros	Sistemas	
Telescopios	Dinámica planetaria Velocidad de la luz	10^{26}	Universo	Macro cosmos
		10^{22}	Grupos de galaxias	
		10^{19}	Galaxias	
		10^{12}	Sistema solar	
Ojo humano	Cinta métrica	$10^1\text{-}10^3$	Casas, terrenos, Campos	Cosmos
	Regla graduada	10^0	Mesa	
	Calibre	10^{-3}	Tuercas y tornillos	
Microscopio	Escala graduada del instrumento	$10^{-8}\text{-}10^{-10}$	Microorganismos, átomos, moléculas	Micro cosmos
Aceleradores	Colisiones de partículas	$10^{-14}\text{-}10^{-17}$	Átomos, núcleos, protones, quarks	

3.4.1. El rango de los metros

Cuando un carpintero debe medir una mesa u otro objeto de uso cotidiano utiliza una cinta métrica. Para ello hace coincidir el origen de la cinta (cero) con un extremo del mueble, buscando luego la marca de la cinta más próxima al otro extremo de este. La cinta métrica metálica tiene generalmente una longitud de dos, tres o cinco metros y tiene marcadas divisiones de un milímetro. La *apreciación* del instrumento es un milímetro.

Para medir un terreno urbano también podemos valernos de una cinta métrica, en este caso de mayor longitud, normalmente unos veinticinco metros aunque hay cintas de cincuenta y hasta de cien metros, *de agrimensor*. En estas cintas la apreciación suele ser de un centímetro. Estas cintas han sido reemplazadas en los últimos años por instrumentos ópticos basados en láseres, que tienen mayor precisión y son más cómodos de usar.

Figura 3.1. Cinta métrica graduada en centímetros; la apreciación es de 1 mm

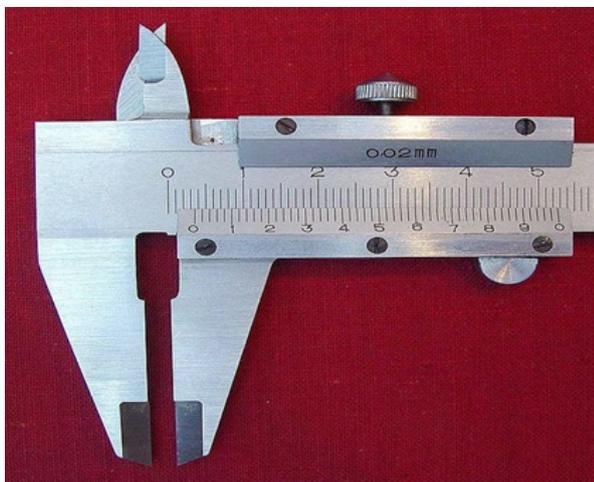


Fuente: Coyau, 2012.

3.4.2. El rango de los milímetros

Para medir objetos con dimensiones del orden de los milímetros (insectos, tornillos o tuercas) se usa un *calibre* o también un *tornillo micrométrico*. La figura muestra un calibre de uso corriente.

Figura 3.2. Calibre con escala de Vernier



Fuente: ArtMechanic, 2004.

La apreciación de un calibre normalmente es de un milímetro. Para aumentar la precisión de las mediciones, es usual que el calibre tenga adosada una *escala de Vernier* o nonio. Seguidamente veremos cómo funciona esta escala.

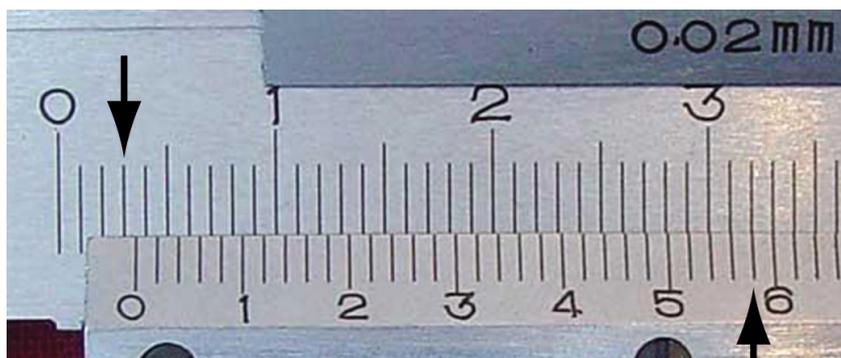
Escala de Vernier

La escala Vernier es una escala pequeña, móvil, colocada junto a la escala principal del instrumento de medición y fue inventada por Pierre Vernier (1580-1637). Permite hacer mediciones con una precisión igual a una fracción de la más pequeña división de la escala principal del instrumento. Las escalas Vernier se usan en muchos instrumentos, un ejemplo específico es un calibre como el que podemos ver en algunas ferreterías.

Una vista ampliada del calibre permite observar una leyenda que dice $0,02\text{ mm}$ y que corresponde a la *apreciación* del instrumento. En la figura 3.3 la lectura que se ve es $3,58\text{ mm}$ y se obtiene de la siguiente manera

- la cantidad 3 mm es la lectura en la escala superior fija.
- la cantidad $0,58\text{ mm}$ se obtiene de la regleta desplazable inferior y corresponde al punto de alineación más próximo entre las dos escalas (flechas negras).

Figura 3.3. Calibre con escala de Vernier o nonio



Fuente: Adaptado de ArtMechanic, 2004.

El nivel de precisión de un instrumento que tiene una escala Vernier depende de la diferencia entre el tamaño de la división más pequeña en la escala principal (1 mm) y el tamaño de la división más pequeña en la escala de Vernier que se obtiene a partir de la división de la longitud de la escala, 49 mm , por la cantidad de divisiones, en nuestro caso 50, lo que nos da $0,98\text{ mm}$. Así la diferencia buscada es de $0,02\text{ mm}$, que es la apreciación del instrumento.

3.4.3. El rango de 10^{-6} m a 10^{-10} m

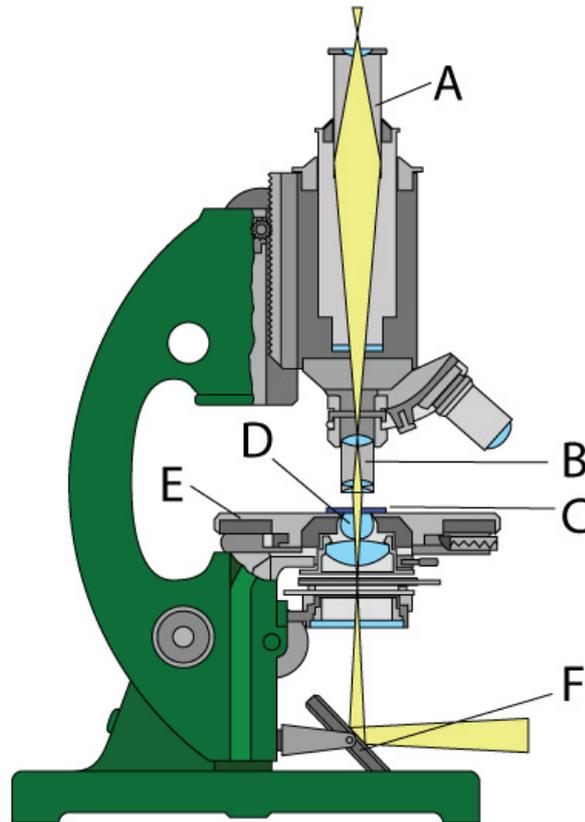
Para medir longitudes más pequeñas, debemos usar un instrumento óptico delante de los ojos, como una lupa o un microscopio. Este es un sistema óptico que

La luz y la visión

Estos fenómenos intrigan a la humanidad desde muy antiguo. Hace tiempo se pensaba que la luz estaba constituida por partículas que partían de nuestros ojos e iluminaban los objetos y así se hacían visibles. Aún antes de comprender la naturaleza de la luz, se comprendió que vemos los objetos porque a nuestros ojos llega la luz emitida por distintas fuentes (el Sol, un lamparita, una linterna) y que estos reflejan. Este principio es el que se utiliza para el funcionamiento de los microscopios. Una fuerte limitación está dada por el hecho de que no podemos ver objetos más pequeños que la longitud de onda de la luz con que iluminamos.

transforma un objeto en una imagen, amplificando detalles característicos del objeto. Con el microscopio óptico (figura 3.4) se pueden resolver detalles del orden de un micrón ($1\mu = 1 \times 10^{-6} m$).

Figura 3.4. Microscopio óptico. A) ocular, B) objetivo, C) portaobjeto, D) lente de iluminación, E) sujeción del objeto, F) espejo de iluminación



Fuente: Tomia, 2008.

3.4.4. Poder de resolución de los instrumentos

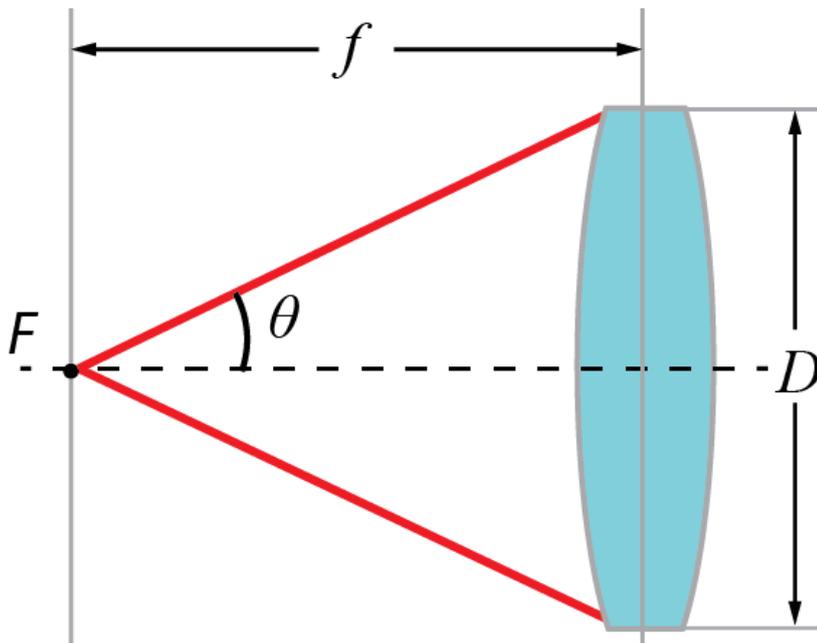
El concepto de poder de resolución está relacionado con la capacidad de distinguir detalles finos en una imagen. En otras palabras, es la distancia mínima d a la cual podemos distinguir claramente dos puntos como entidades separadas. La resolución está limitada por el fenómeno de difracción de la luz y viene dado por la expresión aproximada

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (3.1)$$

donde λ es la *longitud de onda* de la luz (color), θ el *ángulo de apertura* en radianes y n el índice de refracción del medio en que opera el microscopio.³ En la figura 3.5, f es la distancia focal y D la apertura.

³ La difracción es un fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de estas al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija. La difracción de las ondas sonoras es lo que permite que el sonido pueda doblar la esquina, es decir que podamos escuchar música o una conversación aunque no veamos la fuente de sonido.

Figura 3.5. Resolución del microscopio



Fuente: Moxfyre, 2008.

Normalmente, se toma para λ el valor de 550 nm , aproximadamente el centro del espectro visible, que corresponde a la luz verde. Si el microscopio trabaja en aire, la apertura práctica máxima es de $0,95$ y si la óptica del microscopio trabaja sumergida en aceite –que tiene un índice de refracción mayor que el aire– la apertura puede ser de hasta $1,5$. Ello implica que incluso el mejor microscopio óptico está limitado a una resolución de unos $0,2\ \mu\text{m}$. Una manera de salvar esta dificultad consiste en usar el microscopio electrónico, que *ilumina* los objetos con un haz de electrones. Veremos en el párrafo siguiente que estos se comportan como luz de longitudes de onda menores que las ya mencionadas.

3.5. El microscopio electrónico

En 1924 y como un aporte a la comprensión de la estructura del átomo que por esos años presentaba serias dificultades, el físico francés Louis de Broglie (1892-1987) postuló que los electrones se comportan como una onda, es decir tal como se comporta la luz. La naturaleza precisa de estas ondas de electrones no puede ser comprendida en el marco de la física clásica y su descripción se hace mediante la mecánica cuántica, un tema que se trata en cursos más avanzados de física. Para describir un microscopio electrónico nos basta saber que la relación entre la longitud onda de de Broglie y la velocidad v de la partícula está expresada por:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (3.2)$$

donde λ es la *longitud de onda asociada*, m es la masa de la partícula, que para el electrón es $9,1 \times 10^{-31}\text{ kg}$ y h es una constante natura llamada *constante de Planck*, $h = 6,6 \times 10^{-34}\text{ joule} \cdot \text{s}$. La velocidad de los electrones depende de la intensidad del campo eléctrico que los acelera, pero nunca puede sobrepasar la velocidad de la luz.

En el microscopio electrónico un haz de electrones incide sobre la muestra que quiere observarse y, de la interacción de estos electrones con sus átomos, surgen

señales que son captadas por un detector o bien proyectadas directamente sobre una pantalla. De esta manera puede verse con más detalle y, consecuentemente, medir. Si las partículas son electrones acelerados en un potencial eléctrico de $4.000V$, podemos determinar su velocidad v recurriendo a la conservación de la energía: después de recorrer una diferencia de potencial V la energía potencial

eV inicial de los electrones y su energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$, satisfacen la relación:

$$\text{Energía cinética final} = \text{energía potencial inicial}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

de donde sigue

$$v = \sqrt{2eV / m}$$

De acuerdo con la relación de de Broglie (3. 2) la longitud de onda asociada será

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

Y por tanto

$$\lambda = 1,9 \times 10^{-11} m \quad (3.3)$$

La longitud de onda de la luz visible se encuentra entre los límites

$$\lambda = 780nm = 7,8 \times 10^{-7} m \text{ (para el rojo) y}$$

$$\lambda = 380nm = 3,8 \times 10^{-7} m \text{ (para el violeta),}$$

es decir que la longitud de onda de los electrones acelerados con $4.000V$, es 10.000 veces más pequeña que la correspondiente a la luz visible y por lo tanto un microscopio que emplee ese tipo de radiación tendrá mucho mayor resolución que un microscopio óptico.

Dentro de la familia de los microscopios electrónicos, se encuentra el *microscopio electrónico de barrido* (SEM, por sus siglas en inglés) y el *microscopio electrónico de transmisión* (TEM). Cada uno de ellos posibilita el estudio de diferentes características de una muestra dada. El SEM provee información sobre morfología y características de la superficie, mientras que con el TEM puede observarse la estructura interna y otros detalles. En estos microscopios se aplica una fórmula similar a la que ya vimos para determinar el poder de resolución del instrumento, que es proporcional a la longitud de onda de los electrones.

3.5.1. Comparación entre un microscopio óptico y un microscopio electrónico

Un microscopio óptico y un microscopio electrónico son semejantes en cuanto a que ambos permiten amplificar la imagen de objetos que son indistinguibles a simple vista. La diferencia fundamental entre ellos es la naturaleza de la iluminación. Mientras el microscopio de luz utiliza un haz de luz visible, el microscopio electrónico emplea un haz de electrones de muy corta longitud de onda, que le permite una mayor resolución.

La tabla 3.4 muestra una comparación entre ambos tipos de microscopio. Cabe destacar que esta involucra características generales de los microscopios electrónicos y no considera las diferencias entre TEM y SEM.

Tabla 3.4. Comparación entre distintos tipos de microscopios

	Óptico	Electrónico
Iluminación	haz de luz visible	haz de electrones
Longitud de onda	200nm-750nm	0,0037nm-0,0086nm
Lentes	vidrio	electromagnéticas
Medio	atmósfera	vacío
Resolución	200nm	0,3nm
Aumento	10 X - 2.000 X	100 X- 450.000 X
Focalización	mecánica	electromagnética

3.5.2. Microscopía electrónica de transmisión (TEM) y de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de transmisión TEM permite estudiar la estructura atómica de muestras delgadas mientras que el de barrido SEM permite conocer la morfología de una superficie.

Figura 3.6. Microscopio electrónico de barrido de la Universidad de Gotinga

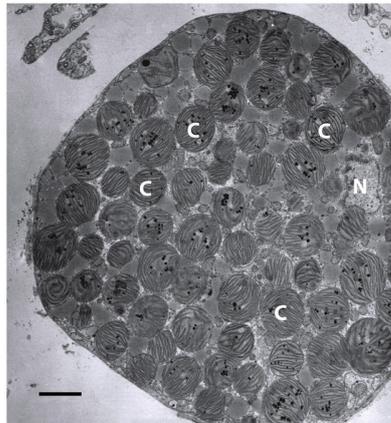


Fuente: Daniel Schwen, 2007.

Imágenes de microscopía electrónica

En el microscopio electrónico de barrido (SEM), el haz de electrones recorre la superficie de una muestra de material o de un objeto. Los electrones reflejados permiten armar la imagen de la superficie, como se aprecia en la figura 3.7.

Figura 3.7. Una célula de los túbulos digestivos de *Elysia crispata*, sinónimo: *Elysia clarki*, densamente empaquetada con cloroplastos secuestrados (C) y núcleo celular (N). Imagen microscópica electrónica. Barra de escala: 3 μm



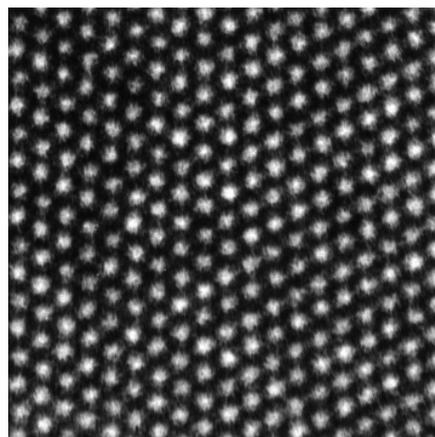
Fuente: Nicholas Curtis, 2011.

Por su parte, el microscopio electrónico de transmisión TEM permite ver detalles de la estructura atómica de un material. En la figura 3.8, cada punto blanco representa una columna de átomos alineada paralelamente al haz de electrones. La resolución de este microscopio es de 0,19 nm .

De acuerdo a lo que mencionamos anteriormente, la longitud de onda de los electrones depende de su velocidad y por lo tanto del voltaje empleado para acelerarlos. En el caso de la figura el voltaje de aceleración es de 200 kV y la longitud de onda correspondiente es $\lambda = 0.0025\text{nm} = 0.25 \times 10^{-11}\text{m}$.

Como el radio atómico es del orden de $a_0 \approx 5.29 \times 10^{-11}\text{m}$, con esos electrones podríamos observar átomos individuales, que de hecho se ven en la fotografía.

Figura 3.8. TEM. Imagen de un material metálico donde se distinguen columnas de átomos



Fuente. Francisco Lovey, CAB-IB.

Sin embargo la energía cinética de los electrones (200 keV) es suficiente para producir daño en el material y eso limita las posibilidades de observar más detalles. Los puntos que se observan en la fotografía corresponden a columnas de átomos que se encuentran ligados en un cristal.

De acuerdo a lo que mencionamos anteriormente, la longitud de onda de los electrones depende de su velocidad y por lo tanto del voltaje empleado para acelerarlos.

En el caso de la figura, el voltaje de aceleración es de 200 kV y la longitud de onda correspondiente es $\lambda = 0.0025\text{ nm} = 0.25 \times 10^{-11}\text{ m}$.

Como el radio atómico es del orden de $a_0 \approx 5.29 \times 10^{-11}\text{ m}$, con esos electrones podríamos observar átomos individuales, que de hecho se ven en la fotografía. Sin embargo la energía cinética de los electrones (200 keV) es suficiente para producir daño en el material y eso limita las posibilidades de observar más detalles.

3.6. Microscopio de efecto túnel

Con el avance de la ciencia y de la tecnología, en la década de 1980 se desarrolló el llamado *microscopio de efecto túnel* que permite obtener imágenes de la superficie de un material con detalles a nivel atómico. Por su desarrollo, sus inventores Gerd Binnig y Heinrich Rohrer obtuvieron el Premio Nobel de Física en 1986. El sistema puede dar una resolución lateral de $0,1\text{ nm}$ y una resolución en profundidad de $0,01\text{ nm}$. Con esta resolución, pueden crearse imágenes de los átomos individuales dentro de los materiales. A diferencia del SEM y del TEM, este microscopio puede ser utilizado no solo en ultra-alto vacío, sino también en el aire, el agua, y otros ambientes líquidos o gaseosos, y a temperaturas que van desde cerca de cero K a unos pocos cientos de grados Celsius.

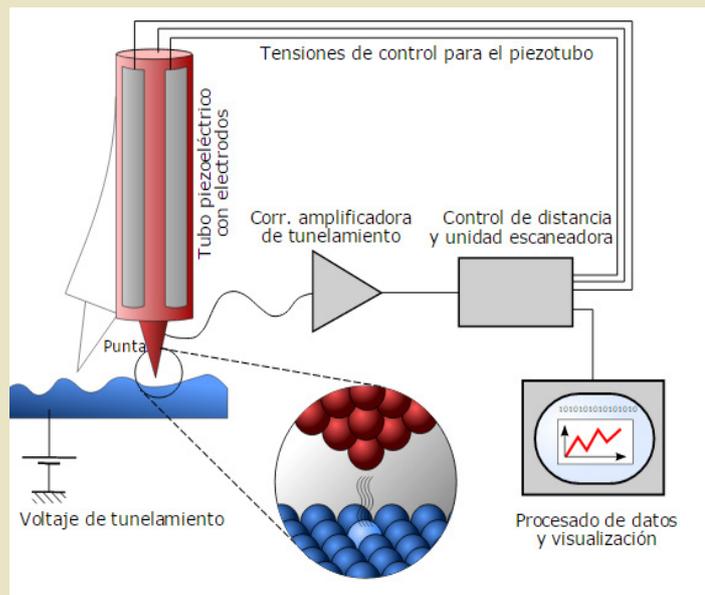
En el recuadro, se ilustra el funcionamiento del instrumento. El paso de los electrones produce una corriente eléctrica –corriente túnel– que es una función de la posición de la punta, el voltaje aplicado y la densidad local de los estados electrónicos de la muestra. La información se adquiere mediante el control de la corriente a medida que la punta explora la superficie, y por lo general se muestra en forma de una imagen. Una de las mayores dificultades es que requiere superficies extremadamente limpias y estables, además de puntas afiladas, estricto control de vibraciones, y una electrónica sofisticada; sin embargo, muchos laboratorios en el mundo han construido su propio equipo.

Microscopio de efecto túnel

Se basa en el *efecto túnel cuántico*. Cuando una punta metálica conductora se acerca a la superficie a examinar una diferencia de voltaje aplicada entre ambos puede permitir que los electrones pasen a través del vacío entre ellos. Como hay un menor potencial en el interior de la muestra y de la punta, los electrones están atrapados en el interior de cada material y el espacio vacío entre ellos representa una barrera de potencial, que deben cruzar por el efecto túnel (ver figura).

La punta metálica es el objeto rojo cerca de la superficie de la muestra, unida al circuito eléctrico. La corriente de túnel decae exponencialmente con la distancia de la punta a la muestra. A la izquierda se muestra la punta inserta en el soporte.

Microscopio de efecto túnel



Fuente: Michael Schmid y Grzegorz Pietrzak, 2011.

3. 7. Más mediciones en el microcosmos: 10^{-14} - $M^{-17}m$

Para estudiar el interior de los átomos deben utilizarse partículas cuya *longitud de onda asociada* sea menor que el tamaño de los átomos. Para ello es necesario acelerarlas a grandes velocidades ya que, como vimos, a mayor velocidad corresponde una menor longitud de onda. Los aceleradores de partículas actúan como poderosas linternas que iluminan el interior de los átomos y de los núcleos atómicos.

En el rango de $10^{-14} - 10^{-17} m$ el poder de resolución de los microscopios anteriores no es suficiente, y para explorar el mundo subatómico los *nuevos microscopios* son los *aceleradores de partículas*. Si bien para el estudio de las partículas fundamentales los físicos aceleran diversas clases de partículas, nos concentraremos aquí en el caso de los aceleradores de electrones, ya que estos pueden considerarse una extensión de los microscopios electrónicos que vimos más arriba.⁴

La aceleración de electrones mediante una diferencia de potencial fija-voltaje- tiene limitaciones prácticas derivadas del uso de la alta tensión eléctrica. Por ello, a partir de cierta energía, se usan los llamados *aceleradores lineales* (LINAC), que funcionan usando una *onda electromagnética* que se propaga en un tubo metálico en vacío. Se trata de una onda similar a las que permiten el funcionamiento de los hornos de microonda de uso doméstico. En el Centro Atómico Bariloche funciona un acelerador de ese tipo que

acelera electrones hasta una energía de $1eV = 1,602 \times 10^{-19} \text{ joule}$ (electrónvoltios),
 $25 MeV = 25 \text{ millones de } eV$,

es decir, como si hubiéramos usado una diferencia de potencial de 25 millones de voltios. La longitud del acelerador es de 3 m y los electrones alcanzan una velocidad $v = 0,99979 c$, muy cercana a la velocidad de la luz. Sin embargo, veremos que en otros laboratorios, hay máquinas que aceleran partículas a energías mayores y por lo tanto a velocidades aun más grandes, sin sobrepasar la velocidad de la luz, un límite impuesto por la teoría de la relatividad.

El acelerador lineal de electrones más poderoso se encuentra en el Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), en Stanford, Estados Unidos. Tiene una longitud de 3,2 km y puede acelerar electrones y positrones (antipartículas de los electrones, que tienen carga positiva), a energías de $50 GeV = 50 \times 10^9 eV = 50.000 MeV$. Enterrado 10 m bajo tierra, cruza por debajo de una importante autopista. La velocidad de los electrones a la salida de este acelerador es $v = 2,997899999843446 \times 10^8 m/s$ equivalentes a 0,999999999477788 de la velocidad de la luz. La longitud de onda de de Broglie asociada a esas partículas es $2,479654147787082 \times 10^{-17} m = 2.48 \times 10^{-8} nm$. Esto significa que la resolución de un microscopio que utilice esas partículas nos permitiría ver el interior de un protón, cuyo radio se estima en $0,8768 \times 10^{-15} m = 8.768 \times 10^{-7} nm$.

De hecho, en un experimento realizado en 1968 en ese laboratorio pudo establecerse que en el interior del protón hay tres componentes que corresponden a lo que hoy se conoce como *quarks*.

⁴ Se denominan *partículas fundamentales* a los constituyentes últimos de la materia, entre ellos, electrones y quarks (capítulo 7).

Figura 3.9. Vista aérea del acelerador slac de 3,2 km



Fuente: Peter Kaminski, U.S. Geological Survey, 2004.

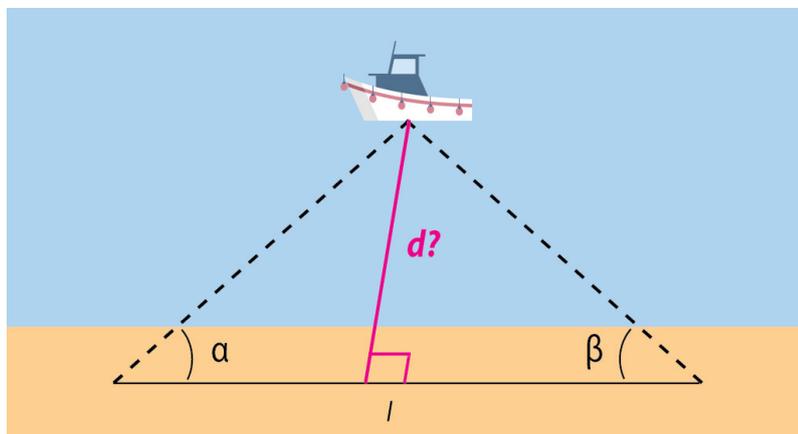
3.8. Mediciones astronómicas. 10^{12}m - 10^{26}m

La primera magnitud astronómica medida fue el radio de la Tierra, en el siglo III a. C. por el matemático, astrónomo y geógrafo griego Eratóstenes (276 a. C.– 194 a. C.). El procedimiento se explica en el capítulo 4. Esta medición corresponde a la categoría de *medición indirecta* como otras en las que se miden objetos que no podemos tocar; otro ejemplo es la medición de la altura de las pirámides de Egipto. Basándose en sus conocimientos de trigonometría Tales de Mileto (625 a. C. – 547 a. C.) aplicó un ingenioso método para determinar la altura de la pirámide de Keops (ver cuadro sobre Tales).

3.8.1. Mediciones en el Sistema Solar

El método de Tales muestra una forma de medir algo que no puede tocarse; veremos ahora otros casos similares. Supongamos que queremos determinar desde la costa, la distancia a la que se encuentra el barco de la figura 3.10. Podemos resolver el problema con ayuda de la trigonometría. Para ello debemos medir la línea de base de longitud l . Si el barco se encuentra en movimiento, una solución práctica consiste en que dos observadores parados en los extremos de la línea midan, al mismo tiempo, los ángulos α y β . Nótese que el ángulo central es un ángulo recto.

Figura 3.10. Línea de base l para medir la distancia d .



Fuente: basado en 4C, 2006.

A partir de la figura podemos deducir la relación

$$l = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta} \quad (3.4)$$

De donde, usando identidades trigonométricas, sigue que

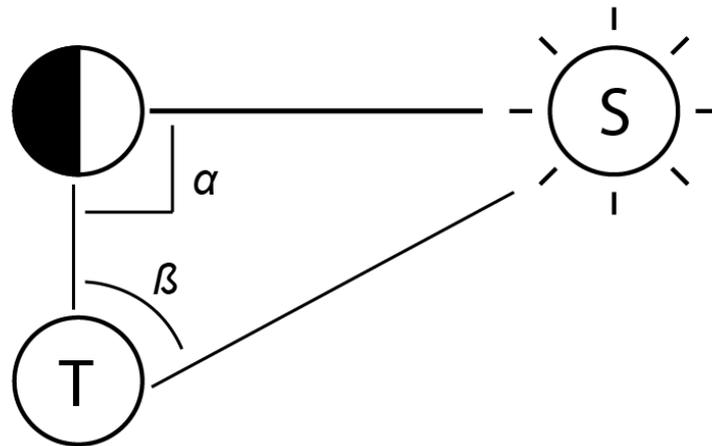
$$d = \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} l \quad (3.5)$$

El primer intento por determinar la distancia Tierra-Sol (la unidad astronómica UA) fue realizado por Aristarco de Samos (310 a.C. – 230 a.C.). Ya en esa época se sabía que las fases lunares se originan en el movimiento de la Luna en torno a la Tierra y su posición respecto del Sol. Se sabía también que durante los cuartos creciente y menguante, la Luna está *en cuadratura* respecto al Sol, es decir que, en esa situación, el ángulo α de la figura es de 90° . Aristarco determinó el ángulo β que forman las líneas T-L y el T-S, estimándolo en 87° .

Actividad 3.2.

Repetir la figura 3.11, a escala.

Figura 3.11. Sol y Luna en cuadratura



Fuente: Xenoforne, 2005.

En el capítulo 4 veremos los detalles de los cálculos de Aristarco. Mientras tanto invitamos al lector a encontrar la relación entre la distancia Tierra-Sol d_{TS} , la distancia Tierra-Luna d_{TL} y el ángulo β . Usando esas relaciones, Aristarco calculó que la distancia Tierra-Sol era aproximadamente veinte veces más grande que la distancia Tierra-Luna. Ese cálculo, correcto desde el punto de vista geométrico, se basó en una observación imprecisa, ya que hoy se sabe que el ángulo β es en realidad $89^\circ 50'$ y la mencionada relación entre las distancias es 390. Sin embargo, el resultado original indujo a pensar que el Sol tenía que ser mucho más grande que la Luna pues a pesar de estar más lejos, ambos tienen aproximadamente el mismo tamaño aparente en el cielo. Por ende, tenía sentido suponer que todos los cuerpos menores orbitaban en torno al Sol, lo que llevó a Aristarco a enunciar la primera versión de una teoría heliocéntrica.

El método moderno para la determinación de la distancia Tierra-Sol se basa en la medición de la distancia a los planetas interiores por medio del radar: a partir

de la velocidad de la luz, $c = 299792,458 \text{ km/s}$, la distancia se calcula midiendo el tiempo que tarda la señal en su camino de ida y vuelta. Luego, por triangulación, se determina la distancia Tierra-Sol. Este valor es el que define la *unidad de medida* utilizada para determinar las distancias planetarias.

La tabla 3.5 muestra el valor de algunas magnitudes a las que nos referiremos en este libro.

Tabla 3.5.

Magnitud	Dimensión en m
Radio del universo	$8,8 \times 10^{26}$
Distancia a la galaxia más próxima (Andrómeda)	$9,5 \times 10^{15}$
Radio de nuestra galaxia (Vía Láctea)	$9,5 \times 10^{20}$
Distancia a la estrella más cercana (Alfa Centauri)	$4,1 \times 10^{16}$
Radio de la órbita de Plutón	$5,9 \times 10^{12}$
Radio de la órbita terrestre	$1,5 \times 10^{11}$
Radio de la órbita lunar	$3,84 \times 10^8$
Radio de la órbita de un satélite geoestacionario	$4,22 \times 10^7$
Radio de la Tierra	$6,37 \times 10^6$
Altura de un niño	1×10^1
Radio de un virus	1×10^{-6}
Radio de un átomo	$5,29 \times 10^{-2}$
Radio del protón	1×10^{-15}

3.9. Medición de masas

Como veremos más adelante, la masa de un cuerpo se manifiesta de dos maneras diferentes, como

- *masa gravitatoria*
- *masa inercial*

En el primer caso está asociada a la fuerza de atracción entre masas, de acuerdo a la ley de Newton de gravitación universal; en el segundo está asociada a la dinámica, que veremos en el capítulo 5.

El kilogramo

La primera definición fue introducida durante la Revolución Francesa y especificaba el kilogramo como la masa de un decímetro cúbico de agua destilada a la presión de una atmósfera a la temperatura de $3,98^\circ\text{C}$, punto en el que el agua tiene la mayor densidad. Esta definición es difícil de realizar porque la densidad del agua varía con la presión y las unidades de presión incluyen la masa como factor, lo que introduce una *dependencia circular*. En 1889 el kilogramo se redefinió usando un objeto patrón. El Sistema Internacional de Pesos y Medidas establece como prototipo un cilindro circular recto (altura=diámetro) de 39 milímetros, fabricado con una aleación de 90% Pt y 10% Ir. Se guarda en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas, en Sèvres (París). Las copias oficiales en distintos países se comparan con el prototipo cada cuarenta años. Actualmente se realizan experiencias para definir el kilogramo mediante leyes físicas. Hay dos líneas de investigación: en una se fija el valor del número de Avogadro, y se materializa la unidad de masa con una esfera de silicio casi perfecta en su geometría y composición isotópica, cuyas características dimensionales pueden conocerse con gran exactitud. Se determina el volumen ocupado por la esfera y usando el número de Avogadro, se determina la masa. En la otra línea se fija el valor de la carga del electrón o el de la constante de Planck, y luego, mediante mediciones eléctricas, se materializa el kilogramo utilizando un dispositivo denominado *balanza de Watt*. Este método fue utilizado en octubre de 2018 para definir el nuevo patrón del kilogramo masa.

La ley de Newton de gravitación universal establece que dados dos objetos, uno de masa m_1 y otro de masa m_2 separados por una distancia r , existe una *interacción* entre ellos que se manifiesta como fuerza atractiva y es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Se expresa mediante la relación

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.6)$$

donde $G = 6,67428 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2}$ es la *constante de gravitación universal*.

A partir de esta relación podemos deducir que un cuerpo de masa m ubicado en la superficie de la Tierra ($r = R$, masa M) es atraído por esta con una fuerza

$$F_m = \frac{GM}{R^2} m = gm \quad (3.7)$$

donde definimos

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (3.8)$$

la llamada *aceleración de la gravedad*. La fuerza F_m no es otra cosa que el peso del cuerpo de masa m . En esta expresión hemos supuesto que la Tierra es una esfera perfecta, aunque en realidad la Tierra es una esfera achatada en los polos y por tanto g depende ligeramente del lugar geográfico.

Ahora bien, ¿cómo podemos medir m ? Si suspendemos dos cuerpos en los extremos de una vara que está colgada, a su vez, por su punto medio y vemos que la vara se mantiene equilibrada, podemos decir que ambos cuerpos tienen la misma masa. Si definimos un patrón o unidad de medida para la masa y sus submúltiplos, utilizando una balanza de platillos y equilibrando los platillos, uno de los cuales contiene la masa que queremos medir y el otro el patrón elegido, podemos medir el valor de una masa determinada.

La unidad de masa en el SI es el *kilogramo*. Es la única unidad que emplea un prefijo y la única unidad del SI que todavía se define por un objeto patrón y no por una característica física fundamental. Su símbolo es *kg* y no admite mayúscula, ni punto, ni plural.

También es común que se utilice la palabra kilogramo como unidad de fuerza en el Sistema Técnico, aunque esto debe hacerse bajo el nombre de *kilogramo-fuerza* o *kilopondio*, que es, por definición, el peso de una masa de 1 kilogramo en la gravedad estándar en la superficie terrestre; esto es, $9,80665 m/s^2$. Por eso una masa de 1 *kg* (Sistema Internacional de Unidades), pesa 1 kilogramo fuerza (Sistema Técnico) solamente si la gravedad tiene ese valor.

3.9.1. La balanza

La balanza (palabra que proviene del latín *bis* que significa dos y *lanx* que significa plato) consiste en una palanca de brazos iguales que, mediante el establecimiento de una situación de equilibrio entre los pesos de dos cuerpos, permite medir masas. Al igual que una *romana*, o una *báscula*, es un instrumento de medición que permite medir la masa de un objeto. Para ello se utilizan *patrones de masa* cuyo grado de exactitud depende de la precisión del instrumento. Al igual que en una romana, pero a diferencia de una báscula o un dinamómetro, los resultados de las mediciones no son afectados por variaciones locales de la aceleración de la gravedad.

El rango de medida y precisión de una balanza puede variar desde muchos kilogramos (con precisión de gramos), en balanzas industriales y comerciales; hasta unos gramos (con precisión de miligramos) en balanzas de laboratorio.

3.10. Medición de tiempos

La unidad de medida del tiempo en el SI es el segundo que, hasta 1967 se definía como 1/86400 de la duración del día solar medio entre 1750 y 1890, donde 86.400 es el número de segundos en un día. En esa época se utilizaban relojes de péndulo que superaban considerablemente la precisión de los primitivos de agua y de arena, pero como debían funcionar en posición exactamente vertical, no podían ser utilizados en los buques. Además, su tamaño los hacía poco prácticos para ese uso. Con esos relojes se detectaron irregularidades en la velocidad de rotación de la Tierra, determinadas –en parte– por la fricción de las mareas que la retrasan poco a poco. Es así que cada cien años el día es una milésima de segundo más largo, por lo cual la definición dada más arriba no es estrictamente exacta. Para evitar esa incerteza, en 1967 la Convención Internacional de Pesas y Medidas estableció una definición para el segundo usando lo que se llama un reloj atómico. Determinó que un segundo es la *duración de 9.192.631.770 oscilaciones de la radiación emitida en la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del isótopo 133 del átomo de cesio, a una temperatura de 0*.

La tabla 3.6. Muestra los submúltiplos del segundo en el SI.

Submúltiplos del segundo		
Valor	Símbolo	Nombre
10 ⁻¹ s	Ds	decisegundo
10 ⁻² s	Cs	centisegundo
10 ⁻³ s	Ms	milisegundo
10 ⁻⁶ s	μs	microsegundo
10 ⁻⁹ s	Ns	nanosegundo
10 ⁻¹² s	Ps	picosegundo
10 ⁻¹⁵ s	Fs	femtosegundo
10 ⁻¹⁸ s	As	attosegundo
10 ⁻²¹ s	Zs	zeptosegundo
10 ⁻²⁴ s	Ys	yoctosegundo

El tiempo

Más allá de la postura de algunos filósofos, Albert Einstein sostenía que «los físicos se han visto obligados, por los hechos, a bajar el tiempo del Olimpo del *a priori* con el fin de ajustarlo y hacerlo utilizable». El tiempo en nuestras vidas está ligado a fenómenos periódicos, como el día y la noche determinados por la rotación de la Tierra alrededor de su eje y como los ciclos anuales de la agricultura determinados por la traslación de la Tierra alrededor del Sol. Los relojes más primitivos eran relojes de Sol, *testigos terrestres* de la periodicidad astronómica. Luego se desarrollaron los de agua y los de arena. Los primeros relojes mecánicos se construyeron en el siglo XIII y como no tenían un péndulo que funcionara como regulador de la marcha, eran muy imprecisos. Con la invención del *áncora* y el uso del péndulo aumentó su confiabilidad.

Antiguo reloj de Sol en Taganrog, Rusia



Fuente: Alexey Petrov, 2010.

Reloj de arena



Fuente: S. Sepp, 2007.

Actividad 3.3.

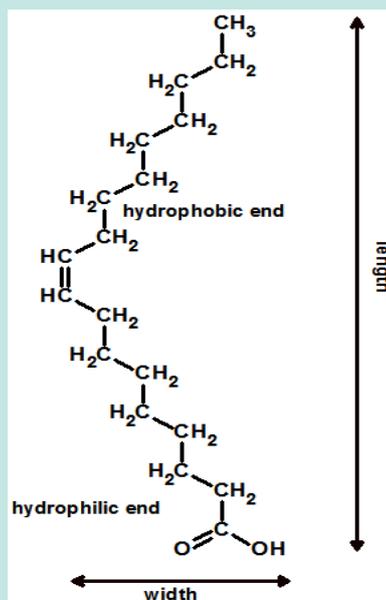
El tamaño de una molécula.

Para estimar el tamaño de una molécula de aceite, haremos una medida indirecta, similar a otras que ilustramos en este capítulo. Usaremos aceite de oliva de buena calidad que contiene un 75 de ácido oleico, de modo que tendremos una buena aproximación a una sustancia pura. Su fórmula química reducida es $C_{18}H_{34}O_2$. La forma de la molécula se ilustra en la figura adjunta.

Vemos que estas moléculas son alargadas y diferentes en ambos extremos; tienen un extremo hidrófobo y otro hidrófilo. Cuando una pequeña cantidad de esta sustancia se coloca sobre la superficie del agua, las moléculas se ubican con el extremo hidrofílico (afinidad por el agua) hacia el agua y el extremo hidrofóbico (repulsión por el agua) hacia afuera del agua.

La idea del experimento es determinar la longitud aproximada de esta molécula a través de la dispersión de una pequeña cantidad de aceite de oliva sobre la superficie del agua, midiendo luego el diámetro del círculo resultante. El ácido oleico se esparce en una capa cuyo grosor corresponde a la longitud de una sola molécula; la mancha resultante tiene entonces la forma de un cilindro muy aplastado. Ver figura 3.12.

Figura 3.12. Molécula de ácido oleico



Fuente: Aaron Keller, 2011.

Para comenzar, debemos averiguar el volumen de una gota de *aceite de oliva*. Usando *una pipeta o un gotero calibrado* podemos medir una cantidad conocida de líquido. Llenando el gotero o la pipeta determinamos cuántas gotas son necesarias para vaciarlo. Si se repite el procedimiento varias veces y se anotan los resultados podemos calcular el promedio y así obtener el volumen buscado.

Tomamos un recipiente plano preferentemente de base transparente (bandeja) de unos 40 cm de diámetro y de escasa profundidad, lo apoyamos sobre un papel milimetrado o en su defecto cuadrículado y le agregamos agua hasta cubrir el fondo con una capa de 1 cm de altura. Luego espolvoreamos la superficie del agua con una pequeña cantidad de *polvo de licopodio*, un polvo fino y oscuro de origen vegetal que nos permitirá ver cómo el aceite se

extiende sobre la superficie (también se puede usar polvo de tiza). Finalmente, con el gotero vertemos una gota de aceite en el centro de la capa de licopodio. El aceite empujará el polvo hacia afuera de manera de formar un círculo. Ese círculo es en realidad un cilindro muy delgado cuyo espesor h corresponde a la longitud de las moléculas. Si hacemos tres mediciones del diámetro del círculo en tres lugares diferentes, podemos obtener el diámetro promedio D y también el radio $r = D/2$.

El volumen del cilindro $V = \pi r^2 h$, corresponde al volumen de la gota de aceite, que habíamos determinado al comienzo. Luego, la longitud de las moléculas (altura del cilindro o espesor de la gota de aceite dispersa sobre el agua) es

$$h = \frac{V}{\pi r^2}$$

Lo invitamos a realizar la experiencia, una vez que haya calculado la altura de la molécula, compárela con los datos teóricos que puede encontrar en alguna de las referencias que agregamos más abajo.

Resumen de materiales

- Aceite de oliva 500 cm^3
- Pipeta o gotero calibrado.
- Recipiente plano de base transparente de unos 40 cm de diámetro y de escasa profundidad (puede ser un cristizador).
- Papel milimetrado.
- Polvo de licopodio o polvo de tiza.
- Papel de lija ($n.^\circ 80$)

Duplicación de un cubo

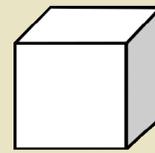
La duplicación del cubo, también llamado *el problema de Delos*, es uno de los problemas geométricos de la Antigüedad que exige, dada la longitud de la arista de un cubo, construir un segundo cubo cuyo volumen sea el doble del primero. En la época clásica esto debía hacerse utilizando únicamente una regla (sin graduación) y un compás. El problema aparece en una leyenda griega según la cual los atenienses, que sufrían una plaga, pidieron consejo al Oráculo de Delos para calmar a los dioses, a fin de que la plaga terminara. El consejo del oráculo fue duplicar el tamaño del altar al dios Apolo, que consistía en un cubo de piedra. Por tanto, los atenienses construyeron un nuevo altar similar al anterior pero cuyas aristas fueran dos veces más grandes que las originales.

Práctica: cubos que crecen, longitud, superficie y volumen

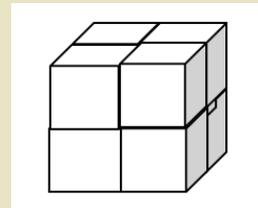
Si se mantiene la forma de los objetos pero se cambia su tamaño (cambio de escala) cambia su longitud, su área y su volumen. Cada una de estas propiedades cambia de manera diferente y a veces con resultados curiosos.

Materiales: 64 cubos iguales, de 1 cm de lado.

1. Ubique uno de los cubos sobre una superficie plana. Registre la longitud de una arista, la superficie total de las caras y el volumen, según sugerencias de la tabla.



2. Si duplicamos el lado de cada cubo, obtenemos un nuevo cubo. Registre en la tabla la longitud del lado, el área y el volumen, en las unidades respectivas.



3. Arista del próximo cubo posible tiene tres unidades. En pasos sucesivos tendremos cubos cuya arista mide $n \text{ cm}$ según pasos de la tabla:

Long [cm]	Superficie [cm ²]	Volumen [cm ³]
1	$1 \times 1 \times 6 = 6$	$1 \times 1 \times 1 = 1$
2	$2 \times 2 \times 6 = 24$	$2 \times 2 \times 2 = 8$
3	$3 \times 3 \times 6 = 54$	$3 \times 3 \times 3 = 27$
4	$4 \times 4 \times 6 = 96$	$4 \times 4 \times 4 = 64$
5	$5 \times 5 \times 6 = 140$	$5 \times 5 \times 5 = 125$
6	$6 \times 6 \times 6 = 210$	$6 \times 6 \times 6 = 216$
7	$7 \times 7 \times 6 = 294$	$7 \times 7 \times 7 = 343$
8	$8 \times 8 \times 6 = 384$	$8 \times 8 \times 8 = 512$
9	$9 \times 9 \times 6 = 486$	$9 \times 9 \times 9 = 729$
10	$10 \times 10 \times 6 = 600$	$10 \times 10 \times 10 = 1000$

Escriba la relación general entre superficie y volumen; analice los resultados en función de la tasa de crecimiento.

Pregunta:

Al hacer esto ¿satisficieron el pedido del oráculo?

En el recuadro de la página anterior se analiza cómo crecen la superficie y el volumen de un cubo cuando crece su arista (una dimensión lineal). La conclusión es que el área de la superficie del cubo crece más rápidamente que la dimensión lineal y que el volumen crece aún más rápidamente. Lo mismo sucede con otras figuras geométricas. La razón es que la superficie crece en proporción al cuadrado de la longitud, mientras que el volumen lo hace en proporción al cubo.

Como conclusión podemos decir que a medida que aumentamos la escala, las longitudes, las superficies y los volúmenes crecen de la misma manera que vimos con los cubos –aunque se trate de cubos o de esferas, de árboles o de caballos. Las relaciones diferentes de crecimiento de superficies y volúmenes son significativas para objetos de diferentes tamaños. Objetos pequeños –como por ejemplo, ratones– tienen un volumen pequeño respecto de su superficie y objetos grandes, tales como elefantes, tienen un volumen grande con relación a su superficie. La relación entre superficie y volumen tiene implicancias importantes en los seres vivientes, en arquitectura y aun para cocinar. En particular debido a la forma de su cuerpo, el elefante africano tendría dificultades para eliminar el calor que genera su organismo debido al metabolismo de los alimentos que ingiere; la situación es particularmente delicada por el clima cálido en el que habita. La naturaleza lo ayudó dotándolo de grandes orejas que son eficientes disipadores de calor. Algo similar sucede con el enfriamiento de los edificios; por otra parte, un cocinero experto sabe que las papas cortadas en trozos pequeños se cocinan más rápidamente que las papas enteras.

Mediciones indirectas

La ciencia moderna depende en gran medida de la determinación indirecta de las propiedades físicas de los objetos observados. Para ilustrar un procedimiento de medición indirecto podemos ver, en primer lugar, un ejemplo de la vida diaria. ¿Podríamos hacer una estimación del espesor de una hoja de papel, utilizando solo instrumentos de uso común? Sabemos que una resma de papel contiene 500 hojas; con ese dato podemos estimar el espesor de una hoja. Tomando una resma comercial cerrada medimos con una regla (mayor precisión se obtiene utilizando un calibre) un espesor de $4,83 \times 10^{-2} m$. Para estimar el espesor de cada hoja debemos dividir este valor por 500. Así obtenemos para el espesor de una hoja⁵

$$d = (4,83 \times 10^{-2} / 500) m = 9,66 \times 10^{-5} m = 0,0966 mm.$$

⁵ Puede obtenerse un valor más exacto midiendo el espesor de las hojas quitándoles la envoltura, que usualmente es de un papel más grueso.

Actividad 3.4.

La actividad que se presenta a continuación puede ayudar a convencernos de que las determinaciones indirectas constituyen un método importante y confiable para obtener información precisa. Este ejercicio puede ser utilizado como una introducción a una discusión del modelo atómico de Rutherford. La actividad simula un experimento de física de partículas donde un material que sirve como blanco es bombardeado por partículas de alta velocidad y, de esa manera, se estudian las colisiones.

Se pretende mostrar cómo determinar de manera indirecta el radio de un círculo. Para ello utilizaremos la hoja con los círculos que se muestra en la figura 3.2, ampliándola hasta el tamaño A4. Se ubica la hoja de papel con los círculos hacia arriba y se la cubre con una hoja de papel carbónico, con la tinta hacia abajo. De esta manera, cuando dejamos caer una bolita de acero sobre la hoja no solo quedarán marcados los impactos, sino que además podemos ver dónde cae cada bolita. Trabajando en parejas, mientras un estudiante deja caer bolitas de acero siempre desde una altura determinada y de manera tal que siempre impacten sobre el papel carbónico, el segundo estudiante atrapa las bolitas luego del primer rebote de manera de evitar un segundo rebote. Los lanzamientos deben repetirse por lo menos cien veces. Se debe tener cuidado de que los impactos se distribuyan al azar sobre toda el área.

Análisis: Cuente el número total de impactos dentro del área rectangular marcada y también el número total de impactos que cayeron completamente dentro de los círculos. Determine el área total del papel dentro del rectángulo, y cuente el número total de círculos dentro del rectángulo. Si los círculos son todos iguales y hubo una distribución al azar de impactos, puede establecerse la siguiente proporción:

el número de impactos (i) dentro de todos los círculos es al número total de impactos (I) como el área (a) de todos los círculos es al área total (A) del rectángulo, es decir

$$\frac{\text{impactos dentro de los círculos}}{\text{impactos totales}} = \frac{\text{área de todos los círculos}}{\text{área del rectángulo}}$$

O en símbolos

$$\frac{i}{I} = \frac{a}{A}$$

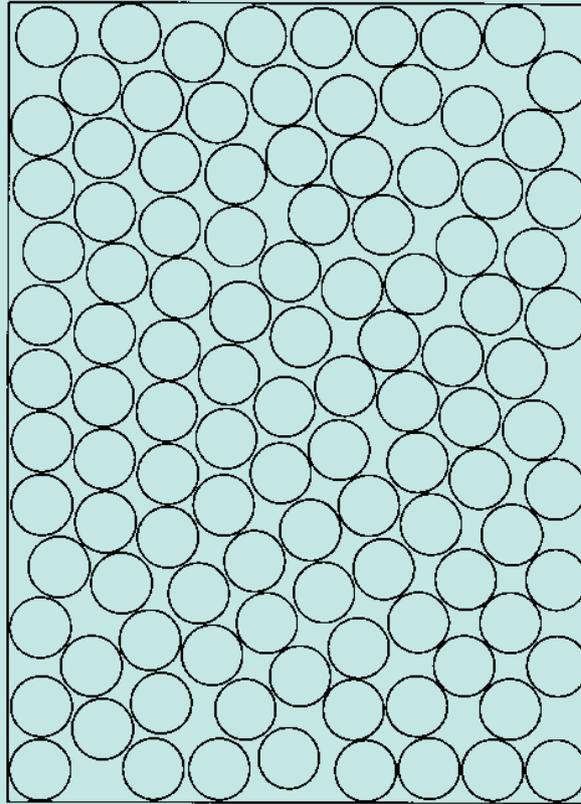
Por lo tanto se puede calcular:

$$\frac{\text{impactos dentro de los círculos} \times \text{área del rectángulo}}{\text{impactos totales}} = \text{área de todos los círculos}$$

$$\frac{i \times A}{I} = a$$

En la imagen 3.13 se muestra una hoja que podemos utilizar para realizar este experimento de medición indirecta.

Figura 3.13. Hoja usada para una medición indirecta (ver texto)



Fuente: Fermi National Accelerator Laboratory, Office of Education and Public Outreach, 1996.

Como el área de todos los círculos es igual al área de un círculo multiplicado por la cantidad de círculos, tenemos que el área de un círculo a_i es igual al área (a) de todos los círculos dividido por la cantidad de círculos (c).

$$\text{área de un círculo} = \frac{\text{área total de todos los círculos}}{\text{cantidad total de círculos}}$$

$$a_i = \frac{a}{c}$$

El área de un círculo puede usarse para calcular el radio del círculo (área de un círculo $a_i = \pi R^2$).

Este radio calculado puede compararse con la medida directa del radio.

En este caso se tiene la posibilidad de verificar experimentalmente el valor calculado con el valor medido. ¿Se puede concluir que este método de medida indirecta es confiable?

¿Qué se puede concluir cuando se utiliza la medición indirecta de propiedades de las partículas que no pueden medirse directamente?

¿Qué puede comentar con respecto al experimento de Rutherford y los métodos indirectos?

PREGUNTAS

● **PREGUNTA 3.1.**

Indique qué instrumentos utilizaría para medir:

- Una cancha de fútbol.
- La cabeza de un alfiler.
- El grosor de un cabello.

● **PREGUNTA 3.2.**

1. ¿Cuántos metros hay en un kilómetro?
2. ¿Cuántos centímetros hay en un metro?

● **PREGUNTA 3.3.**

¿Cuáles de las siguientes cantidades tienen propiedades vectoriales y cuáles tienen propiedades escalares?

- Masa
- Densidad
- Velocidad
- Temperatura
- Desplazamiento

● **PREGUNTA 3.4.**

Escriba las siguientes cantidades en notación científica:

1. Radio de la Tierra, $6.370.000\ m$.
2. La distancia de la Tierra a la Luna, $384.000\ km$.
3. Masa de la Tierra, $5.970.000.000.000.000.000.000\ kg$.
4. Radio de Bohr, $0.0529177\ nm$.
5. Radio nuclear, $1,25\ fm$.

● **PREGUNTA 3.5.**

Un átomo de hidrógeno tiene un diámetro de aproximadamente $10^{-10}\ m$. Si ese átomo es expandido hasta alcanzar el tamaño de una manzana ¿cuán grande sería una manzana que se expande en la misma proporción? Piense en un objeto cuyo tamaño es comparable con esta manzana gigante.

● **PREGUNTA 3.6.**

Para usar un microscopio óptico, conviene comenzar observando las muestras con un aumento de

- 10 veces
- 100 veces
- 500 veces

● **PREGUNTA 3.7.**

¿Cuánto costará alfombrar un salón que mide $10\ m$ de ancho y $12\ m$ de largo, si la alfombra cuesta $\$12,51$ por metro cuadrado?

- $\$1840,30$
- $\$1750,90$
- $\$1501,20$
- $\$1897,90$
- $\$1921,20$

- **PREGUNTA 3.8.**
¿Por qué el acelerador de electrones LINAC de Stanford, puede ser comparado con un microscopio?
- **PREGUNTA 3.9.**
¿En qué principio físico se basan las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM) que se usan para el estudio de materiales? ¿Qué ventaja tienen respecto a la microscopía óptica?
- **PREGUNTA 3.10.**
¿Qué tipo de información se obtiene mediante el uso de cada una de las técnicas mencionadas en la pregunta anterior?
¿Cuál es la diferencia entre SEM y TEM con respecto al tipo de muestra utilizada?

PROBLEMAS

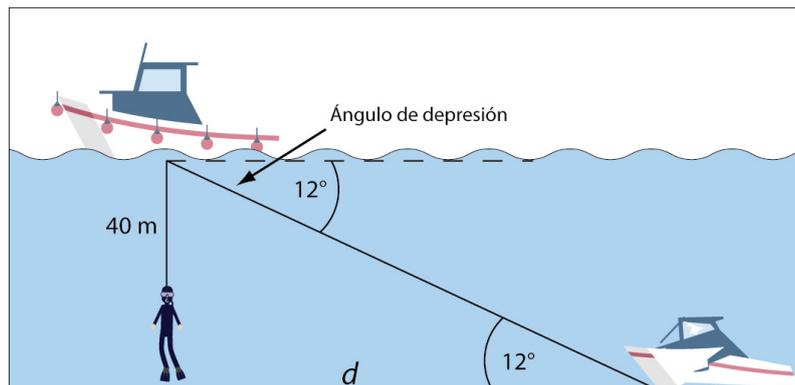
- **PROBLEMA 3.1. ÁTOMOS Y MANZANAS**
Un átomo y una manzana verde son agrandados en un factor de 10; de 10^2 ; de 10^3 ; hasta llegar a 10^8 . Para este último caso determine el nuevo tamaño de cada uno de esos objetos y compare el resultado obtenido para la manzana, con el tamaño de la Tierra.
- **PROBLEMA 3.2. HIERRO**
Un átomo de hierro tiene un radio de $10^{-10} m$ pero considérela cúbico para simplificar el siguiente cálculo:
 - a. ¿Cuántos átomos de hierro están contenidos en una cabeza de alfiler ($V = 1mm^3$)?
 - b. ¿Qué longitud ocuparían si se los pusiera uno al lado del otro?
- **PROBLEMA 3.3. SOMBRAS**
Un estudiante de la UNRN observa que una varilla vertical de $1 m$ de longitud proyecta una sombra de $3,13 m$ a la misma hora que la torre de la iglesia catedral de Bariloche proyecta una sombra de $213 m$. ¿Podría usted ayudar al estudiante a determinar la altura de la torre?
- **PROBLEMA 3.4. ÁRBOLES**
Un árbol de $65 m$ de altura (una sequoia) proyecta una sombra de $60 m$ de longitud. Encuentre el ángulo de elevación del Sol en ese momento.
- **PROBLEMA 3.5. DIRIGIBLE**
Desde un dirigible que vuela a $800 m$ de altura se observa un pueblo con un ángulo de depresión de 12° . ¿A qué distancia del pueblo se halla el dirigible? Nota: el ángulo de depresión y el ángulo de elevación son los ángulos formados por la línea visual o línea de visión y la línea horizontal.
- **PROBLEMA 3.6. OTRO ÁRBOL**
Calcule la altura de un árbol sabiendo que desde un punto del terreno se observa su copa bajo un ángulo de 30° y si nos acercamos $10 m$, la copa aparece bajo un ángulo de 60° .

● **PROBLEMA 3.7. TORRES**

Juan y Pedro ven, desde la puerta de la casa de cada uno, una torre bajo ángulos de 45° y 60° , respectivamente. La torre está situada, en línea recta, entre sus casas que se encuentran a 126 m una de otra. Hallar la altura de la torre.

● **PROBLEMA 3.8. NAUFRAGIO**

El buque de pasajeros Monte Cervantes naufragó frente a la costa de Tierra del Fuego el 21 de enero de 1930. Un barco de salvamento localizó los restos del naufragio en un ángulo de depresión de 12° pero no pudo acercarse más por razones técnicas. Un buzo fue bajado 40 m hasta el fondo del mar.



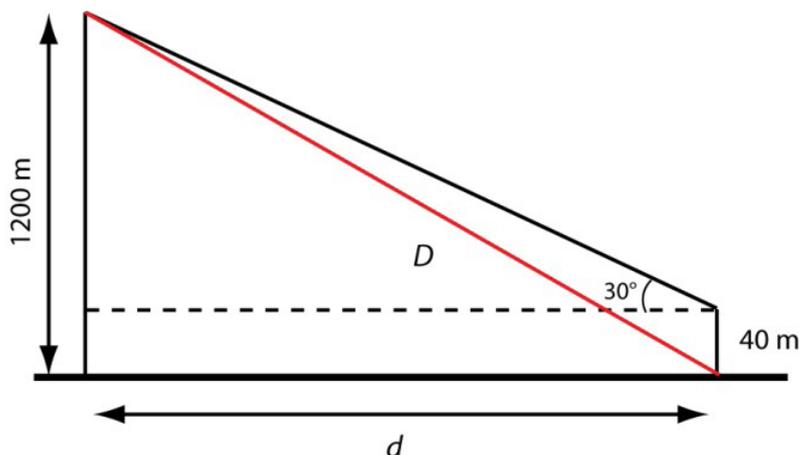
¿Cuánto necesitó avanzar el buzo por el fondo para encontrar los restos del naufragio?

● **PROBLEMA 3.9. DESDE EL JARDÍN**

En el jardín de la casa de un profesor de física hay un pino que se sacude peligrosamente cada vez que sopla viento fuerte. Para evitar que el pino sea volcado por el viento, el dueño del terreno decidió sostenerlo con un cable que se extiende desde 50 cm por debajo de la punta del árbol hasta una estaca clavada en el suelo. El cable mide 70 m de largo y forma un ángulo de 58° con la horizontal. El profesor decide aprovechar la situación para medir la altura del árbol. ¿Sabe usted cómo hizo?

● **PROBLEMA 3.10. AEROPUERTO**

Desde la torre de control del aeropuerto de Bariloche se establece comunicación con un avión que se encuentra próximo a aterrizar. En ese momento el avión se encuentra a una altura de 1200 m y el ángulo que forma la visual hacia el avión con la horizontal es de 30° . ¿A qué distancia del pie de la torre está el avión si esta mide 40 m de altura?



Lista de referencias bibliográficas

- Battaner, E. (2015). *Física de las noches estrelladas*. Barcelona: Booket.
- Cepa, J. (2007). *Cosmología física*. Barcelona: Akal.
- De Florian, D. (2010). *Una expedición al mundo subatómico*. Buenos Aires: Eudeba.
- Giancoli, D. (2006). *Física*. Nueva York: Prentice Hall.
- Hamuy, M. y Maza, J. M. (2009). *Supernovas*. Santiago de Chile: Ediciones B.
- Maiztegui, A., Boido, G., López, M. (2001). *Nociones de física y química*. Buenos Aires: Kapelusz.
- Menchaca Rocha, A. (1988). *El discreto encanto de las partículas elementales*. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/discreto.htm>
- Moreira, M. A. (2007). Quark Physics and Epistemology. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(2), pp. 1-13.
- Resnick, R. Halliday, D. y Krane, K. (2014). *Física*. México: Compañía Editorial Continental SA.
- Rodríguez, S. y E. (2001). *Física re-creativa*. Nueva York: Prentice Hall.
- Sears y Zemansky (2009). *Física*. Nueva York: Prentice Hall.

Lista de figuras

- Curtis, Nicholas. (2011). Electron micrograph of a digestive tubule cell of *E. clarki* [Fotografía]. En Middlebrooks ML, Pierce SK, Bell SS (2011) Foraging Behavior under Starvation Conditions Is Altered via Photosynthesis by the Marine Gastropod, *Elysia clarki*. *PLoS ONE* 6(7): e22162. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022162>
- Fermi National Accelerator Laboratory, Office of Education and Public Outreach, Batavia, IL, U.S.A. (1996). Círculos en un recuadro [Diagrama]. *Topics in Modern Physics. Teacher Resource Materials*, (p. 29). <https://ed.fnal.gov/samplers/hsphys/tmp10-06.pdf>
- Kaminski, Peter, U.S. Geological Survey. (2004). S Stanford Linear Accelerator, shown in an aerial digital orthoimage [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stanford-linear-accelerator-usgs-ortho-kaminski-5900.jpg>. Dominio público.
- Keller, Aaron. (2011). Measuring the Size of an Oleic Acid Molecule [Diagrama]. <http://kaffee.50webs.com/Science/labs/Chem/Lab-Size.of.Molecule.html>
- Lovey, Francisco, CAB-IB. Imagen de material metálico tem [Diagrama].
- Meyer, W. (ca 1875). Tales de Mileto [Grabado]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustrerad_Verldshistoria_band_I_III_107.jpg. Dominio público.
- Petrov, Alexey. (2010). Antiguo reloj de sol [Fotografía]. <https://web.archive.org/web/2016101715849/http://www.panoramio.com/photo/43652483>
- Schmid, Michael y Pietrzak, Grzegorz. (2011). Diagrama esquemático de un microscopio de efecto túnel [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rastertunnelmikroskop-schema_es.svg. CC BY-SA 2.0.
- Schwen, Daniel. (2007). Students working on a Scanning Electron Microscope (SEM) Leo Supra 35 [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Goe_SEM_students_working1.jpg. CC BY-SA 2.5
- Usuario:Basado en 4C. (2006). Distance by triangulation [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Distance_by_triangulation.svg. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:ArtMechanic. (2004). Calibre con escala nonio, con una medición de 358mm [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Messschieber.jpg>. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Coyau. (2012). Stanley dynagrip 5 m × 19 mm 33-684 01 [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20469752>. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Gregors. (2011). Roemer Jupiter moons speed of light [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roemer-Jupiter_moons-Speed_of_light.svg
- Usuario:Moxfyre. (2008). Angular aperture [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Angular_aperture.svg. Dominio público.
- Usuario:S.Sepp. (2007). Wooden hourglass 3 [Fotografía]. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wooden_hourglass_3.jpg. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Tomia. (2008). Microscope (labeled) [Ilustración]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Microscope-letters.svg>. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Xenoforme. (2005). Aristarco [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aristarco.png>. CC BY-SA 3.0.

ASTRONOMÍA

(EL SEÑOR GALILEO)

Las verdades científicas no se deciden por mayoría
Galileo Galilei

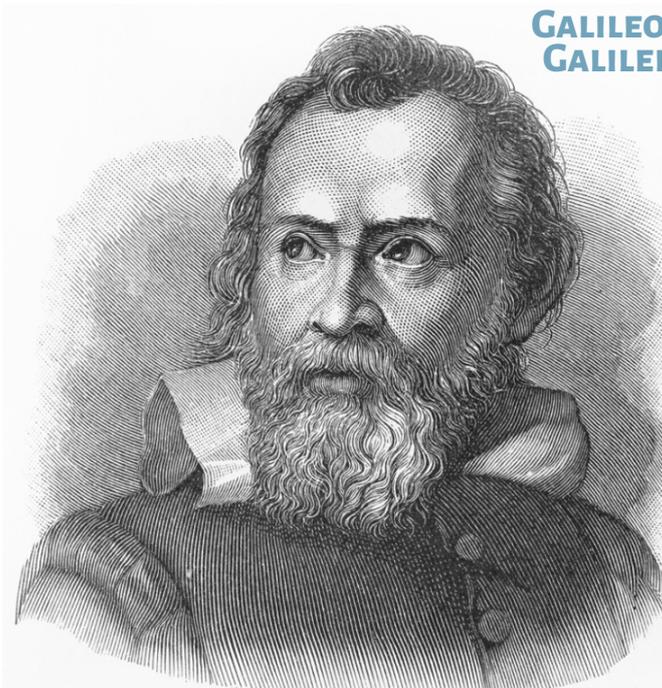
4.1. Introducción

Este capítulo cumple un doble propósito. Por una parte está aquí porque como dice Walter Lewin (2012),

La astronomía es física, escrita a gran escala sobre el cielo nocturno: eclipses, cometas, estrellas fugaces, cúmulos globulares, estrellas de neutrones, erupciones de rayos gamma, nebulosas planetarias, supernovas, cúmulos de galaxias, agujeros negros. Basta con que mires al cielo y te hagas unas preguntas obvias: ¿por qué el cielo es azul, los atardeceres rojos y las nubes blancas? ¡La física tiene las respuestas!

Además, la astronomía nos servirá de base para la discusión sobre el origen del universo que presentaremos en los próximos capítulos.

Un cielo estrellado es uno de los espectáculos más sorprendentes del mundo que nos rodea. Si bien en la actualidad el avance de la urbanización hace difícil disfrutar de una clara visión del cielo, una detención accidental o voluntaria en un viaje en



**GALILEO
GALILEI**

Fuente: Ottavio Leoni, 1624.

Nació el año en que murió Copérnico y fue un importante defensor del modelo heliocéntrico. Partiendo del desarrollo de un artesano holandés construyó un telescopio. Descubrió los cráteres de la Luna, las lunas de Júpiter, las manchas solares y las fases de Venus. En constante contacto con Kepler, se escribían sobre sus trabajos y las dificultades que enfrentaban. En una de sus cartas se lee:

¡Oh mi querido Kepler, cuánto me gustaría poder echarme a reír contigo! Aquí en Padua, el profesor de filosofía más prestigioso a quien he incitado muchas veces a mirar la Luna o los planetas con mi lente, se ha negado de la manera más absoluta. ¡Si tú estuvieras aquí! ¡Qué suerte sería para ti esta gloriosa locura! ¡Cuán divertido sería ver a ese profesor agitar Pisa con razonamientos de lógica, delante del Gran Duque, para ahuyentar los nuevos planetas y hacerlos desaparecer como por encanto!

Usaba el italiano en lugar del latín para publicar sus trabajos, y así sus obras alcanzaban una amplia difusión pública lo que contribuyó a su conflicto con la Iglesia. Después de varios enfrentamientos con religiosos en los que fue respaldado por el Papa y a pesar de los pedidos de moderación en la difusión de sus estudios, escribió el libro *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, en el que ridiculizaba la posición de la Iglesia a través del personaje Simplicio. El conflicto culminó con un juicio y la imposición de un arresto domiciliario. Murió a los 88 años con la bendición papal.

automóvil por el campo, o un corte de luz en la ciudad nos permiten deleitarnos con esa maravilla. El Sol es la más prominente manifestación astronómica en el cielo, rodeado por los planetas, que aparecen como pequeños puntos de luz en el cielo nocturno, junto a millones de estrellas. Los pueblos antiguos pudieron discernir las diferencias entre unos y otras.

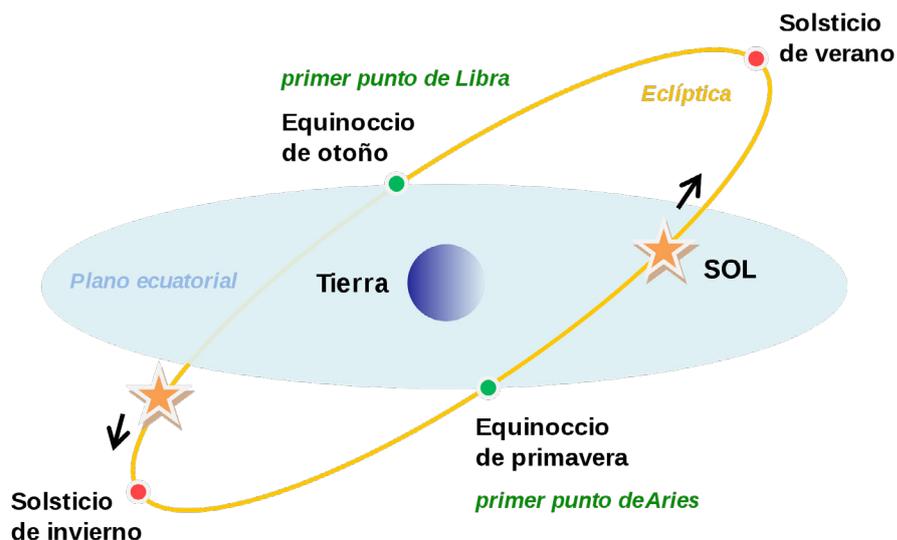
El hombre no pudo escapar al atractivo de los astros y se interesó desde la Antigüedad por ellos y por su movimiento. El interés contemplativo inicial se convirtió luego en una herramienta útil para determinar los períodos más aptos para la caza y para la agricultura; estas observaciones han sido practicadas por todas las civilizaciones. Por eso la astronomía es probablemente uno de los oficios más antiguos, y se manifiesta en todas las culturas. Creemos que a ningún otro campo de la ciencia se aplica mejor esta frase atribuida a Galileo Galilei: «Todas las verdades son fáciles de entender una vez que se descubren; el asunto es descubrirlas».

La magnificencia del cielo estrellado dio origen a la idea de que en el firmamento habitaban seres poderosos, capaces de influir en nuestro destino. Se lo utilizó como representación de seres imaginarios que constituían la mitología de cada civilización. La ciencia fue aclarando la mayoría de los fenómenos observados, lo que no siempre ocurrió de manera fácil; algunos astrónomos fueron forzados, por razones filosóficas, a cambiar o silenciar sus propuestas e ideas sobre la estructura del universo.

4.2. La Tierra y el Sol

El movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol está descrito en la figura 4.1. La trayectoria de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol ocurre a lo largo de una línea llamada eclíptica. Mientras desarrolla este movimiento de traslación, la Tierra gira alrededor de su eje, que tiene un ángulo de inclinación de $23^{\circ}27'$ respecto al plano de la eclíptica.

Figura 4.1. Traslación de la Tierra alrededor del Sol



Fuente: Divad, 2010.

En la figura se señalan los solsticios y los equinoccios para el hemisferio sur.

Solsticio de verano (perihelio, menor distancia Sol-Tierra): 21 de diciembre; el Sol alcanza su mayor altura aparente en el cielo y los rayos solares inciden perpendicularmente sobre el trópico de Capricornio, paralelo terrestre situado a una latitud de $23^{\circ}26'17''$ al sur del ecuador y atraviesa Chile, la Argentina, Paraguay y Brasil y los países africanos Namibia, Botsuana, Sudáfrica, Mozambique y Madagascar. En la Argentina pasa a 15 km al norte de Tilcara a $23^{\circ}27'30''$ de latitud sur.

Solsticio de invierno (afelio, mayor distancia Sol-Tierra): 21 de junio; el Sol alcanza su menor altura aparente en el cielo. Los rayos solares inciden perpendicularmente sobre el trópico de Cáncer, paralelo situado a una latitud $23^{\circ}26'17''$ al norte del ecuador que cruza por dos países americanos (México y Bahamas); siete países africanos (Mauritania, Malí, Argelia, Níger, Libia, el Chad y Egipto) y siete países asiáticos (Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Omán, India, Bangladés, Birmania y China).

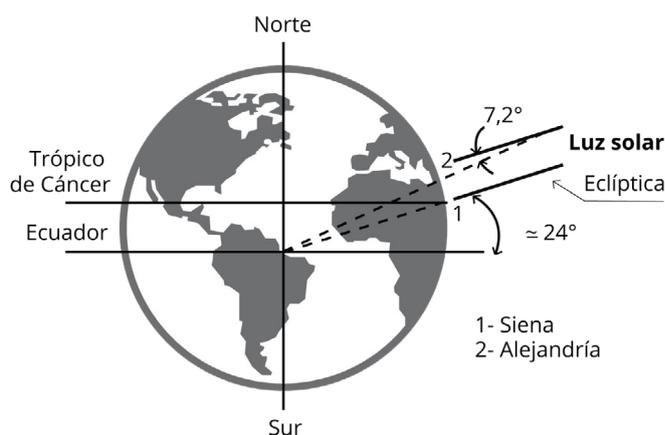
Equinoccios: el Sol está situado en el plano del ecuador terrestre (distancia Sol-Tierra son iguales en ambas fechas). Duración del día o de la noche es igual para todos los puntos de la Tierra. Se produce el cambio de estación anual en cada hemisferio.

La eclíptica corta al *ecuador celeste* en dos puntos opuestos denominados equinoccios, que corresponden a dos puntos sobre el eje menor de la elipse. En los equinoccios, la duración del día y de la noche es aproximadamente 12 horas en todos los puntos de la Tierra. La falta de perpendicularidad entre el eje de rotación de la Tierra y el plano de la eclíptica da lugar a las estaciones.

4.3. Dimensiones en astronomía

Como dijimos, la primera medición realizada en astronomía fue el radio de la Tierra, en 250 a. C. por Eratóstenes quien observó que, en el solsticio de verano (20 o 21 de junio) del hemisferio norte,¹ los rayos solares incidían perpendicularmente sobre la Tierra en Siena (Asuán), ubicada en el trópico de Cáncer. Ese día, la luz solar iluminaba el fondo de un pozo profundo.

Figura 4.2. Siena, Alejandría y los rayos solares



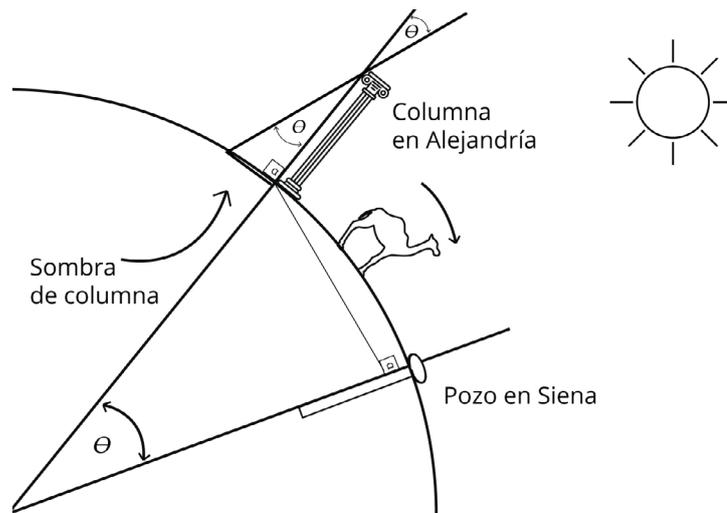
Fuente: Adaptado de Juan Carlos Arias Millán, 2004.

¹ Solsticio (del latín *solstitium*, sol quieto) momento del año en el que el Sol alcanza su mayor o menor altura aparente en el cielo, y la duración del día o de la noche son las máximas del año, respectivamente. Astronómicamente, los solsticios son los momentos en los que el Sol alcanza la máxima declinación norte o sur con respecto al ecuador terrestre.

Ese mismo día en Alejandría, 843 km al norte, sobre la desembocadura del Nilo, Eratóstenes midió la longitud de la sombra proyectada por una columna de mármol, de altura conocida, lo que le permitió determinar el ángulo que forman los rayos solares con la vertical del lugar.

Como el Sol está muy alejado de la Tierra, los rayos que llegan a las dos ciudades son paralelos entre sí (figura 4.3), y el ángulo medido coincide con el ángulo en el centro de la Tierra entre las verticales en ambas ciudades (diferencia de latitud entre ellas); la medición determinó $\theta = 7,2^\circ = 7^\circ 12'$ o en radianes $\theta = \frac{1}{50}$.

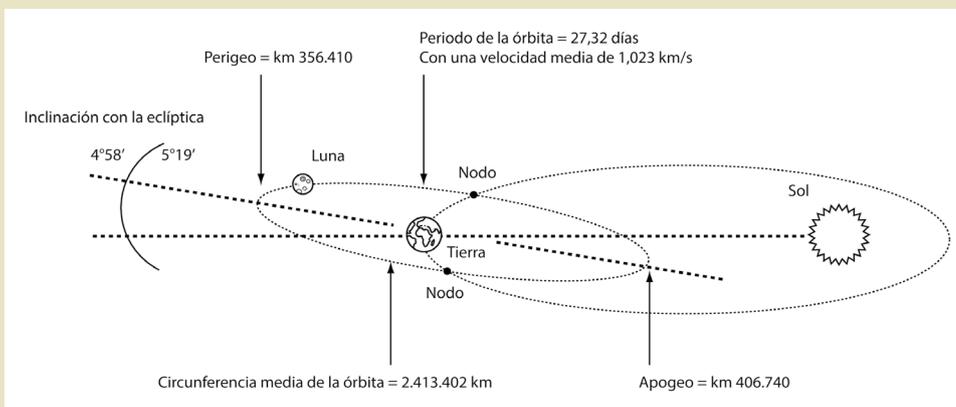
Figura 4.3. Distancia angular entre las ciudades y ángulo medido a partir de la sombra de la columna en Alejandría



Fuente: Adaptado de Ian Stewart, 2008.

La órbita de la Luna

La órbita de la Luna es una elipse de baja excentricidad con un radio medio de 356.000 km y un período de 27,32 días; la Tierra ocupa uno de los focos. El movimiento es en sentido antihorario visto desde el norte del Sistema Solar, el mismo sentido en el que se traslada la Tierra alrededor del Sol. La órbita lunar está inclinada respecto a la eclíptica unos 5°9' y corta la trayectoria de la Tierra en dos puntos (nodos lunares). Donde la Luna pasa del sur al norte es el nodo ascendente y el otro el nodo descendente. La inclinación del plano de la órbita lunar respecto al plano de la eclíptica, impide que haya un eclipse solar cada 28 días.



Fuente: Adaptado de Mungany, 2007.

En relación a la figura 4.3 notamos la siguiente proporción entre el ángulo θ y la distancia l entre ambas ciudades, por un lado, y por otro, el ángulo completo 360° y la circunferencia de la Tierra $C = 2\pi R$, es decir

$$\frac{\text{ángulo}\theta}{l} = \frac{360}{C} \quad (4.1)$$

Para la distancia l entre las dos ciudades Eratóstenes tomó la estimación realizada por las caravanas que comerciaban entre ellas y la fijó en 5000 estadios, de donde dedujo que la circunferencia de la Tierra era

$$C = \frac{360}{7,2} l = 50 \times 5.000 = 250.000 \text{ estadios}$$

resultado que posteriormente elevó hasta 252.000 estadios, de modo que cada grado correspondiera a 700 estadios.

Suponiendo que Eratóstenes usara el estadio de 1850 m, el error cometido fue de 6.616 km (alrededor del 17 %). Sin embargo, hay historiadores que sostienen que usó el estadio egipcio (300 codos de 52,4 cm), en cuyo caso la circunferencia polar calculada sería de 39.614,4 km frente a los 40.008 km considerados en la actualidad, eso representa un error menor al 1%. Sin embargo, las incertezas en otras variables del procedimiento elevan bastante este error.

A partir de este importante resultado, y usando diversas observaciones astronómicas sobre eclipses, el mismo Eratóstenes y luego otros determinaron el radio del Sol y de la Luna y sus respectivas distancias a la Tierra.

En este capítulo presentaremos algunos conceptos de la astronomía observacional clásica, cuyo objetivo es describir los objetos celestes y determinar su ubicación y su distancia a la Tierra. Esto nos servirá de base para entender la física de las estrellas, que veremos en el capítulo 8.

4.4. Esfera celeste

Los equinoccios son los momentos del año en que el Sol está situado en el plano del ecuador terrestre (como vemos en la figura 4.4, las distancias del Sol a la Tierra son iguales en ambos equinoccios), y el día y la noche tienen la misma duración, en todo punto sobre la Tierra. En ese momento se produce el cambio de estación anual, contraria en cada hemisferio. Por otra parte, la mayor distancia entre el Sol y la Tierra (afelio),² ocurre el 4 de julio, y la menor distancia entre el Sol y la Tierra (perihelio),³ el 4 de enero.

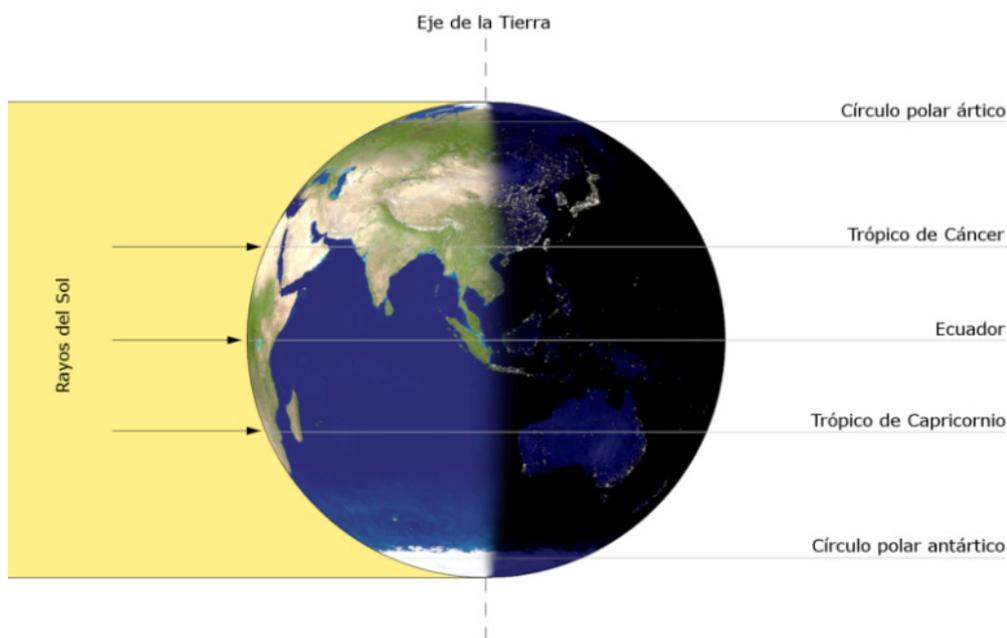
La figura 4.4 muestra la marcha de los rayos solares que caen sobre la Tierra los días de equinoccio. Vemos que en esa fecha, la igual duración del día y la noche ocurre porque la línea Sol-Tierra es perpendicular al eje de rotación de la Tierra.

También podemos notar que la distancia del Sol a ambos polos de la Tierra es la misma, contrariamente a lo que sucede en los solsticios, donde uno de los polos se encuentra más cerca del Sol según sea verano o invierno en el respectivo hemisferio. Esto se ve claramente en la figura 4.1.

2 La palabra afelio proviene del griego y significa 'sin sol'.

3 Perihelio también proviene del griego y significa 'alrededor del sol'.

Figura 4.4. Iluminación de la Tierra por el Sol el día del equinoccio



Fuente: Basquetteur, 2008.

La ubicación de un cuerpo celeste se define como un punto sobre una esfera imaginaria (*esfera celeste*), centrada en el punto de observación (hay una esfera celeste para cada observador). La trayectoria del Sol en el cielo diurno determina la proyección de la eclíptica sobre esa esfera. La proyección del ecuador terrestre sobre la esfera determina otra circunferencia llamada *ecuador celeste*, que cruza la eclíptica en los equinoccios. Los puntos donde la prolongación del eje de la Tierra corta a la esfera celeste definen los polos celestes, norte y sur.

El Sol, en su movimiento aparente por la eclíptica,⁴ cruza el ecuador celeste en los equinoccios, uno de sur a norte y el otro de norte a sur.⁵ El cruce de sur a norte –22 o 23 de septiembre– es el equinoccio de primavera, y el cruce de norte a sur –20 o 21 de marzo– determina el equinoccio de otoño. La figura 4.5 muestra una esfera celeste construida para la latitud de Buenos Aires.

El centro de la esfera se ubica en el punto donde está el observador y se han marcado los cuatro puntos cardinales correspondientes al horizonte del lugar. Se muestra el polo sur celeste (PS) elevado sobre el horizonte en un ángulo igual a la latitud del lugar ($34^{\circ} 36'$). La línea norte-sur que une ambos polos es el eje de rotación de la Tierra y perpendicularmente a este se encuentra el plano del *ecuador celeste*.

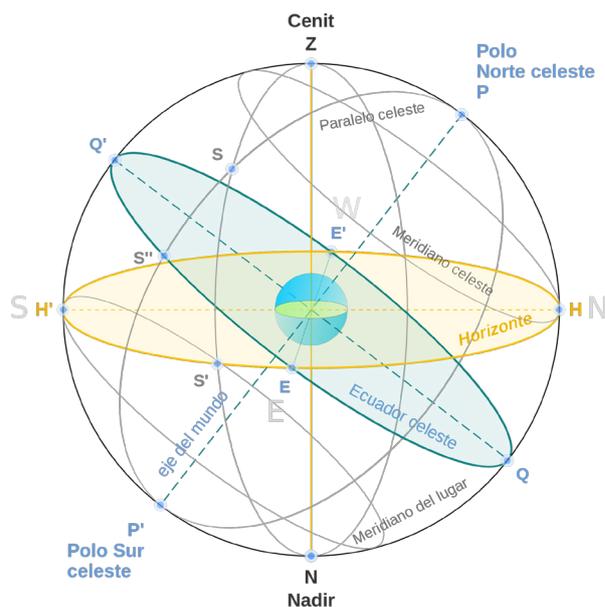
La posición de los objetos celestes, estrellas o planetas, sobre la esfera celeste, está determinada mediante *dos coordenadas angulares*. Una de estas es la *declinación*, ángulo que se mide sobre el círculo máximo que une ambos polos, pasando por el objeto, a partir del ecuador celeste hacia los polos; es positiva hacia el norte y negativa hacia el sur. El ecuador celeste tiene *declinación* de 0° y los polos *declinación* de $+90^{\circ}$ (norte) y -90° (sur).

El plano de la *eclíptica* no se dibuja en la figura 4.5 y solo se marca el *punto gamma*, donde la eclíptica cruza el ecuador celeste, de sur a norte.

4 Sabemos que en realidad es la Tierra la que se mueve.

5 La dirección norte sobre la esfera celeste está en la dirección hacia el polo norte celeste y, en forma similar, la dirección sur hacia el polo sur celeste.

Figura 4.5. Esfera celeste y coordenadas celestes



Fuente: Divad, 2010a.

La segunda coordenada angular del objeto celeste es la *ascensión recta* (AR), que se mide sobre el ecuador celeste desde el *punto gamma*, de 0 a 24 horas (1 hora equivale a 15 *grados*) en sentido horario mirando al PN.

El *punto gamma* se encuentra en una de las dos intersecciones del ecuador con la eclíptica, la línea por donde vemos desplazarse al Sol durante el período de un año. En el momento del equinoccio de otoño (hemisferio sur), la AR del Sol es $0h\ 0m\ 0s$ (AR: $0h\ 0m\ 0s$). Seis meses después, en el equinoccio de primavera la AR del Sol es $12h\ 0m\ 0s$. La altura del polo elevado sobre el horizonte es igual a la latitud del lugar de observación, para Buenos Aires $34^{\circ}36'S$.⁶

En el equinoccio de otoño del hemisferio sur, el Sol tiene una ascensión recta de $0h\ 0m\ 0s$. Unos seis meses después, en el momento del equinoccio de primavera –hemisferio sur– la ar del Sol es de $12h\ 0m\ 0s$.

4.5. Las constelaciones

Nuestra visión del cielo agrupa las estrellas en conjuntos que han mantenido su forma por millones de años. La imaginación humana ha querido ver en esos conjuntos de estrellas –*las constelaciones*– figuras de animales o de personajes mitológicos. Nuestra civilización ha heredado la tradición griega y con ello su mitología se refleja en las constelaciones. El saber popular las ha rebautizado con nombres vulgares, que varían según los lugares y los tiempos.

La figura 4.6 muestra la Cruz del Sur, usada durante siglos en el hemisferio sur para orientarse en la Tierra o en el mar. En el hemisferio norte se utiliza la llamada *estrella polar* o Polaris, ubicada casi exactamente en el polo norte celeste. La Cruz del Sur era conocida por los antiguos griegos debido al hecho de que puede verse desde el sur de Egipto y Ptolomeo la consideraba parte de la constelación Centaurus. Era completamente visible hasta el norte como Gran Bretaña en el cuarto milenio a. C. Sin embargo, la precesión de los equinoccios redujo gradualmente sus estrellas bajo

6 Para San Carlos de Bariloche es $41^{\circ}018'44'' S$.

el horizonte europeo, y fueron finalmente olvidadas por los habitantes de latitudes septentrionales. Hacia el año 400 d. C., la mayor parte de la constelación nunca se elevó por encima del horizonte para los atenienses.

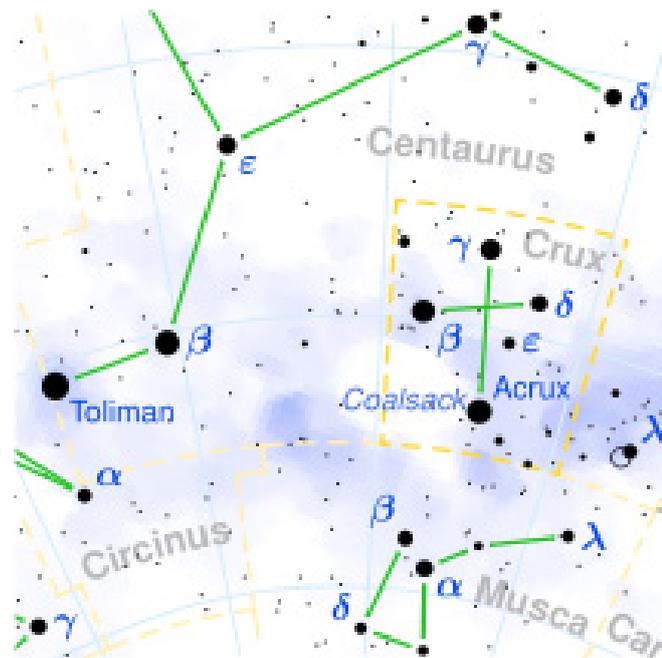
Figura 4.6. La Cruz del Sur, formada por unas veinte estrellas de las cuales cuatro determinan los extremos de la cruz



Fuente: Antonio Ferretti, 2017.

En la figura 4.7 se indica el nombre de las principales estrellas de la constelación de la Cruz del Sur.

Figura 4.7. Las estrellas más notables de la Cruz del Sur, en particular las cuatro que determinan los extremos de la Cruz



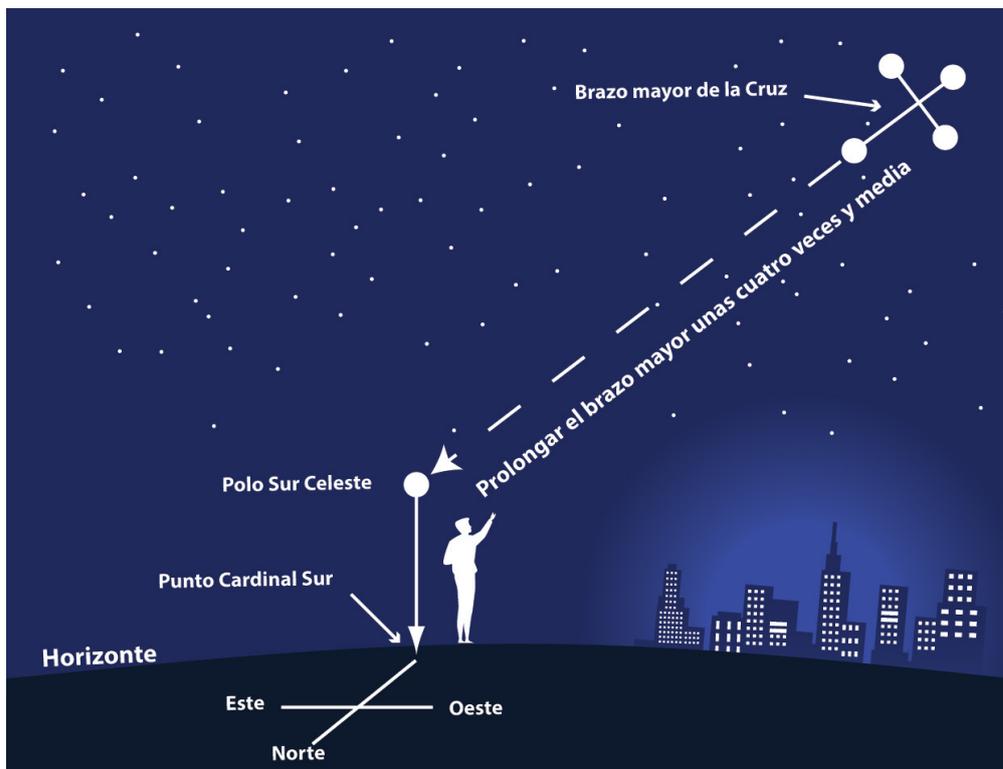
Fuente: Torsten Bronger, 2010.

Las cuatro estrellas que determinan los extremos de la cruz son:

- α Crucis (Ácrux), la más brillante de la constelación y duodécima más luminosa del cielo, de color blanco-azulado; está a 325 años luz del Sistema Solar.
- β Crucis (Becrux o Mimosa), subgigante azul, situada a 280 años luz del Sistema Solar. Estrella de dos componentes separadas por siete unidades astronómicas, con período orbital de 5 años.
- γ Crucis (Gacrux), gigante roja de gran tamaño. Distancia: 88 años luz .
- δ Crucis (Decrux), subgigante azul. Distancia: 360 años luz .

La figura 4.8 muestra cómo orientarnos observando la posición de la Cruz del Sur, el mismo método que utilizaron muchas generaciones anteriores.

Figura 4.8. Cómo orientarse mirando a la Cruz del Sur



Fuente: Adaptado de Astroturismo, s.f.

En el hemisferio sur, la rotación de la Tierra permite ver que, en el transcurso de una noche, el conjunto de las estrellas fijas parece girar rígidamente alrededor del polo sur celeste.

El mismo fenómeno se observa en el hemisferio norte alrededor de un eje que pasa por la estrella polar. La figura 4.9 es una fotografía de la Vía Láctea y la figura 4.10 está tomada con una cámara apuntada al polo sur celeste, cuyo obturador se mantuvo abierto durante un tiempo.

Actividad 4.1.

Estime el tiempo que estuvo abierto el diafragma de la cámara para lograr la foto de las trazas de las estrellas. Explique.

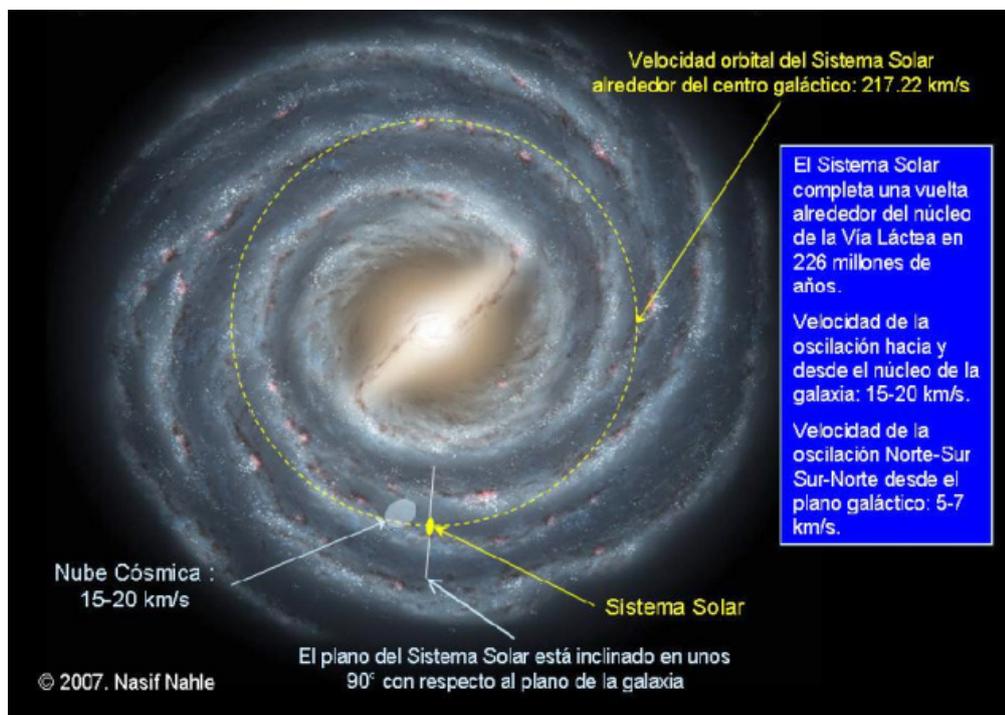
Figura 4.9. Vista nocturna del cielo alrededor del polo sur



Fuente: Iztok Bončina/ESO, 2010.

El giro de 360° de la Tierra sobre su eje en 24 h , nos hace ver que las estrellas lejanas, relativamente quietas, describen círculos en el cielo a nuestro alrededor, de la misma manera que vemos el resto del parque cuando giramos con la calesita. Los planetas, en cambio, parecen avanzar y retroceder en el cielo, de allí el nombre; la palabra *planeta* proviene del griego $\pi\lambda\alpha\eta\eta\tau\eta\varsigma$ que significa ‘vagabundo’.

Figura 4.10. Ubicación del Sistema Solar en la Vía Láctea



Fuente: NASA y Nasif Nahle, 2007.

4.5.1. La Vía Láctea

Nuestro Sistema Solar forma parte de una galaxia, la Vía Láctea, cuyo nombre es una traducción del latín y describe el aspecto que tiene vista desde la Tierra, ya que aparece como una banda luminosa en el cielo nocturno. Esto se debe a que está formada por gran cantidad de estrellas que no pueden separarse a simple vista.

Vista desde la Tierra, la Vía Láctea aparece como una banda de estrellas porque estamos viendo su estructura, en forma de disco, desde el interior. En 1610, y utilizando el telescopio que acababa de construir, Galileo Galilei fue el primero en resolver la luz de las estrellas individuales. Hasta 1920, se pensaba que la Vía Láctea contenía todas las estrellas del universo. Las observaciones de Edwin Hubble demostraron que es solo una entre muchas galaxias.

Es una *galaxia espiral barrada* con un diámetro de entre 100.000 y 180.000 años luz. Esto significa que es una galaxia espiral con una banda más o menos recta de estrellas brillantes. Esta barra se extiende desde el centro de la galaxia hasta diferentes distancias, en algunos casos, casi hasta el borde. Los brazos espirales emanan de los extremos de cada barra. Esto es visible en el centro de la figura 4.10.

Se estima que la Vía Láctea contiene entre 100 y 400 millones de estrellas y probablemente haya unos 100 mil millones de planetas. El Sistema Solar se encuentra dentro del disco, a unos 26.000 años luz del centro galáctico, en el borde interior de una de las concentraciones en forma de espiral de gas y polvo llamadas el Brazo de Orión. Las estrellas en el interior tienen una o más barras que se irradian del centro. El centro mismo está marcado por una fuente de radio intensa, llamada Sagitario A*, que es probablemente un agujero negro supermasivo.

Estrellas y gases a una amplia gama de distancias desde el centro galáctico orbitan a aproximadamente 220 kilómetros por segundo. La velocidad de rotación constante aparentemente contradice las leyes de Kepler y sugiere que gran parte de la masa de la Vía Láctea no es visible porque no emite radiación electromagnética, razón por la cual se denomina *materia oscura*.

El período de rotación de nuestra galaxia es de unos 240 millones de años en la posición del Sol. La Vía Láctea en su conjunto se mueve a una velocidad de aproximadamente 600 km por segundo con respecto a los sistemas de referencia extragalácticos.

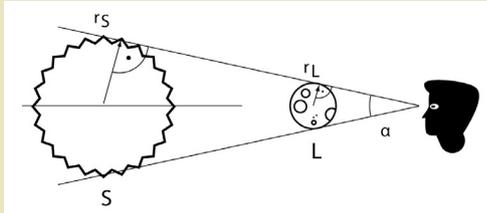
Las estrellas más antiguas de la Vía Láctea son casi tan viejas como el universo mismo y probablemente se formaron poco después de la Edad Oscura del Big Bang. La Vía Láctea tiene varias galaxias satélites y es parte del grupo local de galaxias, que compone el supercúmulo de Virgo, en sí mismo un componente del supercúmulo de Laniakea.

4.6. La astronomía en las diferentes civilizaciones

Se sugiere que, a partir de este punto, el lector organice la lectura mediante una recta histórica ubicando los sucesos más importantes de la astronomía en forma cronológica y agregue sucesos vinculados a las artes y otros aspectos de la civilización que se ubiquen en esa misma época.

Aristarco de Samos

Adhería a la hipótesis heliocéntrica y realizó estudios detallados para explicar el movimiento de los astros. Intentó determinar el tamaño relativo y las distancias al Sol y a la Luna.

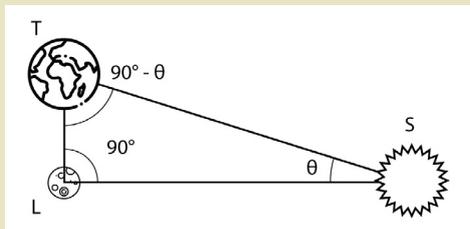


La Luna y el Sol observados desde la Tierra durante un eclipse de Sol. Ambos astros tienen aproximadamente el mismo tamaño angular, que resulta útil para estudiar su tamaño y distancias relativas. Los eclipses solares muestran que la Luna está más cerca de la Tierra que el Sol. Aristarco concluyó que la Luna debe ser más pequeña que el Sol y debe cumplirse la relación.

$$\frac{r_S}{d_{TS}} = \frac{r_L}{d_{TL}} = \sin \frac{\alpha}{2}$$

donde d_{TS} y d_{TL} son las distancias Tierra-Sol y Tierra-Luna y r_S y r_L los radios. Conociendo estos conoceríamos las distancias midiendo el ángulo α .

Aristarco desarrolló un método para relacionar el radio de la Luna con el de la Tierra, lo cual permitiría calcular el radio lunar conociendo el terrestre. Utilizó la idea de que cuando la Luna está en cuarto creciente o en cuarto menguante, el Sol, la Luna y la Tierra están en los vértices de un triángulo rectángulo:



El ángulo en el vértice de la Luna es de 90° y se cumple

$$\frac{r_L}{r_S} = \frac{d_{TL}}{d_{TS}} = \sin \theta$$

Desde la Tierra podemos medir el ángulo $90^\circ - \theta$. De allí Aristarco obtuvo un valor aproximado para el tamaño relativo del Sol y la Luna.

4.6.1. Prehistoria

Figura 4.11. Solsticio de verano en Stonehenge



Fuente: Simon Wakefield, 2008.

El monumento de Stonehenge en Inglaterra, figura 4.11, situado a unos quince kilómetros al norte de Salisbury, es una construcción prehistórica que data de alrededor de 2500 a. C., en la misma época que la Gran Pirámide de Egipto. Consta de una circunferencia de piedra con dinteles y era importante hasta en la temprana Edad de Bronce (2200-1500 a. C.). Se cree que era un observatorio astronómico avanzado que permitía predecir eclipses de Luna y de Sol. La posición del sistema de piedras permite predecir con precisión cada evento lunar importante durante un largo tiempo. A partir de su decodificación, se pudo descubrir un ciclo de 56 años para los eclipses.

Cada año el primer día de verano, solsticio –que proviene del latín *solstitium* y significa *sol sistere*, ‘sol quieto’– el Sol sale por un punto que está más al sur que en cualquier otro día del año. En el amanecer de ese día la luz del Sol atraviesa el eje de la construcción, por lo que se piensa que los constructores tenían conocimientos de astronomía. El mismo día, el Sol se oculta atravesando el eje del llamado Woodhenge, donde se han encontrado gran cantidad de huesos de animales que evidencian que, al anochecer, se realizaban allí celebraciones.

4.6.2. Grecia

Un modelo geocéntrico aparece por primera vez en Grecia como una idea de Eudoxo de Cnido (390-337 a. C.), quien fue apoyado por Aristóteles. Por su parte, Aristarco de Samos (310-230 a. C.), desarrolló un modelo heliocéntrico del Sistema Solar y fue el primero en calcular la relación de distancias Tierra-Luna y Tierra-Sol. Según su modelo, el Sol ocupa el centro del universo y todos los demás astros giran a su

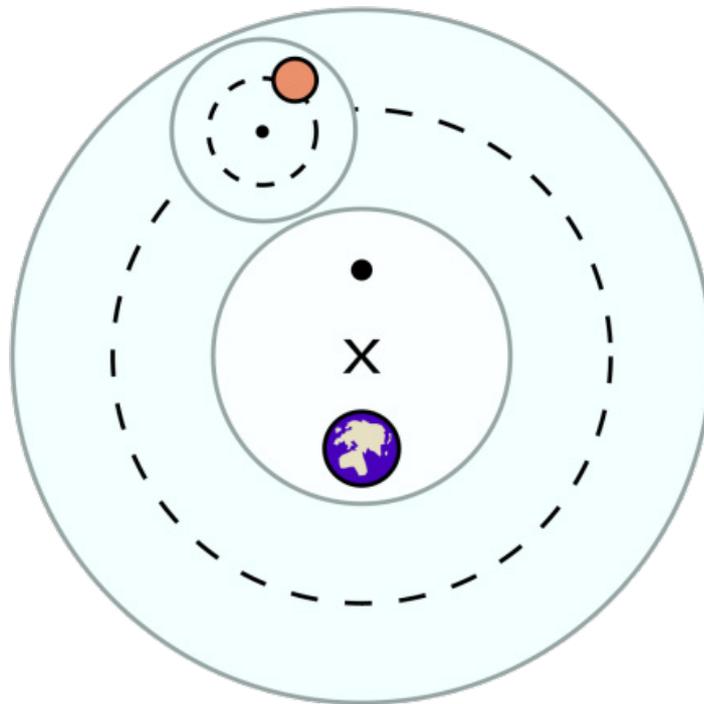
alrededor, algo ya descrito en las obras de Arquímedes. Se aproxima bastante a las ideas actuales pero no fue bien acogido porque chocaba con las observaciones cotidianas y se consideraba ofensivo para los dioses, pues contradecía la idea de que la Tierra era el centro de la creación.

Como ese modelo no explicaba algunos fenómenos observados, Tolomeo (Klaudio Tolomaios, 107-100 a. C.) alrededor del año 140 a. C., elaboró la primera visión cosmológica sistemática, desarrollada en su libro *Almagesto*. Supone que la Tierra se encuentra en el centro del universo, con la esfera celeste que gira a su alrededor. Esta hipótesis, basada en el testimonio de los sentidos, fue mejor recibida que la propuesta por Aristarco.

En el modelo de Tolomeo, la Tierra es el centro del universo y los astros se asientan sobre esferas, que se imaginaban de cristal, que giran a su alrededor. Para explicar el movimiento de los planetas, ideó un sistema en el cual cada planeta giraba en un círculo, llamado *epiciclo*, alrededor de un punto ubicado en la circunferencia de su órbita o esfera principal llamada *deferente*.

La figura 4.12 muestra los elementos básicos de la representación del movimiento aparente del Sol y los planetas con la Tierra como centro, en el modelo de Tolomeo.

Figura 4.12. Los epiciclos del sistema planetario de Tolomeo. Los elementos básicos de la astronomía de Ptolomeo muestran un planeta en un epiciclo (círculo de puntos más pequeño), un deferente (círculo de puntos más grande), el excéntrico (x) y un ecuante (punto negro agrandado)



Fuente: Fastfission, 2009.

Las circunferencias pequeñas –en la parte superior de la imagen– son los *epiciclos*. Como un planeta gira alrededor de su epiciclo mientras el centro de este se mueve sobre la circunferencia grande se logra, por la combinación de ambos movimientos, que el planeta se mueva en el sentido de las estrellas fijas (aunque con cierto retraso diario) y que, en ocasiones, revierta ese movimiento y parezca por un tiempo

adelantarse a las estrellas fijas. De esta manera se explica que, vistos desde la Tierra, los planetas puedan tener un *movimiento retrógrado* respecto de las estrellas.

Tolomeo tenía un notable conocimiento de astronomía. Entre otras cosas, en sus tratados demostró que la Tierra era redonda. Para ello, argumentó que si la estrella polar se eleva más alto hacia el norte que hacia el sur, la Tierra debe necesariamente ser curva en esa dirección. Su argumento a favor de la curvatura en la dirección este-oeste demuestra una observación aun más delicada. Si se establece el tiempo de los relojes de acuerdo con la posición del Sol, un eclipse de Luna debe verse en diferentes momentos de la noche en dos lugares separados en la dirección este-oeste. Dado que un eclipse lunar es un evento objetivo único, que debe ser visto simultáneamente en todas partes, llegó a la conclusión de que los relojes no se sincronizan debido a que la curvatura de la Tierra en la dirección este-oeste provoca que el Sol pase por el meridiano local de diferentes lugares a diferentes tiempos.

A pesar de este conocimiento, no estaba dispuesto a admitir ni la rotación de la Tierra, ni su traslación. Según su visión, la rotación de nuestro planeta dejaría atrás a los pájaros y al aire, que no podrían seguir ese movimiento. También se oponía a la posibilidad de que la Tierra se mueve a través de la esfera celeste; razonaba que, en tal caso, estaríamos acercándonos a sus límites, y algunas partes de esta se verían más grandes que las demás. Estas ideas parecen demostrar que dedicó bastante tiempo a pensar en estas posibilidades aunque también demuestran que tenía poco conocimiento de las leyes de la mecánica. Sus ideas filosóficas y físicas estaban, de hecho, basadas en los pensamientos de Aristóteles. La concepción cosmológica tolemeica dominó el conocimiento astronómico durante más de mil años.

Además de la determinación del tamaño de la Tierra, los griegos compilaron un catálogo de estrellas y un sistema de clasificación de las mismas basado en el brillo y la luminosidad aparente.

4.6.3. Edad Media

La parálisis de la actividad intelectual de Europa en las ciencias y en las artes, durante la Edad Media,⁷ afectó también a la astronomía. En el siglo XV renació el interés por el estudio de las ciencias debido, en parte, a la actividad de la *escuela de traductores de Toledo*, donde se traducían al latín los antiguos textos griegos. En su primer período –siglo XII– esta escuela fue dirigida por el arzobispo Raimundo de Toledo, quien promovió la traducción de obras filosóficas y religiosas del árabe clásico al latín. Luego, durante el siglo XIII, bajo el reinado de Alfonso X de Castilla –llamado el Sabio– los traductores utilizaron una de las formas del castellano, contribuyendo así a establecer las bases del castellano moderno.

La ocupación árabe de la península ibérica comenzó alrededor de 712 y terminó definitivamente en 1492. El fomento que los árabes habían dado a la traducción de los textos griegos llevó al surgimiento de estudiosos árabes que continuaron esos trabajos en varias ramas, incluyendo la astronomía. Estos conocimientos llegaron a Europa por vía de las traducciones de Toledo y también con las invasiones turcas en el siglo XV.

4.6.4. América precolombina

Si bien todas las culturas desplegaron alguna actividad astronómica, las civilizaciones agrícolas –por la necesidad de optimizar el tiempo de la siembra y de la cosecha– son las que alcanzaron mayores avances. Los pueblos de América Central

⁷ Edad Media: período comprendido entre los siglos quinto y décimo quinto. Comienza en el 476 (caída del Imperio romano de Occidente) y su fin es en 1492 (descubrimiento de América).

–mayas, zapotecas, mexicas (o aztecas) y otros– adoptaron un calendario desarrollado posiblemente por los olmecas hace unos 35 siglos. Los mayas conocían la periodicidad de los eclipses e inscribieron en monumentos de piedra fórmulas para predecirlos; también conocían la relación entre el movimiento del Sol y las salidas de Venus. Este desarrollo había comenzado ya en el tercer milenio antes de Cristo; hay registros de un eclipse de Luna ocurrido en febrero de 3379 a. C.

El calendario maya constaba de un año de 365 días con 18 meses de 20 días y un período intercalado de cinco días. Orientaban sus ciudades de acuerdo al movimiento de los astros y algunos edificios fueron construidos con el objeto de demostrar determinados fenómenos celestes. Un ejemplo es la pirámide de Chichén Itzá, que se muestra en la figura 4.13; a la izquierda vemos una vista panorámica de la pirámide y a la derecha se aprecia la sombra que proyecta el descenso de Kukulcán, una serpiente formada por las sombras que se crean en los vértices del edificio durante los solsticios. Las cuatro escaleras de la pirámide, junto a la plataforma superior suman 365 escalones.

Figura 4.13. Pirámide de Chichen Itzá



Fuente: Patrickrichaud, 2018.

Por su parte los incas, como pueblo agrícola, habían desarrollado notablemente la astronomía y conocían con precisión el tiempo entre dos conjunciones consecutivas de la Tierra con un mismo planeta. Tenían un calendario solar para la agricultura y uno lunar para las festividades religiosas.

El año solar inca constaba de 365 días, distribuidos en 12 meses de 30 días, con cinco días intercalados. Dominaron a otros pueblos de América y en el caso particular de los pueblos más antiguos del norte de la Argentina, este dominio se extendió desde aproximadamente 1470 hasta el arribo de los españoles a sus tierras, en 1535.⁸ La dominación inca llegó hasta Mendoza y parte de Córdoba e impuso a los pueblos dominados su idioma y su cultura.

⁸ Omaguacas, atacamas, diáguitas, calchaquíes, quilmes, huarpes y otros, intentaron resistir pero los incas lograron dominarlos. Sus métodos incluían el traslado forzoso de tribus de un lugar a otro, práctica que luego aplicaron los conquistadores españoles, en particular en el caso de los Quilmes, que fueron llevados desde los Valles Calchaquíes a la provincia de Buenos Aires.

En la región centro sur de nuestro país, previo a su conformación, habitaban pueblos nómades como los tehuelches, entre los que se incluye a patagones o chewelches, pampas, puelches y querandíes. Posteriormente, según algunos autores, comenzó a instalarse el pueblo mapuche en la región este de los Andes.⁹ Su cultura incorporó aportes incas debido al trato frecuente entre ambos grupos. Como otras culturas, suponían que sus deidades ejercían dominio sobre los fenómenos naturales. Según su creencia, algunos de estos poderes se rebelaron y en castigo fueron convertidos en piedra. Para lograr su arrepentimiento, el *Espíritu Poderoso* les puso el pie encima, formando así la cordillera de los Andes. Los arrepentidos pudieron salir de las rocas y observar el mundo, convertidos en llamas y humo de los volcanes. Algunos se elevaron al cielo, convirtiéndose en estrellas y su llanto de pena dio origen a la lluvia.

Esto repite una creencia que aparece en otras culturas: la deidad de los astros, con un lugar central para el Sol y la Luna, que son los padres de los hombres. Para todas las culturas, los fenómenos celestes eran importantes para fijar el calendario. Para los mapuches el año nuevo (*we tripantu*), coincide con el *solsticio de invierno* en el hemisferio sur y era predicho con cierta precisión por la observación de las Pléyades (*ngaupoñi*, ‘montón de papas’).

Estas pléyades (en griego Πλειας, *pleias*, que significa ‘muchas’) eran para los griegos las siete hijas de Atlas y de la ninfa marina Pléyone. Vulgarmente llamadas *las siete hermanas* o *las siete cabritas*, es un conjunto estelar observable a simple vista en el cielo. Para los mapuches, la aparición de estas estrellas por el este, una hora antes del amanecer, indicaba que faltaban doce días para el *we tripantu*. Esto refuerza la idea de la influencia inca, cuyo calendario también se regía por la aparición de las Pléyades.

La Cruz del Sur (*penon choique*, ‘pata del choique’), según algunos o *melipal* (cuatro estrellas) para otros, era la huella del ñandú (*choique*) que junto con las estrellas de la constelación del Centauro y la Vía Láctea constituían el río de arriba (*wenuleufü*).



La leyenda tehuelche del origen de la Cruz del Sur

<https://infobservador.blogspot.com/2014/05/la-leyenda-tehuelche-del-origen-de-la.html>

Autor: Marcelo Monópoli

4.6.5. El Renacimiento

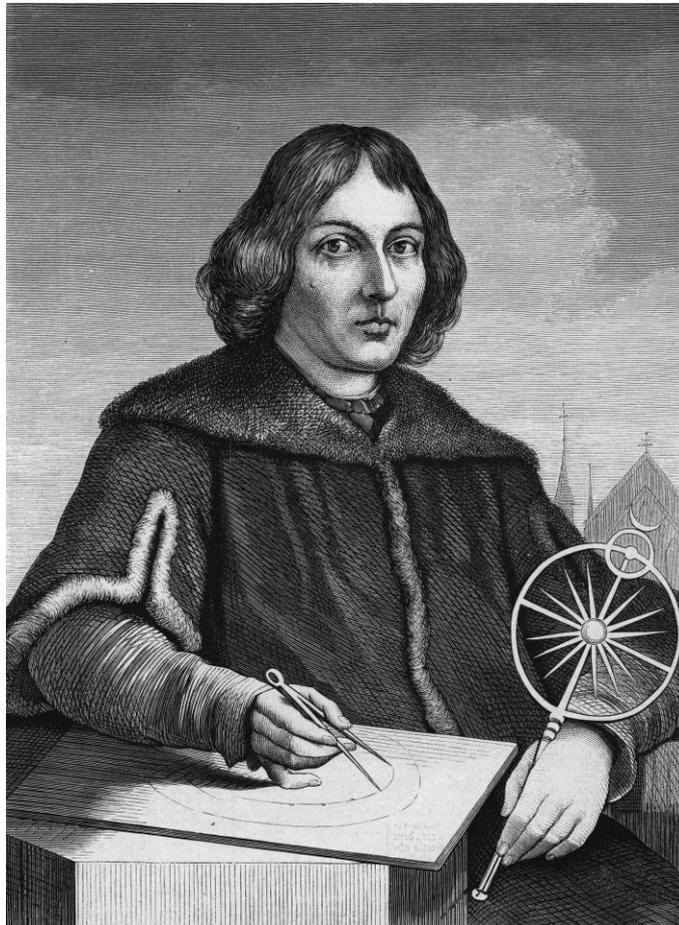
A partir del siglo xv hubo un rápido incremento del intercambio comercial entre las naciones del Mediterráneo, que trajo la búsqueda de nuevas rutas entre oriente y occidente. Es la época de los grandes descubrimientos y la exploración de nuevos territorios entre los que se cuenta América. El incremento del tráfico marítimo fomentó el estudio de la geografía, la astronomía y la cartografía, estimulando la invención de nuevos instrumentos como brújulas y relojes.

A este período pertenecen los astrónomos Nicolás Copérnico (polaco, 1473-1543), Tycho Brahe (danés, 1544-1401), Giordano Bruno (italiano, 1548-1600), Galileo Galilei (italiano, 1564-1642), Johannes Kepler (alemán, 1571-1628), Christopher Scheiner (alemán, 1575-1630), Johannes Hevelius (suizo, 1611-1687), Johannes Hevelius (alemán, 1611 -1687), Giovanni Cassini (italiano, París, 1625-1712), Christian Huygens (holandés 1629 -1695), Ole Rømer (danés, 1644-1710) y Giovanni Battista Hodierna (italiano, 1660-1597).

⁹ Martínez Sarasola (2012).

El astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) impulsó las ideas heliocéntricas, según las cuales el Sol se encuentra inmóvil mientras los planetas giran a su alrededor en órbitas circulares. En un comienzo Copérnico incluyó epiciclos para aproximarse a las observaciones pero pronto comprendió que estos no eran necesarios.

Figura 4. 14. Nicolás Copérnico



Fuente: Anónimo, s/f.

Demostrando una gran independencia de pensamiento, socavó las ideas de Ptolomeo a través de una nueva visión. En 1530 dio fin a su obra *De revolutionibus orbium coelestium*, en la que afirmaba que la Tierra y los planetas giran alrededor del Sol. Sus ideas no se basaban en pruebas que no hubieran estado a disposición de Ptolomeo ya que sus argumentos invocan exclusivamente razones de simplicidad. Calculó con precisión los radios de las órbitas planetarias y llegó a la conclusión de que el Sol se aparta algo del centro de esas órbitas.

Gracias a su capacidad para construir instrumentos astronómicos Tycho Brahe (1546-1601) abrió el camino para la determinación precisa de las órbitas planetarias. Sus observaciones fueron completadas por su ayudante Johannes Kepler (1571-1630), cuya fama superó la de su maestro. Kepler trabajó con Brahe en Praga, donde este último había buscado refugio, exiliado de Dinamarca, su país de origen.

Brahe desarrolló el sextante, lo que le permitió aumentar la precisión de las determinaciones cosmográficas llevándolas a medio minuto de arco. Con estos instrumentos, Kepler realizó observaciones que le permitieron encontrar las armonías del sistema planetario. En 1619 publicó su trabajo *Armonías del Universo* en el que presenta sus observaciones y conclusiones. En la introducción del libro dice Kepler:

Por fin lo he encontrado, y mis esperanzas y expectativas están demostrando que es verdad que las armonías naturales están presentes en los movimientos celestes, tanto en su totalidad como en los detalles –aunque no de la manera que me imaginaba previamente pero en otra, más perfecta–... Si usted me perdona, me alegraré, y si usted está enojado, me privaré de verlo. Aquí tiro los dados y escribo un libro para ser leído por mis contemporáneos o por las futuras generaciones. Puede esperar largos siglos por su lector. Pero incluso Dios mismo tuvo que esperar seis mil años por aquellos que contemplan su obra.

A pesar de la magnificencia de su obra, Kepler no fue capaz de admitir la posibilidad, considerada por Giordano Bruno (1548-1600), de que las estrellas distantes podrían ser sistemas solares independientes. Poco después de las obras de Kepler, Galileo Galilei (1564-1642) determinó un cambio sustancial en los medios de observación astronómica con la introducción del telescopio. Las observaciones de Galileo interesaron inmediatamente a Kepler. En una de las cartas de Galileo a Kepler, le dice:

Estoy muy agradecido de que usted haya tomado interés en mis investigaciones desde la primera mirada a las mismas y por lo tanto se ha convertido en la primera y casi la única persona que da plena credibilidad a mis argumentos, no podía realmente esperar otra cosa de un hombre con su entusiasmo y franqueza. Pero, ¿qué le diría a los filósofos notables de nuestra universidad que, a pesar de las reiteradas invitaciones, todavía se niegan a echar un vistazo, ya sea a la Luna o al telescopio y cierran los ojos a la luz de la verdad? Este tipo de personas se refiere a la filosofía como un libro, como La Eneida o La Odisea y creen que la verdad se descubrirá, como ellos mismos afirman, a través de la comparación de los textos y no a través del estudio del mundo o la naturaleza. Usted se echaría a reír si pudiera oír a algunos de nuestros filósofos universitarios más respetables tratar de discutir la existencia de los nuevos planetas a través de meros argumentos lógicos como si fueran amuletos mágicos.

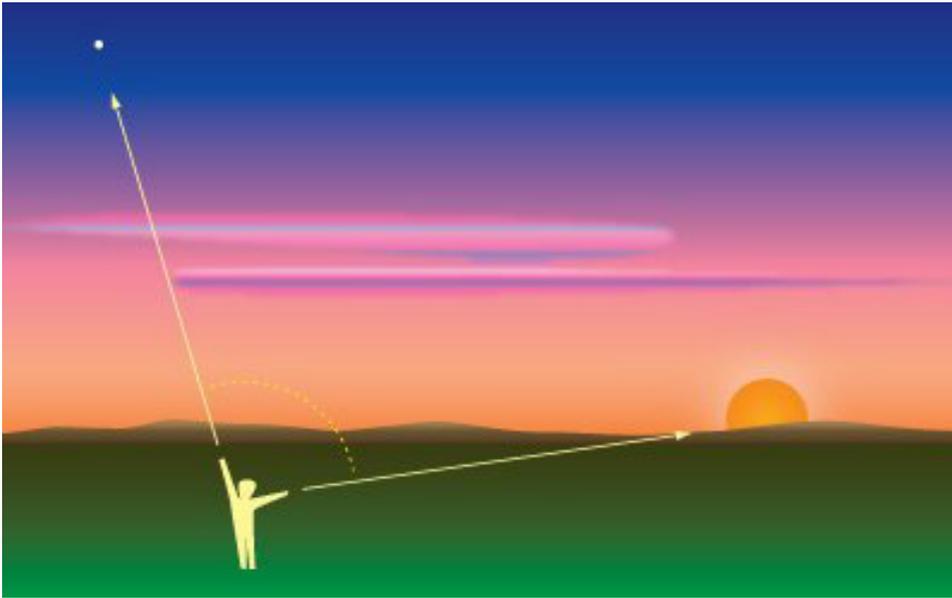
La victoria más importante de Galileo se debió precisamente a su confianza en las observaciones.

Isaac Newton (1643-1727) fue el gran unificador que desempeñó el papel final en este capítulo de la cosmología. Combinó los avances de Copérnico y Kepler y los descubrimientos individuales de Galileo en un sistema coherente. Percibió que las observaciones de Galileo sobre la caída libre de los cuerpos estaban vinculadas a sus propias observaciones astronómicas. Llegó a la conclusión de que la fuerza de atracción de la Tierra se extendía también a otros planetas y que era una propiedad común a todas las masas. Perseveró más de veinte años para corregir un error en sus cálculos de distancias, que le impidieron calcular correctamente el radio de la órbita lunar. Cuando comprendió el origen de la discrepancia, fue capaz de crear un marco armónico. La teoría que desarrolló fue confirmada a través de cálculos precisos de las órbitas planetarias, e incluyó la concepción heliocéntrica de Copérnico, las leyes de Kepler sobre las órbitas y las leyes de Galileo sobre la caída libre de los cuerpos.

4.7. Determinación del radio de las órbitas planetarias por Copérnico

En el modelo heliocéntrico, los planetas rodean al Sol en órbitas aproximadamente circulares. Copérnico pudo determinar el orden de los planetas y el tamaño de sus órbitas, midiendo la *elongación*, ángulo entre las visuales al Sol y al planeta desde la Tierra. Cuando podemos ver a Venus y el Sol al mismo tiempo, al atardecer o al amanecer, podemos medir su elongación usando un sistema que nos permita poner nuestras visuales a ambos objetos en un mismo plano (figura 4.15).

Figura 4.15. Ángulo de elongación, entre nuestras visuales a Venus y al Sol



Fuente: Material reproducido del sitio web de Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln (<http://astro.unl.edu>), s.f..

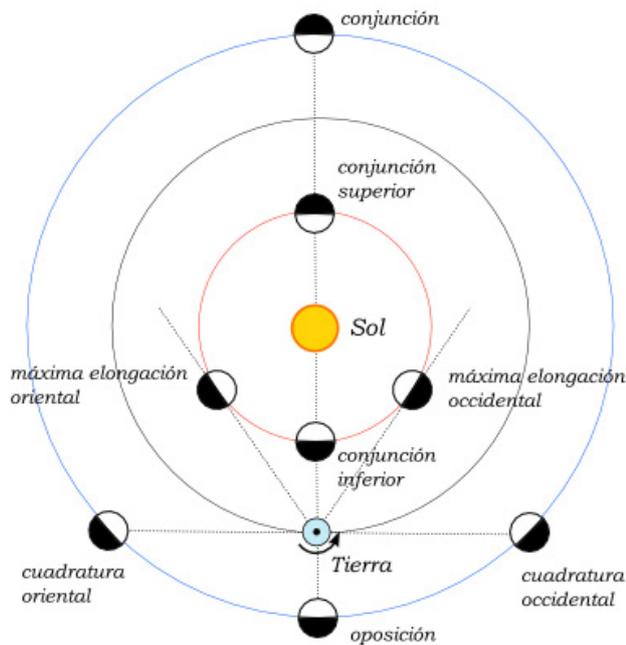
La situación es diferente según se trate de los *planetas inferiores* (interiores) o de los *planetas superiores* (exteriores); para los planetas inferiores, cuya órbita es de menor radio que la órbita terrestre (Mercurio y Venus) la elongación adquiere un valor máximo, dado por

$$\sin E_{max} = r$$

donde r es la distancia del planeta al Sol en UA. Cuando un planeta inferior está alineado entre la Tierra y el Sol, se dice que se encuentra en *conjunción inferior*, mientras que si se encuentra del otro lado del Sol se dice que se encuentra en *conjunción superior* (ver figura 4.16). Si pudiéramos ver el planeta en el cielo en ese momento, lo veríamos en la dirección al Sol; si el alineamiento fuera perfecto lo veríamos cruzar enfrente del Sol.

Cuando un planeta inferior es visible después de la puesta del Sol (figura 4.16), está próximo a su máxima elongación oriental. Cuando es visible antes del amanecer, está cerca de su máxima elongación occidental. El valor de la máxima elongación (oeste o este), para Mercurio, está entre 18° y 28° y para Venus entre 28° y 47° . Este valor varía debido a que las órbitas de los planetas son elípticas, en lugar de círculos perfectos. Otro factor que contribuye es la inclinación orbital: la órbita de cada planeta está en un plano ligeramente diferente.

Figura 4.16. Principales configuraciones de los planetas

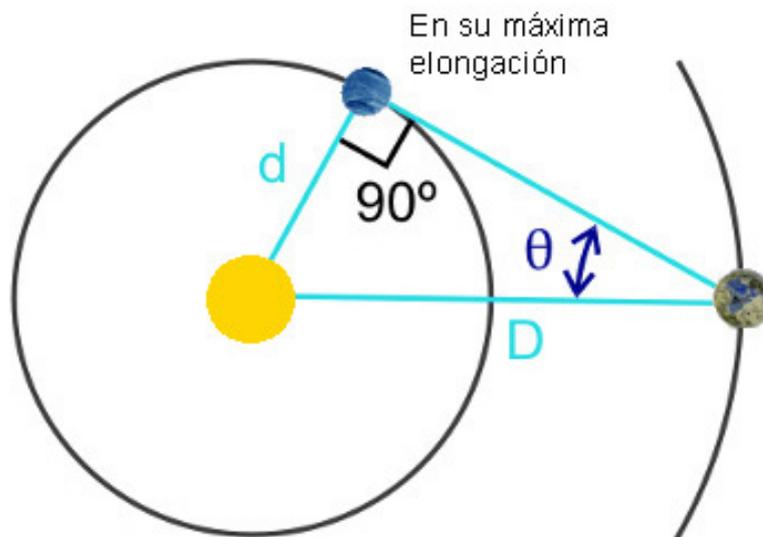


Fuente: Francisco Javier Blanco González, 2006.

En la figura, la órbita de la Tierra es el círculo azul. La órbita de planeta interior es el círculo rojo, la de un planeta exterior, azul. Elongación de un planeta es el ángulo entre la línea visual al Sol y la línea visual al planeta.

Para calcular el radio de la órbita de un planeta inferior notamos que si este está en su mayor elongación, como vemos en la figura 4.17, la visual desde la Tierra al planeta es tangente a la órbita; el Sol, el planeta y la Tierra se encuentran en los vértices de un triángulo rectángulo.

Figura 4.17. Máxima elongación de un planeta inferior



Fuente: Material reproducido del sitio web de Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln (<http://astro.unl.edu>), s.f.-a.

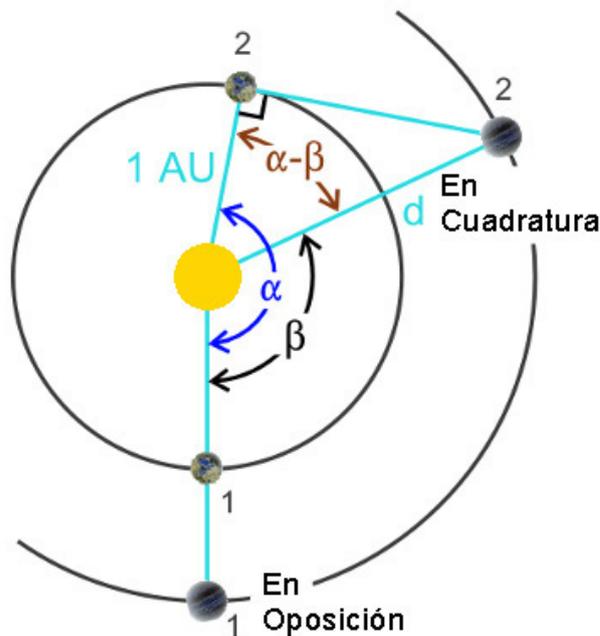
Llamando D la distancia Sol-Tierra y d el radio de la órbita del planeta, tenemos

$$d = D \sin \theta \quad (4.2)$$

es decir que, conociendo la máxima elongación θ podemos determinar el radio de la órbita del planeta inferior d en términos del radio de la órbita de la Tierra, D .

La figura 4.18 ilustra el caso de un planeta superior. Deben hacerse dos determinaciones de la posición del planeta. La figura muestra a la Tierra y Marte en oposición (línea 1-1) y en cuadratura (línea 2-2). Cuando Marte recorre el ángulo β , la Tierra lo aventaja y recorre el ángulo $\alpha > \beta$. Si llamamos Δt el tiempo que tarda la Tierra en recorrer el ángulo α para ir desde la posición 1 (oposición) a la posición 2 (cuadratura), tenemos la situación que muestra la figura 4.18.

Figura 4.18. Máxima elongación de un planeta superior



Fuente: Material reproducido del sitio web de Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln (<http://astro.unl.edu>), s.f.-b.

$$\alpha = \Delta t \times \frac{360^\circ}{T_T}$$

Donde T_T es el período de la Tierra. Si llamamos T_N el período de Marte, en el tiempo Δt este recorre el ángulo

$$\beta = \Delta t \times \frac{360^\circ}{T_M}$$

La diferencia entre estos dos ángulos nos da el ángulo Sol-planeta en cuadratura. Por tanto si d es el radio de la órbita del planeta superior tenemos

$$d = \frac{D}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (4.3)$$

donde D es la distancia Tierra-Sol y los ángulos α y β se determinan de manera indirecta. Los resultados obtenidos por Copérnico y la comparación con valores actuales se resumen en la tabla 4.1.

Utilizando los métodos de observación que describimos aquí, Copérnico determinó los radios de las órbitas de los planetas conocidos en su tiempo. La tabla 4.1 muestra esos resultados comparados con los valores actuales.

Tabla 4.1. Resultados de Copérnico

Planeta	Radio orbital (UA)	
	Copérnico	Moderno
Mercurio	0,376	0.3871
Venus	0,719	0.7233
Tierra	1,000	1.000
Marte	1,520	1,5237
Júpiter	5,219	5,2028
Saturno	9,174	9,5389

4.8. Las leyes de Kepler

Las mediciones detalladas de Tycho Brahe fueron aprovechadas por Kepler, quien invirtió varios años tratando de resolver algunos problemas que planteaba el modelo de Copérnico. Complementando los datos de Brahe con mediciones propias, Kepler llegó a entender la naturaleza de las órbitas de los planetas y pudo enunciar las leyes del movimiento planetario:

K1. Primera ley (1609). Los planetas se desplazan alrededor del Sol describiendo órbitas elípticas, con el Sol situado en uno de los focos, ver figura 4.19.

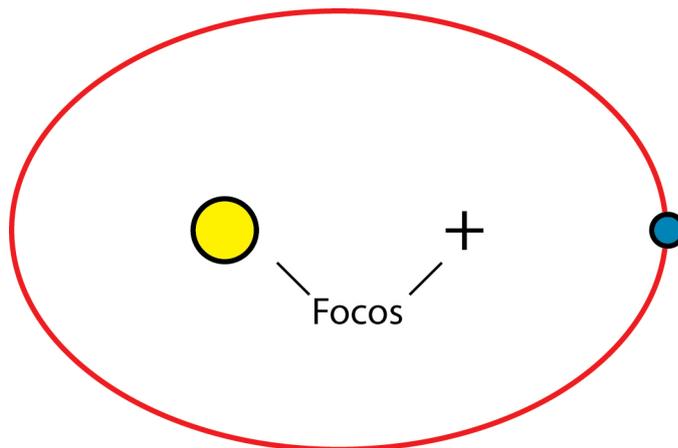


Fuente: Grabado de C. Barth, publicado en Meyers Konversations-Lexikon, Germany, 1859.

JOHANNES KEPLER (1571-1630)

Matemático, astrónomo y astrólogo alemán, clave en la revolución científica del siglo XVII. Conocido por sus leyes del movimiento planetario, basadas en sus obras *Astronomia nova*, *Harmonices Mundi*, y su comentario sobre la *Astronomía de Copérnico*, que proporcionaron las bases de la teoría de la gravitación de Newton. Profesor en Graz y en Linz, de Tycho Brahe y matemático imperial. Hizo trabajos fundamentales en óptica y mejoró el telescopio de refracción. En su época no había una distinción clara entre astronomía y astrología, pero sí una división entre astronomía y física. Incorporó argumentos religiosos a su trabajo, motivado por la convicción de que Dios había creado el mundo de acuerdo a un plan inteligible, accesible a través de la razón. Describió su nueva astronomía como física celestial y como una excursión a la *Metafísica de Aristóteles*. Transformó la tradición de la cosmología física tratando a la astronomía como parte de una física matemática universal.

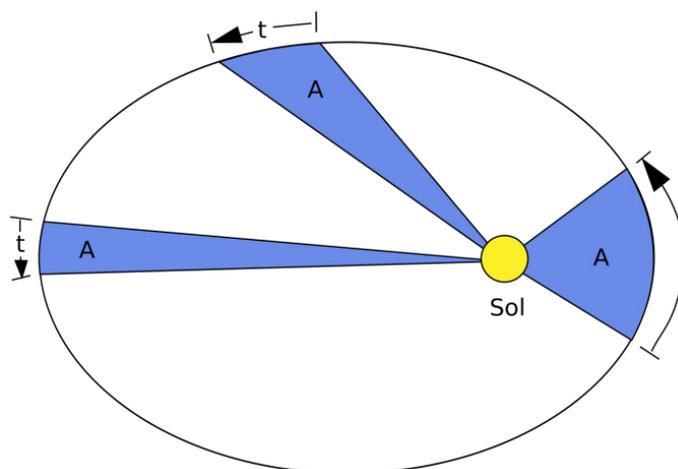
Figura 4.19. Esquema de la primera ley de Kepler



Fuente: Adaptado de Johanna Morales, 2017.

K2. Segunda ley (1609). El radio vector que une el planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales, ver figura 4.20.

Figura 4.20. Segunda ley de Kepler.
Las áreas marcadas son iguales y barridas en el tiempo t .



Fuente: Talifero, 2011.

K3. Tercera ley (1618). El cuadrado del período orbital T de un planeta –tiempo que tarda en dar una vuelta alrededor del Sol– es directamente proporcional al cubo de la distancia media al Sol, R .

$$T^2 = KR^3$$

donde K es una constante para todos los planetas del Sistema Solar. Newton demostró que la ley debe escribirse en realidad como

$$T^2 = Ka^3$$

donde a es el semieje mayor de la elipse que representa la órbita y la constante K vale

$$K = \frac{4\pi^2}{GM_{\odot}}$$

donde G es la constante de gravitación universal, $G = 6,674 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$, y

$M_{\odot} = 1,9891 \times 10^{30} kg$ es la masa del Sol.

Esta ley permitió establecer el radio de las órbitas de los planetas a partir de sus períodos orbitales. También permite estimar la masa Solar. La tabla 4.2 muestra algunas propiedades básicas de los planetas del Sistema Solar.

Tabla 4.2. Propiedades de los planetas

	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
Masa (kg)	$3,3 \times 10^{23}$	$4,869 \times 10^{24}$	$5,974 \times 10^{24}$	$6,419 \times 10^{23}$	$1,899 \times 10^{27}$	$5,68 \times 10^{26}$	$8,685 \times 10^{25}$	$1,024 \times 10^{26}$
Radio órbita (ua)	0,387	0,723	1	1,524	5,203	9,537	19,191	30,069
Período (año)	0,24	0,615	1,000	1,881	11,863	29,447	84,017	164,791
Vel. orbital (km/s)	47,872	35,021	29,786	24,131	13,070	9,672	6,835	5,478
Excentricidad	0,206	0,007	0,017	0,093	0,048	0,054	0,047	0,009

La tercera ley de Kepler también permitió determinar la masa de Júpiter a partir del período de sus lunas; del mismo modo, a partir del período de los planetas ligados a una estrella –exoplanetas o planetas extrasolares– puede determinarse la masa de la estrella.¹⁰

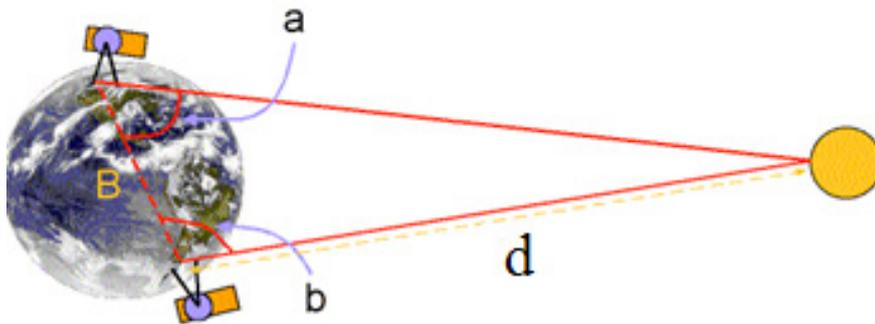
En el fértil ámbito que se desarrolló en Europa en el 1600, las ideas de Newton en el campo de la mecánica permitieron avanzar sobre el empirismo –época previa, cuyo máximo exponente fue Galileo– en la explicación de los movimientos celestes. El propio Newton demostró que las leyes de Kepler surgían naturalmente de las leyes de la dinámica por él desarrollada, combinadas con la ley de gravitación universal. En el capítulo 6 mostraremos cómo Newton pudo demostrar esto. Con estos avances parecía que la física era una herramienta poderosa para explicar el comportamiento del universo, un universo mecánico.

4. 9. Dimensiones del universo

El método de triangulación (capítulo 3), usado en agrimensura, también se aplica en astronomía para la determinación de distancias no demasiado grandes. Tal es el caso de la medición de la distancia Tierra-Marte, figura 4.21, realizada en 1672 por Giovanni Cassini en París y su ayudante Jean Richer en Cayena, Guayana Francesa, ubicación necesaria para observar a Marte en oposición. Estos astrónomos se reunieron luego en París, y con los datos aportados por cada uno, calcularon la distancia a Marte. Gracias a las mediciones anteriores de Copérnico se pudo determinar la distancia Tierra-Sol.

¹⁰ Ver «Los exoplanetas que se han descubierto pueden albergar vida, ahora hay que buscarla» (2017).

Figura 4.21. Determinación de la distancia a Marte



Fuente: Nick Strobel (www.astronomynotes.com), 1998.

Ejercicio:

Utilizando los ángulos a y b medidos por Cassini en París y su ayudante Jean Richer en Cayena, y la distancia B estimada por ellos, determinar la distancia Tierra-Marte, d . Sugerencia: ver figura 3.10.

Con la invención del radar, la distancia a Venus pudo determinarse con gran precisión, midiendo el tiempo que tarda el haz del radar –viajando a la velocidad de la luz– para recorrer la distancia al planeta y regresar.¹¹ Es decir

$$\text{distancia} = (\text{velocidad de la luz}) \times (\text{tiempo total}) / 2.$$

En la actualidad, y con referencia a la figura (4.21), mediante el uso del radar puede medirse la distancia de la Tierra a Marte y luego por trigonometría obtendríamos el valor de la unidad astronómica $UA = 149.597.892 \text{ km}$. Este increíble grado de precisión es posible porque la velocidad de la luz es una constante universal y se utilizan relojes muy precisos. No puede utilizarse el radar para determinar la distancia al Sol directamente porque no tiene superficie sólida para reflejar la radiación de manera eficiente.

El método tampoco resulta práctico cuando el objeto celeste se encuentra muy lejos, como es el caso de las estrellas, pues da lugar a grandes errores. En ese caso se utiliza el método de la *paralaje*, una especie de triangulación específica, que veremos en la sección siguiente.

4.9.1. El fenómeno de paralaje

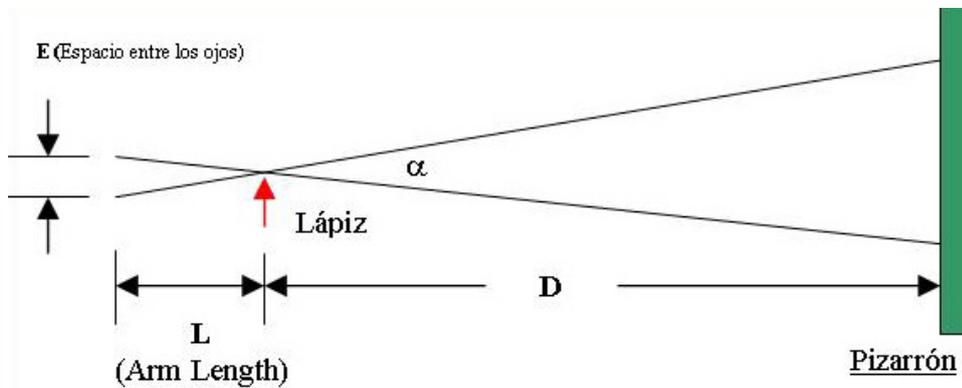
La paralaje es un fenómeno óptico que vemos a menudo pero al que no le prestamos atención. Podemos observarlo poniendo un lápiz o un dedo delante de los ojos, con el brazo extendido y con un fondo no uniforme, es decir que tenga marcas que nos permitan distinguir un punto de otro. Mantenemos la cabeza y el dedo quietos y miramos primero con un ojo y luego con el otro, veremos que la posición del dedo respecto al fondo cambia.

Esto se debe a que entre los dos ojos hay una separación de algunos centímetros, de modo que la línea imaginaria que une el lápiz con uno de los ojos forma

¹¹ La distancia Sol-Tierra es recorrida por la luz en ocho minutos

un ángulo con la línea imaginaria que los une con el otro ojo. Si prolongamos estas líneas imaginarias hasta el fondo no uniforme, tendremos dos puntos que corresponden a las dos posiciones aparentes del lápiz. El dibujo muestra una vista esquemática de la situación, vista desde arriba (no a escala).

Figura 4.22. Paralaje de un lápiz



Fuente: Argelia Sol-Haret Báez Barrios, 2009.

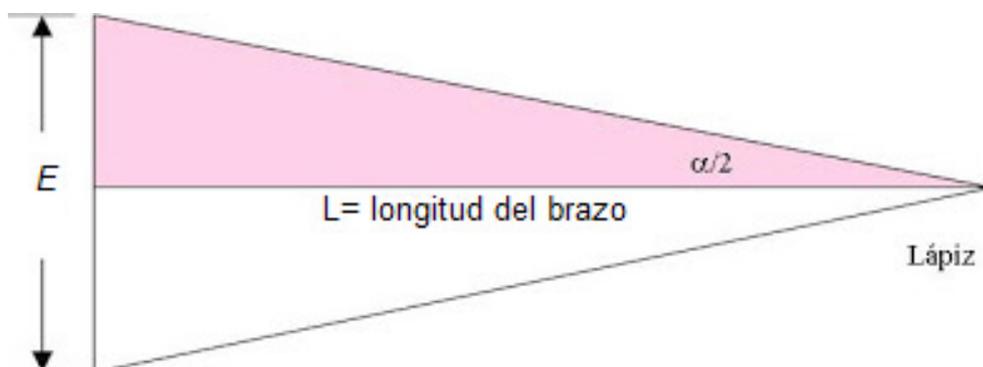
Para entender en qué consiste la paralaje y cómo permite determinar distancias a objetos alejados les proponemos la siguiente actividad.

Párese a una distancia de 4 m aproximadamente del pizarrón o de alguna pared, sosteniendo un lápiz verticalmente con el brazo extendido.

Ahora cúbrase un ojo y pida a un miembro del grupo que marque una línea vertical en el pizarrón, alineada con su imagen del lápiz. Cúbrase el otro ojo y pida que hagan una segunda marca vertical en la nueva posición en la que usted ve el lápiz, que parece cambiar de posición relativa a las marcas en el pizarrón a causa de que estamos cambiando el punto de observación de un ojo al otro. Pida que sus compañeros midan la distancia entre sus ojos, E .

Para medir el desplazamiento angular del lápiz, la *paralaje* del lápiz, observamos la figura inferior. Con hilos delgados podemos marcar en el piso la proyección de las líneas que van de cada ojo al lápiz y a la respectiva marca en el pizarrón, y así medir directamente el ángulo de paralaje α .

Figura 4.23. Cálculo de la distancia al lápiz



Fuente: Argelia Sol-Haret Báez Barrios, 2009a.

El ángulo α en la figura es igual al abarcado por los ojos del observador y el lápiz y es igual al ángulo que acaba de medir. Por convención, para la paralaje se

acostumbra determinar la mitad del ángulo, es decir $\alpha / 2$. A partir del triángulo sombreado tenemos la relación

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{E / 2}{L}$$

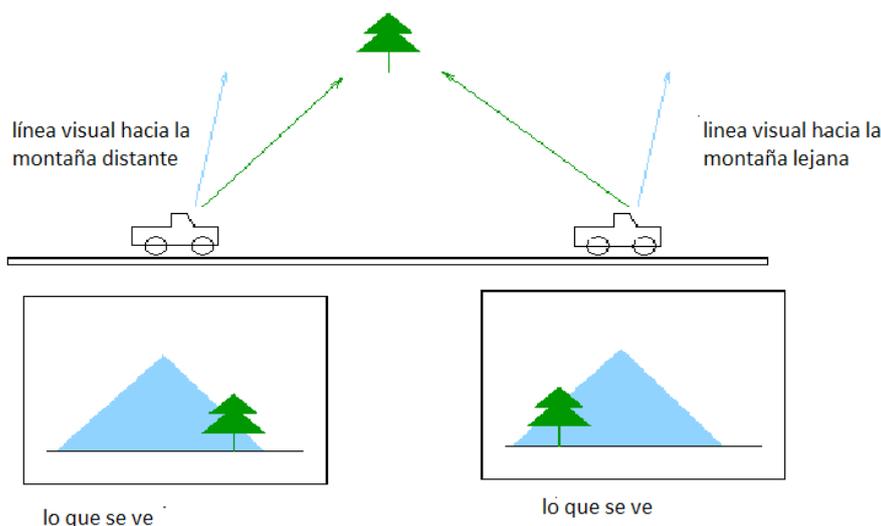
o también

$$L = \frac{E}{2} \left(\frac{1}{\tan \alpha / 2} \right)$$

A partir de esta relación, usando la distancia entre los ojos E (línea de base) y el ángulo $\alpha / 2$ podemos calcular la longitud del brazo L .

Ahora veremos un ejemplo que permite entender el fenómeno de la paralaje en un contexto realista: supongamos que vamos en auto hacia el norte por una carretera cercana a la cordillera de los Andes, en un día claro. Imaginemos a la izquierda, a lo lejos, una montaña nevada y cerca nuestro, un árbol en un campo a cierta distancia de la carretera, ver figura 4.24.

Figura 4.24. Paralaje de un árbol en relación con una montaña lejana



Fuente: Ned Ladd, s.f.

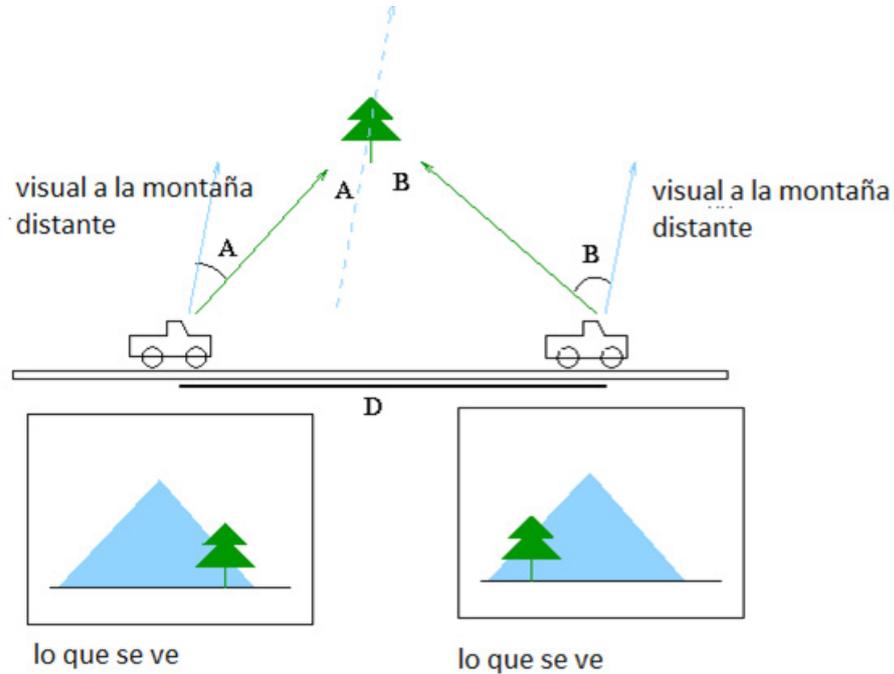
A medida que continuamos el viaje observamos que, cuando estamos en una posición como en la parte izquierda de la figura, el árbol parece estar a la derecha de la montaña. Esto se debe al hecho de que la línea verde de visión hacia el árbol está a la derecha de la línea azul de visión hacia la montaña. Una imagen de lo que se ve por la ventanilla se muestra en la parte inferior.

Cuando llegamos a la posición indicada a la derecha, el árbol aparece a la izquierda de la montaña; la línea de visión hacia el árbol –verde– está ahora a la izquierda de la línea de visión hacia la montaña –azul. Lo que se ve por la ventanilla del coche se muestra debajo del dibujo del coche, a la derecha en la figura 4.24.

El árbol y la montaña no se movieron; sin embargo el árbol parece haberse desplazado mientras nos movemos con el auto. Esto es así porque el árbol está más cerca de nosotros que la montaña. Este fenómeno es la *paralaje* y se usa para medir la distancia desde el auto hasta el árbol. Debemos medir el ángulo entre la visual al árbol y la visual a la montaña desde la posición a la izquierda –ángulo A – y desde la

posición a la derecha –ángulo B. Si la montaña está suficientemente lejos para que, desde ambos puntos de vista, la dirección de la visual hacia esta sea la misma, las dos líneas azules en la figura 4.25 son paralelas.

Figura 4.25. Ángulos A y B. Ambas visuales (azul) a la montaña son paralelas entre sí



Fuente: Ned Ladd, s.f.a.

El ángulo formado por las dos líneas verdes –la diferencia en la dirección hacia el árbol entre los dos puntos de vista– es igual a la suma $A + B$. Esto se ve dibujando una línea que pase por el árbol en forma paralela a las dos líneas azules en la figura, como la línea punteada. Las líneas azules son paralelas y por tanto cada una de las líneas verdes cruza un par de líneas paralelas. Si utilizamos lo que sabemos de geometría –teorema de Tales– o miramos atentamente la figura, veremos que los ángulos con vértice en el árbol, que llamamos A y B tienen el mismo valor que los ángulos A y B medidos desde ambas posiciones del automóvil. Por lo tanto, el ángulo entre las dos líneas verdes es igual a la suma $A + B$, dos ángulos que podemos medir desde el automóvil.

Si llamamos R a la distancia del camino al árbol y $\alpha = A + B$, para ángulos pequeños podemos escribir

$$\alpha = A + B \cong \frac{D}{R} \quad (4.4)$$

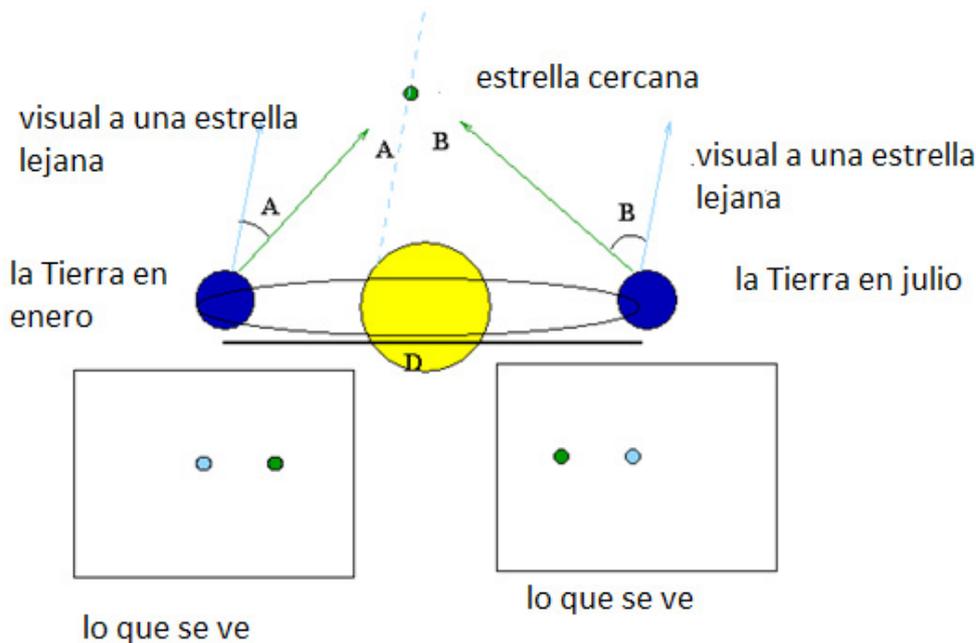
Para la distancia al árbol R obtenemos

$$R \cong \frac{D}{A + B} \cong \frac{D}{\alpha} \quad (4.5)$$

Vemos que hemos determinado la distancia al árbol. Lo notable de esta relación es que la distancia a la montaña no interviene en el resultado.

Esta forma de resolver el problema puede extenderse directamente a la astronomía. En el siguiente diagrama hemos reemplazado el auto que viaja por un camino, por la Tierra que viaja en su órbita alrededor del Sol; el árbol y la montaña son ahora una estrella cercana y una estrella distante, respectivamente.

Figura 4.26. Paralaje en astronomía



Fuente: Ned Ladd, s.f.b.

En enero la estrella verde aparece a la derecha de la estrella azul (parte izquierda de la figura). Seis meses más tarde, la Tierra se ha movido una distancia igual al diámetro de la eclíptica es decir, $2UA$ (dos unidades astronómicas) al otro lado del Sol, y las imágenes de la estrella cercana (verde) y la estrella distante (azul) aparecen simétricamente invertidas. Al igual que con el árbol y la montaña, las estrellas no se han movido. Solo aparecen en diferentes posiciones relativas en el cielo, porque nosotros nos movimos y porque una está más cerca de la Tierra que la otra.

Hemos cambiado la escala en varios órdenes de magnitud para pasar de la situación del árbol y la montaña a la situación de la Tierra y las estrellas, pero la geometría es la misma, y por lo tanto, el método para calcular la distancia a una estrella cercana también es el mismo. Podemos medir los ángulos A y B y de ese modo obtener el ángulo entre las dos líneas verdes que se unen en la estrella cercana. Como conocemos la distancia D que la Tierra ha viajado en los seis meses entre una observación y la otra, podemos calcular la distancia a la estrella cercana R con la relación.

$$A + B = \frac{D}{R} \quad (4.6)$$

Por lo tanto,

$$R = \frac{D}{A + B} \quad (4.7)$$

Las relaciones que usamos son válidas solo para ángulos pequeños, y en los dibujos que hemos utilizado, los ángulos no se ven demasiado pequeños. Sin embargo, cuando aplicamos estas relaciones a las estrellas, siempre tendremos ángulos pequeños. Por ejemplo, los ángulos A y B de la estrella más cercana a nuestro Sistema Solar, Próxima Centauri, son de menos de un segundo de arco o $1/3600$ de grado.¹² Aclaración: un segundo de arco es igual a exactamente un treinta y seis centésimo de grado ($1^\circ/3600$).

¹² Un segundo de arco es igual a un treinta y seis centésimo de grado ($1^\circ/3600$). En términos de radianes (unidad del SI) es $\pi/648000 \text{ rad}$ ó aproximadamente $4,848137 \times 10^{-6} \text{ rad}$.

Como vimos, la *paralaje* de una estrella es el ángulo a través del cual la estrella parece moverse (es decir, la semisuma de los ángulos A y B en los diagramas anteriores) para una línea de base (D en los diagramas) de $1UA$. En otras palabras, la paralaje es el ángulo bajo el cual se vería el diámetro de la órbita de la Tierra, en su traslación anual, desde la estrella. En resumen, la paralaje P es

$$P = \frac{A+B}{2} = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)}{R} \quad (4.8)$$

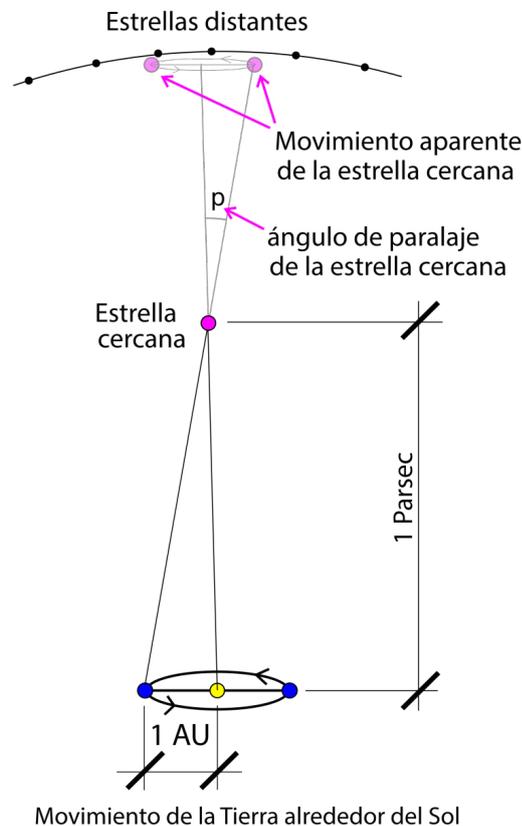
y se cumple

$$2R = \frac{D}{P} \quad (4.9)$$

4.9.2. Unidades de medida

El metro y el kilómetro resultan muy pequeños para medir distancias astronómicas. Esas distancias, además de ser muy grandes, son muy dispares entre sí; por ejemplo, si hiciéramos una maqueta del Sistema Solar a escala, donde representaríamos al Sol con una pelota de fútbol, la Tierra tendría un diámetro de 2 mm (una cabeza de alfiler) y estaría ubicada a $23,5\text{ m}$; Júpiter tendría 2 cm de diámetro y se ubicaría a 123 m ; Saturno tendría $1,8\text{ cm}$ y estaría a 226 m ; Plutón tendría un diámetro de $0,3\text{ mm}$ y estaría a más de 900 m .

Figura 4.27. Definición del parsec



Fuente: Srain, 2006.

La estrella más cercana al Sol (Próxima Centauri), por otra parte, estaría representada por otra pelota de fútbol ubicada en Venezuela (6330 km). Siguiendo con la comparación de tamaños, si representáramos todo el Sistema Solar por una moneda de 10 centavos, el diámetro de nuestra galaxia sería como la distancia de Ushuaia a Jujuy.

Por esta razón se ha generalizado el uso de distintas unidades de medida según de qué distancias astronómicas se trate. Así, para el tamaño de los planetas, se utiliza como unidad de medida el radio terrestre y para el tamaño de sus órbitas, la UA. Para distancias mayores, como las de las estrellas, se utiliza el año luz o el parsec, definido como la distancia a la que debería estar una estrella para que, desde ese lugar, el ángulo subtendido por la órbita terrestre sea un segundo de arco, como se muestra en la figura 4.27.

Las unidades usuales para grandes distancias son

$$1UA = 1,496 \times 10^{11} m = 1,496 \times 10^8 km.$$

$$1 \text{ año luz} = 9,461 \times 10^{15} = 9,46 \times 10^{12} km$$

$$1 pc = 3,086 \times 10^{16} m = 3,085678 \times 10^{13} km$$

Las dimensiones de los objetos visibles del universo se indican en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Objetos celestes visibles

Objeto	Dimensión
Tierra	12.760 km
Sol	1.400.000 km
Sistema Solar	1 mes luz
Vía láctea	10 ⁵ años luz
Grupo local de galaxias	10 ⁶ años luz
Universo visible	10 ¹¹ años luz

Problema 1.

¿Cuál es la paralaje del planeta Venus usando el diámetro de la Tierra como línea de base?

Solución 1.

Tomando como referencia la figura 4.20, pero suponiendo que el planeta es

Venus, tenemos para la paralaje pedida $\tan P = \frac{D_T}{d}$ donde llamamos D_T al

diámetro terrestre y d a la distancia Tierra-Venus. Para D_T tomamos el valor de tablas $D_T = 2 \times R_T = 2 \times 6.367 km = 12.734 km$.

Para la distancia d tomamos los astros en conjunción superior, figura 4.15, y tenemos $d = R_{OT} - R_{OV}$ donde $R_{OT} = 149.597.870,691 km$ es el radio medio de la órbita de la Tierra y $R_{OV} =$ el radio medio de la órbita de Venus; luego $d = 4.139 \times 10^7 km$.

$$\text{Así obtenemos } \tan P \cong P = \frac{D_T}{d} = 3,08 \times 10^{-4}.$$

Problema 2.

Los astrólogos (no los astrónomos) afirman que la posición de los planetas al momento de nacer influye sobre nuestras vidas. Para determinar si la fuerza de gravedad de otros planetas podría influir de alguna manera, compare la fuerza de gravedad que actúa sobre un bebé recién nacido (en la Tierra) debida a

1. El planeta Marte.
2. El médico que recibe al bebé.

Haga una hipótesis razonable sobre la masa del médico y su distancia al bebé.

Solución 2.

La fuerza gravitatoria entre la Tierra y Marte es máxima cuando Marte está más próximo a la Tierra; como las órbitas de ambos planetas son elípticas, la distancia entre ambos planetas varía—a medida que se mueven—entre un mínimo y un máximo, que son *401 millones de km* y *55 millones de km*, respectivamente. La distancia media es *225 millones de km*. En la solución utilizaremos la distancia mínima, que es cuando el efecto buscado debe ser máximo.

Datos

- Distancia Marte-Tierra $R = 55 \times 10^6 \text{ km} = 55 \times 10^9 \text{ m}$
- Masa de Marte $M_M = 6,4 \times 10^{23} \text{ kg}$,
- Masa del bebé $m_{BB} = 3 \text{ kg}$
- Constante de gravitación universal $G = 6,674 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$

Usando la ley de Newton de gravitación universal tenemos para la fuerza entre Marte y el bebé:

$$F_{Mar-BB} = G \frac{M_{Mar} m_{BB}}{R^2} = 6,674 \times 10^{-11} \times \frac{3 \times 6,4 \times 10^{23}}{(55 \times 10^9)^2} \text{ N} = 4,236 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Fuerza debida al médico:

- Distancia médico-bebé $d_{med-BB} = 0,25 \text{ m}$
- Masa del médico $M_{med} = 75 \text{ kg}$,
- Masa del bebé $m_{BB} = 3 \text{ kg}$

$$F_{med-BB} = G \frac{m_{med} m_{BB}}{d^2} = 6,674 \times 10^{-11} \times \frac{3 \times 75}{(0,25)^2} \text{ N} = 2,403 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Cociente entre ambas fuerzas

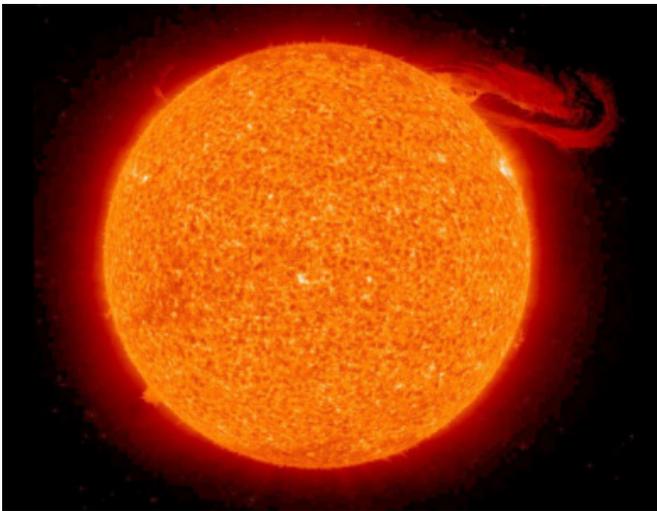
$$\text{Cociente} \left[\frac{F_{Mar-BB}}{F_{med-BB}} \right] = \frac{d^2}{R^2} \times \frac{M_M}{m_{BB}} = (4,236 \times 10^{-8} \text{ N}) / (2,403 \times 10^{-7} \text{ N}) = 0,176$$

Vemos que la influencia de Marte, si la hubiera, resulta algo más que la décima parte de aquella debida al médico.

4.10. Origen del Sistema Solar

Se estima que el Sistema Solar, constituido por el Sol y ocho planetas, sus lunas y otros objetos no estelares, se formó hace 4,6 mil millones de años. Las primeras teorías sobre el origen del Sol y los planetas datan del siglo XVIII. Los viajes espaciales y las sondas que exploran el Sistema Solar permitieron completar nuestro conocimiento sobre este a la vez que los avances en la física nuclear nos permiten entender las bases de los procesos que se desarrollan en las estrellas, lo que facilita la comprensión de los detalles de la formación y la evolución estelar en general y del Sistema Solar, en particular.

Figura 4.28. Fotografía del Sol en el espectro visible



Fuente: NASA, 2008.

La hipótesis dominante en la actualidad sobre el origen del Sistema Solar es la llamada *hipótesis nebular*, propuesta por el sueco Swedenborg. Ideas análogas fueron presentadas en 1796 por Laplace, quien además hizo importantes aportes a la comprensión de la dinámica de los planetas y del Sistema Solar. Esta hipótesis supone que una nube de materia –nébula– que contenía los restos de una supernova, dio origen al Sol y a los planetas por efecto de colapsos gravitatorios.

Una *nebulosa presolar* es una región de la nube de gas, de entre 7000 y 20.000 UA diámetro que pudo haber formado el Sol. La masa de esta nebulosa debía ser apenas más grande que el Sol actual, con una composición similar.

La composición en masa es cercana a 98% de hidrógeno y helio presentes desde el Big Bang y 2% de elementos más pesados creados por generaciones anteriores de estrellas que murieron y los expulsaron al espacio interestelar. El Sistema Solar se encuentra en

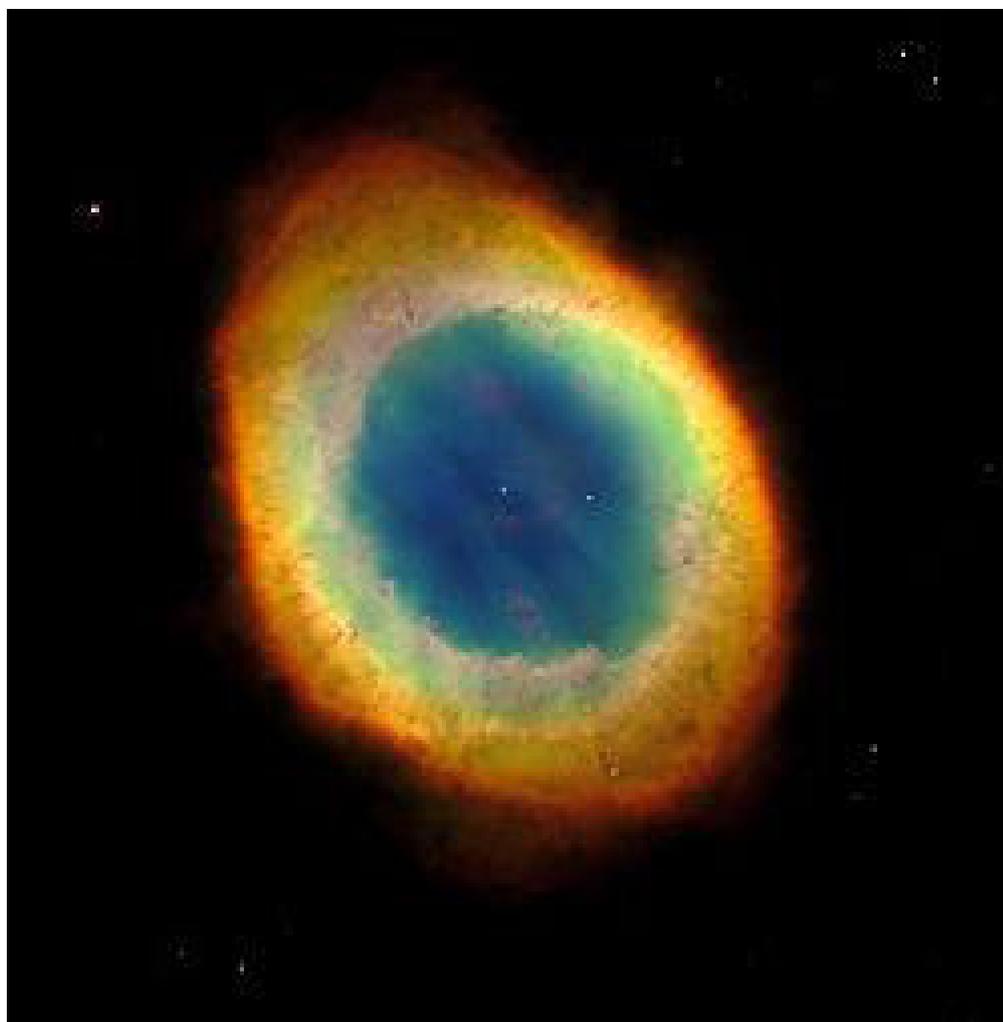
Masa de los planetas comparada con la Tierra y con Júpiter

	Tierra	Júpiter
Mercurio	0,0553	0,000174
Venus	0,815	0,00256
Tierra	1	0,00315
Marte	0,107	0,000338
Júpiter	318	1
Saturno	95,2	0,299
Urano	14,5	0,0457
Neptuno	17,2	0,0540

uno de los brazos exteriores de la galaxia de la Vía Láctea, que contiene cerca de 2×10^{11} estrellas. La masa solar es $M_{\odot} = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ y es usada como una unidad de medida en astronomía y astrofísica para comparar la masa de las estrellas y otros objetos astronómicos, como galaxias.

La hipótesis nebular se ve reforzada por el hecho de que el plano definido por la trayectoria de la Tierra –la eclíptica, ver capítulo 6– contiene la mayor parte de los cuerpos celestes que orbitan alrededor del Sol, lo que sugiere un origen común para el Sol y los planetas, en un único disco de materia estelar. La órbita de Plutón es excepcional, pues forma un ángulo de 17° con la órbita de la Tierra, lo que ha llevado a una serie de teorías ad-hoc sobre el origen de ese planeta. La órbita de Mercurio también tiene una inclinación diferente -7° respecto de la eclíptica. La figura 4.29 muestra la nebulosa planetaria del Anillo, una nebulosa planetaria prototípica situada en la constelación de Lira, a 2300 años luz de la Tierra, descubierta en 1779. Es una de las nebulosas más conocidas, un ejemplo de este tipo de objetos.

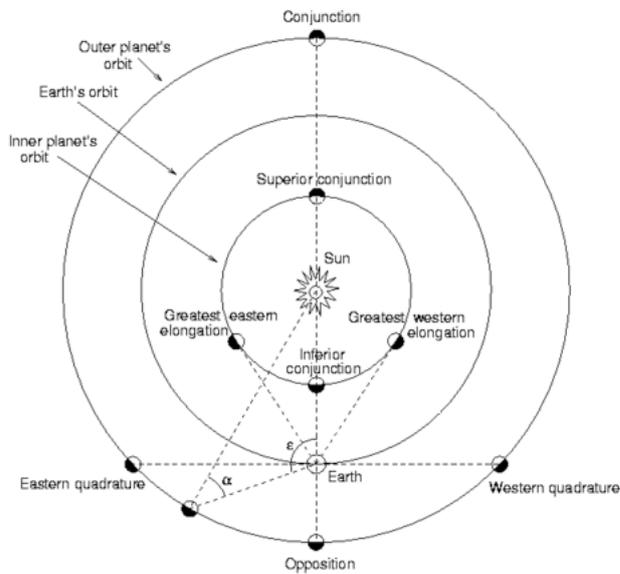
Figura 4.29. Nebulosa planetaria del Anillo



Fuente: The Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA), 1998.

A los planetas cuyas órbitas tienen menor diámetro que la terrestre (Mercurio y Venus) los llamó inferiores y a los demás, superiores. La distinción entre ambas clases se debe a su comportamiento respecto al Sol. Así, por ejemplo, un planeta inferior nunca está en oposición, figura 4.30.

Figura 4.30. Definición de los principales términos en la astronomía de posición



Fuente: Wmheric, 2010.

En el siglo xv Nicolás Copérnico pudo medir los radios de las órbitas de los planetas. Como en esa época no se conocía ninguna distancia astronómica, refirió sus mediciones al radio de la órbita terrestre.

4.11. El orden de los planetas

Los antiguos griegos ya habían determinado el orden que ocupaban los planetas en sus órbitas alrededor del Sol, observando que no todos se mueven con la misma velocidad respecto al fondo de las estrellas fijas. Algunos cambian respecto de ese fondo cada noche, mientras que a otros les toma meses o años hacer un cambio visible. Los griegos razonaron que la causa para esto es que los planetas que se mueven más rápidamente están más cerca de nosotros, mientras que los que se mueven más lentamente están más alejados. Esto les permitió ordenar los planetas de acuerdo a la velocidad observada. También pudieron determinar el período de cada uno.

Originalmente se creyó que los planetas se formaron en las órbitas en las que los vemos actualmente, o muy cerca de ellas. Esta visión cambió sobre el final del siglo xx y actualmente se piensa que el Sistema Solar se veía muy diferente apenas después de su formación inicial, con cinco objetos casi tan masivos como Mercurio presentes en el sistema solar interior (en lugar de los actuales cuatro), un sistema solar exterior mucho más compacto de lo que es ahora y un *cinturón de asteroides* (el *cinturón de Kuiper*) más adentro de lo que está en la actualidad.

Edad del Sistema Solar

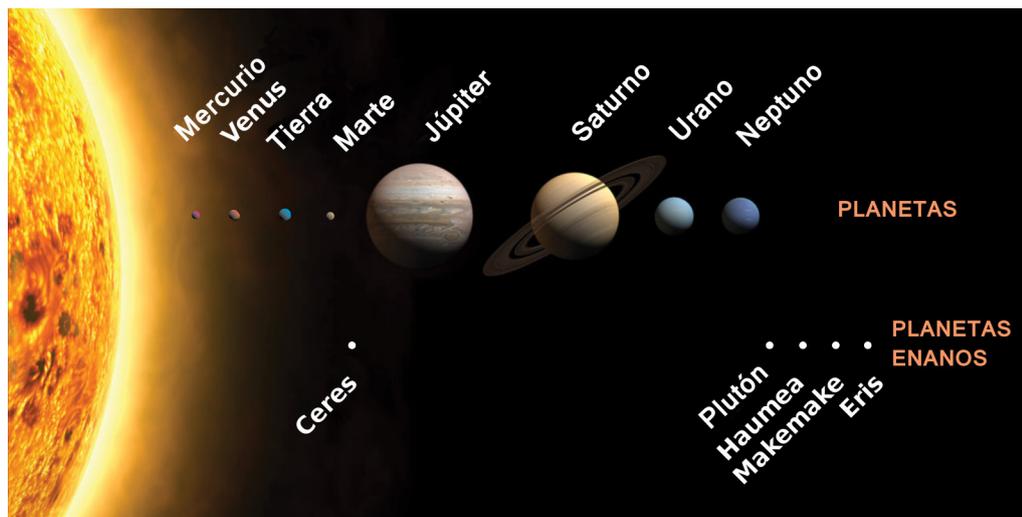
La edad del Sistema Solar puede estimarse a partir de mediciones en las rocas terrestres que contienen elementos radioactivos (datación radiométrica). Como estos materiales decaen en el tiempo, una población inicial de N_0 núcleos evoluciona de acuerdo a una ley exponencial. Transcurrido un tiempo t queda solo una cantidad $N < N_0$ de núcleos radiactivos, de acuerdo a

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t}} \text{ donde } t \text{ (vida media) es el}$$

tiempo que debe transcurrir para que la población inicial baje a la mitad. Los minerales de uranio y torio tienen vidas medias muy largas y decaen en cadenas de decaimiento que finalizan en un isótopo estable del plomo. La vida media de un nucleído no es afectada por factores como la temperatura, la presión, el entorno químico o los campos electromagnéticos. Esto permite utilizar la abundancia relativa de nucleídos relacionados entre sí, como un indicador del tiempo transcurrido desde la incorporación de un nucleído particular en un dado material. La tabla muestra algunos de los isótopos radiactivos más importantes con sus constantes de decaimiento y vida media.

Isótopo	λ (años ⁻¹)	t (años)
40K (40Ar)	5.81×10^{-11}	11.93×10^9
40K (40Ca)	4.962×10^{-10}	1.397×10^9
40K (total)	5.543×10^{-10}	1.25×10^9
235U	9.8485×10^{-10}	703.8×10^6
238U	1.55125×10^{-10}	4.468×10^9
232Th	4.9475×10^{-11}	14.01×10^9
87Rb	1.402×10^{-11}	49.44×10^9
147Sm	6.54×10^{-12}	106×10^9
176Lu	1.86×10^{-11}	37.3×10^9

Figura 4.31. Esquema del Sistema Solar



Fuente: NASA, Martin Kornmesser, Usuario:Pepedavila, 2012.

Se cree que el impacto de grandes meteoritos jugó un papel importante en el desarrollo del Sistema Solar. Desde hace tiempo se piensa que la Luna es fruto de un fenómeno de impacto, así como también algunos satélites de otros planetas. Una colisión entre objetos del cinturón de asteroides puede haber dado origen al sistema Plutón-Garonte. Colisiones de ese tipo han podido observarse recientemente, como la del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter en 1994. Sobre la superficie de la Tierra hay huellas del impacto de grandes meteoritos como el del Golfo de México, que posiblemente provocó la catástrofe que terminó con los dinosaurios, así como grandes cráteres en Siberia y en Arizona.

En el capítulo 9 veremos lo que la ciencia prevé para la evolución del Sol. Los viajes espaciales y las sondas que exploran el Sistema Solar permitieron completar nuestro conocimiento sobre este, a la vez que los avances en física nuclear permiten entender las bases de los procesos que se desarrollan en las estrellas, lo que facilita la comprensión de los detalles de la formación y la evolución estelar en general y del Sistema Solar, en particular.

Los planetas de nuestro Sistema Solar se dividen en terrestres o rocosos (Mercurio, Venus, Tierra y Marte) y gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Los planetas rocosos están formados principalmente por silicatos. Los gigantes gaseosos más masivos que la Tierra, como Júpiter y Saturno, están constituidos principalmente por gases como hidrógeno, helio y agua en sus diferentes fases. Todos los planetas rocosos tienen aproximadamente la misma estructura: un núcleo metálico, mayoritariamente férreo, y un manto de silicatos que lo rodea. La Luna tiene una composición similar, excepto el núcleo de hierro. Estos planetas tienen –como la Tierra– montañas, volcanes, cañones y cráteres. Además tienen atmósferas secundarias, procedentes de sus procesos geológicos o biológicos internos. Los gigantes gaseosos, en cambio, poseen atmósferas primarias, capturadas directamente de la nebulosa solar original.

El Sistema Solar también contiene regiones pobladas por objetos más pequeños. El cinturón de asteroides, situado entre Marte y Júpiter, es similar a los planetas terrestres, ya que la mayoría contiene objetos compuestos de roca y metal. Más allá de la órbita de Neptuno se encuentran el cinturón de Kuiper y el *disco disperso*, una región cuya parte más interna se superpone con el cinturón de Kuiper (a unas 30 UA del Sol) hasta una distancia aún indeterminada que podría ser de unos cientos de UA; está poblado por un número desconocido de cuerpos celestes.

Estos incluyen el asteroide Ceres y objetos como Plutón, Eris, Haumea y Makemake. Además de estas dos regiones, otras poblaciones del sistema incluyen los cometas, los centauros y polvo interplanetario, que viajan libremente entre las distintas regiones. Seis de los planetas, al menos tres de los planetas enanos, y muchos de los cuerpos más pequeños están en órbita con sus satélites naturales, por lo general denominadas *lunas*, como la Luna de la Tierra. Cada uno de los planetas exteriores está cercado por anillos planetarios de polvo y otros objetos pequeños. El viento solar, un flujo de plasma proveniente del Sol, crea un ambiente interestelar que se conoce como heliosfera, que se extiende hasta el borde del disco disperso. Al producirse el colapso de la nebulosa, la conservación de la cantidad de movimiento angular implicó que su velocidad de rotación aumentara, como sucede con una bailarina de *ballet* que recoge una pierna extendida y la une a la otra. Este incremento de la velocidad angular conlleva un incremento de la frecuencia de colisión entre los átomos del interior de la nebulosa, generando un incremento de temperatura, a causa de la energía liberada en forma de calor. En razón de la aislación provista por el resto de la masa de la nebulosa, el centro donde se acumula la mayor cantidad de materia, eleva su temperatura por encima del disco circundante. En estas circunstancias la gravedad compite con la presión del gas y con la fuerza centrífuga mientras actúan también intensos campos magnéticos. El efecto combinado de estos factores produce el aplanamiento de la nebulosa en contracción, que toma la forma de un *disco protoplanetario* con un diámetro de aproximadamente $200UA$, con una protoestrella caliente y densa en el centro.

Se han hecho estudios de un grupo de estrellas jóvenes, llamadas T Tauri, que se cree son similares al Sol en un momento anterior de su evolución. Esos estudios muestran que el núcleo de esas estrellas está acompañado por discos de materia preplanetaria que se extienden por varias UA y son relativamente fríos, con temperaturas de unos $1000 K$. Se cree que los planetas se formaron a partir de esa nube original a la que, por captura gravitacional, se agregó luego gas y polvo interestelar. El crecimiento posterior de los planetas se debe a un mecanismo llamado *acreción*, mediante el cual los planetas se inician como pequeños granos de polvo en órbita alrededor de la futura estrella central y luego por contacto directo, grupos de masas de entre uno y diez kilómetros de diámetro se van uniendo por atracción gravitatoria para formar cuerpos cada vez más grandes, incrementando lentamente su tamaño durante los siguientes millones de años.

La Luna

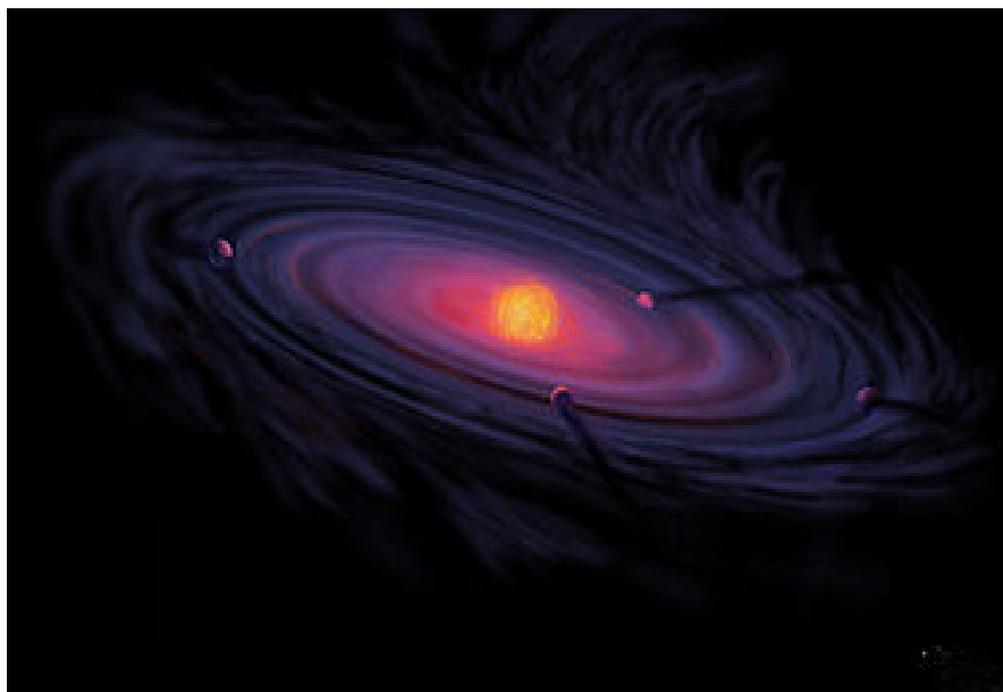


Fuente: Gregory H. Revera, 2010.

Diámetro: 3474,8 km
 Masa: $7,35 \times 10^{22}$ kg
 Distancia: 384.400 km
 Período: 27 d 7 h 43,7 min

Es un satélite relativamente grande comparado con la Tierra, cuyo diámetro es un cuarto del terrestre. La atracción de la Luna causa las mareas en la Tierra; la atracción de la Tierra hace que el período de rotación de la Luna sobre su eje sea igual al período de giro en torno a la Tierra, por lo que la Luna siempre nos presenta la misma cara. Simulaciones numéricas muestran que su atracción a la protuberancia ecuatorial de la Tierra estabiliza la inclinación del eje de rotación, lo que estabiliza el clima. Vista desde la Tierra tiene casi el mismo tamaño angular que el Sol (capítulo 6), lo que permite los eclipses totales de Sol. Se piensa que la Luna se formó con los restos del protoplaneta Theia que chocó contra la Tierra hace unos 10 años,9 lo que explica —entre otras cosas— la ausencia de hierro en la Luna, abundante en la Tierra. La hipótesis también podría explicar la inclinación del eje de rotación terrestre. Otra idea es que la Luna se formó a partir de una protuberancia de la Tierra, cuando el planeta se encontraba en estado plástico (caliente); fue puesta en órbita por la fuerza centrífuga sobre la protuberancia, que se originaría en el actual océano Pacífico. El hecho de que siempre vemos la misma cara de la Luna se debe a ese origen: al separarse, la Luna habría seguido teniendo un movimiento de traslación equivalente al de rotación terrestre, y siempre veríamos la misma zona de la Luna que permaneció unida a la Tierra hasta el último momento.

Figura 4. 32. Discos protoplanetarios en la nebulosa de Orión



Fuente: NASA, Pat Rawlings, s.f.

La figura 4.32 muestra una guardería de estrellas, posiblemente similar a la nebulosa primordial a partir de la cual se formó el Sol.

Planetas								
Planeta	Dist. al Sol Km	Diámetro km	Período de revolución	Período orbital	Aceleración g	T (°C)	Atm.	Lunas
Mercurio $5,79 \times 10^7$	4878	59 días	88 días	0,38	–,38 a 427	Vestigios de Na, He	0	
Venus	$1,08 \times 10^8$	12104	243 días	224 días	0,9	480	CO ₂ (96%) N ₂ (3.5%)	0
Tierra	$1,5 \times 10^8$	12756	23 h 56 min	365,25 días	1	14	N ₂ (77%) O ₂ (21%)	1
Marte	$2,28 \times 10^8$	6,794	24 h 37 min	687 días	0,38	–,38 CO ₂ (95,3%), Ar (1,6%)	2	
Júpiter	$7,78 \times 10^8$	142984	9 h 55 min	11,86 años	2,64	–,64	H ₂ , He	66
Saturno	$1,43 \times 10^9$	120536	10 h 39 min	29 años	1,16	–,16	H ₂ , He	62
Urano	$2,87 \times 1^9$	51118	17 h 14 min	84 años	1,11	–,11	H ₂ , He, Metano	27
Neptuno	$4,49 \times 10^9$	49532 16 h 7 min	164,8 años	1,21	0,21	H ₂ , He, Metano	13	

Inicialmente, la temperatura de los planetas próximos al Sol era demasiado elevada para permitir la condensación de agua o metano, así que los agrupamientos de materia –llamados *planetesimales*– que se formaron en esa región eran pequeños

y sumaban alrededor del 0,6% de la masa total del disco. Compuestos principalmente por materiales de alto punto de fusión como silicatos y metales, finalmente se convirtieron en planetas rocosos (Mercurio, Venus, Tierra, Marte). El juego de fuerzas se complicó al formarse Júpiter, cuya masa era un milésimo de la del Sol y competía con este por sus efectos gravitacionales. Esto hizo imposible que se unieran los objetos protoplanetarios presentes, que quedaron atrapados en el *cinturón de asteroides*, cercano a Júpiter. A mayor distancia del Sol las temperaturas son más bajas y así se define la llamada *línea de hielo* como una distancia al protosol central a partir de la cual los compuestos de hidrógeno, como agua, amoníaco y metano se condensan en cristales sólidos.¹³ En el Sistema Solar esa línea está ubicada a alrededor de 2,7 UA cerca de la mitad de la distancia al cinturón de asteroides.

La baja temperatura de la nebulosa, más allá de la línea de hielo, provoca un incremento de la cantidad de gránulos sólidos disponibles para la acumulación en los planetesimales y planetas. La línea de hielo separa por tanto, los planetas rocosos de los planetas gaseosos del Sistema. Sin embargo, en otros sistemas planetarios –alrededor de otras estrellas– se han encontrado planetas gaseosos gigantes dentro de la línea de hielo. Se cree que se formaron más allá, y luego migraron hacia sus posiciones actuales.

Como en la vecindad de Júpiter y Saturno se encontraba gran cantidad de compuestos volátiles, estos planetas acumularon más material que los planetas rocosos, convirtiéndose en gigantes gaseosos, mientras que Urano y Neptuno capturaron menos material y son conocidos como *gigantes de hielo* porque se cree que sus núcleos están hechos principalmente de compuestos de hidrógeno.

4.12. La Tierra

La Tierra es el tercer planeta del Sistema Solar en orden de distancia al Sol y es el cuarto en tamaño y se encuentra a 150×10^6 km del astro (1UA). No se conoce otro planeta en el Sistema Solar o fuera de él en el que se sepa de la existencia de vida.

Su volumen es un millón de veces menor que el del Sol y su masa nueve veces mayor que la de la Luna. La temperatura media de su superficie es de unos 15 °C. Su forma corresponde a una esfera achatada por los polos con un diámetro de unos 12.700 km.¹⁴

¹³ El término está tomado de la noción de línea de hielo en las ciencias de la Tierra.

¹⁴ Ver en el capítulo 3 la determinación del radio de la Tierra por Eratóstenes.

La Tierra

Dimensiones	
Circ. ecuatorial	40.075.014m
Circ. polar	40.007.832m
Radio esfera equivolumen	6.371.000m
Radio ecuatorial (a)	6.378km
Radio polar (b)	6.357m
a-b	21km
Excentricidad (a-b)/a	0,000329

Composición química	
Elemento	%
Fe	34,6
O	29,5
Si	
Mg	1,7
Ni	2,4
S	1,9
Ca	1,1
Al	1,1
Na	0,57
Cr	0,26

El 71% de la superficie está cubierto por agua y es el único planeta del Sistema Solar que tiene las condiciones necesarias para que el agua esté líquida en la superficie. Esto ha sido esencial para la vida y ha formado un sistema de circulación y erosión único en el Sistema Solar.

Es el único cuerpo del Sistema Solar que presenta una *tectónica de placas* activa: se cree que Marte y Venus pueden haber tenido ese fenómeno en otros tiempos pero, en todo caso, se ha detenido. Esto, unido a la erosión y a la actividad biológica, hace que la superficie de la Tierra sea muy joven, habiéndose eliminado, por ejemplo, casi todos los restos de cráteres que marcan muchas de las superficies de los demás planetas del Sistema Solar. Posee un solo satélite natural y el sistema Tierra-Luna es singular en el Sistema Solar por el gran tamaño relativo del satélite. Uno de los aspectos particulares de la Tierra es su capacidad para recuperarse de cataclismos a mediano plazo (homeostasis).

4.12.1. La hidrosfera

La Tierra es el único planeta del Sistema Solar con una superficie líquida (hidrosfera) cuya masa es de unos $1,4 \times 10^{21} \text{ kg}$. En otros planetas, como Venus, el agua desapareció debido a que la radiación solar ultravioleta rompe la molécula de agua y el ion hidrógeno escapa de la atmósfera. Este efecto es lento y esta hipótesis explica por qué Venus hoy no tiene agua. En la Tierra, la capa de ozono de la estratosfera absorbe mucho de la radiación ultravioleta, reduciendo ese efecto; la magnetosfera es un escudo que protege al planeta del viento solar.

4.12.2. La atmósfera

La atmósfera contiene 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de argón, y trazas de anhídrido carbónico y vapor de agua. Es como una manta de abrigo: deja entrar la radiación solar y atrapa parte de la radiación terrestre (efecto invernadero). Por esto la temperatura media es de unos 17° . La composición es inestable y se mantiene por acción de la biosfera. Cantidad de oxígeno libre se obtiene de la fotosíntesis vegetal, que por acción de la luz solar transforma CO_2 en O_2 . El oxígeno libre en la atmósfera es una consecuencia de la presencia de vida y no al revés. La masa de la atmósfera es de unos $5,1 \times 10^{18} \text{ kg}$ distribuidos en diversas capas cuyas alturas varían con los cambios estacionales.

Figura 4.33. Tierra con Luna llena, vista desde la nave espacial internacional



Fuente: NASA y Space Telescope Science Institute (STScI).

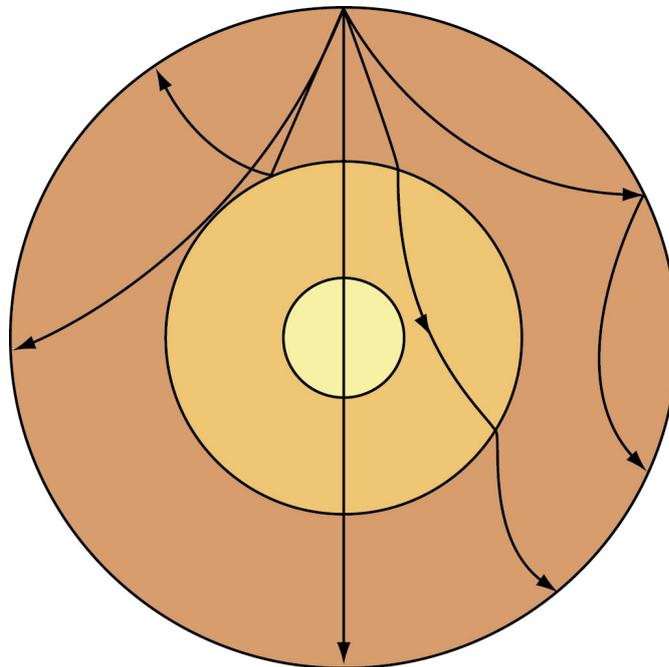
4.12.3. Estructura interna

El estudio de la estructura interna del planeta se basa en observaciones de la topografía –perfil del terreno– y batimetría –profundidad de los mares–, observaciones de las rocas en los afloramientos, muestras traídas desde la profundidad a la superficie por la actividad volcánica, análisis de las ondas sísmicas, mediciones del campo gravitatorio y experimentos con sólidos cristalinos a presiones y temperaturas similares a las del interior de la Tierra.

La gravedad terrestre puede ser usada para calcular la masa y por estimaciones del volumen, la densidad media. También es posible calcular la masa por las propiedades de la órbita y el efecto sobre los cuerpos planetarios cercanos. La tercera ley de Kepler permite calcular la masa usando la distancia Tierra-Luna y el período orbital de la Luna.

La estructura consiste en capas de distinta composición, producidas por la estratificación por densidad, en estado de fusión parcial, en las primeras etapas de la historia de la Tierra. Los elementos pesados, como hierro y níquel, se fueron hundiendo a medida que los componentes rocosos más ligeros flotaban. Esta segregación sigue ocurriendo todavía, pero en forma más lenta. Debido a esta diferenciación química, el interior de la Tierra no es homogéneo. La figura 4.34 muestra un caso similar al de la Tierra, con capas de distinta densidad; se indica la propagación de ondas transversales, que no pueden propagarse en un líquido y se reflejan hacia el medio de origen. Una combinación de ondas transversales y longitudinales permite detectar diferentes regiones en el interior del planeta.

Figura 4.34. Algunas trayectorias posibles de los rayos sísmicos en el interior de la Tierra



En la figura se indican ondas longitudinales (ondas P, de compresión) que viajan a través de las partes sólidas y líquidas de la Tierra y ondas de corte (ondas S más veloces) que viajan solo a través de las partes sólidas. Sobre la base de estas propiedades, se han detectado diferentes capas que son

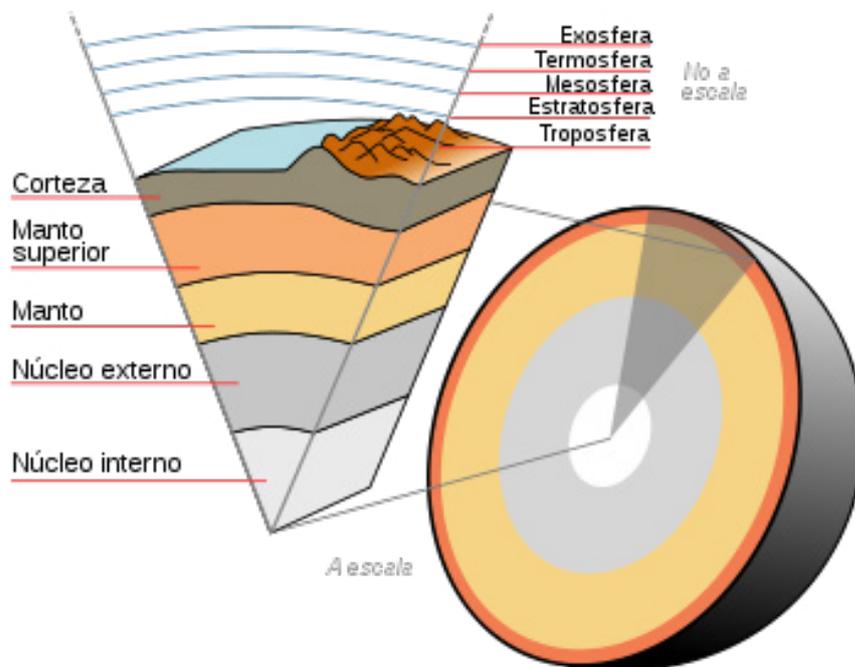
- Corteza: capa más superficial de un espesor que va de 12 *km* en los océanos a 80 *km* en los cratones –porciones más antiguas de los núcleos continentales–.

Está compuesta por basalto en las cuencas oceánicas y por granito en los continentes.

- Manto: capa intermedia entre la corteza y el núcleo que llega hasta unos 2900 km de profundidad. Está compuesto por peridotita. Se divide a su vez en manto superior y manto inferior. Entre ellos existe una separación determinada por las ondas sísmicas, a unos 700 km de profundidad.
- Núcleo: capa más profunda del planeta, de unos 3475 km de espesor. El cambio del manto al núcleo está determinado por la discontinuidad de Gutenberg (2900 km). Está compuesto de una aleación de hierro y níquel, y es en esta parte donde se genera el campo magnético terrestre. Se subdivide a su vez en núcleo interno sólido y núcleo externo líquido, que se mantienen en ese estado debido a las condiciones de presión en cada región.

La división se produce en una discontinuidad a 5150 km . Tiene una temperatura de entre 4000° y 5000° .

Figura 4.35. Corte de la Tierra, del núcleo a la exosfera



Fuente: Jeremy Kemp y Mortadelo2005, 2007.

Nota: El dibujo de la atmósfera no está a escala.

La densidad media de la Tierra es de 5515 kg / m^3 , la mayor del Sistema Solar. En la superficie esta densidad es de aproximadamente 3000 kg / m^3 ; por efecto de la alta presión, en el núcleo es mayor. Los estudios sismológicos aportan evidencia sobre la estructura de la Tierra y la densidad de cada capa. En la etapa de formación del planeta, la acción de la fuerza gravitatoria hizo hundir hacia el centro los componentes más densos, mientras los materiales livianos podían flotar migrando hacia la corteza. Por este motivo el núcleo de la Tierra tiene un alto contenido de hierro (80%) y níquel. Otros elementos densos, como el plomo o el uranio, son más reactivos químicamente y se combinaron con elementos más ligeros y permanecen cerca de la superficie.

La sismología demuestra que el núcleo está dividido en dos partes, una interna sólida con un radio de alrededor de 1200 km y una externa líquida que alcanza un

radio de unos 3400 *km*. El descubrimiento en 1936 del núcleo interno sólido se debe a la sismóloga danesa Inge Lehmann (1888-1993), y se cree que está compuesto principalmente por hierro con algo de níquel. Se cree que el núcleo externo líquido está compuesto de hierro mezclado con níquel y trazas de elementos más ligeros. Especulaciones recientes sugieren que la parte más interna del núcleo está enriquecida por elementos pesados, con números atómicos por encima de 55, lo que incluiría oro, mercurio y uranio.

Se cree que el campo magnético terrestre se origina por el movimiento de convección de los metales líquidos en el núcleo externo, combinado con la rotación inducida por la rotación de la Tierra, en un proceso denominado *dinamo*. La alta temperatura del interior de la Tierra se debe al calor generado por el decaimiento de los elementos radiactivos, combinado con el calor remanente de la etapa de formación del planeta.

4.12.4. La biosfera

Hasta la fecha, la Tierra es el único lugar con vida en el universo. Las formas de vida terrestre permitieron la formación de la biosfera, que comenzó a evolucionar hace aproximadamente 3500 millones de años. La hipótesis Gaia es un modelo científico de la biosfera terrestre formulado por el biólogo James Lovelock que sugiere que la vida sobre la Tierra ha creado su propio sistema de regulación para perpetuarse, lo cual conlleva el mantenimiento de las condiciones sobre los parámetros climáticos físicos. Un ejemplo sería que los animales respiran oxígeno y eliminan dióxido de carbono, mientras que los vegetales absorben dióxido de carbono y eliminan oxígeno. El equilibrio entre estos gases se ha mantenido hasta ahora, y quizá se está rompiendo por intervención del hombre.

4.13. La astronomía antes del siglo XX

Luego de los descubrimientos de Galileo, Kepler, Cassini y otros –que hemos descrito en este capítulo–, la observación astronómica cada vez más detallada permitió el descubrimiento de objetos celestes, diferentes a las estrellas fijas, a los planetas y a los cometas. Los nuevos objetos observados con los telescopios de esa época aparecían como parches de luz y por eso se los llamó *nebulosas*. A partir de 1779, el alemán Frederick Herschel estudió en detalle esos objetos. Su hermana Caroline realizó barridos de zonas del cielo y lograron así dibujar un mapa de la galaxia con un gran número de estrellas observadas. También realizaron otros importantes descubrimientos como Urano, sus lunas Titania y Oberon, y las lunas de Saturno, Encelado y Mimas. Un avance importante en las teorías sobre el universo, producto del avance en la precisión de la medición de distancias astronómicas, fue la detección de la expansión del universo, que trataremos en el capítulo 10.

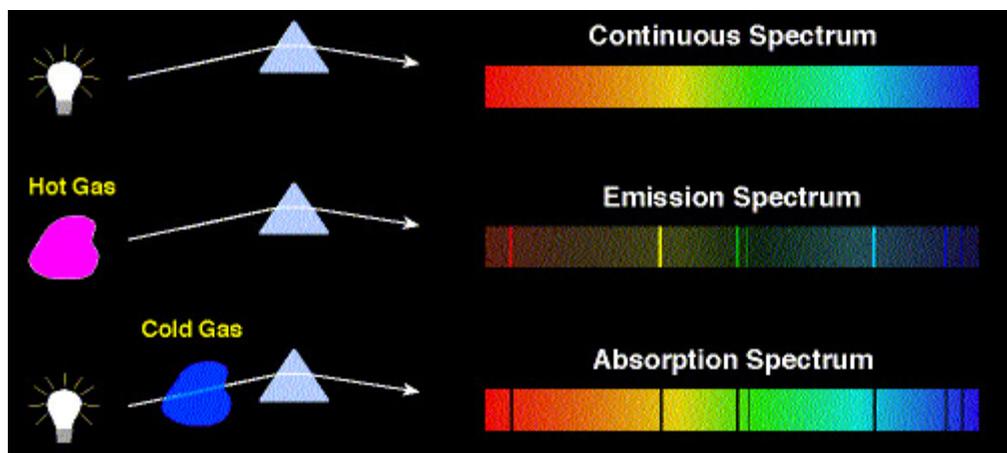
4.14. La astronomía en el siglo XX

A principios del siglo XX ciertos conocimientos astronómicos estaban claramente establecidos: la Tierra y los planetas orbitan alrededor del Sol obedeciendo las mismas leyes que fuerzan a una manzana a caer sobre la superficie de la Tierra; el Sol es una estrella más de las millones que pueblan el universo y que se agrupan formando galaxias; las distancias a escalas astronómicas son enormes comparadas con las distancias humanas. En definitiva, el impulso renacentista perduraba y la magia había dejado paso al conocimiento empírico. La espectroscopía estelar –el

estudio de la luz irradiada por las estrellas– alcanzó un gran desarrollo a fines del siglo XIX. Esta técnica consiste en estudiar la emisión de luz (radiación electromagnética) de un cuerpo, analizando la radiación recibida mediante el uso de un prisma, o una red de difracción.

Como los espectros de emisión de los diversos elementos químicos en la Tierra son conocidos, estos mismos elementos pudieron identificarse en las estrellas, lo que abona la idea de un origen común. Sin embargo, hubo algunas sorpresas. Es conocido el caso del helio, que recibe su nombre por haber sido descubierto en el Sol antes que en la Tierra. En efecto, durante el eclipse en agosto de 1868, Pierre Janssen observó en el espectro solar una línea amarilla muy cercana al doblete del sodio, ya conocido. Meses después N. Lockyer identificó dicha línea y propuso que se debía a un elemento desconocido en la Tierra, al que llamó helio (del griego *ἥλιος*, *helios*, el dios griego del sol)

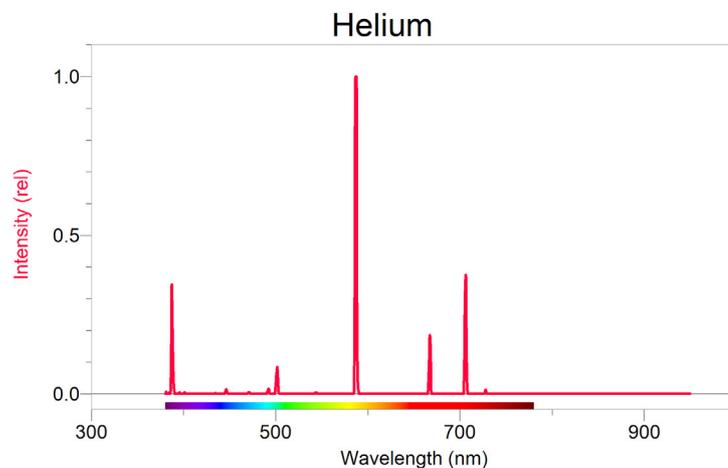
Figura 4.36. Líneas de emisión y absorción de un gas



Fuente: Eric G. Blackman, 2006.

La figura 4.37 muestra el espectro del He, en el que se distingue la línea amarilla observada por Janssen en 1868 y que llevó al descubrimiento de ese elemento químico en el Sol antes que en la Tierra.

Figura 4.37. Líneas de emisión del helio



Fuente: Vernier, 2014.

La investigación de ondas de radio de origen estelar comenzó en 1928 cuando Grote Reber detectó, por ese método, un objeto ubicado en el centro de la Vía Láctea; la Segunda Guerra Mundial produjo una interrupción de esos estudios que se reanudaron en 1946 y gracias a las mejoras en la radioastronomía, el campo avanzó rápidamente. En la Argentina un pionero en este tema fue Carlos Varsavsky (1933-1983), fundador y primer director del Instituto Argentino de Radioastronomía, inaugurado en 1964 en Villa Elisa, Buenos Aires donde se construyó el radiotelescopio más grande del hemisferio sur.

El descubrimiento del radar durante la Segunda Guerra Mundial abrió las puertas a la astronomía en otras longitudes de onda además del espectro visible y el de radio. En la década de 1960, la Guerra Fría y la carrera espacial dieron gran impulso a la astronomía; los primeros satélites artificiales, la llegada del hombre a la Luna, y el desarrollo de la tecnología espacial motivaron la creación de sondas de exploración que comenzaron a estudiar el Sistema Solar: la serie Venera enviada a Venus, las misiones Apolo a la Luna, los exploradores Viking a Marte y las series Pioneer para explorar los planetas exteriores, fueron pasos importantes para la creación de las naves Voyager I y II.

Figura 4.38. Sonda espacial Voyager II, que sobrepasó los confines del Sistema Solar, a 16 horas luz de la Tierra



Fuente: NASA/JPL, 1990.

Estas naves exploraron –desde finales de 1970– los planetas externos del Sistema Solar: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, y en lo posible, más allá. Algunas se encuentran aún hoy en funcionamiento y transmiten datos desde los confines del Sistema Solar, a 16 horas luz de la Tierra. Estas sondas están llegando a los límites exteriores de la heliosfera, la zona de influencia del Sol, y al punto donde el Sistema Solar se encuentra con el espacio interestelar.

Figura 4. 39. Telescopio Espacial Hubble (NASA y ESA) para la observación del universo desde el espacio



Fuente: ESA, 2001.

El avance en la tecnología espacial permitió que en 1990 se pusiera en órbita el Telescopio Espacial Hubble (HST por sus siglas en inglés) que continúa en operación. No es el primer telescopio espacial pero es uno de los más grandes y versátiles; es muy conocido como una importante herramienta de investigación y un poderoso instrumento de divulgación de la astronomía.

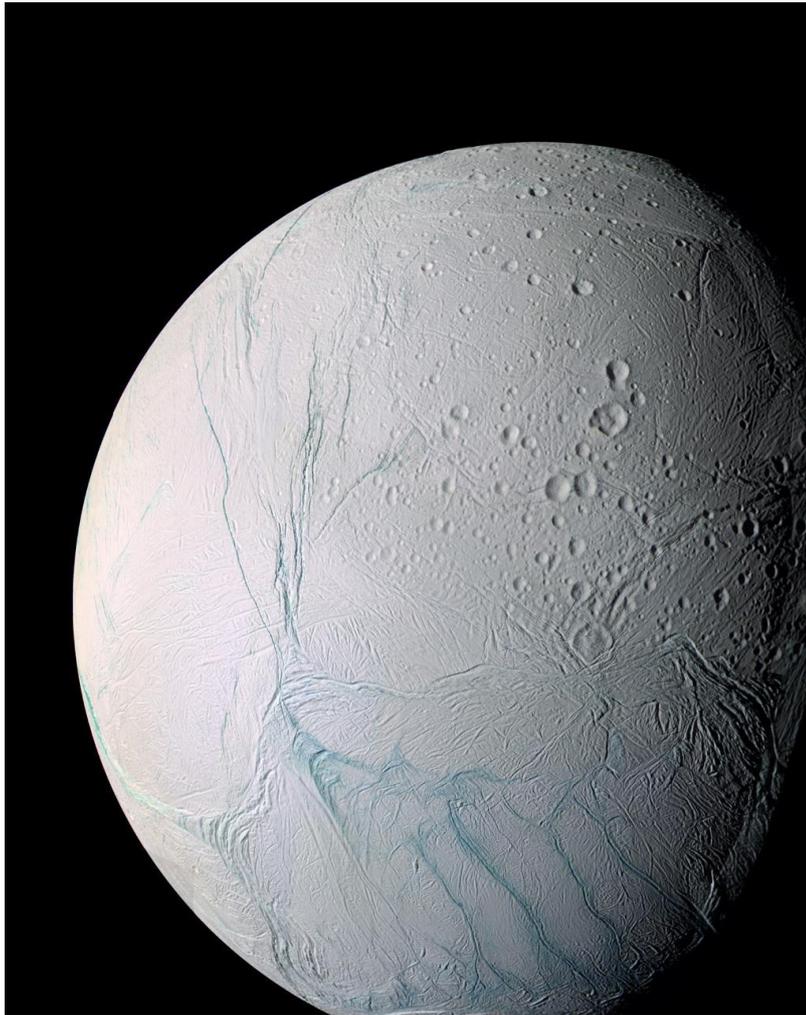
4.15. La astronomía en el siglo XXI

A las herramientas ya mencionadas para observar el universo a través de algún tipo de radiación electromagnética, en este siglo se sumó la detección de rayos cósmicos. Gracias al cúmulo de datos recogidos, en la actualidad sabemos que habitamos un minúsculo planeta de un sistema regido por el Sol que cumple el primer tercio de su vida y que está localizado en la periferia de la Vía Láctea, compuesta por miles de millones de estrellas y que posee, como las demás galaxias, un agujero negro súper masivo en su centro que forma parte de un conjunto galáctico llamado Grupo Local, el cual, a su vez, se encuentra en un súper cúmulo de galaxias. El universo, constituido por miles de millones de galaxias como la Vía Láctea, tiene una edad que se calcula entre 13.500 y 13.900 millones de años y su expansión se acelera constantemente.

En una importante labor de cooperación internacional, se ha logrado formar el primer hábitat en el entorno espacial: la estación espacial, una estructura modular en construcción desde 1998, y que actualmente tiene unos 108 *m* de largo, 73 *m* de ancho y 20 *m* de alto, con un volumen presurizado para hacerlo habitable y 873 *m*³ de equipos y una masa total de aproximadamente 450.000 *kg* orbitando la Tierra cada 90 minutos a 390 *km* de altura.

Una variedad de misiones espaciales que exploran el Sistema Solar –el Sol, los planetas interiores, Marte, el cinturón de asteroides, Júpiter, Venus, y hasta Plutón– ponen de relieve los enormes avances alcanzados en la exploración espacial. Gracias a los satélites y telescopios espaciales en órbita, la cosmología se ha vuelto una ciencia de precisión, y gracias a internet esos conocimientos están casi al instante al alcance de cualquier persona. Los adelantos científicos y técnicos abren nuevas ventanas al estudio del espacio: poderosos telescopios terrestres y orbitales, sondas interplanetarias llegan a los confines del Sistema Solar y robots se localizan en la superficie de otros planetas aumentando nuestra comprensión sobre el entorno astronómico.

Figura 4. 40. Encélado, sexta Luna de Saturno por tamaño



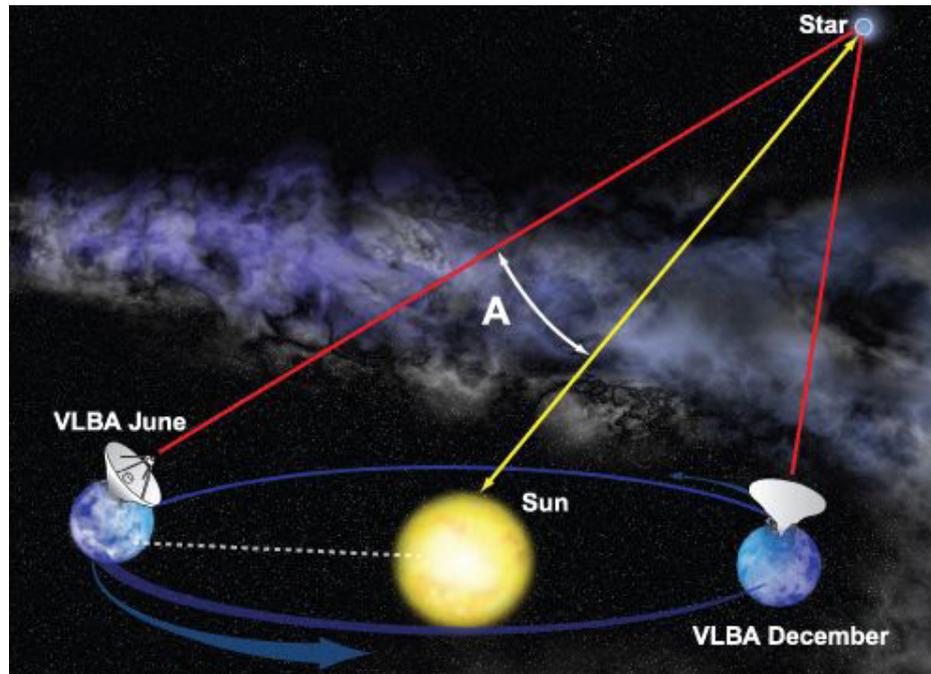
Fuente: NASA / JPL / Space Science Institute., 2005.

La foto muestra la cara izquierda de Encélado con un brillo blanquecino que se debe a iluminación solar. En la cara derecha se aprecia un brillo amarillento, resultado del reflejo de la luz solar sobre Saturno.

La figura 4.41 muestra el esquema de funcionamiento del interferómetro de base muy grande (VLBA), usando radiotelescopios, lo que permite extender la alta precisión de las determinaciones.

Estas observaciones requieren de la cooperación internacional pues los instrumentos suelen estar ubicados en distintos continentes.

Figura 4.41. La interferometría de base muy grande (VLBA) permite extender la alta precisión



Fuente Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF, 2007.

Un equipo liderado por Adam Deller (astrónomo) utilizó el sistema Very Long Baseline Array (VLBA) para marcar un nuevo récord en la medición de distancias. El grupo detectó un pulsar llamado PSR J2222-0137 ubicado a 871,4 años luz de la Tierra, observando el objeto durante dos años a fin de medir su paralaje.



Referencia:

Astronomers use precision pulsar positions to break record

<http://phys.org/news/2013-06-astronomers-precision-pulsar-positions.html#jCp>

PREGUNTAS

- **PREGUNTA 4.1.**
¿Cómo hizo Eratóstenes para medir por primera vez el radio de la Tierra? No es necesario que incluya valores numéricos. Solo relate con sus propias palabras en qué consistió la experiencia.
- **PREGUNTA 4.2.**
¿Cómo hizo Tales para medir la altura de la pirámide de Keops? No es necesario que incluya valores numéricos. Solo relate con sus propias palabras en qué consistió la experiencia.
- **PREGUNTA 4.3.**
¿Por qué Venus y Mercurio no pueden verse a la medianoche?
- **PREGUNTA 4.4.**
¿Qué método utilizaría para medir la distancia desde la Tierra a la Luna?
- **PREGUNTA 4.5.**
¿En qué consiste un eclipse de Sol y uno de Luna?
- **PREGUNTA 4.6.**
¿Qué dicen las leyes de Kepler? ¿Qué consecuencias y aplicaciones tienen?
- **PREGUNTA 4.7.**
¿Qué es la paralaje?
- **PREGUNTA 4.8.**
¿Cómo pudo Copérnico medir el radio de la órbita de Venus?
- **PREGUNTA 4.9.**
¿Cómo fue posible detectar la existencia del gas helio en el Sol?
- **PREGUNTA 4.10.**
¿Cuáles son las unidades de medida más comunes en astronomía y en qué caso su usa cada una de ellas?
- **PREGUNTA 4.11.**
¿A qué se deben las fases de la Luna?
- **PREGUNTA 4.12.**
Calisto, una de las lunas de Júpiter, orbita alrededor de ese planeta en una trayectoria circular (radio = $1,88 \times 10^6 \text{ km}$) en 16 días y 17 horas. Calcule la masa de Júpiter.
- **PREGUNTA 4.13.**
El período orbital de Neptuno es de 165 años. Calcule la distancia a Neptuno.
- **PREGUNTA 4.14.**
Suponga un sistema planetario alrededor de una estrella que tiene cuatro veces la masa del Sol. Si en ese sistema hubiera un planeta con el tamaño de la Tierra orbitando a una distancia de 1 AU , ¿cuál sería el período del planeta?

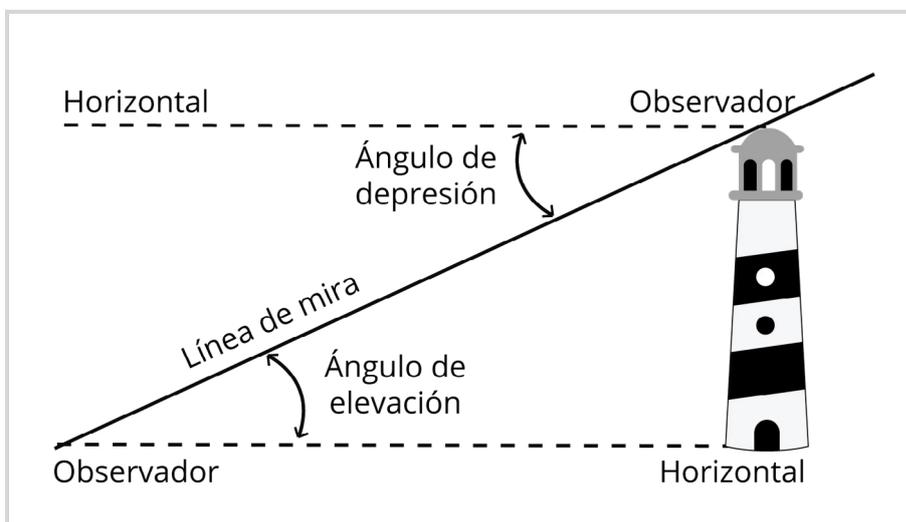
● **PREGUNTA 4.15.**

Si el período de Neptuno es de 165 años ¿cuál es su distancia al Sol?

Definición

En algunos ejercicios y problemas relacionados con la medición de distancias, se utilizan los *ángulos de elevación y de depresión*; estos se definen en la figura siguiente.

Figura 4.42. Ángulo de elevación y de depresión



PROBLEMAS

● **PROBLEMA 4.1. TIERRA**

Determine la masa de la Tierra utilizando la tercera ley de Kepler. Busque los datos numéricos que necesite.

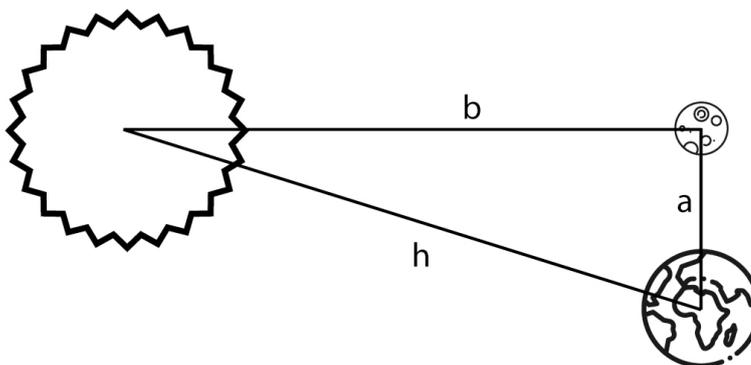
● **PROBLEMA 4.2.**

Determinar la masa de la Tierra a partir del valor de la aceleración de la gravedad en nuestro planeta ($g = 9,80665 m/s^2$). Comparar ese valor con el que se obtiene a partir del período de la Luna.

● **PROBLEMA 4.3. LUNA**

Suponga que la Luna está en cuarto creciente como se muestra en la figura.

Figura 4.43. Luna creciente



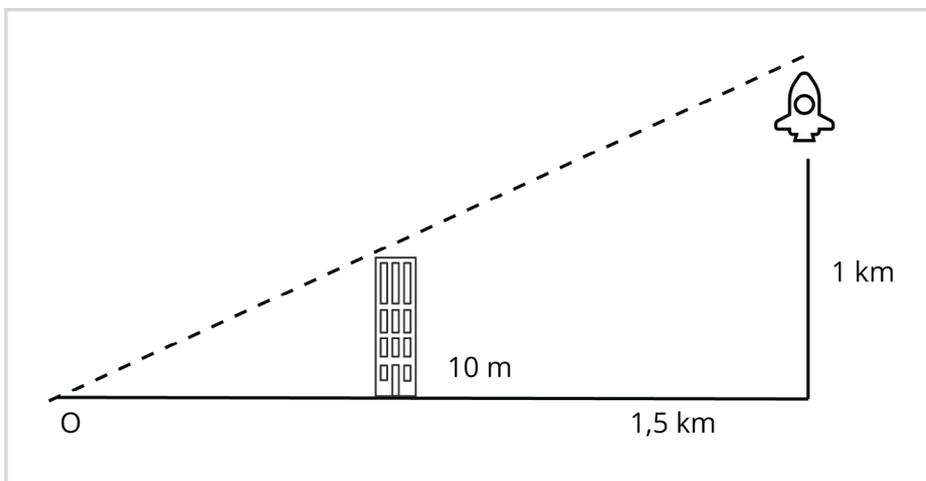
Sabiendo que la distancia de la Tierra a la Luna es de 384.100 km y de la Tierra al Sol es de 150 millones de kilómetros, calcule la distancia de la Luna al Sol en este momento. Considere las distancias desde el centro de cada cuerpo celeste.

● **PROBLEMA 4.4. ÓRBITA**

Considerando la órbita de la Tierra alrededor del Sol como circular, calcule el tiempo que tarda la Tierra en describir un ángulo de 90° .

● **PROBLEMA 4.5. COHETE**

Un espectador desea ver el lanzamiento de un cohete de exploración espacial. Sin embargo, se percató de que un edificio de $10,8 \text{ m}$ de altura le impediría observar dicho espectáculo. Si el edificio se encuentra a $1,5 \text{ km}$ de la base de lanzamiento ¿a qué distancia debe alejarse el espectador del edificio para observar cuando el cohete alcance 1 km de altura?



● **PROBLEMA 4.6. VOYAGER**

La sonda espacial Voyager viaja rumbo a la estrella Próxima Centauri. Calcule en cuánto tiempo llegará a destino. Los datos a su disposición son:

1. Distancia entre la Tierra y esa estrella en años luz.
2. La velocidad de la sonda en km/s .
3. Velocidad de la luz en m/s .

● **PROBLEMA 4.7. CASSINI**

La sonda Cassini de la NASA tomó fotografías de lo que podría ser la formación de un nuevo satélite de Saturno, designado informalmente como Peggy. Se ha observado que este satélite recorre $1/7$ parte de su órbita en 2 h . ¿Cuál es el período orbital?

● **PROBLEMA 4.8. KEPLER**

La NASA descubrió recientemente un planeta semejante a la Tierra llamado Kepler-10b, cuyo radio es 1,4 veces el radio de la Tierra y cuya masa es 4,6 veces la masa de nuestro planeta y que orbita alrededor de la estrella Kepler-10, cuya masa es aproximadamente de $1,78 \times 10^{30} \text{ kg}$.

1. ¿Cuál es la masa y el radio de este *exoplaneta*?
2. Tomando en cuenta que Kepler-10b tiene un período orbital de 20 h , calcular el radio promedio de la órbita de este exoplaneta.
3. las observaciones indican que la masa de Kepler-10 es similar a la del Sol; tomando en cuenta el período orbital de Kepler-10b. ¿Cómo es la distancia entre Kepler-10b y su estrella en relación a la distancia Tierra-Sol?

4. Tomando en cuenta la distancia de Kepler 10-b a su estrella, la temperatura en su superficie es:
 - a. Igual que en la Tierra.
 - b. Más elevada.
 - c. Más baja.

● **PROBLEMA 4.9. JÚPITER**

Determine el período de traslación de Júpiter alrededor del Sol a partir de

- Distancia media Júpiter-Sol en UA.
- Distancia media Tierra-Sol en UA.
- Período de traslación de la Tierra alrededor del Sol en años.

● **PROBLEMA 4.10. MASA ROCOSA**

En 2004, se anunció el descubrimiento de una gran masa rocosa casi del tamaño de un planeta en los confines del Sistema Solar, al que se le dio el nombre de Sedna. Es aproximadamente del tamaño de Plutón, y tiene un período orbital de 10,500 años y su perihelio mide 75 UA.

1. Calcule el semieje mayor de la órbita.
2. Determine la excentricidad de la órbita.

● **PROBLEMA 4.11. MARTE**

Sabiendo que los períodos de revolución de la Tierra y Marte son, respectivamente, 365,25 y 687 días, estimar cuánto tiempo se adelanta, por día, la Tierra respecto de Marte.

● **PROBLEMA 4.12. GALAXIA**

Indique qué longitud de la línea de base se requiere para que la galaxia de Andrómeda, ubicada a *2,5 millones de años luz* de distancia del Sol produzca una paralaje de un segundo de arco.

Lista de referencias bibliográficas

- Abramson, G. (2010). *Viaje a las estrellas: de cómo (y con qué) los hombres midieron el Universo*. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Alfonso Garzón, J., Galadí Enríquez, D., Morales Durán, C., (Coords.) (2007). *100 Conceptos básicos de Astronomía*. Madrid: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas.
- Butikov, E. I. (2000). The velocity hodograph for an arbitrary Keplerian motion. *European Journal of Physics*. 21 (1-10).
- Fliesch, D., Kremenow, J. (2013). *Mathematics of astronomy*. New York: Cambridge up.
- Galileo, G. (1610, 19 de agosto). Carta a Johannes Kepler. *Edizione Nazionale*, 379, (54).
- Goodstein, D. L. y Goodstein, J. R. (1996). *Feynman's lost lecture. The motion of planets around the sun*. New York: W. W. Norton & Company.
- Grupo Astrófilo Lariano (2002). *Observar el cielo, un curso de astronomía práctica*. Ponferrada, España: De Vecchi.
- Lewin, W. (2012). *Por amor a la física*. España: Editorial Debate.
- Los exoplanetas que se han descubierto pueden albergar vida, ahora hay que buscarla (2017, 5 de marzo). *El Norte de Castilla*. <https://www.elnortedecastilla.es/palencia/201703/05/exoplanetas-descubierto-pueden-albergar-20170304233636.html>
- Martínez Sarasola, C. (2012). *Nuestros paisanos los indios*. Buenos Aires: Editorial Del Nuevo Extremo.
- Sagan, C. (1982). *Cosmos*. Barcelona: Planeta.
- Stewart, I. (2008). *Historia de las matemáticas*. Barcelona: Crítica.

Recursos complementarios

<http://www.astro.utoronto.ca/~zhu/ast210/kepler.html>

<http://www.educacionplastica.net/zirkel/ellipseTan1.html>
<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/336k/Newton/nodes5.html>
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/062/htm/sec_8.html
<http://homepages.wmich.edu/~korista/Newton-Kepler.html>
http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler's_laws_of_planetary_motion
<http://www.bobthealien.co.uk/table.htm>
http://es.wikipedia.org/wiki/Configuraci%C3%B3n_de_la_%C3%B3rbita_de_los_planetas
<http://www.astrosurf.com/astronosur/planetas.htm>
<http://mais-ccd-spectroscopy.com/Order%20and%20Distance%20to%20Planets.pdf>
[http://es.wikipedia.org/wiki/\(3753\)_Cruithne](http://es.wikipedia.org/wiki/(3753)_Cruithne)
http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%93cleo_de_la_Tierra
http://es.wikipedia.org/wiki/Formaci%C3%B3n_y_evoluci%C3%B3n_del_Sistema_Solar
<http://ciencia-geo.blogspot.com.ar/2010/02/forma-de-la-Tierra-interpretaciones.html>
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/raddatz.html#c1>
<http://www.bobthealien.co.uk/table.htm>
<http://astro.unl.edu/naap/ssm/modeling2.html>
<http://www.astronomynotes.com/Solarsys/sz.htm>
<http://www.eaae-astronomy.org/WG3-SS/WorkShops/Triangulation.html>
<http://www.csicenlaescuela.csic.es/pdf/ferias/dimension.pdf>

Lista de figuras

Anónimo. (s/f). Copernicus [Grabado]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Copernicus.jpg>. Dominio público.
 Arias Millán, Juan Carlos. (2004). Eratostenes circunferencia polar [Diagrama]. <http://enciclopedia.us.es/index.php/Archivo:Eratostenes-circunferencia-polar.png>. GFDL.
 Astronomy Education, University of Nebraska-Lincoln. (s.f.-a). Determining an inferior planet's distance from the sun [Diagrama]. https://astro.unl.edu/naap/ssm/ssm_advanced.html
 Astronomy Education, University of Nebraska-Lincoln. (s.f.-b). Determining a superior planet's distance from the sun using measurements [Diagrama]. https://astro.unl.edu/naap/ssm/ssm_advanced.html
 Astronomy Education. University of Nebraska-Lincoln. (s.f.). Elongation angle is the angle between planet and sun as seen from earth [Diagrama]. <http://astro.unl.edu/naap/ssm/elongation.html>
 Astroturismo. (s.f.). Cómo orientarse de noche si no tiene brújula [Diagrama]. <http://www.astroturismo.com.ar/aprender-mirar-cielo.html>
 Báez Barrios, Argelia Sol-Haret. (2009). Cálculo de la distancia al lápiz [Diagrama]. <http://astrouv.blogspot.com.ar/2009/09/la-paralaje.html>
 Báez Barrios, Argelia Sol-Haret. (2009). Paralaje de un lápiz [Diagrama]. <http://astrouv.blogspot.com.ar/2009/09/la-paralaje.html>
 Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF. (2007). VLBA Changes Picture of Famous Star-Forming Region [Diagrama]. <https://public.nrao.edu/news/vlba-changes-picture-of-famous-star-forming-region/>
 Blackman, Eric C. (2006). Sources of continuous, emission, and absorption spectra [Diagrama]. <http://www.pas.rochester.edu/~blackman/ast104/absorption.html>
 Blanco González, Francisco Javier. (2006). Aspectos de los planetas superiores e inferiores del Sistema Solar [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aspectos_de_los_planetas.png. CC BY-SA 3.0.
 Bončina, Iztok/ESO. (2010). La Silla estrellada [Fotografía]. <https://www.eso.org/public/spain/images/potw1043a/>.
 Bronger, Torsten. (2010). Crux constellation map [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crux_constellation_map.svg. CC BY-SA 3.0.
 European Space Agency (ESA). (2001). The Hubble Space Telescope and the Faint Object Spectrograph [Ilustración]. <https://www.spacetelescope.org/images/heic0112a/>
 Ferretti, Antonio. (2017). Cruz del Sur - Nueva Zelanda. [Fotografía]. https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Southern_Cross_-_New_Zealand-.jpg. CC BY-SA 3.0.

Revera, Gregory H. (2010). The Moon (near side) [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FullMoon2010.jpg>. CC BY-SA 4.0.

Kemp, Jeremy; Usuario:Mortadelo2005. (2007). La atmósfera y la hidrosfera también son capas de la tierra [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth-crust-cutaway-spanish.svg>. Dominio público.

Ladd, Ned. (s.f.). Paralaje de un árbol en relación con una montaña lejana [Diagrama]. <http://www.eg.bucknell.edu/physics/astronomy/astr101/specials/parallax.html>

Ladd, Ned. (s.f.a). Ángulos A y B. Ambas visuales (azul) a la montaña son paralelas entre sí [Diagrama]. <http://www.eg.bucknell.edu/physics/astronomy/astr101/specials/parallax.html>

Ladd, Ned. (s.f.b). Paralaje en astronomía [Diagrama]. <http://www.eg.bucknell.edu/physics/astronomy/astr101/specials/parallax.html>

Leoni, Ottavio. (1624). Retrato de Galileo Galilei [Grabado sobre madera].

Morales, Johanna. (2017). Primera ley de Kepler [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Primera_Ley_de_Kepler.gif. CC BY-SA 4.0.

NASA / JPL / Space Science Institute. (2005). Enceladus the Storyteller [Fotografía]. <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=pia07800>

NASA and the Space Telescope Science Institute (STScI). (s.f.). Earth and full moon [Fotografía].

NASA, Martin Kornmesser, Usuario:Pepedavila. (2012). Planetas del Sistema Solar a escala [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planetas_del_Sistema_Solar_a_escala.png. Dominio público.

NASA, Pat Rawlings. (s.f.). Plandisk [Ilustración]. <https://web.archive.org/web/20090402034740/http://origins.jpl.nasa.gov/stars-planets/ra4.html>

NASA. (2008). Solar prominence from STEREO spacecraft September 29, 2008 [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_prominence_from_STEREO_spacecraft_September_29_2008.jpg. Dominio público.

NASA. (s.f.). The Hubble Space Telescope and the Faint Object Spectrograph [Fotografía]. <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=pia07800>

NASA/JPL. (1990). Artist's Concept of Voyager [Ilustración]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Voyager_spacecraft.jpg. Dominio público.

Strobel, Nick. (1998). Determinación de la distancia a un planeta [Diagrama]. <http://www.astronomynotes.com/solarsys/s2.htm>

The Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA). (1998). M57 The Ring Nebula [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M57_The_Ring_Nebula.JPG. Dominio público.

Usuario:Basquetteur. (2008). Earth-lighting-equinox SP [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth-lighting-equinox_SP.PNG. Dominio público.

Usuario:Divad. (2010). Equinoxes-Solstice-ES [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Equinoxes-solstice-ES.svg>. Dominio público.

Usuario:Divad. (2010a). Celestial sphere ES [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Celestial-sphere-ES.svg>. Dominio público.

Usuario:Fastfission. (2009). Sistema ptolemaico [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ptolemaic_elements.svg. Dominio público.

Usuario:Mungany. (2007). Orbit and data of the Moon [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orbit_of_Moon.jpg. Dominio público.

Usuario:Patrickrichaud. (2018). Pirámide de Chichen Itzá [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chichen_Itzá_Tierra.jpg. CC BY-SA 4.0.

Usuario:Strain. (2006). Stellarparallax parsec [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stellarparallax_parsec1.svg. Dominio público.

Usuario:Talifero. (2011). Illustration of Kepler's second law of planetary orbits [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Keplers_law_2_ru.svg. Dominio público.

Usuario:Wmheric. (2010). Positional astronomy [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Positional_astronomy.svg. CC BY-SA 3.0.

Vernier. (2014). Helium emission spectrum. [Gráfico]. <https://www.vernier.com/product/vernier-spectrometer/>

Wakefield, Simon. (2008). Stonehenge in your face [Fotografía]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stonehenge_\(sun\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stonehenge_(sun).jpg). CC BY 2.0.

ENERGÍA

(EL SEÑOR JOULE)

*Mi objetivo ha sido, primero, descubrir principios correctos
y luego sugerir su desarrollo práctico.*

James Joule

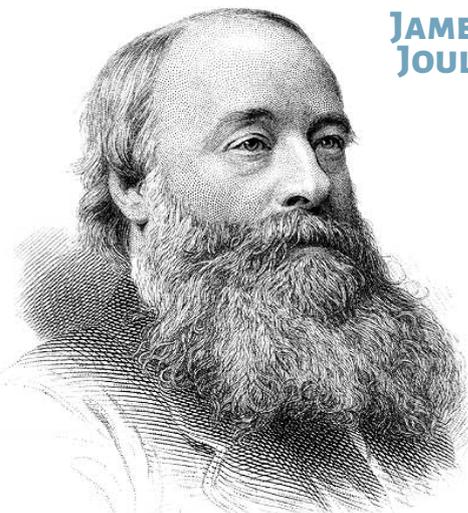
5.1. Introducción

La palabra *energía* es usada en la vida diaria con diferentes sentidos, muchos de ellos alejados de su significado científico. En física, una definición posible es que la energía es la capacidad de realizar trabajo, pero hay muchos investigadores que no la aceptan.¹ Podemos buscar otras definiciones pero, más importante que definirla, es acercarnos al concepto a través de sus propiedades.

La energía existe en una variedad de formas y puede ser transformada de un tipo a otro. Pero estas transformaciones están reguladas por una condición fundamental: *el principio de conservación de la energía*, que dice: «La energía no puede ser creada ni destruida, solo puede transformarse de una forma a otra».

Como veremos en este capítulo la *energía es un concepto unificador*, ya que todo proceso físico implica una transformación de una forma de energía en otra. La validez de los principios de la energía se extiende casi sin cambio desde la física clásica hasta la física moderna. Incluso algunos procesos complejos, o que están muy lejos de la física newtoniana, pueden describirse de manera precisa en términos de energía.

¹ Ver, por ejemplo, Lehrman (1973).



**JAMES
JOULE**

Físico inglés; estudió la naturaleza del calor y descubrió su relación con el trabajo mecánico. Verificó experimentalmente la ley de la conservación de energía en su estudio de la conversión de energía mecánica en energía térmica. A partir del uso de métodos independientes determinó la relación entre la energía térmica y la mecánica, el *equivalente mecánico del calor*. Así ayudó a afianzar el *principio de conservación de la energía*, lo que llevó al desarrollo del *primer principio de la termodinámica*. Hizo observaciones importantes en electricidad y encontró la relación entre la corriente eléctrica que pasa a través de una resistencia y el calor disipado, el *efecto Joule*. Junto con su compatriota, W. Thomson (Lord Kelvin), descubrió que la temperatura de un gas desciende cuando se expande sin realizar trabajo, el *efecto Joule-Thomson*, base de los sistemas de refrigeración y de aire acondicionado. Se cuenta que recién casado fue en viaje de luna de miel con su esposa a las cataratas del Niágara. Aprovechando su presencia allí determinó que la diferencia de temperatura del agua entre la parte superior y la inferior de la catarata era de un grado, por efecto de la caída. La unidad de energía en el sistema si lleva su nombre.

Fuente: C. H. Jeens, 1882.

Por eso, la energía es un principio organizador central y una herramienta poderosa para encontrar explicación a gran cantidad de fenómenos naturales. Aquí trataremos de mostrar su utilidad en la enseñanza de la física. Por otra parte, nuestra experiencia coincide con la de algunos grupos interesados en la didáctica de la física en el sentido de que resulta relativamente más fácil introducir el concepto de energía que el de fuerza.²

Es sabido que la enseñanza de la dinámica generalmente choca con las ideas previas de los estudiantes debido a la concepción aristotélica de la mecánica que todos tenemos naturalmente. En ese caso, la mayor dificultad radica en la comprensión de que la *fuerza es la causa de la aceleración* y no de la velocidad, como sostenía Aristóteles.

5. 2. Energía: moneda de cambio

La energía es una propiedad de un sistema físico que no es directamente observable, pero cuyo valor puede ser calculado a partir del estado del sistema.³ Dice Verónica Grünfeld (1991):

La física inventó el concepto de energía, a partir de una generalización de observaciones inicialmente referidas a fenómenos relativamente simples: la dinámica de cuerpos macroscópicos. Para hacer una analogía se inventó una moneda; es decir una equivalencia que permitía contabilizar ganancias y pérdidas de conceptos dinámicos, tales como la energía potencial de un cuerpo de masa determinada, a una altura determinada en un campo gravitatorio también definido (este último por el valor de la constante g) y la energía cinética que podría alcanzar ese cuerpo cayendo hasta una altura menor.

En este capítulo se incluye una breve introducción al concepto de energía, necesaria para el desarrollo de los temas de este libro. Cuando decimos que la energía es un concepto unificador nos referimos a que hay dos de sus aspectos que permiten explicar muchos de los fenómenos que estudiamos: su *conservación* y su *transformación de una forma en otra*.

5. 2. 1. Las transformaciones

La energía *es necesaria para producir transformaciones*, tanto las grandes transformaciones que ocurren en el universo como aquellas que ocurren a nuestro alrededor. Todos los seres vivos deben disponer de energía para sostener la vida; los animales y los seres humanos la obtienen de los alimentos; los vegetales la toman de la energía luminosa que reciben del Sol. La civilización humana requiere un suministro continuo de energía para funcionar, situación que se ha agudizado en las sociedades modernas. Los recursos energéticos, como los combustibles fósiles, son un tema vital en la economía y la política actuales.

A diario pueden observarse procesos de transformación de una forma de energía en otra. En efecto, cuando dos autos chocan entre sí, podemos ver la transformación de la energía cinética de los vehículos en energía elástica de deformación de las carrocerías, que finalmente se disipa como calor. En el proceso de calentar agua en una cacerola que colocamos sobre la llama del gas, la *energía química* del gas se transforma en *energía térmica* del agua por transferencia de calor; otro proceso posible puede darse en la navegación de un globo aerostático; si por accidente el

² Ver Heron y Michelini (2012).

³ Un sistema es un objeto o conjunto de objetos sobre el que dirigimos nuestra atención.

globo se desinflara bruscamente comenzaría una caída libre durante la cual ocurre una transformación de la *energía potencial gravitatoria* en *energía cinética* debida al movimiento de descenso vertical.

Cuando observamos un velero que navega o vemos moverse las nubes a través del cielo, estamos frente a los efectos de la energía del viento –*energía eólica*–; cuando empleamos electricidad generada por una central hidroeléctrica estamos aprovechando la energía hidráulica, si se trata de una central a carbón o petróleo se libera energía química, o si es una central nuclear, como su nombre lo indica, se trata de energía nuclear. El concepto de energía y sus transformaciones es muy útil para comprender el origen de muchos fenómenos naturales. Por ejemplo, las plantas, mediante la fotosíntesis, convierten la energía solar en energía química; los animales convierten la energía química de los alimentos en energía mecánica de trabajo muscular.

Actividad 5.1.

Averigüe cuáles son las centrales eléctricas más importantes que proveen de energía eléctrica a nuestro país. Ubíquelas en un mapa y haga una lista en orden decreciente de potencia.

Conservación. Como dijimos antes, una razón por la que la energía es importante es que se trata de *una magnitud conservada*. En particular, veremos que esa propiedad es fundamental al momento de buscar la solución a situaciones problemáticas que se plantean en la naturaleza, porque la suma de todas las formas de energía en un sistema solo puede cambiar a causa de que una cantidad de energía entre o salga del mismo.

Aunque los filósofos antiguos, que se remontan a Tales de Mileto, tenían indicios de la ley de conservación de la energía, fue el alemán Gottfried Leibniz quien en el período comprendido entre 1676-1689 intentó una formulación más precisa. Observó que en algunos conjuntos de masas m_i , cada una con una velocidad v_i , la cantidad:

$$\sum_{i=1}^N m_i v_i^2$$

se conserva, donde N es el número de masas. Llamó a esta cantidad la *vis viva* –fuerza viva– del sistema. Como veremos, este principio representa una formulación exacta de la conservación de la energía cinética en las colisiones elásticas. En el capítulo siguiente mostraremos que la energía cinética de una partícula de masa m y que tiene velocidad v está dada en realidad por

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (5.1)$$

Esto significa que Leibniz encontró experimentalmente que en ciertos casos había conservación de la energía cinética.⁴ En el capítulo siguiente mostraremos que la forma (5.1) puede deducirse de manera directa a partir de las leyes de Newton de la dinámica.

En 1722, el holandés Willem Gravesande publicó los resultados de una serie de experimentos en que dejaba caer esferas de bronce desde distintas alturas sobre una superficie de arcilla fresca. Encontró que una esfera que cae con el doble de velocidad que otra dejaba una hendidura cuatro veces más profunda; de donde concluyó que la expresión correcta para la *vis viva* de un cuerpo en movimiento (lo que hoy llamamos energía cinética) es proporcional a $m v^2$. En la próxima sección veremos cómo, con los conocimientos actuales, la teoría explica esos resultados.

4 Nótese que el factor $\frac{1}{2}$ en la ecuación (5.1) no afecta la ley de conservación.

Transformaciones entre distintas formas de energía

Energía mecánica	
Se transforma en	Por medio de
energía térmica	frenos
energía eléctrica	dinamo
radiación electromagnética	sincrotrón
energía química	fósforos
energía nuclear	acelerador de partículas

Energía química	
Se transforma en	Por medio de
energía mecánica	músculos
energía térmica	fuego
energía eléctrica	celdas combustibles
radiación electromagnética	luciérnagas

Energía térmica	
Se transforma en	Por medio de
energía mecánica	turbina de vapor
energía eléctrica	termocupla

Energía eléctrica	
Se transforma en	Por medio de
energía mecánica	motor electric
energía térmica	resistencia
radiación electromagnética	LED
energía química	electrolysis
energía nuclear	sincrotrón

Energía electromagnética	
Se transforma en	Por medio de
energía mecánica	velas solares
energía térmica	colector solar
energía eléctrica	celda solar
radiación	LED
energía química	fotosíntesis
energía nuclear	efecto Mössbauer

Más tarde, la física francesa Émilie du Châtelet repitió los experimentos de Gravesande y verificó las teorías de Leibniz. También propuso que la energía se midiera siempre en las mismas unidades para poder relacionarla en sus diferentes formas (cinética, potencial, térmica, etcétera).

5.2.2. Experimento de Gravesande

Supongamos que dejamos caer bolas idénticas desde distintas alturas sobre un bloque de arcilla húmeda. Si la primera bola cae desde una altura h , su energía potencial inicial es

$$E_{pot}(inicial) = mgh$$

Durante la caída de la bola, la energía potencial inicial se convierte paulatinamente en energía cinética y al final del recorrido se debe cumplir

$$E_{pot}(inicial) = E_{cin}(final)$$

es decir $mgh_1 = \frac{1}{2}mv^2$; por tanto la velocidad con

que la bola llega al suelo es

$$v = \sqrt{2gh}$$

Si queremos que una segunda bola llegue al suelo con el doble de velocidad, es decir $v_2 = 2v$, debemos dejarla caer desde una altura h_2 tal que

$$h_2 = \frac{1}{2g}(2v)^2 = 4h$$

Del mismo modo si queremos que una tercera bola llegue al suelo con velocidad $v_3 = 3v$ debemos dejarla caer desde una altura

$$h_3 = \frac{1}{2g}(3v)^2 = 9h$$

Los resultados se resumen en la siguiente tabla

Tabla 5.1

Velocidad	Altura inicial	Penetración (ver texto)
v	h	$d_1 = d$
$2v$	$h_2 = 4h$	$d_2 = 4d$
$3v$	$h_3 = 9h$	$d_3 = 9d$

En la última columna hemos incorporado los resultados para la penetración, en la arcilla fresca, d ,

en cada caso. Gravesande mostró que esto puede explicarse mediante el siguiente razonamiento. Cuando la bola penetra en la arcilla, debe vencer su resistencia, que asociamos a una fuerza de roce constante, f_r ; durante el tramo de frenado de la bola en la arcilla, esa fuerza de fricción realiza un trabajo, cuyo valor total es

$$W_r = f_r \cdot d$$

donde d es la profundidad de penetración de la bola en la arcilla. En el marco de la conservación de la energía podemos igualar la energía cinética final, justo antes de comenzar a penetrar en la arcilla, con el trabajo realizado contra la fuerza de roce; haciendo esa igualación con cada una de las bolas obtenemos, para cada lon-

gitud de penetración, la última columna de la tabla, donde $d = \frac{mg}{f_r} h$.

5.2.3. Formas de energía

A continuación listamos las formas de energía que se definen en física, algunas de las cuales ya fueron introducidas con anterioridad: mecánica, eléctrica, magnética, nuclear (unión de los nucleones –protones y neutrones– para formar el núcleo atómico), de ligadura (responsable de la unión de los electrones en un átomo o molécula), elástica, sonora, gravitatoria, intrínseca (asociada a la masa de un objeto según la teoría de la relatividad), térmica, electromagnética asociada a ondas de radiación (luz), elástica debida a la deformación de los materiales y química liberada cuando un material se quema. En sentido amplio, podemos decir que todas las formas de energía se reducen a *potencial*, *cinética* y *radiante*. Tanto la energía cinética como la potencial están asociadas a la materia y la energía radiante a la energía electromagnética; es una forma de propagación de la energía, como la que nos llega del Sol.

Tabla 5.2. Formas de energía

Asociadas a la materia ordinaria			
Asociada a	Cinética	Potencial	Radiante
los objetos macroscópicos	de los objetos macroscópicos	Gravitatoria	ondas gravitacionales
		Electromagnética entre objetos macroscópicos	ondas de radio
las partículas que forman los cuerpos (átomos, iones, moléculas)	de las partículas que forman los cuerpos	Electromagnética correspondiente a las uniones entre las partículas que forman los cuerpos	ondas de TV microondas rayos infrarrojos luz visible
al nivel subatómico (electrones y nucleones)	de las partículas subatómicas	Electromagnética entre partículas subatómicas	rayos ultravioletas rayos X
		Nuclear	rayos gamma

5.2.4. Energía mecánica

Aunque en el capítulo siguiente profundizaremos en el estudio de la dinámica, es decir la relación entre las fuerzas y el movimiento, revisaremos ahora conceptos básicos que nos permitirán avanzar en la comprensión cualitativa de algunos fenómenos. Esos conceptos son la *energía potencial*, la *energía cinética* e, íntimamente ligado a ambas, el *trabajo*.

La energía mecánica es un concepto importante al momento de encontrar explicación al movimiento de los cuerpos a nuestro alrededor, como también en el resto del universo. Es un tipo familiar de energía que estudia situaciones frecuentes en nuestra vida diaria, a partir de propiedades como la masa, la posición y la velocidad.⁵ Conocidas estas tres variables, podemos conocer la energía mecánica de un sistema como por ejemplo, un cuerpo móvil.

La *energía cinética* es aquella asociada al movimiento de un cuerpo y reúne los conceptos de masa y velocidad. Así encontramos energía cinética en todo cuerpo que se halle en movimiento como un automóvil, una piedra, un planeta, un satélite, un maratonista, un caballo de carrera, un electrón. La energía cinética de un cuerpo depende del sistema de referencia que utilicemos para describir el movimiento, ya que cuando decimos que un cuerpo se halla en movimiento, necesariamente estamos refiriéndonos al movimiento de un cuerpo respecto a otro, que tomamos como referencia. Por ejemplo, una pelota de fútbol y la Luna se mueven respecto a la Tierra, la Tierra se mueve respecto al Sol, etcétera.

Aquella forma de energía que puede almacenarse se denomina *energía potencial*. El almacenamiento tiene lugar a causa de la forma en la que se disponen las partículas o los objetos que están bajo la acción de un tipo particular de fuerza (el *campo de fuerzas*).⁶ Esto incluye energía potencial gravitatoria (un conjunto de masas en un campo gravitatorio), varios tipos de energía potencial nuclear (nucleones que utilizan el potencial de las fuerzas nucleares), energía potencial eléctrica (partículas cargadas en un campo eléctrico), energía potencial magnética (corrientes eléctricas en un campo magnético) y energía potencial elástica (debido a las fuerzas de restitución en un resorte u otros materiales elásticos).

Llamamos *energía mecánica* a la suma de la energía cinética más la energía potencial de un sistema:

$$E_{\text{mecánica}} = E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}} = E_c + E_p \quad (5.2)$$

Un caso típico para analizar la energía mecánica es el del movimiento de un objeto que levantamos desde el suelo contra la fuerza de gravedad. Al ser elevado debemos ejercer una fuerza sobre el objeto; cuando cae, actúa la fuerza de gravedad sobre el objeto.

La conservación de la energía mecánica implica que la energía cinética y la energía potencial se transforman una en otra pero la suma de las dos no cambia. Para el estudio de esta ley de conservación es importante tener en cuenta que, en general, *se desprecian* las fuerzas de rozamiento o se trata de reducirlas al máximo, como hizo en su momento Galileo para estudiar la caída de los cuerpos sobre un plano inclinado.

5.3. Trabajo

Volvamos sobre el caso del objeto que primero es elevado por sobre la superficie terrestre y luego se deja caer bajo la acción de la gravedad. Para analizar la situación introduciremos el concepto de *trabajo*, muy conocido en la vida diaria y asociado a un esfuerzo físico. En física, se trata de un concepto importante para entender las transformaciones de energía. El trabajo de una fuerza está dado por el *desplazamiento*

5 Tanto la posición como el movimiento se especifican relativos a un sistema de referencia: a menudo es un punto fijo arbitrario sobre la superficie de la Tierra, el sistema de referencia terrestre.

6 Cuando en una determinada región del espacio actúa una fuerza se dice que allí existe un campo de fuerzas. Así, por ejemplo, la Tierra crea a su alrededor un campo de fuerza gravitatoria que es percibido por cualquier masa que se encuentre en vecindades de la Tierra.

provocado por la fuerza, multiplicado por el valor de la fuerza misma. Si una fuerza desplaza un cuerpo una distancia d decimos que la fuerza realizó un trabajo, dado por

$$W = F \cdot d \quad (5.3)$$

Tradicionalmente se usa la letra W para designar el trabajo. Es importante aclarar que la fuerza que realiza trabajo es la que produce el desplazamiento. Si medimos la distancia d en metros y la fuerza F en newtons, las unidades del trabajo W son

$$[W] = [F][d] = N \cdot m = \text{joule}$$

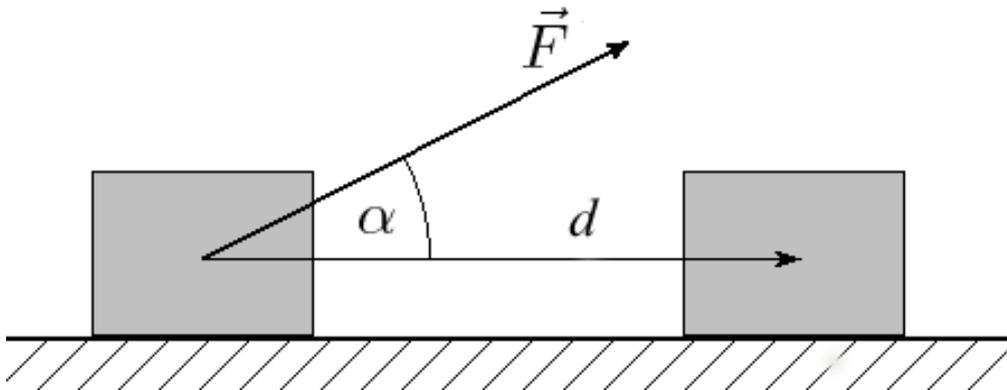
Si la fuerza aplicada sobre el objeto no es paralela a la dirección del desplazamiento, se debe buscar la *componente de la fuerza en la dirección del desplazamiento*,

$$F_d = F \cos \alpha \quad (5.3\text{bis})$$

y entonces el trabajo es el producto de esa componente por el desplazamiento d :

$$W = F_d \cdot d = F \cos \alpha \cdot d \quad (5.4)$$

Figura 5.1. La fuerza \vec{F} produce el desplazamiento d



Fuente: Ignacio Marcoux, 2010.

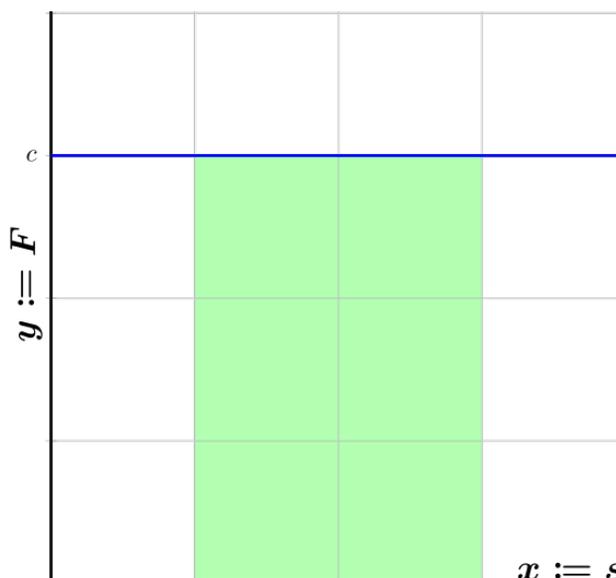
En la relación (5.3bis) hemos definido la proyección de la fuerza \vec{F} en la dirección del desplazamiento \vec{d}

$$F_d = F \cos \alpha$$

En la figura 5.1 el punto de aplicación de la fuerza \vec{F} se ubica en el centro del cuerpo. Hemos supuesto una fuerza constante, es decir que no cambia en intensidad, en dirección ni en sentido en el trayecto en que se produce el desplazamiento.

La situación de una fuerza constante de valor F y paralela al desplazamiento $d = b - a$ podemos representarla como en la figura 5.2.

Figura 5. 2. Fuerza constante de valor F ; el trabajo es el área $(b - a)F$



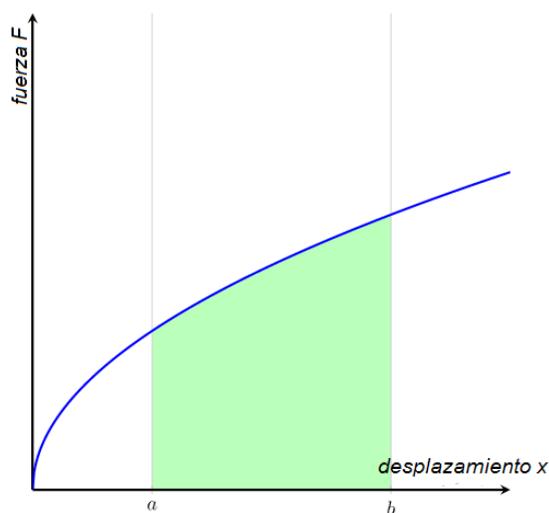
Fuente: Martin Thoma, 2014a.

En el caso en que la fuerza no es constante a lo largo del camino recorrido, pueden tomarse intervalos suficientemente pequeños de ancho Δx en los que la fuerza es prácticamente constante, calcular la contribución de cada tramo $F_d \Delta x$ y sumar el total de contribuciones.⁷

$$W = \text{Suma}(F_d \cdot \Delta x) = \int_a^b F_d dx \quad (5.5)$$

El símbolo \int se denomina *integral*, e indica la suma de las contribuciones de intervalos pequeñísimos (*infinitesimales*). La situación se ilustra en la figura 5. 3, donde el trabajo es el área coloreada en verde.

Figura 5. 3. El trabajo de una fuerza que varía a lo largo del camino según la línea azul, está dado por el área verde



Fuente: Martin Thoma, 2014b.

⁷ Los lectores que saben cálculo infinitesimal reconocerán en la ecuación (5.5). la operación integral.

Si quisiéramos levantar un objeto de peso P hasta una altura h , debemos aplicar una fuerza en contra de la fuerza de gravedad, por lo menos igual al peso del cuerpo. En ese caso, el trabajo de esa fuerza es el producto

$$W = P \cdot h \quad (5.6)$$

En su nueva posición el objeto tiene *una energía potencial* E_p exactamente *igual al trabajo realizado para llevarlo hasta allí*, es decir que

$$E_p = W = P \cdot h \quad (5.7)$$

La conservación de energía implica que la persona que levantó el objeto ha entregado $F \cdot h$ joules de su cuerpo como trabajo, mientras el objeto ha ganado $F \cdot h$ joules de energía. En el caso general podemos definir la energía potencial como *el trabajo realizado en contra de una dada fuerza*, así ocurre con la energía electrostática, la energía elástica y otras formas de energía potencial.

5.4. Energía cinética y trabajo

Veremos ahora mediante un ejemplo, la conexión entre la energía cinética y el trabajo. Consideremos un cuerpo que se encuentra en el piso 10 de un edificio y se deja caer libremente. Inicia su movimiento con velocidad cero y esta va aumentando constantemente debido al trabajo de la fuerza de la gravedad. Como la fuerza es constante, el trabajo realizado es el producto de la fuerza multiplicado por la distancia que recorre el cuerpo hasta llegar a la superficie terrestre, ecuación (5.2); a su vez la energía cinética varía de cero a su valor final, ecuación (5.5) al llegar a la superficie terrestre. Reuniendo estos dos hechos podemos inferir que el incremento de la energía cinética –diferencia entre la energía cinética final y la inicial– es igual al trabajo realizado por la fuerza de gravedad.

$$E_{c2} - E_{c1} = \Delta E_c = W \quad (5.8)$$

5.5. Intercambio entre energía potencial y cinética

En una montaña rusa los coches alcanzan la energía cinética máxima cuando están en el punto más bajo de su trayectoria, donde tienen la máxima velocidad. A medida que ascienden, la energía cinética comienza a convertirse en energía potencial gravitatoria. Suponiendo que las pérdidas por fricción son despreciables, la suma de energía cinética y potencial permanece constante. En todo caso, los motores que accionan el sistema solo realizan el trabajo necesario para reponer la energía disipada por el rozamiento.

Figura 5. 4. En la montaña rusa, la energía potencial se transforma en energía cinética



Fuente: Brandon R., 2005.

En las pistas de esquí, figura 5. 5, tenemos un ejemplo similar. Los esquiadores suben a la parte más alta de la montaña sentados en una silla elevadora, que convierte la *energía eléctrica* que alimenta el sistema de elevación, en *energía potencial* del esquiador, que es depositado en la parte superior. Cuando el esquiador inicia su descenso, la energía potencial que adquirió se va convirtiendo en energía cinética a medida que pierde altura, hasta alcanzar una velocidad máxima. Si el esquiador quisiera frenar, aprovecha la fuerza de rozamiento convirtiendo parte de la energía cinética que trae en energía térmica, por fricción contra la nieve, derrapando con los pies juntos. Esta maniobra levanta una gran cantidad de nieve que en su movimiento ascendente se lleva parte de la energía cinética inicial del esquiador.

Figura 5. 5. Esquiadores en Austria.

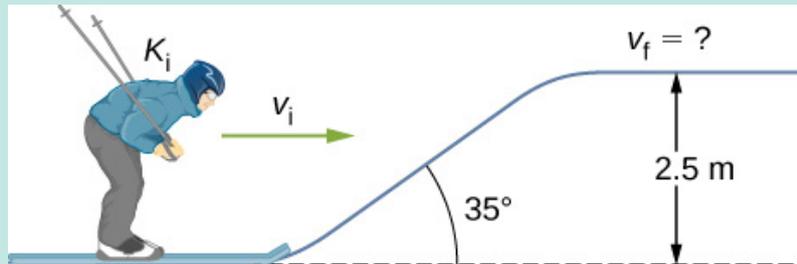


Fuente: Gerard De Mooij, 2016.

Problema 1.

Una esquiadora de masa $m = 60,0 \text{ kg}$, que se mueve con una velocidad de $12,0 \text{ m/s}$ pretende subir, aprovechando esa velocidad, una pendiente de 35° hasta un plano ubicado a $2,5 \text{ m}$ de altura, como se muestra en la figura 5. 6. Encuentre la velocidad final que tendrá en la parte superior, suponiendo un coeficiente de fricción cinético entre los esquíes y la nieve de $\mu_d = 0.08$.

Figura 5. 6. Esquiadora enfrenta una ladera



Fuente: OpenStax, 2016.

Solución 1.

En la sección 5. 2 vimos que la energía puede ser utilizada como *una moneda de cambio*, una equivalencia que permite contabilizar ganancias y pérdidas de conceptos dinámicos, tales como por ejemplo, la energía cinética y la energía potencial que podría alcanzar un cuerpo cayendo a una altura menor o ascendiendo a una altura mayor.

Trataremos de aplicar ese concepto al presente problema. La esquiadora llega a la base de la pendiente con una velocidad V_i y por tanto con una energía cinética $E_0 = \frac{1}{2} m V_i^2$. Podemos pensar que esa energía es todo el *capital*

de que dispone la esquiadora e imaginarnos que corresponde a una cierta cantidad de dinero; es todo con lo que ella cuenta para continuar su viaje. Para ascender hasta el nivel superior, debe *pagar* una cierta cantidad de energía para vencer la fricción contra la nieve (trabajo en contra de la fuerza de roce); es como si una máquina elevadora le cobrara por transportarla hasta arriba; ese trabajo vale $W = \mu_c P_N d$ donde μ_c es el coeficiente cinético de roce, P_N es la componente del peso normal a la superficie del terreno, $P_N = P \cos \theta$ y

$d = \frac{h}{\sin \theta}$ es la distancia recorrida en la pendiente. Continuando con nuestro

análogo económico podemos decir que a la esquiadora le queda la cantidad

$$E_0 - W = 4320 \text{ J} - 167,96 \text{ J} = 4152 \text{ J}$$

para continuar su viaje. Pero resulta que recién ahora se entera de que para permanecer en la nueva cota alcanzada debe pagar el valor de la energía potencial adquirida, una especie de costo por el nuevo *estatus alcanzado*. Por tanto la energía cinética final –el dinero que realmente le queda– disponible para los gastos que debe afrontar en adelante es

$$E_c = E_0 - W - mgh = 4320 \text{ J} - 167,96 \text{ J} - 1470 \text{ J} = 2461,5 \text{ J}$$

que corresponde a una velocidad final $V_f = \sqrt{\frac{2}{m} E_c} = 9,455 \text{ m/s}$.

5.6. Significado de la energía potencial

La energía potencial puede ser vista como energía acumulada en un sistema que existe toda vez que hay una fuerza (*fuerza de restitución*) que tiende a llevar un objeto de regreso a una posición original.

Por ejemplo, cuando levantamos un objeto del suelo y lo colocamos sobre una mesa de altura h , hemos vencido la fuerza de gravedad, y el cuerpo gana energía potencial mgh ; pero la fuerza de gravedad es ahora la *fuerza de restitución* pues esa energía *potencial* puede ser transformada en energía cinética cuando dejamos libre el cuerpo y este puede caer. Mientras el cuerpo no cae, porque está apoyado en una mesa, la caída es solo una posibilidad, por eso es *energía potencial*.⁸

De modo similar cuando un resorte se estira, ejerce una fuerza elástica –fuerza de restitución– que tiende a volver los extremos del resorte a la posición original. Mientras eso no sucede, el sistema tiene energía potencial elástica acumulada. La acción de estirar el resorte o de levantar el peso requiere la realización de un trabajo.

De acuerdo con el *principio de conservación de la energía*, la energía potencial almacenada no puede desaparecer. Si se libera el resorte, la *energía potencial elástica* almacenada puede convertirse en energía cinética por efecto de la fuerza de restitución, y si se libera el peso, la *energía potencial gravitatoria* se convierte en energía cinética por efecto de la fuerza de la gravedad.

Hay una forma de energía potencial asociada a cada tipo de fuerza. Cuando es posible definir la energía potencial, en la forma que hemos indicado más arriba, las fuerzas se llaman *conservativas*.

5.7. Energía potencial gravitatoria

El radio terrestre tiene el valor aproximado $R_T = 6371 \text{ km}$; por esa razón si un cuerpo se encuentra a la altura h sobre la superficie de la Tierra, mientras h sea mucho menor que R_T , la fuerza gravitatoria varía muy poco con la altura. Esa fuerza se manifiesta como el peso del cuerpo y es igual a la masa m de este multiplicada por la aceleración de la gravedad $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$, es decir,

$$F = -mg \quad (5.9)$$

El signo negativo surge porque suponemos que el sentido positivo de la coordenada vertical es hacia arriba y la fuerza peso apunta hacia abajo. En este caso, la energía potencial gravitatoria está dada por el trabajo –en contra de la fuerza peso– que debemos hacer para llevar el cuerpo desde una altura dada, hasta otra mayor. Ya dijimos que en las aplicaciones interesan solo las diferencias de energía potencial; en este caso tomamos como posición de referencia el nivel del suelo en el lugar en que estamos, es decir, allí fijamos $h = 0$. Cuando subimos el cuerpo a una altura h por encima de la altura inicial, tenemos para la energía potencial

$$E_p = \text{Suma}(F_d \cdot d) = mgh \quad (5.10)$$

donde hemos utilizado que la fuerza es constante y el desplazamiento total es h . Vemos que F_d tiene el módulo de la fuerza de gravedad mg pero apunta hacia arriba (lo mismo que el desplazamiento d pues F_d debe elevar el cuerpo en contra de la fuerza de gravedad).

⁸ Según el diccionario de la Real Academia Española potencial significa ‘que puede suceder o existir’, en contraposición de lo que existe.

Esta forma de la energía potencial gravitatoria es usada comúnmente en la mecánica. Hemos visto que se aplica por ejemplo, para calcular las transformaciones de energía que ocurren cuando el carrito de la montaña rusa se desplaza por el riel cayendo libremente. El movimiento se realiza de modo que la energía total

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + mgh \quad (5.11)$$

se conserva, es decir que mantiene un valor constante a lo largo del tiempo. Mientras cae, el carrito aumenta su velocidad, que alcanza su máximo en el punto más bajo de la trayectoria (aumenta la energía cinética y disminuye la energía potencial); a medida que sube las cuestas de la montaña rusa, disminuye su velocidad (disminuye la energía cinética y aumenta la energía potencial).

Ver contenidos complementarios

Energía en la pista de patinaje: conceptos básicos

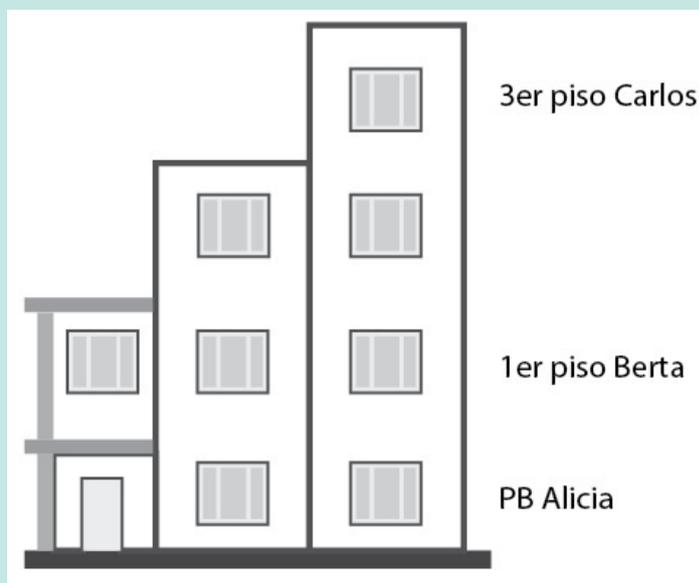
<https://phet.colorado.edu/es/simulation/energy-skate-park-basics>



Problema 2.

Tres estudiantes, Alicia, Berta y Carlos, viven en el mismo edificio; Alicia alquila un departamento en la planta baja y Berta en el primer piso, la altura de cada piso es de 3m. Ambas observan que una grúa levanta un piano de masa $m=100\text{ kg}$ desde el primer piso hasta el tercero donde vive Carlos, un amigo de ambas. Si se les pidiera calcular el cambio en la energía potencial tomando cada uno como referencia el piso donde vive ¿llegarían todos al mismo resultado?

Figura 5. 7. Edificio de tres pisos



Solución 2.

Para ordenar las ideas llamaremos

Nivel de la planta baja (Alicia): $h_0 = 0m$

Nivel del primer piso (Berta): $h_1 = 3m$

Nivel del segundo piso (): $h_2 = 6m$

Nivel del tercer piso (Carlos) : $h_3 = 9m$

Análisis de Alicia

Alicia vive en la planta baja y es natural que tome ese nivel como el 0 de energía potencial. Por eso razona que la energía potencial inicial del piano que se encuentra en el primer piso a nivel h_1 es: energía potencial inicial del piano según Alicia, es

$$E_{Ai} = mgh_1$$

$$E_{Ai} = mgh_1 = 100\text{kg} \times \frac{9,81\text{m}}{\text{s}^2} \times 3\text{m} = 2943,0 \text{ J}$$

Energía potencial final del piano cuando se encuentra en el tercer piso a nivel h_3 es

$$E_{Af} = mgh_3 = 100\text{kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 9\text{m} = 8829,0 \text{ J}$$

La diferencia entre ambas cantidades es

$$\Delta E_A = (E_{Af} - E_{Ai}) = 5886,0 \text{ J}$$

Análisis de Berta

Berta se encuentra en el primer piso y por tanto puede tomar ese nivel como el cero de energía potencial. La altura inicial del piano para Berta es por tanto, 0 m; para la energía potencial por tanto, tenemos

$$E_{Bi} = mg \times 0 = 100\text{kg} \times \frac{9,81\text{m}}{\text{s}^2} \times 0\text{m} = 0 \text{ J}$$

La diferencia entre la energía potencial final del piano que se encuentra en el tercer piso y la inicial del piano en el primer piso es

$$E_{Bf} = mg(h_3 - h_1) = 100\text{kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times (9 - 3)\text{m} = 5886,0 \text{ J}$$

$$\Delta E_B = (E_{Bf} - E_{Bi}) = 5886,0 \text{ J}$$

Análisis de Carlos

Carlos se encuentra en el tercer piso cuya altura es h_3 y por tanto puede tomar ese nivel como el cero de energía potencial. Luego razona que la energía potencial inicial del piano que se encuentra en el primer piso de nivel h_1 es: Energía potencial inicial del piano según Carlos

$$E_{Ci} = mg(h_1 - h_3) = 100\text{kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times (3 - 9)\text{m} = -5886,0 \text{ J}$$

Mientras que la energía potencial final del piano cuando se encuentra en el tercer piso a nivel h_3 es

$$E_{Cf} = 0 \text{ J}$$

$$\Delta E_C = (E_{Cf} - E_{Ci}) = 0 \text{ J} - (-5886,0 \text{ J}) = 5886,0 \text{ J}$$

Conclusión

La diferencia de energía potencial es la misma no importa donde se tome el nivel de referencia; en los tres casos el trabajo que se realiza en contra de la fuerza de la gravedad resulta idéntico. Notamos que para Carlos la energía potencial inicial del piano es negativa, lo que no representa ningún inconveniente, pues el cambio total de energía resulta igual para los tres observadores.

El piano debe pasar del primer piso al tercero y eso cuesta 5880 J, no importa cómo hagamos las cuentas.

El hecho de que la diferencia de energía es independiente de la posición de referencia facilita la resolución de situaciones problemáticas, algo que utilizaremos en varios ejemplos..

5.8. El experimento de Gravesande

En el experimento mencionado en la sección 5.2 vimos que el holandés Gravesande dejaba caer esferas de bronce sobre arcilla fresca, relacionando la velocidad con la cual caían –o la altura desde la cual las dejaba caer– con la profundidad del hoyo que producían en la arcilla.

En sus experimentos Gravesande buscaba poner a prueba el modelo de Leibniz de *vis viva*. Veremos ahora cómo podemos justificar los resultados del análisis de Gravesande. La esfera que parte de la altura h_1 comienza su movimiento con velocidad nula. La energía mecánica total, dada por la relación (5.2) vale en el instante inicial

$$E_{\text{mecánica}} = E_c(h = h_1) + E_p(h = h_1) \quad (5.12)$$

donde

$$E_c(h = h_1) = 0 \text{ y } E_p(h = h_1) = mgh_1 \quad (5.13)$$

Cuando la esfera llega a la superficie de la arcilla, donde tomamos $h = 0$, las energías (5.12) valen

$$E_c(h = 0) = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (5.14)$$

$$E_p(h = 0) = 0 \quad (5.15)$$

Como la energía mecánica total se conserva, se cumple

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = mgh$$

La arcilla ofrece resistencia a la penetración de la esfera, que representaremos con una fuerza constante f_r dirigida hacia arriba. Para penetrar en la arcilla, la

energía cinética $E_c(h = 0) = \frac{1}{2}mv_1^2$ de la esfera de bronce se convierte en el trabajo

de vencer la resistencia de la arcilla $W = f_r d$, donde d es la profundidad de penetración; es decir debe cumplirse

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = f_r d \quad (5.16)$$

de donde obtenemos

$$d = \frac{m}{2f_r}v_1^2 \quad (5.17)$$

que muestra explícitamente la relación entre la profundidad d de los hoyos y el cuadrado de la velocidad.

Actividad 5. 2.

Demostrar otro de los resultados de Gravesande. Si la altura desde la cual las esferas caen es inversamente proporcional a su masa, las hendiduras hechas en la arcilla son iguales.

Aplicaciones de la energía potencial gravitatoria

Contrapeso. En los ascensores, el contrapeso es un peso equivalente que equilibra la cabina vacía. Con su uso se logra que el motor trabaje solo para levantar el peso de los pasajeros, con el consiguiente ahorro de energía.

Funiculares. En algunos funiculares de montaña, el coche que se encuentra en la parte superior se carga con agua hasta superar el peso del coche que está abajo, haciendo que el primero descienda la colina mientras el otro asciende. El agua se drena en la parte inferior, y el proceso se repite intercambiando el rol de los coches. En la figura 5. 8 se muestra el punto de cruce a mitad de camino.

Figura 5. 8. Funicular de Friburgo



Fuente: Pakeha, 2006.

Trebuchet. Una aplicación de la energía potencial gravitatoria se da en una antigua máquina de guerra llamada trabuquete o fundíbulo, también conocida por su nombre en francés *trebuchet*. Usa la energía potencial gravitatoria de un contrapeso para lanzar un proyectil a gran distancia.

Figura 5.9. Trebuchet (trabuquete)



Fuente: QUISTNIX, 2006.

Posiblemente fuera inventado en China en el siglo IV a. C. y llevado a Europa alrededor del año 500 d. C. Se cree que también fue usado para arrojar fuera de las murallas de las ciudades sitiadas los cadáveres de los muertos durante las pestes. Podía arrojar proyectiles de unos cien kilos hasta una distancia de doscientos metros, utilizando un contrapeso de unas diez toneladas.

Central hidráulica. Una central eléctrica hidráulica acumula agua en una represa, de manera que acumula energía potencial. Esta, al ser liberada, se convierte en energía cinética que impulsa las turbinas y así se convierte en energía eléctrica.

Figura 5.10. Salida del agua en una central hidráulica



Fuente: Hidroeléctrica Futaleufú.

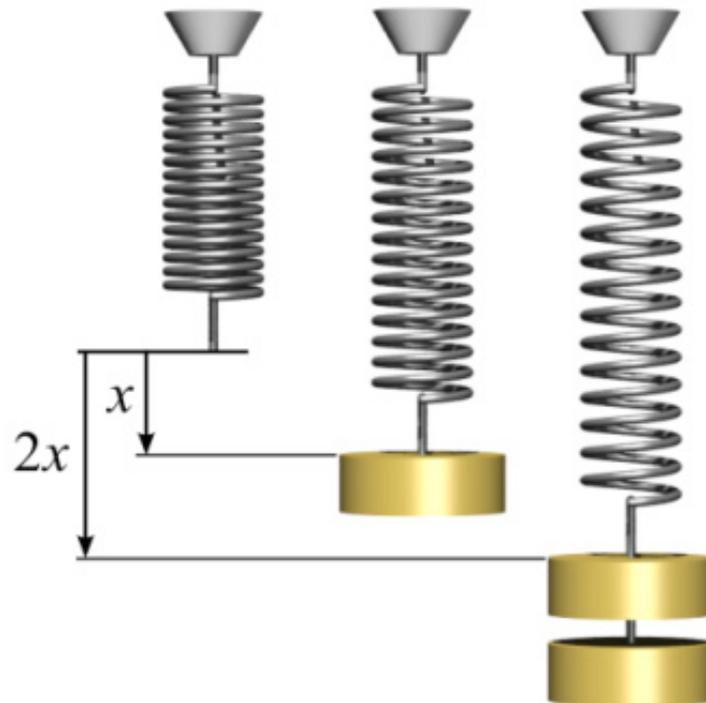
5.9. Energía potencial elástica

Es la energía acumulada como resultado de la deformación de un cuerpo elástico, como cuando estiramos o comprimimos un resorte; es igual al trabajo realizado para lograr esa deformación. La fuerza F necesaria para estirar o comprimir un resorte a una distancia x está regida por la ley de Hooke que establece

$$F = -kx \quad (5.18)$$

k es una constante característica del resorte. La ley es una aproximación, válida para deformaciones pequeñas. La *constante elástica* k es propia de cada material.

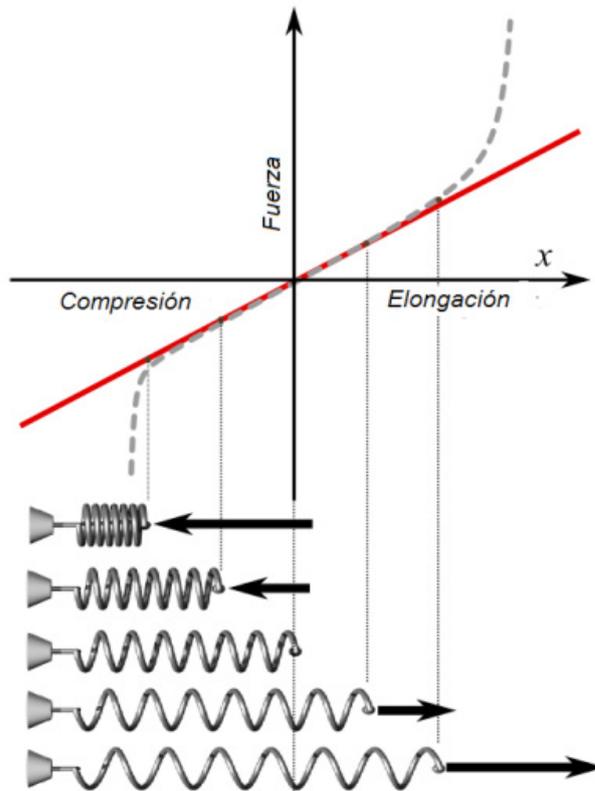
Figura 5.11. Ley de Hooke. La fuerza es proporcional al estiramiento



Fuente: Svjo, 2013a.

La relación de proporcionalidad implica que la fuerza es mayor cuanto mayor sea el estiramiento y el signo negativo indica que la fuerza se opone a la deformación del resorte. Esta ley regula el funcionamiento de la balanza de resortes o dinamómetro. La misma relación se aplica si el resorte es comprimido, como en el caso de los resortes de suspensión de un auto. En la figura 5.11 se grafica la fuerza de restitución en función de la longitud de estiramiento o compresión del resorte. La línea punteada es un gráfico esquemático de la curva real. En la parte inferior se dan las imágenes del estado del resorte, de arriba hacia abajo: el primero corresponde al resorte totalmente comprimido, el segundo corresponde al resorte parcialmente comprimido, el tercero al estado relajado (sin fuerza aplicada), el cuarto a un estiramiento moderado y el quinto, a un estiramiento mayor. Se aprecia que en el quinto caso el resorte se halla más allá del rango de validez de la ley de Hooke.

Figura 5.12. Resorte helicoidal: Fuerza aplicada F en función de la elongación x .
(la línea roja es la ley de Hooke)



Fuente: Svjo, 2013b.

Actividad 5.3.

Verificar la ley de Hooke con un resorte y una regla, graficando los valores del estiramiento a medida que se agregan pesos conocidos. A partir de la pendiente determinar el valor de k .

Ver contenidos complementarios

Ley de Hooke

<https://phet.colorado.edu/es/simulation/hookes-law>

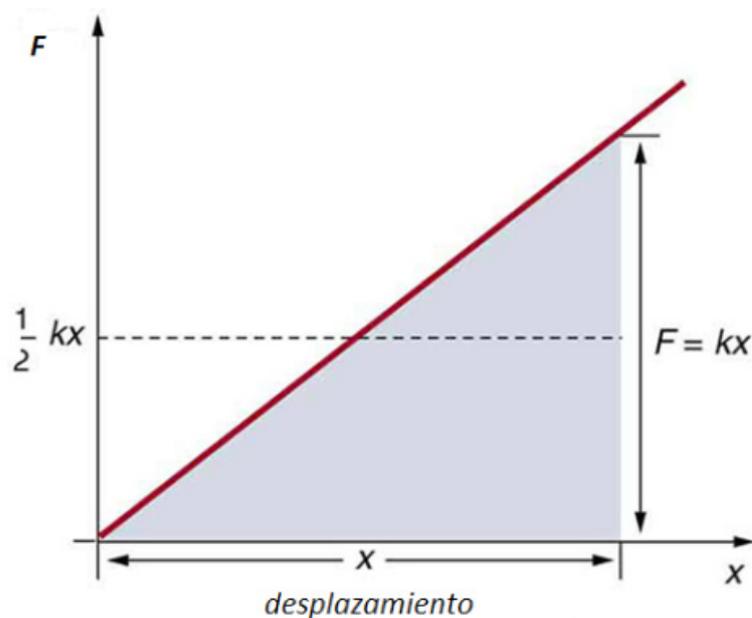


Podemos calcular el trabajo realizado para comprimir un resorte a fin de encontrar la energía potencial almacenada (trabajo realizado por una fuerza aplicada F_{ap} opuesta a la fuerza de restitución [acción-reacción], $F_{ap} = kx$).

El área debajo de la recta de la figura 5.13 representa ese trabajo, ya que puede escribirse:

$$W = \sum_{x=0}^{x=x} F_{ap} \cdot \Delta x \quad (5.19)$$

Figura 5. 13. Fuerza aplicada en función de la deformación



Fuente: OpenStax College, 2018.

Con referencia a la figura 5. 13, como el área del triángulo es $\frac{1}{2}$ (base por altura), resulta

$$kx \cdot \Delta x = \frac{1}{2} kx \cdot x = \frac{1}{2} kx^2 \quad (5.20)$$

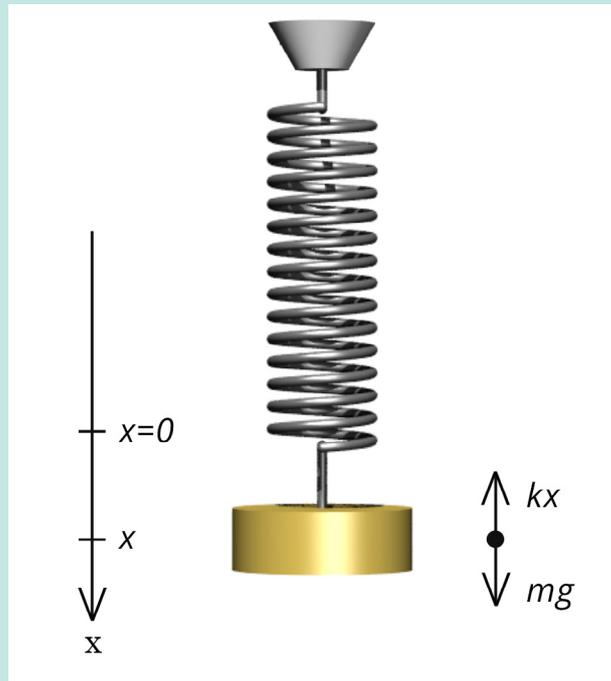
$$W = \sum_{x=0}^{x=x}$$

Para un resorte en reposo –ni estirado ni comprimido– la fuerza y la energía potencial son nulas. Cuando el resorte es estirado, este tiene una cantidad de energía potencial acumulada, dada por $E_{elás} = \frac{1}{2} kx^2$. Cuando el resorte se comprime una longitud x la situación es simétrica. La posición de referencia es el punto $x = 0$.

Problema 3.

Un resorte se estira una longitud de $0,20\text{ m}$ cuando un niño que pesa 400 N se cuelga de este. Determinar cuánta energía potencial se acumula en el resorte. Si luego se cuelga del mismo resorte otro niño con un peso $P = 500\text{ N}$, determinar qué longitud se estira el resorte esta vez y cuánta energía potencial hay acumulada en este.

Figura 5.14. Un resorte estirado



Fuente: Elaboración propia.

Caso 1.

Cuando el primer niño se cuelga del resorte, actúa sobre él una fuerza igual a su peso, 400 N . El resorte se estira hasta que la fuerza elástica de restitución que produce, $F = k\Delta x$ equilibre el peso, o sea hasta que se cumpla la relación $k\Delta x = P$. De aquí sigue que la constante elástica del resorte debe satisfacer

la relación $k = \frac{P}{\Delta x}$; reemplazando los datos numéricos vemos que la constante del resorte, k debe valer

$$k = \frac{P}{\Delta x} = \frac{400\text{ N}}{0,02\text{ M}} = 2000 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5.21)$$

Caso 2.

Cuando el segundo niño, que pesa 500 N se cuelga del resorte, este se estirará hasta que la fuerza de restitución $F = k\Delta x$ iguale el peso de este niño, es decir, 500 N . Las relaciones anteriores nos dicen que el estiramiento debe satisfacer

en este caso, la relación $\Delta x = \frac{P}{k}$, de donde sigue que

$$\Delta x = \frac{500}{2000}\text{ m} = 0,25\text{ m} \quad (5.22)$$

Para determinar la energía potencial elástica almacenada en el resorte en cada caso recurrimos a la relación dada en el texto $E_{elás} = \frac{1}{2}k(\Delta x)^2$. Usando los valores de k y de Δx obtenidos más arriba. Tenemos:

$$E_{elas1} = \frac{1}{2} k (\Delta x)^2 = \frac{1}{2} \times 2000 \times (0,20)^2 \frac{N}{m} m^2 = 40 Nm = 40 J$$

$$E_{elas2} = \frac{1}{2} k (\Delta x)^2 = \frac{1}{2} \times 2000 \times (0,25)^2 \frac{N}{m} m^2 = 62 Nm = 62 J$$

Como era de esperar, vemos que la energía potencial elástica depende del estiramiento del resorte.

5.10. Aplicaciones de la energía potencial elástica

1. Salto con garrocha

Es una prueba de gran complejidad técnica, pues el atleta interactúa con un implemento elástico, la garrocha. El objetivo es superar una valla ubicada a una determinada altura, mediante la ejecución de una carrera de unos pocos metros, portando una garrocha que se utiliza para clavarla en una caja de 0,20 m de profundidad, a fin de elevarse luego verticalmente.

La siguiente figura reproduce la fase final de un caso real.

Figura 5.15. Fase final del salto con garrocha



Fuente: Marie-Lan Nguyen, 2013a, 2013b, 2013c, 2013d, 2013e.

La energía cinética inicial del atleta que se aproxima corriendo a la barra se convierte en energía elástica de la garrocha que se flexiona y, a medida que el atleta se eleva del suelo, en energía potencial gravitatoria. En el punto más alto de su trayectoria, la energía inicial se ha transformado en energía potencial gravitatoria. La garrocha actúa como un dispositivo que almacena energía y ayuda en la transformación de la energía cinética inicial en energía potencial. Al arquear el cuerpo, el atleta mantiene bajo su CM, que de hecho pasa por debajo de la barra.

2. Catapulta

Otra aplicación de la energía potencial elástica se da en la catapulta que usa la energía potencial elástica de una madera como un gran arco para lanzar un proyectil a gran distancia.

Figura 5. 16. Réplica de una catapulta en el Château des Baux, France



Fuente: Vonmangle~commonswiki, 2005.

3. Tiro con arco y flecha

Es uno de los usos más antiguos de la energía potencial elástica para la supervivencia del género humano.

Figura 5. 17. Arquero con arco y flecha



Fuente: Penny Mayes, 2009.

El arquero realiza trabajo sobre el arco, tirando de la cuerda. Parte de la energía química de su cuerpo se transforma en energía elástica del arco. Cuando suelta la cuerda, la fuerza entre la cuerda y la flecha realiza trabajo sobre la flecha: la energía potencial del arco se transforma en energía cinética de la flecha.

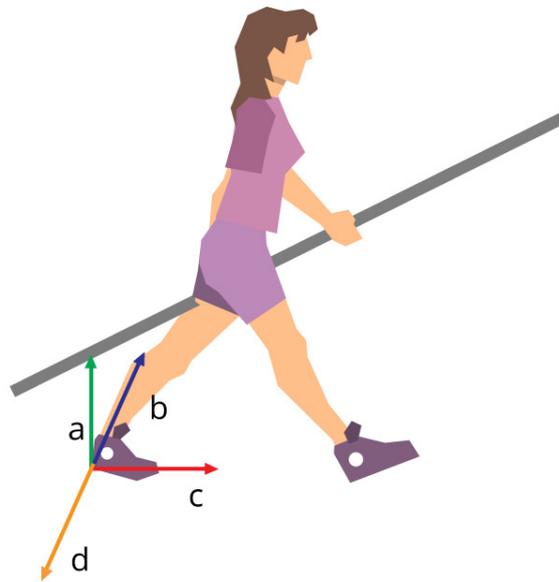
Pregunta 1. Indique cuál de estas afirmaciones es correcta:

- Cuando se transfiere energía, se realiza trabajo.
- Conservación de la energía significa ahorro de energía.
- Todo trabajo produce una fuerza.
- La energía se conserva solo en el laboratorio.

5.11. Fuerzas disipativas

Hasta ahora idealizamos los ejemplos ignorando la disipación de energía debida al rozamiento. Cuando nos frotamos las manos para darnos calor, estamos aprovechando un fenómeno físico ligado a las fuerzas de roce entre nuestras dos manos. Esa fuerza corresponde a la categoría de *fuerza disipativa*: significa que su acción convierte trabajo mecánico en calor. La fuerza de roce se debe a la acción de las fuerzas electromagnéticas que existen entre los átomos de dos cuerpos en contacto. Otro ejemplo es la fricción con el asfalto de los neumáticos de un vehículo cuando frena; la fricción entre las cubiertas y el suelo también provee la fuerza que permite que el auto marche.

Figura 5.18. Fuerzas que intervienen cuando caminamos



Las fuerzas de roce son un factor imprescindible para nuestra vida cotidiana. Vemos en la figura 5.18 que cuando una persona camina, el pie izquierdo se apoya en el suelo según una línea oblicua $R_{M/S}$ (naranja) dirigida hacia abajo y hacia atrás. De acuerdo al principio de acción y reacción, el suelo ejerce sobre el caminante una fuerza $R_{M/S}$ (azul) directamente opuesta, dirigida hacia arriba y hacia adelante.

La componente normal R_N (verde) de la fuerza $R_{M/S}$ impide que el pie se hunda en el suelo, mientras que la componente horizontal R_T (roja), en la dirección del movimiento, impulsa al caminante hacia adelante. Esta componente existe solo si las superficies de contacto son suficientemente rugosas: las fuerzas de fricción sirven para propulsar el caminante.

El principio de conservación de la energía requiere que en todas las transformaciones entre una forma de energía y otra, se incluya el calor generado. Como no siempre es posible calcular ese calor, en la práctica se trata de reducir el rozamiento a un

mínimo. Ya Galileo en sus experimentos con planos inclinados utilizaba superficies de madera o de mármol muy bien pulidas para disminuir el rozamiento.

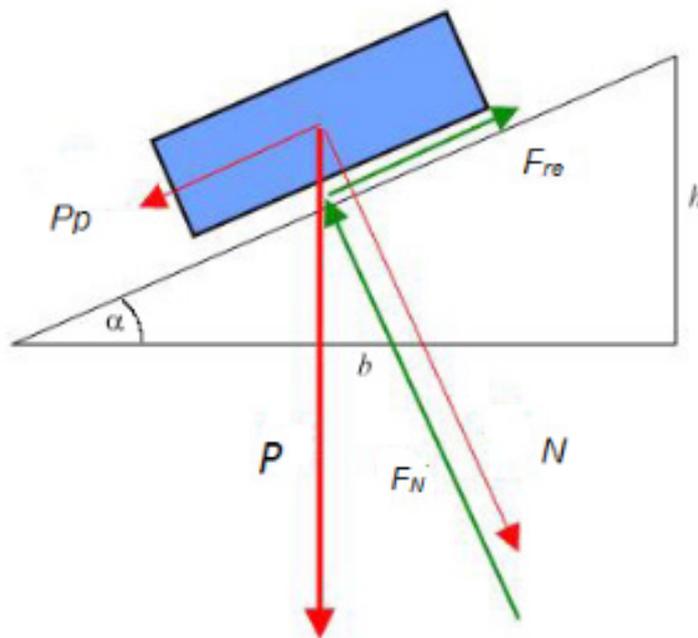
Si colocamos un bloque de madera de peso P en reposo sobre un plano inclinado también de madera, veremos que el bloque no desliza a menos que la inclinación del plano supere un valor crítico. Esto se debe a una fuerza de fricción o rozamiento estático F_{re} que se opone al movimiento.

Fenomenológicamente se ha comprobado que esta fuerza es proporcional a la componente del peso según la dirección normal a la superficie N y al coeficiente de rozamiento estático μ_e que depende de las características de las superficies en contacto. Se cumple

$$F_{\text{re}} = -\mu_e N$$

donde N es la componente normal del peso.

Figura 5.19. Componentes de la fuerza peso en un plano inclinado



Fuente: Adaptado de Studi111, 2008

En la figura 5.19 el peso del cuerpo $P = mg$ (línea roja gruesa) aparece descompuesto en la componente normal a la superficie del plano inclinado $N = mg \cos \theta$ (línea roja delgada) y la paralela $P_p = mg \sin \theta$ (línea roja delgada). El cuerpo no desliza si la fuerza de roce es mayor que la componente paralela del peso $F_{\text{re}} > P_p$, dado que $\mu_e mg \cos \theta > mg \sin \theta$

Si aumentamos la inclinación del plano ambos miembros de esta desigualdad tienden a igualarse. Cuando se alcanza ese punto crítico se cumple:

$$\mu_e = \tan \theta_c$$

lo que permite determinar el valor de μ_e . Apenas superado ese ángulo el bloque se desliza aceleradamente hacia abajo, como consecuencia de que, una vez que el bloque está en movimiento, actúa el coeficiente de rozamiento dinámico μ_d , que es menor que μ_e . Esto puede verificarse: si disminuimos levemente la inclinación del plano, podemos lograr que el bloque deslice con velocidad uniforme, lo que implica que la fuerza neta es cero.

5.12. Energía de los alimentos

La energía de los alimentos es energía química que los animales (incluidos los humanos) obtienen de su comida a través del proceso de respiración celular.

Los seres humanos y otros animales necesitan un aporte mínimo de energía alimentaria para sostener su metabolismo e impulsar sus músculos. Los alimentos están compuestos de carbohidratos, grasas, proteínas, agua, vitaminas y minerales. Los hidratos de carbono, grasas, proteínas y agua representan el 90% en peso de los alimentos, mientras que las vitaminas y los minerales constituyen solo un pequeño porcentaje. Los organismos vivos obtienen energía de los carbohidratos, grasas y proteínas, así como de ácidos orgánicos, polioles y etanol presentes en la dieta. Algunos componentes de la dieta que proporcionan poca o ninguna energía como el agua, los minerales, las vitaminas, el colesterol y la fibra, son necesarios para la salud y la supervivencia por otras razones. Agua, minerales, vitaminas y el colesterol no se descomponen (son utilizados por el cuerpo en la forma en que se absorben) y así no pueden utilizarse para generar energía. La fibra, un tipo de hidratos de carbono, no puede ser completamente digerida por el cuerpo humano. Los rumiantes extraen energía de los alimentos a partir de la respiración de la celulosa gracias a las bacterias en su rumen.

La energía en los alimentos se mide en joule (J) pero otra unidad para medirla es la caloría; en forma de *caloría grande* o kilocaloría (kcal o Cal), que es igual a $4,184 \text{ kiloJ}$. La tasa metabólica basal (TMB) es la tasa mínima de consumo de energía por unidad de tiempo, por animales endotérmicos (sangre caliente) en reposo.

Problema de Fermi: se llama de esta manera o *estimación de Fermi* a un problema de estimación que busca dar una respuesta en una primera aproximación a un problema. Debe su nombre al físico Enrico Fermi, conocido por su habilidad para hacer cálculos aproximados con pocos datos reales, que aplicaba en sus clases en la Universidad de Chicago, en la década de 1940.

Muchas veces se busca estimaciones *alla Fermi* de un problema, antes de recurrir a métodos más complejos para encontrar una respuesta precisa. El método proporciona una forma de comprobación de los resultados. La estimación *alla Fermi* brinda una manera rápida para obtener el resultado que razonablemente podría esperarse que sea la respuesta. El siguiente es un ejemplo de un problema de ese tipo.

Uno de las interrogantes que encuentran los arqueólogos es estimar la cantidad de obreros –o de esclavos– que trabajaron hace 3000 años para construir la Gran Pirámide de Keops. En este ejercicio utilizaremos el principio de conservación de la energía para aportar una estimación de ese dato.

Una vez completado el transporte de las rocas que forman la pirámide, desde la cantera hasta su lugar actual –un problema en sí mismo– el siguiente paso consistió en elevar las piezas hasta su posición en el monumento.

La pirámide tiene una base cuadrada de 233 m de lado y una altura $h = 146 \text{ m}$.

Sabiendo que el centro de masa de una pirámide se encuentra a un altura $z = \frac{h}{4}$

podemos evaluar el valor del trabajo realizado por los obreros para dar forma a la pirámide, pues ese trabajo debe ser igual a la energía potencial

$$E_p = mgz$$

acumulada en la pirámide, donde m es la masa total del monumento. Para calcular el valor de la masa usamos el volumen $V = (a^2 h) / 3 = 2,6421 \times 10^6 \text{ m}^3$ de la pirámide y la densidad media de la roca $\rho = 2700 \text{ kg} / \text{m}^3$; la masa $m = \rho V$ resulta $m = 7,1336 \times 10^9 \text{ kg}$ y con ello la energía potencial es

$$E_p = mgz = 1,0217 \times 10^{13} J$$

o en kcal

$$E_p = mgz = 610,08 \times 10^6 \text{ kcal}.$$

En la actualidad un hombre necesita un promedio de 2500 kcal diarias, a las que habría que sumar unas 500 kcal más si desarrolla un trabajo físico continuado. Es probable que en la época de la construcción de la pirámide la ingesta humana diaria no superase las 1500 kcal. Por el contrario, los egipcios de hace cuarenta siglos difícilmente pudieran rendir más allá de un 10% en trabajo, es decir unas 150 kcal. Así pues, para alcanzar un trabajo total de $600 \times 10^6 \text{ kcal}$ se necesitaría el esfuerzo conjunto de 4×10^6 hombres por día de trabajo o, equivalentemente, 540 hombres trabajando durante 20 años, 360 días cada año.

La primera estimación conocida sobre este tema se debe al historiador griego Herodoto, quien calculó un valor unas 200 veces superior. Pero esto no nos debe desalentar pues no sabemos cuál es el valor más aproximado a la verdad. Nuestro cálculo es solo una estimación, y tiene la finalidad de mostrar una aplicación de la física.

Actividad 5.4.

Se sugiere mejorar la estimación suponiendo que en lugar de levantar un solo bloque de masa igual a la masa total y haberlo elevado verticalmente, la cuarta parte de la altura total de la pirámide, usáramos un plano inclinado. En ese caso deberíamos computar las pérdidas energéticas debidas al rozamiento. Para ello debemos fijar un valor para el coeficiente de rozamiento entre el bloque de piedra y el plano así como para el ángulo de inclinación. Si se toma 0,75 para el rozamiento correspondiente a dos superficies, ambas de piedra caliza y 10° para el ángulo de inclinación, se obtiene un valor de 5700 hombres trabajando durante 10 años; para una pendiente de 5° se llega a 11.000 hombres en 10 años.

5.13. Conservación de la energía en movimientos simples

El caso de movimiento ascendente y descendente de un cuerpo que es lanzado hacia arriba con una velocidad inicial v_0 nos permite analizar en detalle la conservación de la energía mecánica. Al punto inferior de la trayectoria le asignamos el valor $h = 0$; en esas condiciones la energía mecánica inicial es solo energía cinética

$$E_c = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (5.23)$$

y la energía potencial es nula

$$E_p = 0$$

La energía mecánica total en ese punto es

$$E_c + E_p = \frac{1}{2}mv_0^2 = E_o \quad (5.24)$$

El principio de conservación de la energía nos dice que la energía mecánica total

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

debe mantenerse constante, es decir, tiene un valor igual al que tenía en el instante inicial. Por tanto la velocidad v y la altura h alcanzada por el cuerpo, en todo momento deben satisfacer la relación

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = E_0 \quad (5.25)$$

Esta condición nos permite determinar la velocidad en función de la altura, teniendo en cuenta que la energía total se conserva, mientras la cinética y la potencial varían. Para analizar este caso tomamos la velocidad positiva cuando el cuerpo sube, y negativa cuando baja. A medida que el cuerpo asciende h aumenta y la velocidad disminuye. Tenemos estas dos situaciones límite

Tabla 5.3. Velocidad y altura

Altura	Velocidad	Energía cinética	Energía potencial
$h = 0$	$v = v_0$	$\frac{1}{2}mv_0^2$	0
$h_{m\acute{a}x}$	$v = 0$	0	$mgh_{m\acute{a}x}$

Como la energía se conserva, ambos valores máximos deben ser iguales, es decir

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh_{m\acute{a}x}$$

de donde sigue

$$h_{max} = \frac{v_0^2}{2g}$$

En las demás posiciones, se cumple la relación

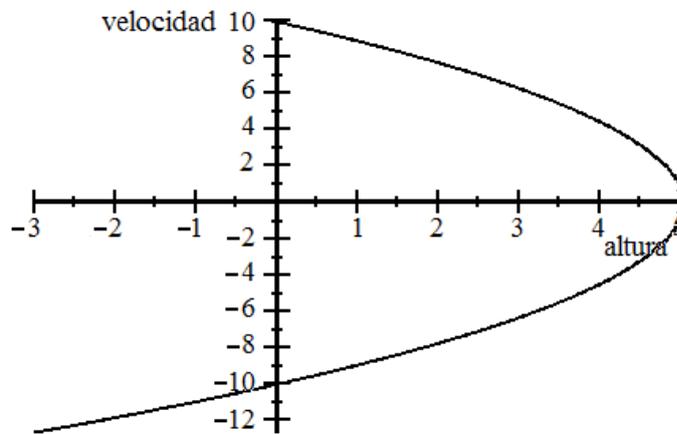
$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

de donde sigue

$$v = \pm\sqrt{v_0^2 - 4gh} \quad (5.26)$$

La representación de la ecuación (5.26), dada en la figura 5.20, muestra la variación de la velocidad con la altura, donde el cuerpo parte de la altura $h_0 = 0$ con velocidad inicial v_0 .

Figura 5. 20. Velocidad en función de la altura para un cuerpo que es arrojado verticalmente hacia arriba desde una altura $h = 0$ con velocidad $v_0 = 10\text{m} / \text{s}$.



La figura 5. 20 corresponde a una velocidad inicial $v_0 = 10\text{m} / \text{s}$. Al alcanzar la altura máxima de 5m , la velocidad se anula y el cuerpo inicia un movimiento descendente (velocidad negativa). Si las condiciones permiten que el móvil caiga por debajo de la altura inicial (por ejemplo si fue lanzado hacia arriba desde el borde de una terraza), la energía potencial mgh se vuelve negativa y la velocidad sigue aumentando.

Un segundo ejemplo para analizar en el marco de la conservación de la energía mecánica es el de un móvil sujeto a una fuerza elástica $F = -kx$. La energía mecánica total es en este caso

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mkx^2 \quad (5.27)$$

El principio de conservación de la energía nos dice que debe cumplirse

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E_0 \quad (5.28)$$

Esto muestra la relación entre velocidad v y posición x cuando la partícula se mueve bajo la acción de un resorte de constante k . Como ambos términos son positivos, para que se cumpla (5.26) mientras una de las variables crece, la otra debe decrecer. Tomamos la velocidad positiva hacia la derecha y negativa hacia la izquierda. Dividiendo ambos miembros por E_0 obtenemos:

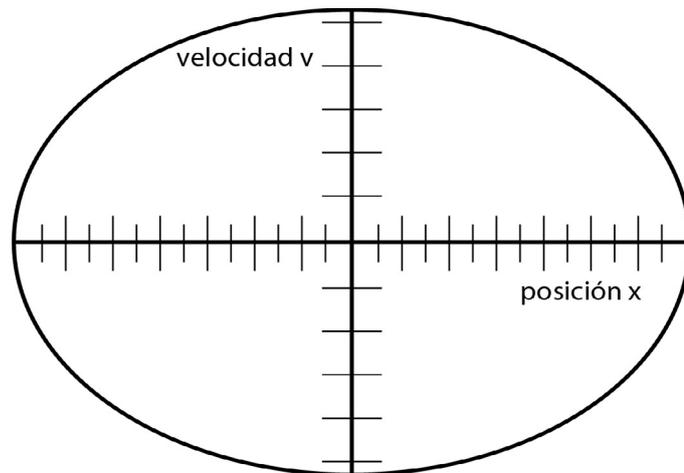
$$\frac{x^2}{\left(\frac{2E_0}{k}\right)} + \frac{v^2}{\left(\frac{2E_0}{m}\right)} = 1$$

Si ahora llamamos $x_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{k}}$ y $v_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{m}}$ queda

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{v^2}{v_0^2} = 1 \quad (5.29)$$

Esta es la ecuación de una elipse cuyos semiejes son x_0 y v_0 :

Figura 5.21. Velocidad en función de la posición para un cuerpo que oscila ligado a un resorte



Problema 4.

Un tren subterráneo con una masa de $5,00 \times 10^5 \text{ kg}$ que viaja a $0,5 \text{ m/s}$ es detenido en la estación terminal por un resorte paratrenes que se comprime una distancia de $0,4 \text{ m}$. Determinar la constante de fuerza k del resorte.

Solución 4.

La energía cinética del tren es

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Al final de la compresión del resorte, toda la energía cinética se ha convertido en energía potencial elástica, $E_p = \frac{1}{2} k (\Delta x)^2$ donde $\Delta x = 0,4 \text{ m}$. Por lo

tanto, la conservación de energía implica que $E_c = E_p$. De aquí sigue que debe cumplirse

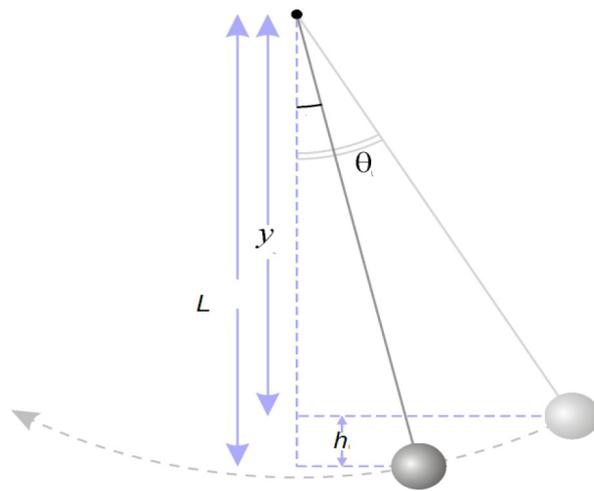
$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} k (\Delta x)^2$$

$$\text{De donde sigue } k = \frac{mv^2}{(\Delta x)^2} = 7,8125 \times 10 \times \frac{N}{m}$$

Otro caso de interés es el de un péndulo construido con una esfera de plomo de masa m que cuelga de un hilo de longitud L . A medida que el péndulo oscila de derecha a izquierda, la altura de la esfera sobre la mesa y también su velocidad van cambiando.

En este caso tomamos como lugar de referencia para la energía potencial el punto más bajo de la trayectoria del péndulo, que corresponde a una altura $h = 0$. Si ahora tomando la esfera entre los dedos, la elevamos manteniendo el hilo tenso, hasta una altura inicial h_0 , la energía potencial ganada por la esfera resulta

$$E_p = mgh_0 \tag{5.30}$$



Fuente: Adaptado de Krishnavedala, 2012.

Si en ese punto soltamos la esfera, esta comenzará su movimiento descendente, atraída por la gravedad, describiendo el movimiento circular indicado por la trayectoria punteada. En este movimiento de caída, la energía potencial inicial de la esfera va disminuyendo y convirtiéndose en energía cinética. El principio de conservación de la energía implica que la cantidad $E_c + E_p$ debe tener siempre el mismo valor, es decir

$$(E_c + E_p)_{\text{tiempot}=0} = (E_c + E_p)_{\text{tiempot}} \quad (5.31)$$

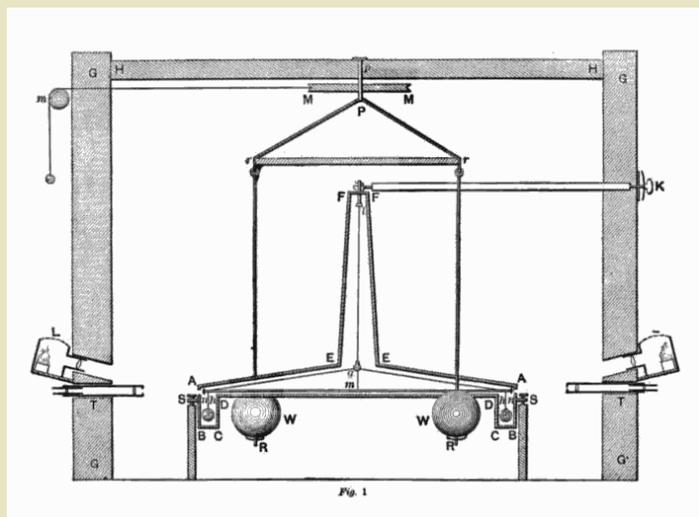
Como liberamos la esfera con velocidad nula desde una altura h_0 , tenemos una relación entre la energía potencial inicial y la energía total al tiempo t

Constante de gravitación universal

Fue medida por primera vez en un laboratorio por Cavendish en 1797, con el aparato que se muestra en la figura, obteniendo el primer resultado confiable para G :

La balanza de Cavendish consistía en una vara de madera de $1,8\text{ m}$ suspendida de un hilo de cuarzo, con esferas de plomo de 51 mm de diámetro ($\text{masa} = 0,73\text{ kg}$) en cada extremo; dos esferas de plomo de 300 mm (158 kg) estaban fijas a 230 mm de las esferas pequeñas. El sistema permitía medir la débil atracción gravitatoria entre las esferas pequeñas y las grandes. Cuando la barra con las esferas pequeñas oscila, se mide el ángulo de rotación, utilizando un método de amplificación llamado palanca óptica. Un espejo fijo al centro de la barra permite que un haz de luz se refleje y que un punto luminoso se mueva sobre la pared. Conociendo las distancias L (pared al hilo de cuarzo) y S (entre dos puntos de luz) es posible medir el ángulo β . En el diagrama se explican las relaciones entre β , S y L . Se muestra la fuente de luz y el conjunto de las pequeñas esferas-barra-espejo en dos posiciones para reflejar la luz y producir dos rayos. El ángulo α está exagerado para mayor claridad.

Experimento de Cavendish



Fuente: Cavendish, H., 1798.

$$mgh_0 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.32)$$

Esta relación muestra que la velocidad vale en general

$$v = \sqrt{2g(h_0 - h)} \quad (5.32 \text{ bis})$$

cuando la masa alcanza el punto más bajo $h = 0$, su velocidad es máxima y vale

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{2gh_0} \quad (5.33)$$

Hasta aquí el análisis no difiere del caso de la caída libre; la diferencia es que la masa del péndulo está ligada con la cuerda de longitud L a un punto fijo de modo que, si bien el movimiento ocurre en el plano, podemos describirlo en términos solo del ángulo θ , es decir, de una sola variable.

Para ello notamos que la altura h se puede escribir

$$h = L(1 - \cos\theta).$$

La energía potencial es entonces

$$E_p = mgL(1 - \cos\theta) \quad (5.34)$$

Usando la relación para la velocidad obtenemos para la energía cinética

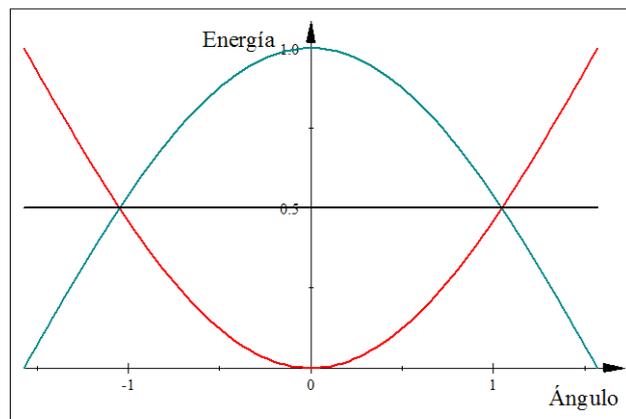
$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = mgh_0 - mgL(1 - \cos\theta) \quad (5.35)$$

Se puede ver que la suma de ambas formas de energía es constante y vale

$$E_p + E_c = mgh_0$$

es decir, la energía mecánica total es igual a la energía potencial inicial, pues la masa parte del reposo. La figura 5.23 muestra esta propiedad.

Figura 5.23. Energía del péndulo: potencial (curva roja), cinética (curva azul); la línea negra representa la energía total, que es constante



En este análisis, como en los casos anteriores, no hicimos uso de la variable temporal, pues el principio de conservación de la energía no lo requiere.

5.14. Ley de gravitación universal

En apartados anteriores hemos tratado un caso particular de la energía potencial gravitatoria cuando estudiamos el fenómeno en puntos cercanos a la superficie terrestre. Veremos ahora el caso general, que corresponde a la ley de gravitación universal de Newton, una ley muy importante de la física clásica que, como veremos en el capítulo 7, ha sido revalorizada en la física de las partículas fundamentales.

La gravitación es una de las cuatro interacciones fundamentales conocidas, cada una de ellas se debe a una propiedad de la materia:

Interacción	se debe a
gravitatoria	masa
electromagnética	carga eléctrica
fuerte	carga nuclear de color
débil	carga nuclear débil

La fuerza gravitatoria se dirige a lo largo de la línea que une ambas masas y su módulo es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Fue formulada por Newton en 1686 en sus *Principia*, lo que le permitió aplicar las leyes de la mecánica por él creadas y así presentar la primera formulación sobre la gravedad en la Tierra, la órbita de la Luna alrededor de la Tierra y la forma en que los planetas se mueven alrededor del Sol. La teoría de la gravitación explica, con gran precisión, estos y otros fenómenos como las mareas en la Tierra y las perturbaciones de un planeta por la presencia de los otros.

La ley de gravitación establece que toda masa puntual m_1 atrae a otra masa puntual m_2 con una fuerza dirigida según la línea que las une. Es proporcional al producto de las dos masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas:

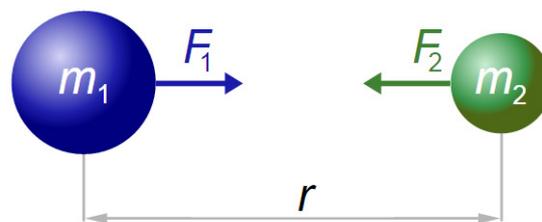
$$F_1 = F_2 = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (5.36)$$

Aquí G es la constante de gravitación universal,

$$G = 6,6742 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$$

Esta relación vale para los módulos de las fuerzas. Su dirección debe mostrar que es una fuerza atractiva como lo muestra la figura (5.24)

Figura 5.24. Las fuerzas que actúan sobre las dos masas son iguales y opuestas y siempre tienen la dirección y el sentido hacia la otra masa puntual



Fuente: Svjo, 2016.

La ley de Newton describe una fuerza que es siempre atractiva, contrariamente a la ley de Coulomb entre cargas eléctricas, que describe fuerzas atractivas o repulsivas según el signo de las cargas. La relación (5.36) puede ser escrita vectorialmente como

$$F_2 = -F_1 = \frac{-Gm_1m_2}{r^2} \rho \quad (5.37)$$

donde ρ es un vector de módulo unidad que apunta desde m_1 a m_2 y vale

$$\rho = \frac{r}{|r|}$$

El signo negativo en la ecuación 5.37 indica que la fuerza está dirigida en sentido contrario a ρ , es decir que es atractiva. Esta relación es de validez general, y por lo tanto también se aplica al caso de la interacción entre la Tierra, de masa M y un objeto cualquiera de masa m .

Si suponemos que la masa m se encuentra sobre la superficie de la Tierra o muy próxima a ella, sabemos que la distancia r es aproximadamente el radio de la Tierra, R_T . En ese caso la fuerza F de la ecuación anterior coincide con el peso del cuerpo, que expresamos comúnmente como mg y que apunta hacia el centro de la Tierra –para nosotros esa es la dirección *hacia abajo*. Por tanto, comparando con (5.9) podemos identificar la aceleración de la gravedad g con

$$g = \frac{GM}{R_T^2} \quad (5.38)$$

Si reemplazamos aquí los valores de $M = 5,9736 \times 10^{24} \text{ kg}$, $R_T = 6364 \text{ km} = 6364 \times 10^3 \text{ m}$ y $G = 6.6742 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ obtenemos $g = 9,84 \text{ ms}^{-2}$, el valor conocido.

Para calcular la energía potencial gravitatoria de un cuerpo de masa m en presencia del campo gravitatorio de la Tierra, imaginamos que queremos levantarlo hasta una altura tal que el campo gravitatorio se vuelva notablemente más pequeño que en la superficie. Para elevar la masa m una distancia Δr debemos usar una fuerza F del mismo valor que la fuerza gravitatoria pero de sentido contrario, es decir que apunte en el sentido de r creciente; el trabajo positivo necesario es $F \cdot \Delta r$ de modo que el incremento en energía potencial vale

$$\Delta E_p = \frac{GMm}{r^2} \Delta r \quad (5.39)$$

Para encontrar el trabajo total necesario para elevar la masa m desde la superficie de la Tierra –a distancia R_T del centro de la Tierra– hasta un punto a distancia r debemos computar la suma

$$\Delta E_p = E_p(r) - E_p(R_T) = GmM \cdot \text{Suma} \Big|_{R_T}^r \frac{\Delta r}{r^2} = GmM \cdot \int_{R_T}^r \frac{dr}{r^2} = GmM \left(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{r} \right) \quad (5.40)$$

Para verificar este resultado consideramos un punto a la altura h sobre la Tierra, tal que la distancia al centro de la Tierra es $r = R_T + h$; si suponemos ahora que $h \ll R_T$ tenemos

$$\Delta E_p = E_p(r) - E_p(R_T) = GmM \left(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{r} \right) = GmM \left(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right) \quad (5.41)$$

o sea

$$\Delta E_p = GMm \left(\frac{h}{R_T (R_T + h)} \right) \cong m \left(\frac{GM}{R_T^2} \right) h = mgh \quad (5.42)$$

donde $g = \frac{GM}{R_T^2}$. La única aproximación realizada aquí es el reemplazo de

$R_T + h$ por R_T en el denominador de (5.42) lo cual, para una altura de 10.000 m , a la que vuela un avión de pasajeros, introduce un error relativo del orden de $\frac{h}{R_T} \cong 10^{-2}$.

La relación (5.42) permite evaluar la variación en la energía potencial si movemos la masa m desde un punto inicial arbitrario A ubicado en r_A hasta un punto genérico P ubicado en r . Resulta

$$\Delta E_p = E_p(r) - E_p(r_A) = GmM \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r} \right) \quad (5.43)$$

Vimos que lo que importa son las diferencias de energía potencial y, como en la formulación original de Newton, la fuerza gravitatoria se anula para distancias grandes, podemos tomar como nula la energía potencial en $r = \infty$

$$E_p(r_A = \infty) = 0$$

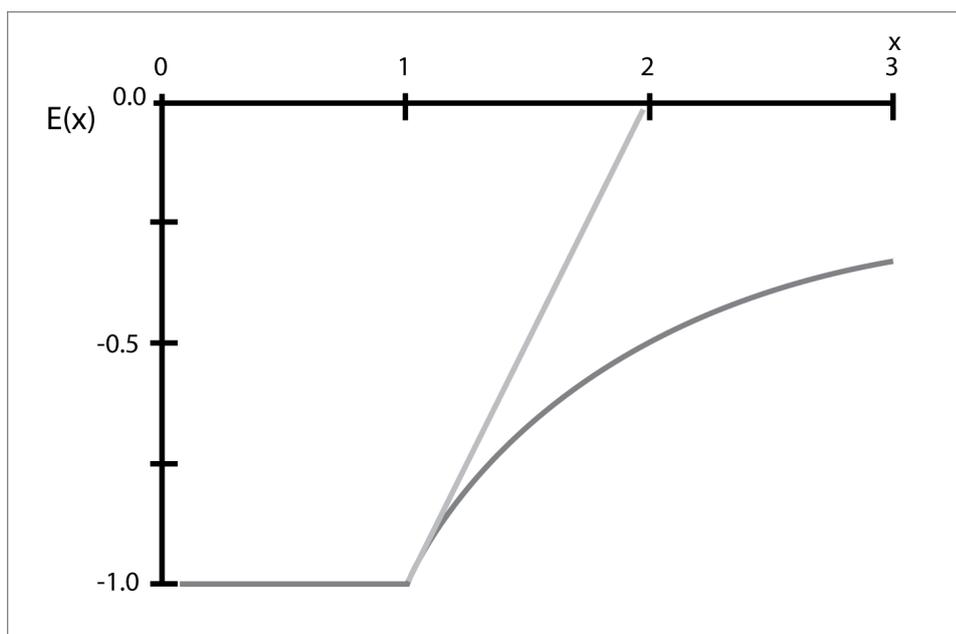
Con esta convención se obtiene para la energía potencial en un punto a distancia r del centro de la Tierra

$$E_p(r) = \frac{-GmM}{r} \quad (5.44)$$

La figura 5.25 muestra un gráfico de la energía potencial en el que las abscisas se miden en unidades del radio de la Tierra, r / R_T y las ordenadas están en unidades de $\frac{GMm}{R_T}$. El valor 1 en las abscisas corresponde a la superficie de la Tierra ($r = 1$).

La recta tangente (gris) corresponde a la aproximación mgh , muy buena para distancias cercanas a la superficie de la Tierra. La escala horizontal está en unidades del radio terrestre; la escala vertical en unidades de GMm / R_T .

Figura 5.25. Potencial gravitatorio exacto de la Tierra (negro) y aproximación lineal (gris)



5.15. Velocidad de escape

La velocidad de escape es la velocidad mínima necesaria para que un objeto escape de la influencia gravitacional de un cuerpo masivo.

La velocidad de escape desde la Tierra es de aproximadamente 11.186 km/s (6.951 mi/s ; 40.270 km/h) en la superficie.

Dicho de otra manera, la velocidad de escape es la velocidad a la que la suma de la energía cinética de un objeto y su energía potencial gravitatoria es igual a cero; [1]; un objeto que ha alcanzado la velocidad de escape no está ni en la superficie, ni en una órbita cerrada. Con la velocidad de escape que se dirige alejándose de la superficie de un cuerpo masivo, el objeto se alejará del cuerpo, ralentizándose para siempre y alejándose, pero sin alcanzar nunca la velocidad cero.

Una vez alcanzada la velocidad de escape, no es necesario aplicar ningún impulso adicional para que continúe el escape. En otras palabras, si se le da una velocidad de escape, el objeto se alejará del otro cuerpo, moviéndose cada vez más lentamente, y se acercará asintóticamente a la velocidad cero a medida que la distancia del objeto se acerca al infinito, para nunca regresar. Si la velocidad es más alta que la velocidad de escape, el móvil tendrá una velocidad positiva en el infinito. Cuando se habla de la velocidad mínima de escape se supone que no hay fricción con la atmósfera. La velocidad de escape para un cuerpo masivo esféricamente simétrico, como una estrella o planeta, a una distancia determinada, se calcula mediante la fórmula

$$v_{esc} = \sqrt{2gR}$$

La energía mecánica total de la Tierra en su órbita alrededor del Sol es:

$$E_{mec} = E_{cin} + E_p = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GmM}{r} \quad (5.45)$$

Si evaluamos el valor numérico de esta expresión para este caso obtenemos

$$E_{cin} = 2,656 \times 10^{33} \text{ J} \text{ y } E_{pot} = -5,306 \times 10^{33} \text{ J}$$

y por lo tanto

$$E_{mec} = -2,65 \times 10^{33} J.$$

Que la energía mecánica sea negativa asegura la estabilidad del sistema. Si quisiéramos liberar a la Tierra de su ligazón con el Sol, deberíamos entregarle una energía positiva de igual magnitud que la energía mecánica negativa que la mantiene ligada. Cuando veamos el modelo atómico de Bohr (sección 8.3) obtendremos una relación similar a la estudiada aquí, pero debida a la atracción electrostática entre protón y electrón. La energía de ligadura es en ese caso de $13,6 eV$, cantidad que es necesaria entregar al átomo para ionizarlo.

En el caso de atracción gravitatoria, se dice que un cuerpo, por ejemplo un satélite artificial, alcanzó la *velocidad de escape* cuando su energía cinética es suficiente para compensar la energía potencial gravitatoria negativa, tomando la superficie del planeta como punto de partida. En esa definición no se considera el rozamiento con la atmósfera, como tampoco la contribución de la velocidad de rotación del planeta, ni las contribuciones de otros cuerpos celestes, al potencial gravitatorio. Para un cuerpo celeste con simetría esférica, la velocidad de escape depende solo de su masa y del radio de partida.

La figura 5.25 muestra el potencial gravitatorio de un planeta como función de la distancia al centro. La energía potencial de una masa m ubicada sobre la superficie está dada por la expresión $E_p(R)$ de la ecuación (5.45). Si quisiéramos alejar la masa m hasta el infinito y liberarla de la fuerza de atracción terrestre, deberíamos dotarla de una energía cinética inicial igual a $E_p(R)$. Esto significa que la velocidad de escape v_{esc} debe satisfacer la relación

$$\frac{1}{2}mv_{esc}^2 - \frac{GmM}{R_T} = 0$$

de donde deducimos

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2gR}$$

Para la Tierra tenemos $M = 5,976 \times 10^{24} kg$, $R = 6378 km$ (el radio ecuatorial); la constante de gravitación universal es $G = 6,67 \times 10^{-11} Nm^2 / kg^2$. Con estos valores resulta para la velocidad de escape

$$v_{esc} = 11.186 m / s = 40.270 km / h$$

Un cuerpo que tenga la velocidad de escape, dirigida perpendicularmente a la superficie de un planeta de masa M , se moverá en forma radial alejándose del cuerpo celeste, disminuyendo su velocidad a medida que se aleja y acercándose a velocidad cero pero sin alcanzarla nunca. Es decir, si tiene la velocidad de escape, el objeto se alejará continuamente del planeta.

PREGUNTAS

● **PREGUNTA 5.1.**

Proponga dos ejemplos de la *energía como concepto unificador*.

● **PREGUNTA 5.2.**

¿Qué entiende usted por la frase *energía como moneda de cambio*?

● **PREGUNTA 5.3.**

En una central eléctrica se quema carbón con el fin de producir vapor de agua que incide sobre los álabes de una turbina y pone en marcha un generador eléctrico. Una compañía de agua potable utiliza esta energía para poner en marcha un motor eléctrico que eleva el agua de un pozo a un depósito situado en lo alto de una colina. Enumere ordenadamente los cambios de energía que tienen lugar.

● **PREGUNTA 5.4.**

Galileo utilizaba superficies de madera o de mármol bien pulidas para hacer sus investigaciones sobre el movimiento de los cuerpos, ¿por qué?

● **PREGUNTA 5.5.**

La energía que necesitamos para vivir proviene de la energía potencial, almacenada químicamente, de los alimentos. Cuando estos se metabolizan se convierte en otras formas de energía. Una persona cuya producción de trabajo es menor que la energía consumida está expuesta a:

- a. engordar ()
- b. adelgazar ()
- c. a consumir más ()

● **PREGUNTA 5.6.**

Explique por qué la energía cinética es siempre positiva y la potencial puede ser positiva o negativa.

● **PREGUNTA 5.7.**

Una manzana cuelga de una rama a cierta altura por lo que tiene energía potencial; al caer, en el instante de chocar contra el suelo lo más probable es que su energía:

- a. se transforme en calor ()
- b. se transforme en energía cinética ()
- c. desaparezca ()

Cuando ya está en el suelo lo más probable es que su energía:

- a. se transforme en calor ()
- b. desarrolle trabajo ()
- c. desarrolle trabajo y se transforme en calor ()

● **PREGUNTA 5.8.**

Comparar las energías cinéticas de dos objetos A y B, idénticos en todo, excepto en un aspecto:

- a. A tiene doble velocidad que B.
- b. A se mueve hacia el norte y B hacia el sur.
- c. A se mueve en un círculo y B en línea recta.
- d. A es una piedra que cae libremente y B es una piedra que asciende verticalmente con igual rapidez.

- e. A está formado por dos piezas unidas por una cuerda liviana, cada una de las cuales posee una masa igual a la de B.

● **PREGUNTA 5. 9.**

Luis y Carlos discuten sobre el diseño de una montaña rusa. Luis dice que cada joroba debe ser de menor altura que la anterior, Carlos manifiesta que aquello es una tontería porque mientras la primera sea de mayor altura no hay ningún problema. ¿Quién tiene razón?

● **PREGUNTA 5. 10.**

Estimar la energía cinética de una persona que se desplaza en bicicleta por un camino plano.

PROBLEMAS

● **PROBLEMA 5. 1. AGUA**

Una central hidroeléctrica convierte la energía potencial gravitatoria del agua contenida en la represa, en energía eléctrica.

- ¿Cuál es la energía potencial gravitatoria respecto a los generadores si el volumen de agua es $50,0 \text{ km}^3$ (masa = $5,00 \times 10^{13} \text{ kg}$), y el embalse tiene una altura media de $40,0 \text{ m}$ por encima de los generadores?
- Compare esto con la energía almacenada en la represa si esta se llenara con nafta.

● **PROBLEMA 5. 2. RESORTE**

Un zanco para saltar tiene un resorte con una constante $k = 2,50 \times 10^4 \text{ N} / \text{m}$, que puede comprimirse 12 cm . ¿Hasta qué altura máxima puede saltar un niño sobre el zanco utilizando solo la energía en el resorte, si el niño y el zanco tienen una masa total de $40,0 \text{ kg}$?

● **PROBLEMA 5. 3. ALIMENTOS**

La energía proveniente de los alimentos, que no utilizamos para realizar trabajo, se convierte en energía química de la grasa corporal, que contiene aproximadamente $39 \text{ kJ} / \text{gr}$. ¿Cuántos gramos de grasa acumularíamos en un día si ingiriéramos 10.000 kJ (2.500 kcal) y no hiciéramos nada más que sentarnos relajados por 16 h y durmiéramos otras 8 h ? Nota: Averiguar cuáles son las tasas de consumo de energía para esas actividades.

● **PROBLEMA 5. 4. RENDIMIENTO**

Suponiendo que los músculos tienen un rendimiento de 22% para convertir energía en trabajo, ¿cuánta energía consume una persona de 80 kg al trepar una altura de 15 m ?

● **PROBLEMA 5. 5. FRENADA**

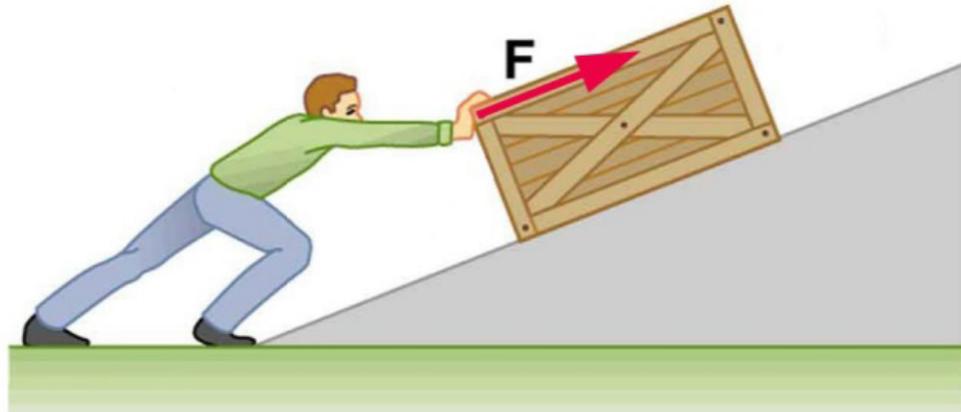
¿Qué fuerza debe aplicarse para detener en una distancia de 120 m , un auto de 950 kg que viaja a $90 \text{ km} / \text{h}$? La distancia dada es típica para una frenada prudente a esa velocidad.

● **PROBLEMA 5. 6. EMPUJÓN**

Calcular el trabajo que realiza un hombre de 85 kg que empuja una caja una distancia de 4 m a lo largo de una rampa que forma un ángulo de 20° con la horizontal. El hombre ejerce, sobre la caja, una fuerza paralela a la rampa de 500 N y esta se

mueve a una velocidad constante. Incluya en sus cálculos, el trabajo realizado sobre la caja y sobre el cuerpo del hombre, figura 5. 26.

Figura 5. 26. Hombre empuja una caja por la rampa



Fuente: OpenStax, 2012.

● **PROBLEMA 5. 7. PELOTA**

Una pelota se lanza verticalmente al aire con una velocidad inicial v_0 . Si el aire ejerce una fuerza de rozamiento constante F_r sobre la pelota, demostrar que la altura alcanzada es $h = \frac{v_0^2}{2(g + F_r / m)}$ y que la velocidad v_F con que llega al suelo es

$$h = \frac{v_0^2}{2(g + F_r / m)}$$

$$v_F = v_0 \sqrt{\frac{mg - F_r}{mg + F_r}}$$

Solución

Tramo de subida

Energía cinética inicial abajo

$$E_{cinini} = \frac{1}{2}mv_0^2$$

Energía potencial final arriba

$$E_{potarr} = mgh$$

Balance

$$E_{cinini} = E_{potarr} + W$$

Donde $W = F_r h$ es el trabajo que el sistema debe realizar contra la fuerza de rozamiento F_r ; luego se cumple

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh + F_r h$$

La solución de esta ecuación

$$h = \frac{1}{2}mv_0^2 \frac{1}{F_r + gm}$$

Tramo de bajada

Energía potencial inicial

$$E_{potarr} = mgh = mg \frac{1}{2} mv_0^2 \frac{1}{F_r + gm}$$

Energía cinética final $E_{cinfin} = \frac{1}{2} mv_F^2$

Balance

$$E_{potarr} = E_{cinfin} + W_{bajada}$$

De donde sigue

$$mgh = \frac{1}{2} mv_F^2 + F_r h$$

Y por lo tanto

$$mg \frac{1}{2} mv_0^2 \frac{1}{F_r + gm} = \frac{1}{2} mv_F^2 + F_r \frac{1}{2} mv_0^2 \frac{1}{F_r + gm}$$

De donde finalmente sigue

$$v_F = v_0 \sqrt{\frac{mg - F_r}{mg + F_r}}$$

Como el factor dentro de la raíz cuadrada es menor que 1, vemos que

$$v_F < v_0$$

como consecuencia de que se ha disipado energía a causa de la fuerza de roce.

● PROBLEMA 5. 8. VACACIONES

Al inicio de sus vacaciones, una familia viaja en un auto estándar para cinco pasajeros y el conductor tiene cuidado de no sobrepasar la velocidad máxima permitida en ruta. Cuando debe realizar una parada sabe que a esa velocidad la distancia típica de frenado es de 120 m .

- Calcule la fuerza necesaria para detener el auto.
- Un segundo conductor imprudente viaja por la misma ruta con un auto similar al anterior, pero al doble de velocidad y debe frenar repentinamente para lo cual la fuerza aplicada al auto es la misma que en el caso anterior. ¿Qué distancia necesitará este conductor para detener totalmente su auto?

● PROBLEMA 5. 9. GRAVITACIÓN UNIVERSAL

Puede mostrarse que la energía potencial gravitatoria de dos cuerpos de masas m y M separados por una distancia r está dada por:

$$E_p(r) = \frac{-GmM}{r}$$

donde se ha elegido la energía potencial gravitatoria igual a cero a distancia infinita. Por lo tanto, la energía potencial gravitatoria de un cuerpo de masa m sobre la superficie de un planeta de masa M y radio R es:

$$E_p(R) = \frac{-GmM}{R}$$

- a. Verifique que al elevar ese cuerpo a una altura h sobre la superficie del planeta, la variación de la energía potencial gravitatoria es:

$$\Delta E_p = E_p(r) - E_p(r_A) = GmM \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h} \right)$$

- b. Calcule la energía potencial para un astronauta ($m = 70 \text{ kg}$) en órbita alrededor de la Tierra a una altura $h = 350 \text{ km}$. Compare ese valor con el obtenido de la expresión aproximada $E_g = mgh$.

● **PROBLEMA 5.10. CERRO CATEDRAL**

Se prepara una pista en el cerro Catedral con una altura inicial $h_i = 2400 \text{ m s.n.m.}$ y altura final, en la base, $h_f = 1030 \text{ m s.n.m.}$. Un esquiador se propone superar el récord mundial, actualmente de $251,4 \text{ km/h}$. Usando argumentos de conservación de la energía y despreciando todo efecto de rozamiento, diga si esto es posible y calcule cuál es la velocidad máxima que podrá alcanzarse. ¿Depende de la masa del esquiador? Justifique.

● **PROBLEMA 5.11. UN NENE**

Un nene que vive en el último piso del Bariloche Center ($h = 30 \text{ m}$) se propone jugar al fútbol en el parque que se encuentra abajo. Al llegar a la planta baja se da cuenta de que no llevó la pelota ($m = 0,4 \text{ kg}$). Llama por celular a su padre pidiendo ayuda y este le arroja la pelota por la ventana. Determine:

- La variación de la energía potencial de la pelota cuando cae del último piso hasta la base del edificio.
- La variación de la energía cinética y la velocidad de la pelota cuando está en el piso.

● **PROBLEMA 5.12. DINOSAURIOS**

La extinción de los dinosaurios al final del período Jurásico es atribuida al impacto sobre la Tierra de un cometa o meteorito de grandes dimensiones. Imagine que un cometa esférico de radio $r = 5 \text{ km}$ y densidad media $d = 500 \text{ kg/m}^3$ se acerca a la Tierra desde el infinito. Entonces,

- Calcule la masa m_v del cometa.
- Calcule la energía cinética y la velocidad al momento del impacto.
- Expresa la energía liberada en el impacto en megatones, teniendo en cuenta que $1 \text{ Mton} = 4,1841015 \text{ J}$.
- Si debido a la interacción con la atmósfera el meteorito se divide en dos partes de masas $m_1 = 0,7 m_c$ y $m_2 = 0,3 m_c$, calcule la energía cinética y la velocidad de cada parte al momento del impacto. ¿Depende el resultado de la altura a la cual el cometa se parte? Justifique.

● **PROBLEMA 5.13. PELOTA VERTICAL**

Una pelota de goma de masa $m = 2 \text{ kg}$ es lanzada hacia arriba en forma vertical, con velocidad inicial $v = 5 \text{ m/s}$.

- Calcule la altura máxima que alcanza la pelota.
- Suponiendo que no hay pérdida de energía debida al rozamiento, calcule la velocidad al momento del impacto en el suelo y la altura alcanzada luego del rebote.
- Suponga que, a diferencia del punto anterior, como consecuencia del rebote, un 20% de la energía mecánica se transforma en calor y sonido. Calcule la altura que alcanza la pelota luego de dos choques contra el piso.

● **PROBLEMA 5.14. PROTECCIÓN**

Imagine que usted debe diseñar el sistema de protección de un ascensor en el Bariloche Center ($h = 30\text{ m}$) con resortes, y que los estos pueden comprimirse un máximo de $0,5\text{ m}$. Sabiendo que la masa del ascensor y su carga es de $m = 160\text{ kg}$:

- Calcule la constante k que debe tener el resorte.
- Si el ascensor tiene un freno de seguridad capaz de transformar el 20% de la energía cinética en calor, calcule la constante del resorte necesaria en este caso.
- Rehaga los cálculos anteriores suponiendo que se dispone de cuatro resortes más pequeños.

● **PROBLEMA 5.15. GRAVEDAD EN LOS PLANETAS**

A partir de la relación que define la aceleración de la gravedad en la superficie de un planeta,

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

- Calcule el valor de g y determine el peso de un cuerpo de masa $m = 70\text{ kg}$ en la Tierra, el Sol, Júpiter y la Luna.
- Calcule a qué altura h sobre la superficie de la Tierra, un cuerpo pesa la mitad que sobre la superficie terrestre.
- ¿Qué pasa si realizamos el mismo cálculo para el planeta Marte?

● **PROBLEMA 5.16. VELOCIDAD DE ESCAPE**

Se define como velocidad de escape aquella velocidad v_{esc} para la cual un cuerpo de masa m puede escapar de la atracción gravitatoria de la superficie de un planeta de masa M .

- Obtenga una expresión para la velocidad de escape, y muestre que la esta es una propiedad inherente al planeta.
- Grafique la dependencia de la velocidad de escape como función: del radio R del planeta y de la masa M del planeta.
- Calcule el valor de la velocidad de escape sobre la superficie de la Tierra, la Luna y el Sol.
- Suponga que fuera posible variar a voluntad el radio terrestre R . Calcule el valor R_c para el cual la velocidad de escape de la Tierra sería igual a la velocidad de la luz c .

● **PROBLEMA 5.17. EL PRINCIPITO**

El Principito ($m = 40\text{ kg}$) vive en un planeta pequeño, el asteroide B612; suponemos que este tuviera un radio $R = 1\text{ km}$ y una densidad igual a la de la Tierra ($d = 550\text{ kgm}^3$). Calcule:

- El valor de g y el peso del Principito en B612.
- Si en la Tierra el Principito logra subir a una silla de $h = 0,5\text{ m}$ de un salto, a qué altura logrará llegar con el mismo salto desde la superficie de B612.
- La velocidad máxima a la cual el Principito puede caminar sin riesgo de abandonar el planeta para siempre.

Lista de referencias bibliográficas

- Colonnese, D., Heron, P., Michelini, M., Santi, L., Stefanel, A. (2012). A vertical pathway for teaching and learning the concept of energy. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 6, 21-50.
- Cromer, A. (1984). *Física para las ciencias de la vida*. Madrid: Editorial Reverté.
- Crowell, B. (2010). *Light and matter*. <http://www.lightandmatter.com>

- Domenech, J. L., Gil-Pérez, D., Grás-Martí, A., Guisasaola, J., Martínez-Torregosa, J., Salinas, J., Trumper, R., Valdés, P., y Vilches, A. (2003). La enseñanza de la energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física.*, 20(3), pp. 285-310. <http://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6527/6024>
- Field, A.R. (2012). *Energy*. Londres: Britannica Educational Publishing.
- Grünfeld, V. (1991). *El caballo esférico: temas de física en biología y medicina*. Buenos Aires: Lugar científico.
- Heron, P. y Michelini M. (2012). Teaching about energy: Which concepts should be taught at which educational level? *The World Conference on Physics Education*, Reims, del 1 al 6 de julio.
- Lehrman, R. L. (1973). Energy Is Not The Ability To Do Work. *The Physics Teacher*, 11(1). <http://dx.doi.org/10.1119/1.2349846>
- Tipler, P.A., Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología*, Volumen 1, Barcelona: Editorial Reverté.

Otras fuentes

- Fowler, Michael. Working with Gravity: Potential Energy. <http://galileo.phys.virginia.edu/classes/152.mf1i.spring02/GravPotEnergy.htm>
- The Physics Classroom. <http://www.physicsclassroom.com/class/energy/>
- William Moebis, Samuel J. Ling, Jeff Sanny. (2016). University Physics Volume 1. OpenStax. <https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/1-introduction>

Lista de figuras

- Cavendish, Henry. (1798). Cavendish experiment [Diagrama]. Experiments to determine the Density of the Earth, en McKenzie, A.S., *Scientific Memoirs Vol. 9: The Laws of Gravitation*, American Book Co. 1900, p.62. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavendish_Experiment.png
- De Mooij, Gerard. (2016). Esquiadores en Austria [Fotografía]. <https://pixabay.com/images/id-1201084/>
- Hidroeléctrica Futaleufú. (s.f). Salida del agua en una central hidráulica [Fotografía]. www.chfutaleufu.com.ar
- Jeens, C. H. (1882). James Joule [Grabado]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joule_James_Jeens_engraving.jpg. Dominio público
- Marcoux, Ignacio. (2010). Trabajo [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trabajo.png>, CC BY-SA 4.0.
- Mayes, Penny. (2009). Archery demonstration at Tŷ Mawr [Fotografía]. <https://www.geograph.org.uk/photo/1571699>, CC-BY-SA 2.0.
- Nguyen, Marie-Lan. (2013a). Théo Mancheron competes in the men's decathlon pole vault final during the French Athletics Championships 2013 at Stade Charléty in Paris, 13 July 2013 [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Men_decathlon_PV_French_Athletics_Championships_2013_t141910a.jpg, CC-BY 3.0
- Nguyen, Marie-Lan. (2013b). Théo Mancheron competes in the men's decathlon pole vault final during the French Athletics Championships 2013 at Stade Charléty in Paris, 13 July 2013 [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Men_decathlon_PV_French_Athletics_Championships_2013_t141910b.jpg
- Nguyen, Marie-Lan. (2013b). Théo Mancheron competes in the men's decathlon pole vault final during the French Athletics Championships 2013 at Stade Charléty in Paris, 13 July 2013 [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Men_decathlon_PV_French_Athletics_Championships_2013_t141910c.jpg
- Nguyen, Marie-Lan. (2013d). Théo Mancheron competes in the men's decathlon pole vault final during the French Athletics Championships 2013 at Stade Charléty in Paris, 13 July 2013 [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Men_decathlon_PV_French_Athletics_Championships_2013_t141911a.jpg
- Nguyen, Marie-Lan. (2013e). Théo Mancheron competes in the men's decathlon pole vault final during the French Athletics Championships 2013 at Stade Charléty in Paris, 13 July 2013 [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Men_decathlon_PV_French_Athletics_Championships_2013_t141911b.jpg
- OpenStax College. (2018, 6 de agosto). Figure 5: A graph of applied force versus distance [Gráfico]. Hooke's Law: Stress and Strain. <https://legacy.cnx.org/content/m42240/1.9/>
- OpenStax. (2012). A man pushes a crate up a ramp [Gráfico]. College Physics. <https://openstax.org/books/college-physics/pages/7-problems-exercises>

OpenStax. (2016, 4 de agosto). Esquiadora enfrenta una ladera [Diagrama]. <https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/8-problems>

Usuario:Studi111. (2008). Schiefe ebene 4 [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schiefe_ebene_4.png. Dominio público.

Thoma, Martin. (2014a). Force-distance diagramm [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Force-distance-diagram-constant.svg>. Dominio público.

Thoma, Martin. (2014b). Force-distance-diagram [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Force-distance-diagram.svg>. Dominio público.

Usuario: BrandonR. (2005). Wooden roller coaster txgi. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wooden_roller_coaster_txgi.jpg, CC BY-SA 3.0.

Usuario: Vonmangle~commonswiki. (2005). Replica catapult at Château des Baux, France [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Replica_catapult.jpg, CC BY-SA 3.0.

Usuario:Krishnavedala. (2012). Simple pendulum height [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simple_pendulum_height.svg. Dominio público.

Usuario:Pakeha. (2006). Funicular in Fribourg, Switzerland [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fribourg_funicular.jpg, CC BY-SA 3.0

Usuario:Quistnix. (2006). Trebuchet at Château des Baux, France (reconstruction) [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trebuchet.jpg>, CC BY-SA 3.0

Usuario:Svjo. (2003a). Hookes law [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hookes-law-springs.png>, CC BY-SA 3.0

Usuario:Svjo. (2003b). Hookes law as an approximation [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HookesLawForSpring-English.png>, CC BY-SA 3.0

Usuario:Svjo. (2016). Newtons Law Gravitation [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NewtonsLawGravitation.png>, CC BY-SA 4.0

LAS FUERZAS Y EL MOVIMIENTO

(EL SEÑOR NEWTON)

*He podido ver tan lejos porque estaba parado
sobre los hombros de gigantes*
Isaac Newton

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan las leyes de Newton y se retoman los conceptos básicos de energía cinética, energía potencial y trabajo, introducidos en el capítulo anterior, a fin de ponerlos en un marco más general. La experiencia nos indica que se pueden manejar estos conceptos, así como las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento, sin haber profundizado demasiado en las definiciones de la cinemática. Compartimos las ideas de Paul Hewitt (2010):

La cinemática carece de leyes, solo tiene definiciones, principalmente para rapidez, velocidad y aceleración, que son quizás los conceptos menos excitantes que ofrecerá este curso. Con frecuencia, la cinemática se convierte en el «agujero negro» de la enseñanza, pues se le dedica mucho tiempo y a cambio ofrece poca física.

Daremos una visión de la dinámica, aquella parte de la física que estudia el movimiento de los cuerpos y su relación con las fuerzas que lo producen. La palabra dinámica deriva del griego δυναμικός (*dynamikos*) que significa ‘poderoso’ y proviene de δύναμις (*dynamis*), que significa ‘poder’.



**ISAAC
NEWTON**

Fuente: Anónimo, ca. 1900.

Físico inglés, autor de los *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, donde describió la ley de la gravitación universal y estableció las bases de la mecánica clásica a través de las leyes que llevan su nombre. Cultivó además la filosofía, la teología y la matemática. Hizo importantes aportes a la óptica y a las teorías sobre la naturaleza de la luz. Compitió con Leibniz en el desarrollo del análisis matemático. Otros de sus aportes a la matemática incluyen el desarrollo del binomio de grado n y el cálculo de las raíces de una función. Desarrolló una ley que describe la tasa de enfriamiento de objetos expuestos al aire; estudió la velocidad del sonido en el aire e hizo una propuesta sobre el origen de las estrellas. Fue también un pionero en la mecánica de los fluidos, estableciendo una ley sobre la viscosidad. Los fluidos como el ketchup y la sangre, cuya viscosidad depende de la velocidad, se conocen como fluidos no newtonianos.

Nuestro objetivo no es presentar un panorama completo de la dinámica, sino principalmente, mostrar el fundamento de las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. Un dominio conceptual de estas leyes permite resolver una variedad de problemas, muchos de ellos de importancia en las aplicaciones, a partir del uso de herramientas matemáticas simples. Ejemplos de esto pueden verse en los ejercicios planteados al final de este capítulo.

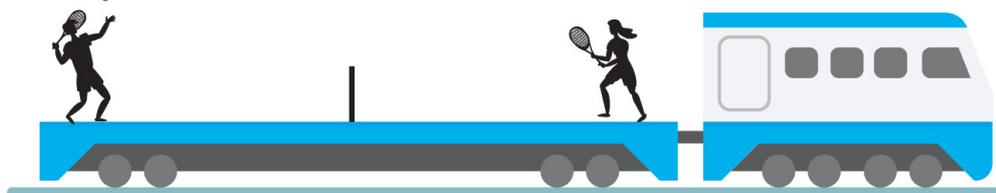
6. 2. Sistemas de referencia

Los sistemas de referencia son fundamentales para avanzar en los conceptos que abordaremos en este capítulo. Cuando viajamos sentados en un tren, si miramos hacia afuera, podemos verificar que nos estamos moviendo respecto a los objetos fuera del tren, pero si las ventanillas estuvieran cubiertas con cortinas opacas (y si las vías estuvieran en buen estado) no existe ninguna manera física de detectar, desde el interior del tren, que este se mueve. Podemos decir que las personas que están en la estación tienen un sistema de referencia y los que van en el tren tienen otro.

Un *sistema de referencia* es un conjunto de convenciones utilizadas por un observador para medir la posición y otras variables asociadas al movimiento de los objetos o sistemas físicos. Como resultado de esas mediciones el observador puede determinar la velocidad y la trayectoria de dichos objetos. Si bien los valores numéricos de esas magnitudes pueden ser diferentes de un sistema a otro, siempre habrá relaciones que permitan vincular las variables obtenidas por un observador con aquellas obtenidas por otros observadores.

La figura 6.1 muestra un partido de tenis jugado sobre un tren que corre a velocidad constante. Las leyes de la física, válidas tanto en el sistema de referencia del andén como en el sistema de referencia del tren, no permiten que se detecte el movimiento.

Figura 6. 1. Partido de tenis en un tren

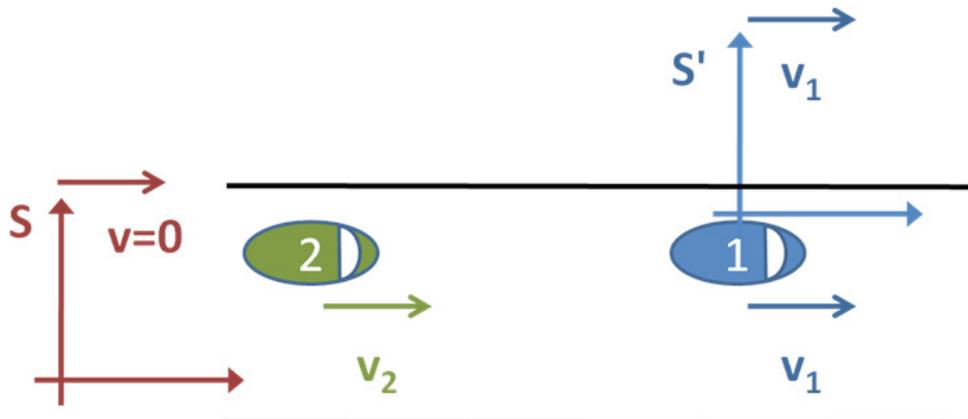


Normalmente, cada sistema de referencia tiene asociado un sistema de coordenadas que permite determinar la posición y la velocidad de los objetos o sistemas físicos que quieren estudiarse.

Una clase particularmente importante de sistemas de referencia son los llamados *sistemas inerciales*. Un sistema de referencia inercial es un sistema en el que es válida *la ley de inercia* (primera ley de Newton). Es decir, es un sistema tal que en el mismo, todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo mientras no sea obligado a cambiar su estado por la acción de fuerzas.

La figura 6. 2 muestra tres sistemas de referencia inerciales: el sistema rojo, fijo a la carretera, es un sistema inercial inmóvil (respecto al laboratorio). El vehículo verde y el vehículo azul moviéndose a velocidades constantes diferentes, respecto a la carretera, constituyen dos sistemas de referencia inerciales adicionales.

Figura 6. 2. Un sistema inercial fijo al laboratorio (rojo) y dos sistemas (verde y azul) moviéndose respecto al primero forman un conjunto de tres sistemas inerciales



Fuente: Brews ohare, 2008.

Por otra parte, los sistemas *no inerciales* son aquellos que se encuentran acelerados, como una calesita que gira o un automóvil en el momento en que arranca o que toma una curva; en esos sistemas percibimos la acción de fuerzas ficticias o aparentes. Cuando el auto en que viajamos se pone en marcha y se acelera, experimentamos una acción que normalmente asignamos a una fuerza que en realidad no existe, nuestro cuerpo y los objetos en el interior del auto se mueven obedeciendo la ley de inercia.

Si bien sabemos que la Tierra gira alrededor de su eje y se traslada alrededor del Sol, esta es comúnmente usada como un sistema de referencia inercial para movimientos en distancias pequeñas comparadas con su radio y con velocidades bajas comparadas con la velocidad de rotación sobre su eje o de traslación en su órbita.

Actividad 6. 1.

Determinar la velocidad tangencial de rotación de la Tierra alrededor de su eje y la velocidad de traslación en su órbita.

6. 3. Las leyes de Newton

La dinámica se describe mediante las leyes de Newton, que fueron resumidas en su obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publicada en 1686. Son el fruto de largos años de estudio del movimiento y las causas que lo provocan, por pensadores que comienzan con Aristóteles y culminan con Galileo, Leibniz y el propio Newton (Hawking, 2004). Einstein las extendió para compatibilizarlas con la teoría de la relatividad y así incluir movimientos con velocidades cercanas a las de la luz.

En las secciones siguientes introduciremos esas leyes y trataremos de clarificar los conceptos de inercia, masa, fuerza y aceleración que intervienen en ellas.

Primera ley de Newton

También conocida como principio de inercia, fue enunciada por primera vez por Galileo como conclusión de sus experimentos sobre el movimiento de cuerpos con rozamiento progresivamente menor y se enuncia así: *Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo mientras no sea obligado a cambiar su estado por la acción de fuerzas.*

Es decir que, por sí mismo, un cuerpo no puede modificar su estado de reposo o movimiento. El hecho de que los cuerpos permanezcan en reposo o conserven su movimiento rectilíneo y uniforme cuando no hay fuerzas actuantes sobre ellos se describe asignando a la materia la propiedad llamada *inercia*. Por eso la primera ley de Newton se llama también ley de inercia (ver cuadro).

Ejemplos de aplicación de la primera ley

Cuando viajamos en automóvil, el comportamiento de nuestro cuerpo permite percibir la primera ley de Newton en acción. Cuando el auto se pone en movimiento o cuando estando en movimiento frena, percibimos que nuestro cuerpo tiende a moverse en el interior del automóvil. En ambos casos hay un cambio en la velocidad del auto, es decir que sufre una aceleración. En el primer caso, la aceleración es en la dirección del movimiento (positiva) y sentimos que somos empujados hacia atrás y nuestro cuerpo se pega al respaldo del asiento. Nuestro cuerpo, que estaba en reposo, trata de permanecer en reposo pero como el auto acelera, percibimos que el auto *nos empuja* hacia adelante. Por otra parte, cuando el auto frena (aceleración negativa), nuestro cuerpo tiende a seguir hacia adelante con la misma *rapidez* y en la misma dirección en la que venía; como consecuencia, si no tenemos colocado el cinturón de seguridad, es inevitable que terminemos dando con la cabeza contra el parabrisas.

Una situación similar se presenta cuando el auto toma una curva, debido a que hay un cambio en su velocidad dado por el cambio de dirección. Nuestro cuerpo, debido a la inercia, tiende a mantener el estado de movimiento que traía. Como consecuencia experimentamos una fuerza (la fuerza centrífuga) que es en realidad ficticia, que nos empuja hacia un lado.

Muchas veces hacemos uso de la primera ley de Newton de manera intuitiva. Por ejemplo, para bajar la marca de un termómetro clínico de mercurio, es natural sacudirlo violentamente. Al hacer esto, producimos el movimiento descendente del termómetro junto al mercurio que lleva adentro; al detener bruscamente nuestra mano detenemos el vidrio del termómetro, pero el líquido en su interior continúa su movimiento descendente.

Cantidad de movimiento

Un concepto fundamental de la dinámica, introducido por Newton y complementario del concepto de energía, es el de *cantidad de movimiento*, que es una combinación de la velocidad con la masa o cantidad de materia. Se define como el *producto de la masa multiplicada por la velocidad*. Su símbolo es p y se expresa como

$$p = mv \tag{6.1}$$

Es interesante notar que Newton, que escribió *Los Principia* en latín, define a p como *Quantitas motus*, es decir, la versión en latín de cantidad de movimiento. En lo que sigue veremos que la variación de la cantidad de movimiento, que designaremos con $\Delta p = \Delta(mv)$, juega un papel importante en la dinámica. En términos de la variación de la cantidad de movimiento en el tiempo expresamos la segunda ley de Newton.

Segunda ley de Newton

La variación en el tiempo de la cantidad de movimiento es proporcional a la fuerza que actúa sobre el cuerpo y tiene lugar según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza actúa.

Esta ley indica una *relación lineal* (proporcionalidad) entre la fuerza y la variación de la cantidad de movimiento, de tipo vectorial (según la línea de acción de la fuerza). Se denomina, en ocasiones, *ley fundamental de la dinámica*, ya que permite obtener las ecuaciones básicas de esta. En otras palabras, la ley dice:

El cambio de la cantidad de movimiento en el tiempo es igual a la fuerza actuante, que en lenguaje matemático se escribe

$$F = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (6.2a)$$

Aquí, como dijimos más arriba, usamos el símbolo Δ para indicar el cambio o incremento de una cantidad.¹ Esta forma es equivalente a

$$F = \lim_{\Delta t} \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{dp}{dt} \quad (6.2b)$$

Esta es la expresión general de la segunda ley, aplicable en todos los casos, incluyendo aquellos en los que la masa del móvil no se conserva, por ejemplo si se quiere conocer la relación entre la fuerza y la aceleración cuando el móvil va perdiendo masa, como es el caso de un cohete espacial. En muchos ejemplos de la vida diaria, nos interesa estudiar el movimiento en casos en que la masa es constante; en esa situación podemos escribir la ley del movimiento en la forma:

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (6.3)$$

El cambio de velocidad en el tiempo, $\frac{\Delta v}{\Delta t}$, es la aceleración, que en el si se mide

en $\frac{m}{s^2} = (m/s)/s$, es decir indica cuántos m/s cambia la velocidad, en un segun-

do. Por tanto, en términos de la aceleración, la segunda ley de Newton se expresa

$$F = ma \quad (6.4)$$

Escrita así, muestra una relación directa entre la causa (fuerza) y el efecto (aceleración). La ecuación (6.4) indica que la aceleración y la fuerza son colineales, es decir que actúan en la misma dirección y sentido. Si tomamos en cuenta solo el módulo de ambos vectores, podemos interpretar la relación (6.4) diciendo que la razón entre fuerza y aceleración es una constante, la inercia o masa, es decir

$$\frac{F}{a} = m$$

Ejemplos de aplicación de la segunda ley

Consideremos el movimiento de un cuerpo que cae libremente bajo la acción de su peso –fuerza de la gravedad– desde una altura inicial hasta el nivel del piso. Esta situación ha sido discutida en el capítulo 5 en el marco de la conservación de la energía, pero su tratamiento mediante la segunda ley de Newton nos brinda información adicional. Como el movimiento es unidimensional no es necesario utilizar

¹ Los lectores que conocen el concepto de derivada, reconocerán que lo utilizamos en la ecuación (6.2).

vectores y podemos simplificar las ecuaciones fijando la posición del cuerpo directamente mediante la coordenada vertical z ; llamamos v a la velocidad, que corresponde a la variación de z en el tiempo, es decir $v = \frac{\Delta z}{\Delta t}$; la aceleración, el cambio

de la velocidad en el tiempo es $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$. La fuerza que actúa es el peso $F = mg$. La segunda ley de Newton $F = ma$ se reduce entonces a

$$mg = ma \quad (6.5)$$

que implica que en este caso, la aceleración es constante e igual a g , la llamada *aceleración de la gravedad*. La relación para el cambio de velocidad resulta

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a = g \quad (6.6)$$

de donde sigue

$$\Delta v = g \Delta t \quad (6.7)$$

es decir que los cambios en la velocidad Δv son proporcionales a los intervalos Δt de tiempo, si inicialmente al tiempo $t = 0$, tiene el valor v_0 , al cabo del tiempo t tendrá el valor

$$v = v_0 + gt \quad (6.8)$$

A su vez los cambios en la coordenada z están dados por

$$\Delta z = v \Delta t = v_0 \Delta t + gt \Delta t \quad (6.9)$$

Para determinar el valor de z luego de transcurrido un tiempo finito t debemos sumar los aportes Δz que corresponden a cada intervalo Δt

$$z = \text{Suma } \Delta z = \sum_{t=0}^t (v_0 \Delta t + gt \cdot \Delta t) = z_1 + z_2 \quad (6.10)$$

La primera sumatoria de (6.10) nos da

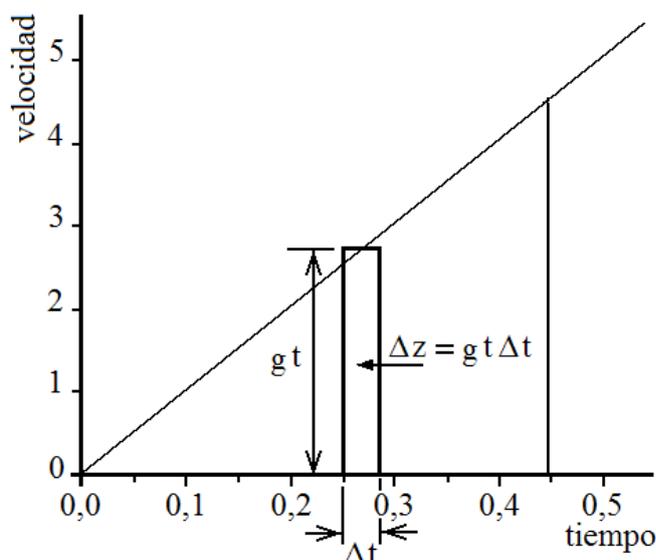
$$z_1 = \sum_{t=0}^t (v_0 \Delta t) = v_0 t \quad (6.11)$$

Mientras que la segunda es

$$z_2 = \sum_{t=0}^t gt \cdot \Delta t \quad (6.12)$$

Para evaluar z_2 podemos ilustrar la situación observando la figura 6.3

Figura 6.3. Representación gráfica de la ecuación (6.12)



La recta inclinada tiene pendiente g y representa a la ecuación (6.12). Cada término de la suma en (6.12) corresponde al área de los pequeños rectángulos de base Δt y altura gt ; la suma desde $t = 0$ hasta el tiempo t representa el área del triángulo de base t y altura gt (1/2 base por altura) es decir

$$z_2 = \frac{1}{2} gt^2 \quad (6.12 \text{ bis})$$

Con lo cual tenemos finalmente

$$z = z_1 + z_2 = v_0 t + \frac{1}{2} gt^2 \quad (6.13)$$

Otro ejemplo de movimiento acelerado es el de un cuerpo que cae bajo la acción de la gravedad, pero además experimenta una fuerza constante debido a la resistencia del aire. Un ejemplo de esta situación es el de un paracaidista: la fuerza de gravedad –peso– lo impulsa hacia abajo, mientras que la resistencia del aire lo frena con la fuerza $-F_r$ que suponemos constante. Tomando como positiva la dirección hacia abajo, la fuerza vertical neta es $F = mg - F_r$. La segunda ley de Newton se escribe entonces

$$ma = mg - F_r \quad (6.14)$$

de donde sigue que la aceleración es ahora $a = g - \frac{F_r}{m}$ es decir, constante pero

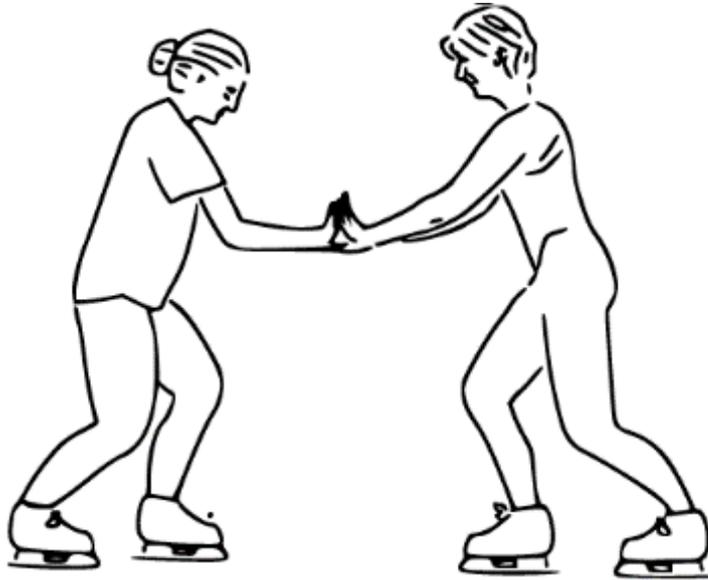
menor que g . Si la resistencia del aire alcanza el valor crítico $F_r = mg$, la relación (6.14) nos muestra que la aceleración se anula, es decir $a = 0$. En este caso, la caída continúa con velocidad constante.

Tercera ley de Newton

A toda acción corresponde siempre una reacción igual y contraria. Significa que las acciones mutuas entre los cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentidos opuestos. La ley se denomina principio de acción y reacción. Es decir, las acciones mutuas entre los cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentidos opuestos. Para ilustrar este principio tomamos un globo de goma y lo inflamos lo más posible. Sujetando

la boca del globo entre los dedos la ubicamos orientada ligeramente hacia abajo; si soltamos de golpe el globo veremos que sale proyectado en una dirección mientras un chorro de aire sale del globo en dirección opuesta. Esto explica el funcionamiento de los aviones a reacción.

Figura 6.4. Dos patinadores se empujan mutuamente



Fuente: Benjamin Crowell, 2006.

En el caso ilustrado en la figura 6.4, la patinadora ejerce sobre el patinador una fuerza F_1 , dirigida hacia la derecha y el patinador ejerce, sobre la patinadora, una fuerza $-F_1$, dirigida hacia la izquierda. Como las fuerzas actuantes son del mismo módulo y sentidos opuestos, de acuerdo a la segunda ley de Newton, el movimiento resultante dependerá de la masa de cada persona.

Ejemplos de aplicación de la tercera ley

Sobre todo cuerpo cercano a la Tierra, sea en movimiento o en reposo sobre el suelo, actúa una fuerza ejercida por la Tierra, el peso; el principio de acción y reacción implica que sobre la Tierra actúa una fuerza igual y contraria ejercida por el cuerpo. En el caso de la caída libre, la fuerza acelera el cuerpo hacia abajo; para un cuerpo en reposo sobre el suelo, la fuerza peso se equilibra con la reacción del piso y el cuerpo se mantiene inmóvil. La fuerza que el cuerpo ejerce sobre la Tierra es igual y contraria al peso; debido a la gran masa de la Tierra, el efecto sobre el planeta es imperceptible.

En un avión a reacción, las toberas expulsan hacia atrás un chorro de masa gaseosa, generada por la combustión en las turbinas. La expulsión de los gases produce una reacción sobre el avión, que es el empuje que lo impulsa hacia adelante. Algo similar sucede cuando se dispara un arma de fuego: el proyectil es impulsado hacia adelante por la explosión de la pólvora y el arma es impulsada hacia atrás; como consecuencia, el tirador recibe un golpe que vulgarmente se denomina *patada*.

Problema.**El billete.**

Consiste en dejar caer un billete de cien pesos través de los dedos de un amigo y ofrecerle que, si logra atraparlo, se quede con él. La caída debe iniciarse con el centro del billete colocado a nivel de los dedos pulgar e índice. Los billetes argentinos tienen una longitud de $15,5 \text{ cm}$ y el tiempo de reacción humana es de alrededor de $0,20$ segundos. Haga los cálculos necesarios para determinar si es seguro arriesgar un billete de cien pesos.

Figura 6.5. Caída de un billete

**Solución**

Usted debe tomar entre sus dedos el borde superior del billete, que pende verticalmente y pedir a su amigo que coloque los dedos a la altura del centro del billete e intente atraparlo cuando lo deje caer. Para ver qué podemos esperar, calcularemos el tiempo que tarda el billete en pasar entre los dedos de su amigo y lo compararemos con el tiempo de reacción de una persona.

Si el billete es nuevo y no está arrugado, caerá verticalmente y podemos despreciar la fricción con el aire y estudiar la caída solo bajo la acción de la gravedad. Suponemos que el centro de masa se encuentra en el centro del billete y llamamos z a la coordenada vertical del centro de masa. Si la longitud del billete es L , la energía potencial inicial respecto del nivel de los dedos de su amigo es nula y la energía mecánica total es

$$E_{mec} = 0.$$

Cuando el billete se pone en movimiento la energía mecánica vale

$$E_{mec} = \left(\frac{1}{2}\right)mv^2 + mgz$$

donde z es negativo. La conservación de la energía implica que E_{mec} debe ser igual a la energía potencial inicial, es decir debe cumplirse $\left(\frac{1}{2}\right)mv^2 + mgz = 0$; de aquí sigue para la velocidad $v^2 = -2gz$.

Esta es la relación entre la velocidad v y la altura z en cada momento de la caída. Cuando el billete termina de pasar entre los dedos de su amigo, la coordenada z vale $z = \frac{-L}{2}$ y la velocidad es $v = \sqrt{2gz} = \sqrt{gL}$

Para obtener el tiempo de caída, recordamos que, como el billete parte del reposo, la velocidad y el tiempo están relacionados por $v = gt$ y por tanto

$$t = \sqrt{\frac{L}{g}} = \sqrt{\frac{0,155m}{9,81m/s^2}} = 0,186s.$$

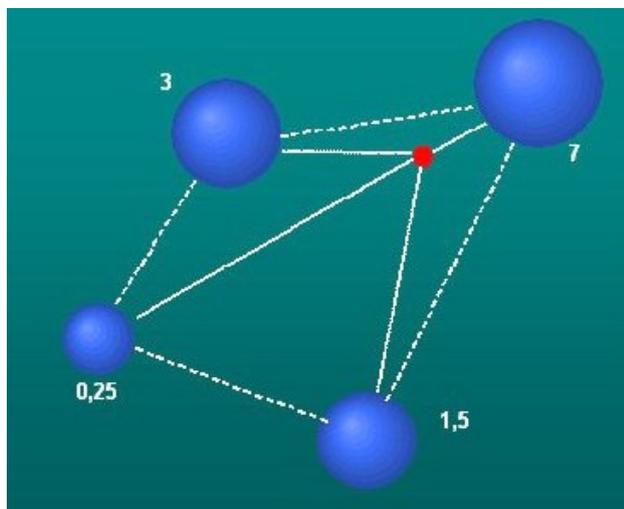
El tiempo de reacción varía de una persona a otra y es del orden de 0,2 segundos; por ello el resultado de la apuesta depende de la velocidad de reacción de quien debe capturar el billete; podemos medir nuestro tiempo de reacción o el del amigo, ingresando al sitio de ciencia de la BBC en: <http://www.bbc.co.uk/science/humanbody/sleep/sheep/>

6. 4. Centro de masa

Si los antiguos hubieran sabido que la masa del Sol es unas 300.000 veces mayor que la de la Tierra, hubieran aceptado rápidamente la hipótesis heliocéntrica. Dado que el Sol es tan masivo, los planetas, por efecto de la interacción gravitatoria, son atraídos hacia él y la velocidad con que recorren sus órbitas impide que caigan hacia el Sol.

La figura 6.6 ilustra la posición aproximada del centro de masa de un conujunto de cuatro masas.

Figura 6. 6. Cuatro masas de diferente valor ubicadas sobre un plano. El punto rojo es el centro de masa



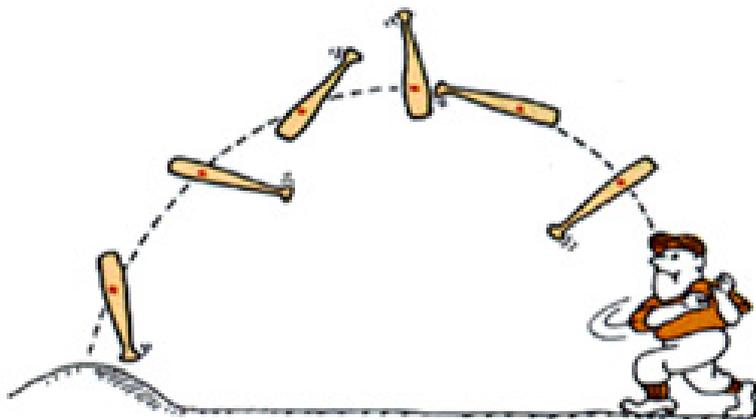
Fuente: Marc Lagrange, 2004.

Cuando un planeta gira alrededor del Sol, este no permanece en reposo y ambos describen órbitas elípticas alrededor de un punto imaginario, el *centro de masa común entre ellos*.²

En la figura 6.6 vemos, marcado por el punto rojo, el centro de masa de un sistema de cuatro masas. Nótese que el centro de masa se encuentra más cerca de la masa 1 que de las otras, pues esa es la que tiene la mayor masa.

El movimiento de un bate de beisbol arrojado al aire es complicado, pero en la figura 6.7 vemos que el centro de masa (punto rojo) se mueve siguiendo la trayectoria que tendría una pequeña pelota arrojada de la misma manera, mientras el bate gira alrededor de su *centro de masa*.

Figura 6.7. Movimiento de un cuerpo arrojado al aire. El punto rojo marcado indica el centro de masa

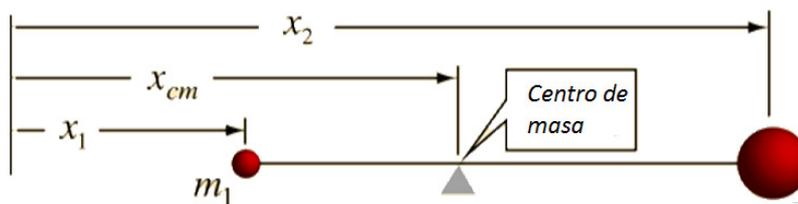


Fuente: Doug Davis, 2001.

El centro de masa es un punto imaginario cuya posición respecto a un punto de referencia es el *promedio pesado de las distancias* de cada parte del cuerpo a dicho punto; cada distancia se pesa con la respectiva masa. En una dimensión, esto es equivalente a equilibrar la barra de la figura 6.8 alrededor de su punto de pivote. Según la definición, la posición del centro de masa x_{CM} de un sistema de dos partículas con masas m_1 y m_2 , situadas en posiciones x_1 y x_2 , referidas a un origen arbitrario, a lo largo de un eje, está dada por

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=2} m_i x_i \quad (6.15)$$

Figura 6.8. Centro masa de un sistema de dos cuerpos



Fuente: Rod Nave, 2016.

2 Ignorando por un momento la presencia de los otros planetas.

Todas las coordenadas están medidas a partir de un origen arbitrario ubicado a la izquierda del dibujo. La relación (6.15) muestra que el centro de masa se encuentra en un punto situado entre las dos masas, cercano a la masa más grande. En general, para un sistema unidimensional con más de dos partículas, la posición del centro de masa satisface la siguiente relación

$$x_{min} \leq x_{CM} \leq x_{max}$$

donde x_{min} y x_{max} son las posiciones más a la izquierda y más a la derecha del sistema de partículas.

La definición del centro de masa puede generalizarse a tres dimensiones de la siguiente manera

$$\begin{pmatrix} x_{CM} \\ y_{CM} \\ z_{CM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N} m_i x_i \\ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N} m_i y_i \\ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N} m_i z_i \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

donde $\begin{pmatrix} x_{CM} \\ y_{CM} \\ z_{CM} \end{pmatrix}$ son las tres coordenadas del punto buscado. En lenguaje vectorial

esta relación se escribe, para dos partículas, de manera compacta:

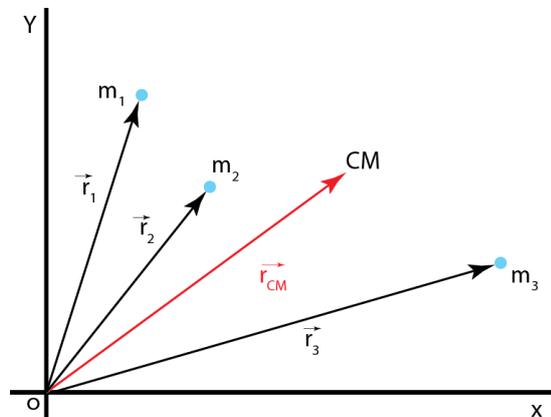
$$\mathbf{r}_{CM} = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{M} (m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2) \quad (6.17)$$

Para un sistema de N partículas tendremos

$$\mathbf{r}_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N} m_i \mathbf{r}_i \quad (6.18)$$

donde m_i y \mathbf{r}_i son la masa y vector de posición de la partícula i -ésima respecto de un sistema de referencia dado, que se muestran en la figura 6.9. La suma debe extenderse a todas las masas; M es la masa total.

Figura 6.9. Centro de masa de un sistema de partículas



Fuente: Adaptado de Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández, 2014.

El concepto de *centro de masa* en la forma del *centro de gravedad* fue introducido por primera vez por Arquímedes, quien trabajó suponiendo que la fuerza de gravedad corresponde a un *campo uniforme*, como el campo de gravedad cerca de la Tierra. Demostró que la *cupla* –par de fuerzas– ejercido sobre una palanca por los pesos que descansan en varios puntos a lo largo de esta es igual al valor que tendría si todos los pesos fueran trasladados a un solo punto, el centro de gravedad o centro de masa.

También podemos decir que el centro de masa de un sistema de varias masas es el punto geométrico que se comporta como si la resultante de las fuerzas externas al sistema estuviera aplicada en él. De manera análoga, puede decirse que el sistema formado por toda la masa concentrada en el centro de masas es un sistema equivalente al original.

6.5. Dinámica de un sistema de partículas

Supongamos ahora que queremos estudiar la dinámica de un sistema de dos partículas. La cantidad de movimiento total \mathbf{P} del sistema es la suma de la cantidad de movimiento de cada partícula \mathbf{p}_1 y \mathbf{p}_2 , es decir

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$$

La variación temporal de la cantidad de movimiento total es entonces

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \frac{d}{dt} (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2) \quad (6.19)$$

La interacción gravitatoria entre las partículas implica que sobre la partícula 1 actúa una fuerza \mathbf{F}_{12} , producida por la partícula 2; por su parte, la tercera ley de Newton nos dice que sobre la partícula 2 actúa una fuerza igual y contraria, es decir $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$ (acción y reacción). De aquí sigue que

$$\mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{21} = 0$$

Por otra parte, la segunda ley de Newton nos dice que la variación de la cantidad de movimiento de cada partícula está dada por la fuerza que actúa sobre ella, es decir que

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} = \mathbf{F}_{12}$$

$$\frac{d\mathbf{p}_2}{dt} = \mathbf{F}_{21}$$

De acá obtenemos que la cantidad de movimiento total $\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$ satisface la relación

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \frac{d(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)}{dt} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{21} = 0 \quad (6.20)$$

que implica

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = cte \quad (6.21)$$

Esto significa que *la cantidad de movimiento de un sistema aislado es constante*.

Estas relaciones pueden ser generalizadas para N partículas que interactúan entre sí, sin la acción de fuerzas externas. Utilizando la expresión (6.19) podemos determinar la variación temporal de la posición del centro de masa

$$\frac{d\mathbf{r}_{CM}}{dt} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N} m_i \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N} m_i \mathbf{v}_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N} m_i \mathbf{p}_i = cte.$$

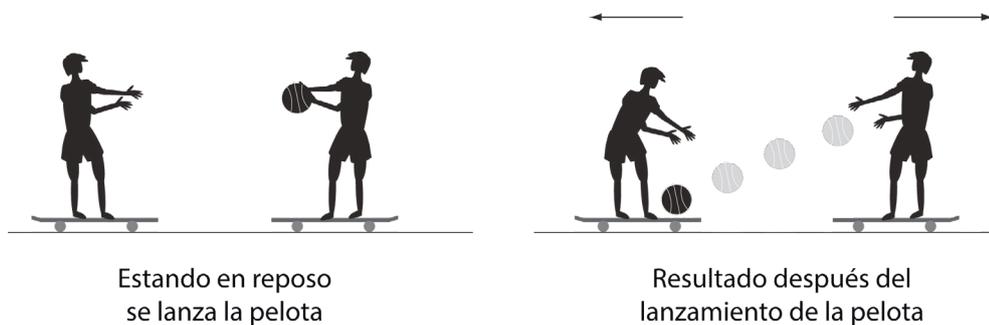
Es decir

$$M \frac{d\mathbf{r}_{CM}}{dt} = cte \tag{6.22}$$

Vemos que, con una interacción como la descrita, la *velocidad del centro de masa es constante*.

En la figura 6. 10, dos niños en patineta juegan arrojándose entre ellos una pelota. Cuando el niño de la derecha lanza la pelota, se produce una interacción breve e intensa entre el niño y la pelota, que se mueve hacia la izquierda mientras el niño va hacia la derecha. Cuando la pelota cae sobre la otra patineta, le transmite la cantidad de movimiento que traía, y el niño de la izquierda se pone en movimiento. Al final, ambos niños se alejan del centro de masa del sistema, que permanece en reposo.

Figura 6. 10. Conservación de la cantidad de movimiento en un sistema compuesto



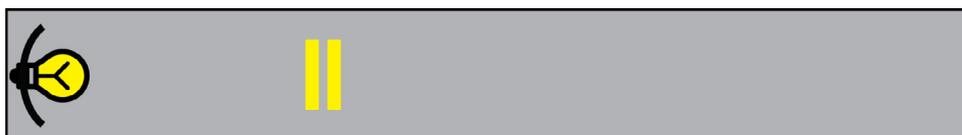
6. 6. Una deducción simple de la relación $E = mc^2$

La relación entre masa y energía fue establecida por Einstein en 1905, en el marco de la teoría de la relatividad (Einstein, 1905). Un año después, en 1906, la dedujo mediante un *experimento ideal* o *experimento pensado* (*gedankenexperiment*)³ usando conceptos de la física clásica e incluyendo el concepto de centro de masa (Einstein, 1906).

El experimento ideal de Einstein es el siguiente: considere una caja cerrada de longitud L que tiene una linterna en un extremo y un material absorbente de luz en el otro. Imagine que la caja se encuentra en el espacio lejos de campos gravitatorios. Suponga ahora que la linterna parpadea una vez, emitiendo un pulso de luz que viaja dentro de la caja y es absorbido en el otro extremo.

³ Experimento pensado: un recurso de razonamiento muy usado por Einstein.

Figura 6.11. Caja de Einstein: lejos en el espacio, un destello de luz emitido por una bombilla ubicada en un extremo viaja hasta ser absorbido en el otro extremo



Fuente: Adaptado de Michael Fowler.

La teoría electromagnética de Maxwell afirma que un pulso de luz que lleva energía E contiene también una cantidad de movimiento $p = E/c$, relaciones comprobadas en el efecto fotoeléctrico. La cantidad de movimiento asociada a la luz es responsable de la presión de radiación que empuja la cola de los cometas en dirección opuesta al Sol, cuando estos pasan por su perihelio.

Por conservación de la cantidad de movimiento, cuando el pulso de luz parte de la lámpara y comienza su viaje por la caja, esta retrocede, como lo hace un revólver cuando dispara una bala, para conservar la cantidad de movimiento total. Debe cumplirse: cantidad de movimiento de la luz = cantidad de movimiento de la caja es decir

$$\frac{E}{c} = vM \quad (6.23)$$

Para determinar la distancia que se desplazó la caja debemos tener en cuenta que se movió a la velocidad v durante un tiempo t , por lo que se trasladó una distancia

$$d = vt = \frac{v}{c} L \quad (6.24)$$

Dado que $\frac{v}{c} \ll 1$, resulta d muy pequeño comparado con L .

Combinando (6.23) con (6.24) obtenemos la distancia d que se desplazó la caja:

$$d = \frac{EL}{Mc^2} \quad (6.25)$$

Es importante notar que no hay fuerzas externas actuando sobre este sistema, por lo que *su centro de masa no puede haberse movido*. La única manera de que esto suceda es que, para contrarrestar el cambio de posición de la caja, de masa M que se movió una distancia d hacia la izquierda, la luz que viajó hasta el otro extremo de la caja debe haber transferido una pequeña masa m , hasta la longitud L del tubo, de modo que los momentos de las masas M y m respecto al centro de masas sean iguales y opuestos. Esto implica que debe cumplirse

$$Md = mL \quad (6.26)$$

De esta manera el centro de masa se mantiene en su lugar. Combinando ahora (6.25) con (6.26), podemos obtener el valor de m ,

$$m = \frac{M}{L} d = \frac{M}{L} \frac{EL}{Mc^2} = \frac{E}{c^2} \quad (6.27)$$

Así resulta

$$E = mc^2 \quad (6.28)$$

Por lo tanto, hemos establecido que *la transferencia de energía implica una transferencia de masa*. Las suposiciones son:

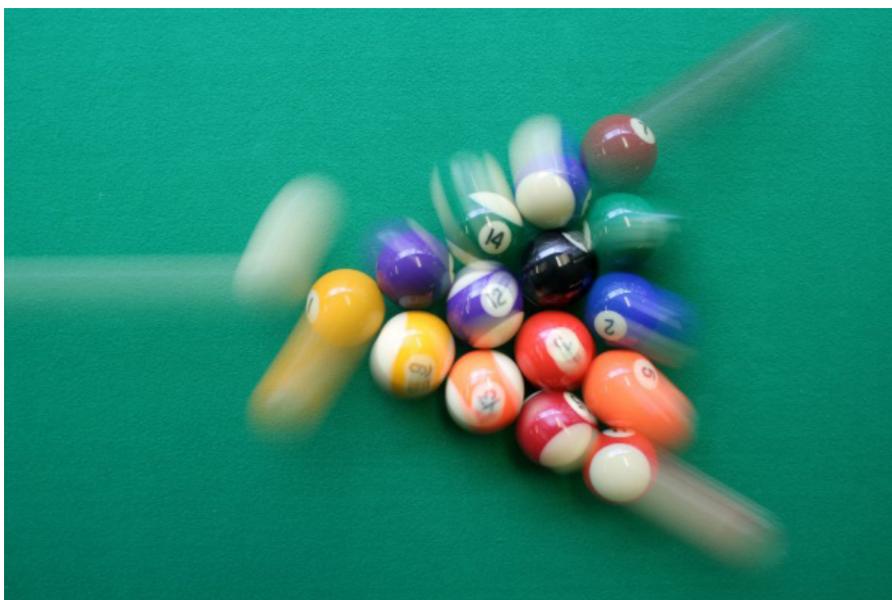
- que el centro de masa de un sistema aislado (libre de fuerzas externas), inicialmente en reposo, permanece en reposo;
- que la radiación electromagnética de energía E lleva una cantidad de movimiento E/c , como predicen las ecuaciones de Maxwell y como está demostrado por la experiencia.

Pero ¿cómo se realiza físicamente esta transferencia de masa? El extremo frontal del tubo ¿tiene realmente más masa después de haber absorbido la luz? La respuesta es sí, porque la absorción de luz eleva un poco la temperatura del material que absorbió la luz, lo que significa que sus átomos vibran ligeramente más rápido; aquí debemos aceptar sin demostración que, de acuerdo con la teoría de la relatividad, los objetos en movimiento rápido tienen mayor masa.

6.7. Colisiones

En la vida diaria podemos observar distinto tipo de colisiones o choques que definimos como el *encuentro violento de dos o más cuerpos, de los cuales al menos uno está en movimiento*. En los juegos de billar, *pool* o bolos vemos colisiones provocadas como parte del juego, en que los objetos involucrados no se deforman. Una colisión de muchos cuerpos se produce, por ejemplo, al iniciar el juego de *pool*, como muestra la figura 6.12.

Figura 6.12. Colisiones múltiples en el juego de pool



Fuente: Noé Lecocq, 2006.

El estudio de las colisiones tiene gran importancia en la vida diaria para el caso de los accidentes de tránsito, donde muchas circunstancias del choque pueden deducirse a partir de los restos de una colisión. En las investigaciones relacionadas con el estudio de la estructura de la materia, también el análisis de colisiones en los grandes aceleradores de partículas es de fundamental importancia.

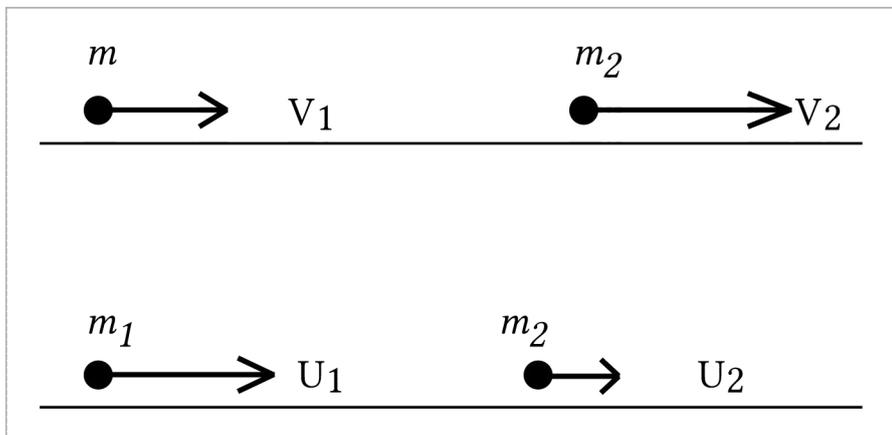
Una colisión es una interacción de corta duración entre dos o más cuerpos que causa un cambio en su movimiento debido a fuerzas que actúan entre ellos,

durante el evento. Las colisiones implican fuerzas que inducen un cambio en las velocidades. En todas las colisiones se conserva la cantidad de movimiento. Pero el hecho de que se conserve o no la energía cinética distingue entre distintos tipos de colisiones. Cuando se conservan tanto la cantidad de movimiento como la energía cinética, se dice que es una *colisión elástica*, mientras que cuando se conserva la cantidad de movimiento, pero no la energía cinética, se trata de una *colisión inelástica*.

Una colisión inelástica a veces también se llama una *colisión plástica*. Una colisión completamente inelástica, también llamada *completamente plástica*, es un caso límite de colisión inelástica en el que los dos cuerpos quedan unidos entre sí después del impacto.

Consideremos dos cuerpos, uno de masa m_1 y otro de masa m_2 , que pueden moverse libremente en una dimensión y supongamos que estos dos objetos chocan entre sí; supongamos además que estos cuerpos no están sometidos a ninguna otra fuerza cuando no están en contacto entre ellos. La situación se muestra en la figura 6.13.

Figura 6.13. Situación inicial (arriba) y final (abajo) de las masas m_1 y m_2 que sufren una colisión elástica



Antes y después de la colisión, los cuerpos se mueven con velocidad constante. Llamemos v_1 y v_2 a las velocidades de cada objeto, antes de la colisión, respectivamente; de la misma manera llamamos u_1 y u_2 a las velocidades después de la colisión. Durante la colisión, el objeto 1 ejerce una fuerza transitoria F_{21} sobre el objeto 2, mientras el objeto 2 ejerce una fuerza igual y opuesta $F_{12} = -F_{21}$ sobre el objeto 1; estas fuerzas actúan un tiempo muy pequeño Δt . El producto $F\Delta t$ se denomina *impulso de la fuerza*; podemos decir que en la colisión, cuando ambos objetos entran en contacto, actúan impulsos iguales y opuestos.

Sobre el sistema que estamos considerando no actúa ninguna fuerza externa, las fuerzas asociadas con la colisión son internas al sistema. Por lo tanto, la cantidad de movimiento total del sistema es una magnitud conservada –ver ecuación (6.31bis)–. Esto significa que la cantidad de movimiento total antes de la colisión es igual a la cantidad de movimiento total después de la colisión; escribiendo esa igualdad obtenemos

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2 \quad (6.29)$$

Esta igualdad es válida para toda colisión en una dimensión, sea elástica o inelástica. Suponiendo que conocemos las masas de los objetos en colisión, la ecuación anterior solo describe la colisión si conocemos las velocidades iniciales de ambos objetos y la velocidad final de al menos uno de ellos. También podría ser que conociéramos las dos velocidades finales y solo una de las velocidades iniciales.

6.7.1. Colisiones elásticas

Se dice que una colisión es *elástica* cuando la energía cinética de los cuerpos involucrados se conserva, lo que significa que la energía cinética inicial total es igual a la energía cinética final total.

¿Por qué aproximaríamos una colisión real considerándola perfectamente elástica?

Dado que ningún problema mecánico real implica una colisión perfectamente elástica, puede parecer que el concepto tiene poca utilidad. Sin embargo, en la práctica, es a menudo muy útil. Esto se debe a que el requisito de que se conserve la energía cinética determina una restricción adicional a las ecuaciones de movimiento, lo que permite resolver problemas en los que, de otra manera, habría demasiadas incógnitas. A menudo, la solución correcta es adecuada porque la colisión es casi elástica.

Supongamos que se produce una colisión frontal elástica entre dos autos (A y B) en una ruta. Tenemos solo las velocidades iniciales v_A y v_B y queremos saber las velocidades finales u_A y u_B para ambos vehículos. La conservación de la energía cinética implica

Energía cinética antes de la colisión = Energía cinética después de la colisión

es decir debe cumplirse

$$E_{ini} = E_{fin} \quad (6.30)$$

Es decir

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 \quad (6.31)$$

En forma similar, la conservación de la cantidad de movimiento implica

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (6.32)$$

A partir de estas ecuaciones es posible obtener las velocidades finales u_1 y u_2 , de cada cuerpo.

$$u_1 = \frac{1}{m_1 + m_2} [(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2] \quad (6.33)$$

$$u_2 = \frac{1}{m_1 + m_2} [(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1] \quad (6.34)$$

Es interesante considerar los casos límite de estas soluciones que se aplican a diferentes configuraciones de colisiones frontales. Esto puede ayudarnos a obtener una comprensión intuitiva de lo que sucede en situaciones como las colisiones elásticas en la llamada cuna de Newton (figura 6.14).

Objeto A choca con un objeto B de igual masa que se encuentra en reposo

Inicialmente es

$$v_A \neq 0; v_B = 0;$$

Respecto a las velocidades finales las ecuaciones nos dicen que

$$u_A = 0; u_B = v_A$$

El objeto impactante se detiene por completo, el objeto blanco adquiere la misma velocidad que tenía el objeto impactante. Este es exactamente el tipo de interacción que vemos en la cuna de Newton.

Figura 6. 14. Cuna de Newton



Fuente: DemonDeLuxe, 2006.

Cuando una bola se balancea y choca en un lado de la cuna, siempre sale una bola por el otro lado. En principio, la cantidad de movimiento también se conservaría si salieran dos bolas, cada una con la mitad de la velocidad original. Sin embargo, las colisiones son (principalmente) elásticas. La única forma de garantizar la conservación tanto de la cantidad de movimiento como de la energía cinética es que salga una sola bola.

Objeto pesado choca con un objeto mucho más liviano que está en reposo

La velocidad final del objeto pesado es *casi igual* a su velocidad inicial.⁴ Esto es bastante intuitivo; el objeto liviano tiene poco efecto sobre el pesado.

Un caso particular de esta situación aparece cuando objeto liviano es una pelota de goma perfectamente elástica que choca contra una pared. En ese caso podemos

⁴ Casi igual: se vuelve más igual cuando mayor es la diferencia de masas.

tomar a la pared como el cuerpo de masa m_2 , que satisface la relación $m_2 \gg m_1$ y $v_2 = 0$. Luego, de (6.33) y (6.34) obtenemos que $u_2 = 0$ y

$$u_1 = -v_1$$

Esto indica que la velocidad de la pelota cambia de signo (rebota) mientras la pared permanece en reposo, que es el resultado esperado.

Otro caso posible es el de un jugador de tenis que utiliza una máquina lanza-pelotas para entrenarse y mejorar su juego. Como es invierno, la máquina de 50 kg se ubica sobre un gran charco congelado, que no se ve en la figura. La máquina dispara horizontalmente una pelota de tenis de 58 g con una velocidad de 36 m/s . ¿Cuál es la velocidad de retroceso de la máquina?

Tenemos entonces $m_1 = 0,058\text{ kg}$, $v_1 = 36\text{ m/s}$, $m_2 = 50\text{ kg}$ y queremos determinar la velocidad v_2 de la máquina.

6.7.2 Colisiones inelásticas

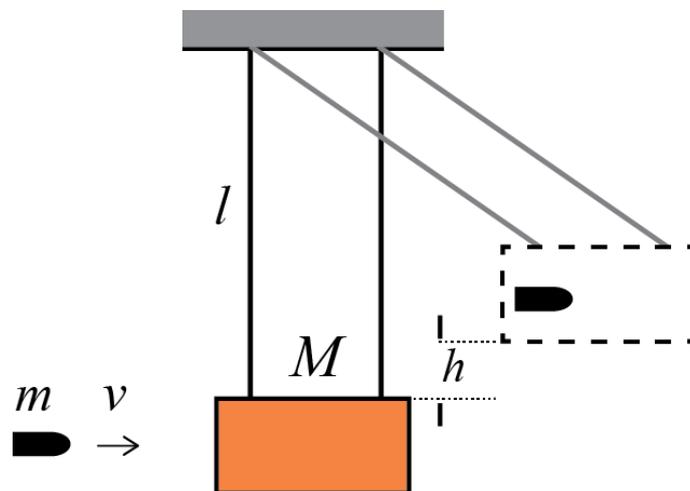
Una colisión inelástica es una colisión en la que hay una pérdida de energía cinética. Mientras que la cantidad de movimiento del sistema se conserva, la energía cinética no se conserva. Esto se debe a que una parte de la energía cinética se convierte en otra cosa: energía térmica, energía sonora y energía de deformación de los materiales.

Supongamos que dos autos similares se mueven uno hacia el otro. Chocan, pero debido a que están equipados con acopladores magnéticos, se unen en la colisión y se convierten en una sola unidad. Este tipo de colisión es completamente inelástica porque se ha perdido la máxima energía cinética posible. Esto no significa que la energía cinética final sea necesariamente cero; la cantidad de movimiento debe conservarse.

En el mundo real, la mayoría de las colisiones no son perfectamente elásticas ni perfectamente inelásticas. Una pelota que se deja caer desde una altura h sobre una superficie dura, normalmente rebota a una altura menor que h , dependiendo de cuán rígida sea la pelota. Tales colisiones se denominan colisiones inelásticas.

Un ejemplo de colisión completamente inelástica se produce en el péndulo balístico que era utilizado, antes de la aparición de los instrumentos modernos, para medir la velocidad de un proyectil.

Figura 6.15. Péndulo balístico



Fuente: Adaptado de Algarabía, 2006.

En este dispositivo, un proyectil se dispara contra un bloque de madera pesada que está suspendido como muestra la figura; el bloque está inicialmente en reposo. Después de la colisión, el proyectil se incrusta en el bloque y parte de la energía cinética se transforma en calor, en sonido y en energía de deformación del bloque. Sin embargo, la cantidad de movimiento debe conservarse y en consecuencia, el bloque se balancea.

El bloque se comporta como un péndulo en el que se conserva la energía mecánica total. Debido a esto, podemos usar la altura máxima alcanzada por el bloque para determinar su energía cinética después de la colisión. Usando la conservación de la cantidad de movimiento, podemos determinar la velocidad inicial del proyectil.

Sabemos que solo la cantidad de movimiento se conserva en este caso, por eso la cantidad de movimiento del proyectil antes de la colisión debe ser igual a la cantidad de movimiento del sistema proyectil-bloque inmediatamente después de la colisión. Usaremos el subíndice B para el bloque y P , para el proyectil. Llamamos v_P a la velocidad del proyectil y u_B a la velocidad del bloque después de la colisión. Tenemos entonces

$$m_P v_P = (m_B + m_P) u_B \quad (6.35)$$

de donde sigue para la velocidad común a ambos objetos unidos

$$u_B = \frac{m_P}{m_P + m_B} v_P$$

Sabemos que después de la colisión, la energía mecánica del sistema bloque-bala se conserva, por lo que si el bloque se eleva a una altura máxima h entonces

$$\frac{1}{2} (m_P + m_B) v_B^2 = (m_P + m_B) gh$$

donde g es la aceleración de la gravedad. De aquí sigue para la velocidad del proyectil

$$v_P = \frac{m_P + m_B}{m_P} \sqrt{2gh}$$

Problema

El bote y las piedras

Suponga que usted llega caminando hasta la orilla del agua en un brazo de ancho L , del lago Nahuel Huapi. Allí halla un bote de masa M que está a una distancia $l = 10\text{ m}$ de la costa. Al otro lado del brazo se encuentra un amigo suyo, que igual que usted, tampoco sabe nadar; para cruzar el brazo de agua deciden aplicar la física que aprendieron. Luego de discutir la situación deciden que usted arroje al bote unas piedras que abundan allí, para imprimirle cantidad de movimiento y así desplazarlo hasta la otra orilla, para que su amigo pueda subirse. Suponga que usted arroja tres piedras de masa m_1 , $m_2 = 2m_1$ y $m_3 = 3m_1$ con excelente puntería; suponga también que al lanzar cada piedra su brazo es capaz de imprimir una cantidad de movimiento horizontal p a cada una, independientemente de su masa. Si la masa del bote es de 70 kg , determine:

- La velocidad que lleva cada piedra después de que usted la arroja.
- La cantidad de movimiento del bote luego de que cada piedra cae en él.
- La velocidad del bote luego de que cada piedra cae en él.

Nota: Considere solo el movimiento horizontal de las piedras y del bote y desprece la fricción del bote con el agua.

Datos

$$p_1 = p_2 = p_3 = 45 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}; m_1 = 1 \text{ kg}; m_{\text{bote}} = 70 \text{ kg}$$

Solución

Velocidad de cada piedra.

Masa kg	Velocidad			
1	$v_1 = \frac{p_1}{m_1}$	$\frac{p}{m_1}$	$\frac{45 \text{ kgms}^{-1}}{1 \text{ kg}}$	45,0 m / s
2	$v_2 = \frac{p_2}{m_2}$	$\frac{p}{m_2}$	$\frac{45 \text{ kgms}^{-1}}{2 \text{ kg}}$	22,5 m / s
3	$v_3 = \frac{p_3}{m_3}$	$\frac{p}{m_3}$	$\frac{45 \text{ kgms}^{-1}}{3 \text{ kg}}$	15,0 m / s

Cantidad de movimiento del bote después de que cae cada piedra.

Cantidad de movimiento del bote		Velocidad del bote		
$p_{b1} = p_1$	45 kgms^{-1}	$v_{b1} = \frac{p_{b1}}{(70+1) \text{ kg}}$	$\frac{45 \text{ kgms}^{-1}}{(70+1) \text{ kg}}$	$0,6338 \text{ ms}^{-1}$
$p_{b2} = p_{b1} + p_2$	$90,0 \text{ kgms}^{-1}$	$v_{b2} = \frac{p_{b2}}{(71+2) \text{ kg}}$	$\frac{90,0 \text{ kgms}^{-1}}{(71+2) \text{ kg}}$	$1,2329 \text{ ms}^{-1}$
$p_{b3} = p_{b2} + p_3$	$135,0 \text{ kgms}^{-1}$	$v_{b3} = \frac{p_{b3}}{(73+3) \text{ kg}}$	$\frac{135 \text{ kgms}^{-1}}{(73+3) \text{ kg}}$	$1,7763 \text{ ms}^{-1}$

6. 8. Las colisiones en la física del siglo XX

Los experimentos de Lord Rutherford (ver capítulo 7) mostraron que el estudio de las colisiones entre átomos u otros objetos microscópicos permite conocer la estructura atómica y subatómica. Al observar los efectos de bombardear una lámina de oro con partículas alfa provenientes de la emisión radioactiva de una muestra de polonio, Rutherford y sus colaboradores, Chadwick Mardsen y Hans Geiger, llegaron a la conclusión de que la masa del átomo estaba concentrada en un núcleo muy pequeño. Siguiendo este modelo del bombardeo, posteriormente, James Chadwick descubrió el neutrón. A fin de alcanzar mayores energías, siguieron otros estudios que introdujeron la idea de provocar colisiones de partículas aceleradas, lo que llevó a diseñar los grandes aceleradores. Los últimos avances en este tema se muestran en el capítulo 10.

Problema resuelto 2

Un niño se desplaza en su patineta de masa $4,0 \text{ kg}$ con una velocidad constante de $3,0 \text{ m/s}$ cuando salta hacia atrás, fuera del juguete, y continúa corriendo hacia adelante con una velocidad de $2,0 \text{ m/s}$ con respecto al suelo. Mientras tanto, la patineta continúa hacia adelante con una velocidad de $15,5 \text{ m/s}$ respecto al suelo. Determine la masa del niño.

Solución

La conservación de la cantidad de movimiento total implica

$$P_i = P_f$$

es decir

$$(m_n + m_p)V_i = m_n V_{fn} + m_p V_{fp}$$

Escribiendo ahora las velocidades en m/s y las masas en kg sigue

$$3m_n + 3 \times 4 = 2m_n + 4 \times 15.5$$

Y finalmente

$$m_n = 4 \times 15.5 - 3 \times 4 = 50.0 \text{ kg}$$

Problema resuelto 3

Imagine dos cuerpos de masas iguales y entre los cuales se interpone un resorte de constante K que está en posición horizontal y comprimido una cantidad respecto a su posición de equilibrio; los cuerpos están sujetos entre sí por un hilo delgado. Si usted corta el hilo delicadamente con una tijera, encuentre la relación entre las velocidades v_1 y v_2 con que saldría despedido cada cuerpo. Calcule la velocidad y la energía cinética de ambas masas para el caso $m_1 = 1 \text{ kg}$.

PREGUNTAS

● **PREGUNTA 6.1.**

Suponga que un tenista golpea con su raqueta una pelota de tenis, que sale directamente hacia adelante y paralela al suelo. Si no se toma en cuenta la resistencia del aire, ¿cuál es el sentido de la fuerza neta que actúa sobre la pelota una vez que se aleja de la raqueta?

- Directamente hacia adelante.
- Directamente hacia abajo.
- Hacia adelante y un poco hacia abajo.
- Hacia abajo y un poco hacia atrás.

● **PREGUNTA 6.2.**

Si dos automóviles A y B de masa $m_A \gg m_B$ chocan frontalmente entonces:

- El automóvil de mayor tamaño ejercerá más fuerza que el de menor tamaño.
- La fuerza que ejerce A sobre B es igual en magnitud a la que ejerce B sobre A.
- El automóvil que se desplace con mayor rapidez ejerce más fuerza.
- Se ejerció una mayor fuerza sobre el auto con más daños.
- El automóvil de menor masa ejercerá menos fuerza.

● **PREGUNTA 6.3.**

Si nuestro peso es el resultado de la atracción gravitacional de la Tierra sobre nuestro cuerpo ¿cuál es la fuerza que ejercemos nosotros sobre la Tierra? ¿Cómo se relacionan las magnitudes de esas fuerzas?

● **PREGUNTA 6.4.**

En la interacción entre un martillo y el clavo al cual golpea, ¿se ejerce alguna fuerza sobre el clavo? ¿Sobre el martillo? ¿Cuántas fuerzas participan en esta interacción?

● **PREGUNTA 6.5.**

¿Cómo puede acelerarse un cohete fuera de la atmósfera, donde no hay aire?

● **PREGUNTA 6.6.**

Cuando se dispara un rifle, ¿cómo es la magnitud de la fuerza que el rifle ejerce sobre la bala, en comparación con la fuerza que la bala ejerce sobre el rifle? ¿Cómo es la aceleración del rifle en comparación con la de la bala?

● **PREGUNTA 6.7.**

Un autobús que viaja a gran velocidad choca con un insecto que se aplasta contra el parabrisas. A causa de la fuerza repentina, el infortunado bicho sufre una desaceleración súbita. La fuerza que el insecto ejerce contra el parabrisas es ¿mayor, menor o igual a la que percibe el insecto? ¿La desaceleración resultante del autobús es mayor, menor o igual a la del insecto?

● **PREGUNTA 6.8.**

Las fuerzas de acción y reacción de la tercera ley de Newton:

- Están en la misma dirección.
- Tienen diferentes magnitudes.
- Actúan sobre diferentes objetos.
- Pueden ser la misma fuerza.

● **PREGUNTA 6.9.**

Un postigo de madera golpea una ventana de vidrio y la rompe. Entonces:

- La magnitud de la fuerza que el postigo ejerce sobre el vidrio es mayor que la magnitud de la fuerza que el vidrio ejerce sobre el postigo.
- La magnitud de la fuerza del postigo contra el vidrio es menor que la del vidrio contra el postigo.
- La magnitud de la fuerza del postigo contra el vidrio es igual a la del vidrio contra el postigo.
- Nada de lo anterior.

● **PREGUNTA 6.10.**

Un libro descansa sobre una superficie horizontal. Indique:

- Cuántas fuerzas actúan sobre el libro:
 - una
 - dos
 - tres
- La fuerza de reacción a cada fuerza sobre el libro.

● **PREGUNTA 6.11.**

Un corredor de 65 kg de masa inicia su carrera empujando hacia atrás sobre los tacos de salida, ubicados en la pista, con una fuerza de 200 N . Identifique la fuerza que provoca la aceleración del corredor.

- Su empuje sobre los bloques.
- La fuerza hacia abajo que ejerce la gravedad.
- La fuerza que los tacos ejercen sobre el corredor.
- La aceleración inicial cuando pierde contacto con los tacos de salida.

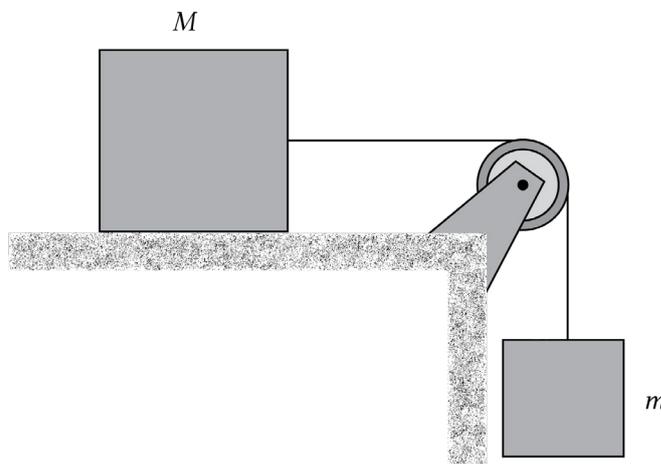
● **PREGUNTA 6.12.**

Si un auto de masa $m = 900\text{ kg}$ se desplaza con velocidad constante de 20 m/s . ¿Cuál es la fuerza resultante que actúa sobre él?

● **PREGUNTA 6.13.**

Analice la situación de la figura donde la masa $M = 100\text{ kg}$ y la masa $m = 500\text{ kg}$. Ambas están unidas con una cuerda que pasa por una polea sin fricción. La fricción entre la caja y la mesa mantiene el sistema en reposo. Indicar la magnitud de las fuerzas que actúan sobre la caja y el bloque. Determine qué condiciones deben satisfacer las dos masas y el coeficiente de rozamiento estático entre el bloque y la mesa para que el sistema permanezca en reposo.

Figura 6.16. Una caja de masa M es arrastrada por la caída de un bloque de masa m



● **PREGUNTA 6.14.**

Un caballo tira de un carro en un terreno plano. El caballo cree que conoce la tercera ley de Newton y le dice al carro que él va a ejercer una fuerza hacia adelante, y que el carro ejercerá una fuerza igual pero en dirección opuesta. Por lo tanto, explica al caballo, él nunca podrá mover el carro hacia adelante. ¿Puede explicarle usted al caballo que se equivoca? ¿Cómo puede el caballo mover el carro hacia adelante?

PROBLEMAS



Referencia general:

Curso Interactivo de Física en Internet

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/>

● **PROBLEMA 6.1. EL CAMIÓN Y EL AUTO PEQUEÑO**

Un camión de masa M cargado con 380 bolsas de cemento se dirige hacia el norte por la Ruta 40 a velocidad V_0 . El conductor, distraído por el paisaje, no se percató de que sobre la ruta se encuentra detenido un auto pequeño de masa m_A . La colisión resultante es totalmente elástica y de proporciones épicas.

- Haga un croquis de la situación y analice casos límites.
- Suponga que el camión, de masa $m_C = 10.000 \text{ kg}$, viaja a 108 km/h y que la masa del auto es 1000 kg y está inicialmente detenido. Calcule la velocidad final del camión y del auto suponiendo una colisión elástica. Calcule la energía cinética total inmediatamente antes y después de la colisión.
- Repita los cálculos anteriores suponiendo que el auto viajaba con una velocidad de 72 km/h^{-1} en la misma dirección y sentido que el camión.

● **PROBLEMA 6.2. RESPONSABILIDAD AL VOLANTE**

Imagine que usted es el conductor del auto pequeño del ejercicio anterior y que se dirige por la Ruta 40 hacia el sur a una velocidad de 110 kmh^{-1} , mientras un auto de masa $m = 800 \text{ kg}$ viaja a 100 km/h^{-1} , delante suyo. Debido a una mala maniobra de sobrepaso usted debe circular por la mano contraria y por eso choca frontalmente con el camión del punto anterior (misma masa y velocidad que en aquel caso). Calcule las velocidades de cada vehículo inmediatamente después de la colisión, suponiendo:

- Colisión totalmente inelástica.
- Colisión totalmente elástica.

● **PROBLEMA 6.3. CHOQUE EN LA PISTA DE PATINAJE**

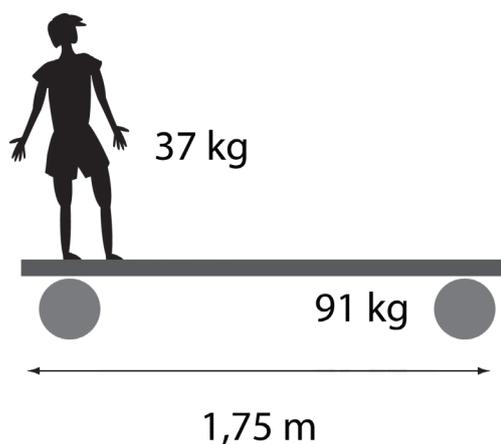
Un patinador con una masa $m_1 = 70 \text{ kg}$ que se mueve sobre el hielo a una velocidad de $2,5 \text{ m/s}$, choca frontalmente con una patinadora de masa $m_2 = 60 \text{ kg}$ que se mueve en sentido contrario con una velocidad de 2 m/s . Si después del choque ambos quedan unidos, determine la velocidad con que se mueve el conjunto.

● **PROBLEMA 6.4. UN NIÑO.**

Un niño con una masa de 37 kg , que está parado en el extremo de un acoplado de 91 kg y $1,75 \text{ m}$ de longitud, camina lentamente hasta el extremo opuesto del acoplado. Suponiendo que no hay rozamiento con el suelo, determine:

- Cuánto se desplaza el centro de masa del sistema formado por el acoplado y el niño.
- Cuánto se desplaza el niño respecto del suelo.
- Cuánto se desplaza el acoplado.

Figura 6.17. Un niño sobre una plataforma rodante

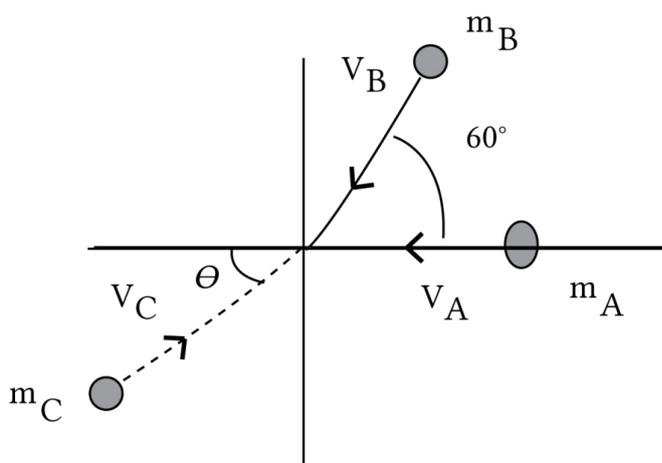


Fuente: Adaptado de Franco García, 2016.

● **PROBLEMA 6.5. BOLAS DE BILLAR**

Las tres bolas de billar de la figura tienen masas iguales de $0,2 \text{ kg}$ y se mueven hacia el origen sobre una mesa sin fricción con velocidades $v_A = 1 \text{ m/s}$ y $v_B = 2 \text{ m/s}$. Las tres bolas llegan al origen simultáneamente.

Figura 6.18. Bolas de billar



Fuente: Franco García, 2016.

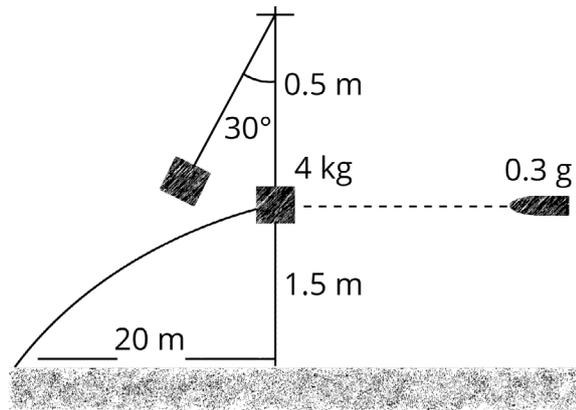
- ¿Qué valor debe tener V_C (módulo y dirección) para que, después del choque, las masas queden inmóviles en el origen?
- ¿Cuánta energía cinética se pierde en el choque?

● **PROBLEMA 6.6. OTRO PÉNDULO**

Una bala de fusil de masa $0,3 \text{ kg}$ y velocidad desconocida choca contra un cubo de metal de 4 kg suspendido de una cuerda de $0,5 \text{ m}$ de largo y en reposo. Después del choque el cubo se eleva hasta que la cuerda forma un ángulo de 30° con la vertical; mientras tanto la bala describe una parábola, impactando el suelo a 20 m de distancia horizontal y $1,5 \text{ m}$ por debajo. Calcular:

- La velocidad del cubo y de la bala inmediatamente después del choque.
- La velocidad de la bala antes del choque y la energía perdida en el mismo.
- La tensión de la cuerda cuando esta forma un ángulo de 10° con la vertical.

Figura 6.19. Otro péndulo

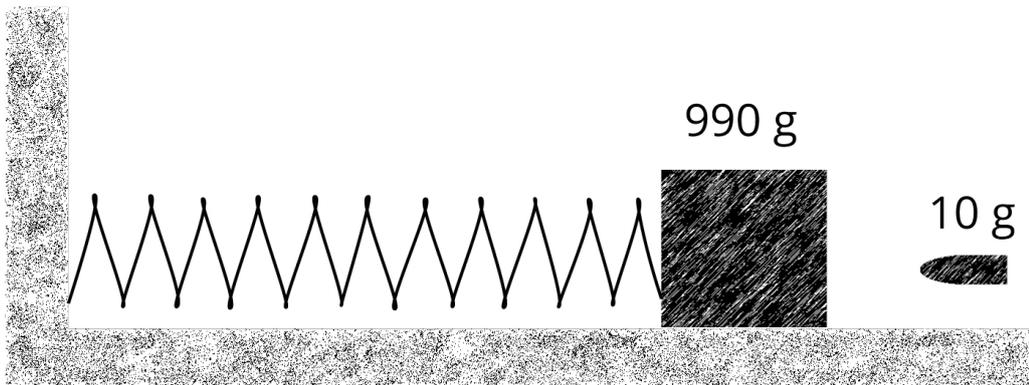


Fuente: Franco García, 2016.

● **PROBLEMA 6.7. OTRA BALA**

Una bala de 10 g se incrusta en un bloque de 990 g que descansa sobre una superficie horizontal sin fricción, sujeto a un resorte de constante $k = 800 \text{ N/m}$, tal como se ve en la figura. El impacto comprime el resorte 15 cm.

Figura 6.20. Una bala y un bloque de madera



Fuente: Adaptado de Franco García, 2016.

Calcular

- La velocidad del conjunto bloque + bala justo después del choque.
- La velocidad de la bala antes del choque.

● **PROBLEMA 6.8. CURIOSIDAD**

A veces, la curiosidad de los pasantes en la escena de un accidente de autos es tan grande que, mientras la gente mira para ver qué está pasando, se producen accidentes secundarios. Considere un auto deportivo de 800 kg que baja su velocidad hasta 13,0 m/s para observar la escena de un accidente mientras una camioneta de 1200 kg que viaja detrás suyo continúa viajando a 25,0 m/s, ¿cuál será la velocidad con que se mueven de los dos autos si los paragolpes quedaron unidos después de la colisión?

● **PROBLEMA 6.9. BUZO**

Un buzo de $85,0\text{ kg}$, dispara un arpón de $2,0\text{ kg}$ con una velocidad de 15 m/s a fin de cazar un tiburón. ¿A qué velocidad retrocede cuando dispara el arpón?

● **PROBLEMA 6.10. JUEGOS**

En la feria provincial de Cipoletti un hombre está entretenido con los juegos que se ofrecen. En uno de los puestos, lanza una esfera de $0,50\text{ kg}$ con una velocidad de $21,0\text{ m/s}$ con el fin de pegarle a una botella de $0,20\text{ kg}$ que se encuentra en un estante. Cuando da en el blanco, la botella sale volando hacia adelante con una velocidad $30,0\text{ m/s}$.

- ¿Cuál es la velocidad de la esfera después de pegarle a la botella?
- Si la masa de la botella fuera mayor, ¿cómo afectaría esto la velocidad final de la esfera?

● **PROBLEMA 6.11. COSMONAUTA**

Una cosmonauta rusa cuya masa es de 68 kg , sale de la estación espacial internacional para efectuar una revisión ocular de esta. Cuando está flotando a 15 m de la estación, su correa de seguridad queda atrapada en un trozo afilado de metal y se corta. Para intentar regresar a la nave, Valentina arroja su cámara de $2,0\text{ kg}$, alejándola de la estación espacial, con una velocidad de 12 m/s .

- ¿A qué velocidad viaja Valentina hacia la nave?
- Suponiendo que inicialmente Valentina está en reposo con respecto a la nave, ¿cuánto tiempo tardará en llegar a esta?

● **PROBLEMA 6.12. ALCE**

Un alce de masa 620 kg está parado sobre las vías del ferrocarril, encandilado por la luz de una locomotora, de masa 10000 kg que avanza a $10,0\text{ m/s}$. El conductor ve al animal, pero no puede bajar la velocidad del tren a tiempo y el alce cae en el sistema de captura de la locomotora. ¿Cuál es la nueva velocidad de la combinación locomotora + alce?

Lista de referencias bibliográficas

- Antippa, A. (1976). Inertia of Energy and the Liberated Photon. *American Journal of Physics* 44(9), pp. 841-844.
- Einstein, A. (1905). Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?. *Annalen der Physik*, 18, pp. 639-641.
- Einstein, A. (1906). The Principle of Conservation of the Center of Gravity and the Inertia of Energy. *Annalen der Physik*, 20, pp. 627-633.
- Einstein, A. (1935). Elementary Derivation of the Equivalence of Mass and Energy, *Bulletin of the American Mathematical Society.*, 41, pp. 223-230.
- French, A.P. (1968). *Special Relativity (M.I.T. Introductory Physics)*. New York: Series W.W. Norton & Co.
- Franco García, Ángel. (2016). Curso Interactivo de Física en Internet. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/index>.
- Harari, D. y Mazzitelli, D. (2006). *100 años de relatividad*. Buenos Aires: Eudeba.
- Hawking, S. (2004) *A hombros de gigantes*. Barcelona: Crítica.
- Sprott, J. C. (2006). *Physics demonstrations: a sourcebook for teachers of physics*. Madison: University of Wisconsin Press.
- Hewitt, P. (2010). *Física conceptual*. México: Addison Wesley.

Lista de figuras

- Crowell, Benjamin. (2006). Skaters showing newtons third law. [Ilustración]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skaters_showing_newtons_third_law.svg, CC BY-SA 3.0.
- Doug, Davis. (2001). Center of Mass. [Diagrama]. <http://www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1350/09Mom/CoM.html>

- Fowler, Michael. (s.f.). Caja de Einstein. [Diagrama]. http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/mass_and_energy.html
- Lecocq, Noé. (2006). Billiard Balls Showing The Transfer Of Momentum [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Billard.JPG>, CC BY-SA 4.0.
- Nave, Rod. (2016). Centro masa de un sistema de dos cuerpos. [Diagrama]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/cm.html>
- Niesen, Jitse. ArealVelocity with curved area. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ArealVelocity_with_curved_area.svg, CC BY-SA 3.0.
- Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández. (2014). Curso de física básica. Centro de masas [Gráfico]. <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/dinamsist/cdm.html>
- Usuario:Algarabia. (2006) Péndulo balístico. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moglfm19p13_pendolo_balistico.jpg. Dominio público.
- Usuario:Brews ohare. (2008). Two inertial frames translating each other. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Two_reference_frames.PNG, CC BY-SA 3.0.
- Usuario:DemonDeLuxe. (2006). Animation of Newton's cradle [Animación]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newtons_cradle_animation_book_2.gif. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Marc Lagrange. (2004). Centro di massa di un sistema di 4 punti di massa diversa. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Centro_di_massa.jpg

Interludio: Newton explica a Kepler

Vimos en el capítulo 4 que las leyes del movimiento planetario fueron descubiertas por Kepler sobre la base de observaciones de Tycho Brahe y las suyas propias. Newton mostró que esas leyes se explican a partir de las leyes de la dinámica y la ley de gravitación universal

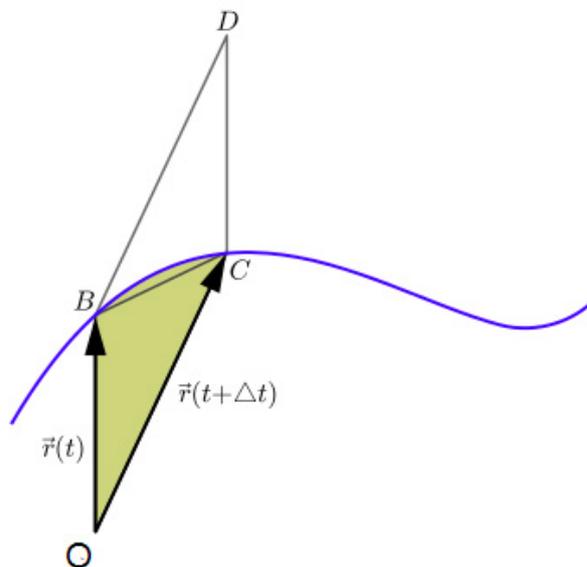
$$\vec{F} = \frac{-GMm}{r^2} \vec{\rho} \quad (I 6.1)$$

donde G es la constante de gravitación universal, M la masa del Sol, m la masa del planeta, r la distancia entre ambas masas y $\vec{\rho}$ un vector unitario en dirección radial de M a m .

La explicación de la primera ley, que las órbitas de los planetas son elipses, requiere desarrollos más allá del alcance de este libro.⁵ Esos desarrollos muestran que las trayectorias asociadas a una ley de fuerzas central, como (I 6.1), y que varía con la inversa del cuadrado de la distancia, son cónicas: elipses, hipérbolas o parábolas, según las condiciones iniciales.

La segunda ley (*el radio vector del planeta barre áreas iguales en tiempos iguales*) es consecuencia de la conservación de la cantidad de movimiento angular. Para ello, veremos qué relación existe entre el área barrida por el radio vector de una partícula que sigue una trayectoria y otras variables dinámicas.

Figura I 6.1. Velocidad areal. Posición, en dos instantes de tiempo sucesivos, de una partícula que se mueve siguiendo la trayectoria azul



Fuente: Jitse Niesen, 2013.

La figura ilustra el cambio del vector posición, que va desde el origen O hasta la partícula en B o en C , cuando esta se mueve siguiendo la trayectoria azul, desde el punto $\vec{r}(t)$ al punto $\vec{r}(t + \Delta t)$. Definimos la velocidad areal o areolar como la velocidad con que gira el radio vector de una partícula que describe una determinada trayectoria. Al tiempo t la partícula de la figura se encuentra en el punto B y al tiempo $t + \Delta t$, se ha desplazado al punto C . El área barrida por el radio vector

⁵ <https://es.wikipedia.org/wiki/Órbita>

OB de la partícula es la zona verde en la figura limitada, por un lado, por los segmentos OB y OC y, por otro, por la trayectoria de la partícula. La velocidad areal es la velocidad con que el radio vector OB barre el área verde y corresponde al área citada, dividida por el intervalo de tiempo Δt , en el límite en que este tiende a cero.

En la figura, el área barrida durante el período de tiempo Δt por la partícula es aproximadamente igual al área del triángulo OBC . Llamemos D al cuarto vértice del paralelogramo $OBDC$ que se muestra en la figura, de modo que se cumple la relación vectorial $OB + OC = OD$. El área del triángulo OBC es la mitad del área de paralelogramo $OBDC$. De acuerdo al álgebra vectorial, el área del paralelogramo $OBDC$ es igual al módulo del producto vectorial $OB \times OC$. Por lo tanto tenemos que el área del paralelogramo es

$$OBDC = |\vec{r}(t) \times \vec{r}(t + \Delta t)|$$

y el área del triángulo $OBC = A(t)$ es $\frac{1}{2} |\vec{r}(t) \times \vec{r}(t + \Delta t)|$. Como ya dijimos, la velocidad areal $\frac{d\vec{A}}{dt}$ es esta área dividida por Δt en el límite en que Δt tiende a cero, es decir

$$\frac{d\vec{A}(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}(t) \times \vec{r}(t + \Delta t)}{\Delta t} \right| \quad (16.2)$$

Introduciendo el vector velocidad de la partícula

$$\vec{v}(t) = \frac{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t))}{\Delta t} \quad (16.3)$$

nos queda

$$\frac{d\vec{A}(t)}{dt} = \frac{1}{2} |\vec{r}(t) \times \vec{v}(t)| \quad (16.4)$$

Por otra parte, el vector cantidad de movimiento angular de la masa m es

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad (16.5)$$

Este vector es perpendicular a \vec{r} y a \vec{v} que están en el plano de la órbita, y por lo tanto es perpendicular al plano de la órbita. De acuerdo a (16.4), el módulo $|\vec{L}| = L$ de ese vector vale

$$L = 2m \frac{dA}{dt} \quad (16.6)$$

La segunda ley de Kepler afirma que el radio vector desde el Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales lo que significa que el módulo de la velocidad areal es constante. De acuerdo con la relación (16.6) esto implica que –para el movimiento planetario– el módulo de la cantidad de movimiento angular es una magnitud conservada.

Veremos ahora cómo es la variación temporal del vector cantidad de movimiento angular \vec{L} , es decir evaluaremos $\frac{d\vec{L}}{dt}$. Para ello, usamos la relación

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt} (\vec{r} \times m\vec{v}) = m\vec{r} \times \frac{d\vec{v}}{dt} + m \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{v}$$

donde hemos aplicado la regla de la derivada de un producto, preservando el orden de los factores, pues se trata de un producto vectorial. Usando ahora la identidad

$m \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{v} = m\vec{v} \times \vec{v} = 0$ y la segunda ley de Newton $m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}$, la expresión anterior puede escribirse

$$\frac{dL}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{r} \times m\vec{v}) = m\vec{r} \times \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (16.7)$$

En el caso del movimiento de un planeta atraído por el Sol, F es una *fuerza central*, es decir que apunta siempre al centro de atracción, y por lo tanto $\vec{r} \times \vec{F} = 0$.⁶ Con esto resulta

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = 0 \quad (16.8)$$

En conclusión, la segunda ley de Kepler es una manifestación de la conservación de la cantidad de movimiento angular para un movimiento bajo la acción de una fuerza central.

Analizamos ahora la tercera ley, en el caso de la órbita circular de un planeta alrededor del Sol, como lo hizo Newton. Cuando un objeto se mueve en una trayectoria circular, la dirección del vector velocidad cambia continuamente, ya que en todo momento debe ser tangente a la circunferencia; esto significa que, aunque se mueva a velocidad orbital constante, el cuerpo experimenta una aceleración.

De acuerdo a la segunda ley de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$), si hay una aceleración debe haber una fuerza que la produzca. Para el caso del movimiento circular esa fuerza tira del objeto hacia el centro de la circunferencia, como cuando hacemos girar una piedra atada a un hilo, y se llama *fuerza centrípeta*. Su módulo puede depender de la masa m , de la velocidad v y del radio r de la órbita. Intentaremos encontrar el valor de esa fuerza mediante el análisis dimensional. Para ello proponemos una expresión de la forma

$$F_{cent} = m^X v^Y r^Z \quad (16.9)$$

donde X , Y y Z son exponentes a determinar; la fuerza F_{cent} debe tener dimensiones de N [newton]: luego 16.9 implica

$$[F_{cent}] = [kg]^X \cdot \left[\frac{m}{s}\right]^Y m^Z = kg \cdot \frac{m}{s^2} = N \quad (16.10)$$

donde ahora los símbolos son m para el metro, kg para kilogramo, s para segundo y N para Newton. Resolviendo para los exponentes obtenemos $X = 1$, $Y = 2$ y $Z = -1$, de donde sigue

$$F_{cent} = \frac{mv^2}{r} \quad (16.11)$$

Podría haber un factor numérico, la deducción exacta muestra que (16.11) es la expresión correcta.

Cuando hacemos girar un objeto atado a un hilo, la *fuerza centrípeta* es provista por el hilo. En el caso de los planetas que giran alrededor del Sol, la fuerza centrípeta es proporcionada por la atracción gravitatoria del Sol, por lo que debe cumplirse

⁶ El Sol y el planeta giran alrededor del centro de masa común. Como la masa del Sol es mucho mayor que la de los planetas, el centro de masa del sistema se ubica muy cerca del centro de aquel.

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (I 6.12)$$

Simplificando, obtenemos la relación

$$\frac{GM}{r} = v^2 \quad (I 6.13)$$

El tiempo que el planeta tarda en dar una vuelta completa a su órbita es el período T ; por otro lado, en ese tiempo el cuerpo recorre la circunferencia de la órbita, $2\pi r$; la velocidad v es entonces $v = \frac{2\pi r}{T}$. Combinando con el resultado

(I 6.12) obtenemos

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Reemplazando r por a obtenemos la forma conocida de la tercera ley de Kepler

$$T^2 = Ka^3 \quad (I 6.14)$$

donde la constante de proporcionalidad resulta $K = \frac{4\pi^2}{GM}$

PROBLEMAS

● **PROBLEMA I. 6. 1.**

Determinar la masa del Sol a partir del período de traslación de la Tierra en su órbita.

● **PROBLEMA I. 6. 2.**

Determinar la masa de la Tierra a partir del valor de la aceleración de la gravedad en nuestro planeta ($g = 9,80665 m / s^2$). Comparar con el valor obtenido a partir del período de la Luna.

● **PROBLEMA I. 6. 3.**

La masa de Júpiter es de $1,899 \times 10^{27} kg$ y su período orbital es $11a315d1,1h$. Determinar el radio medio de la órbita y la posición de su baricentro con el Sol.

● **PROBLEMA I. 6. 4.**

En el libro *El Principito* el personaje vive en un pequeño asteroide llamado B 612. Si el asteroide tiene un radio de $20 m$ y una masa de $10^4 kg$, calcule la aceleración de la gravedad y la velocidad de escape en el asteroide.

● **PROBLEMA I. 6. 5.**

La órbita del cometa Halley tiene una excentricidad $\varepsilon = 0,967$ y su distancia al perihelio es de $0,307499 UA$. Encontrar el período orbital y la velocidad en el perihelio y en el afelio.

● **PROBLEMA I. 6. 6.**

¿Cuánto tiempo tomará para que el radio vector del Sol a la Tierra gire 90° , a partir del perihelio? El período y la excentricidad de la Tierra son $T = 365,24 días$ y $\varepsilon = 0,01673$, respectivamente.

● **PROBLEMA I. 6. 7.**

Los astrólogos sostienen que nuestra personalidad está determinada por la posición de los planetas en el momento de nuestro nacimiento. Los científicos afirman que estos efectos gravitacionales son tan pequeños que son totalmente insignificantes. Compare la atracción gravitatoria entre usted y Marte con la atracción gravitatoria entre usted y su médico de 80 kg en el momento de su nacimiento, si el médico estuvo parado a $0,5\text{ m}$ de usted. (Nota: masa de Marte $M = 6,42 \times 10^{23}\text{ kg}$, distancia media Tierra-Marte $d_{T-M} = 7,83 \times 10^{10}\text{ m}$).

● **PROBLEMA I. 6. 8.**

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, contiene aproximadamente 4×10^{11} estrellas con una masa promedio de $2 \times 10^{30}\text{ kg}$ cada una. ¿A qué distancia está la Vía Láctea de la galaxia más próxima, Andrómeda, si esta contiene aproximadamente el mismo número de estrellas y ambas se atraen entre sí con una fuerza $2,4 \times 10^{30}\text{ N}$?

● **PROBLEMA I. 6. 9.**

Se presume que hay un agujero negro cuando una estrella visible es atraída por un compañero invisible cuya masa es más de tres veces la masa del Sol. Si una gigante roja es acelerada gravitacionalmente a $0,075\text{ m/s}^2$ hacia un objeto que se encuentra a $9,4 \times 10^{10}\text{ m}$ de distancia:

- ¿cuán grande debe ser la masa del cuerpo que no se ve?
- ¿Cuántas veces más masivo que el Sol es ese objeto? ($M_s = 1,99 \times 10^{30}\text{ kg}$).

● **PROBLEMA I. 6. 10.**

El satélite de Saturno, Titán, orbita ese planeta en poco menos de 16 días , a una distancia media de $1,216 \times 10^9\text{ m}$ del centro del planeta. Utilice esta información para encontrar la masa de Saturno.

● **PROBLEMA I. 6. 11.**

¿A qué distancia del centro de la Tierra debe estar una nave espacial para que experimente la misma atracción gravitatoria por parte de la Tierra y de la Luna cuando se encuentra a la misma distancia de ambos? ($M_T = 5,98 \times 10^{24}\text{ kg}$, $M_L = 7,35 \times 10^{22}\text{ kg}$, $d_{T-L} = 3,84 \times 10^8\text{ m}$).

● **PROBLEMA I. 6. 12.**

El satélite galileano más cercano a Júpiter, lo, está cubierto de volcanes activos, que se deben a la intensa atracción gravitatoria sobre el satélite por parte de Júpiter y las otras lunas cercanas. lo gira a $4,2 \times 10^8\text{ m}$ del centro de Júpiter; los otros satélites están ubicados de la siguiente manera a partir del centro de Júpiter: Europa: $6,7 \times 10^8\text{ m}$, Ganímedes: $1,0 \times 10^9\text{ m}$ y Calisto: $1,9 \times 10^9\text{ m}$. Si Júpiter y sus satélites estuvieran alineados, ¿qué fuerza gravitatoria experimentaría lo? ($M_J = 1,9 \times 10^{27}\text{ kg}$, $M_I = 8,9 \times 10^{22}\text{ kg}$, $M_E = 4,9 \times 10^{22}$, $M_G = 1,5 \times 10^{24}\text{ kg}$, $M_C = 1,1 \times 10^{23}\text{ kg}$).

● **PROBLEMA I. 6. 13.**

La Luna tiene aproximadamente $1/80$ de la masa terrestre, mientras que el Sol es aproximadamente 330.000 veces más masivo que nuestro planeta. Por otro lado, la Luna está a unos 380.000 km de la Tierra y el Sol a 150 millones de km . Compare la fuerza que estos dos astros ejercen sobre nuestro planeta.

ESTRUCTURA DE LA MATERIA (EL SEÑOR GELL-MANN)

Lo que es especialmente sorprendente y notable es que en la física fundamental es más probable que sea correcta una teoría bella o elegante que una teoría poco elegante.

Murray Gell-Mann

7.1. Introducción

Como dice Marco Antonio Moreira (2011):

La física de partículas es posiblemente el mejor ejemplo de la física que se desarrolla en la actualidad. En este tema se muestra con claridad el proceso de construcción del conocimiento en física y el carácter provisorio de las teorías. El Modelo Estándar es una excelente teoría, la más completa jamás producida por el hombre sobre la estructura del universo, pero es provisorio. En algún momento seguramente habrá otra, que tampoco será la última. En la física de partículas resulta explícita la interdependencia entre teoría y experimentación. Una orienta a la otra, a veces una precede a la otra, a veces esa misma sigue a la otra.



**MURRAY
GELL-MANN**

Fuente: Michael Wuertenberg, 2012.

Egresado de la Universidad de Yale en 1948 y doctorado en MIT en 1951. En 1952 ingresó al Instituto de Estudios Avanzados y fue profesor en la Universidad de Chicago. Trabajó en interacciones fuertes y electromagnéticas y luego la teoría de las interacciones débiles. Es miembro del Instituto de Santa Fe, y profesor emérito de Caltech, donde ingresó como profesor en 1955. En 1969 recibió el Premio Nobel por su trabajo sobre las partículas elementales. Escribió *El Quark y el Jaguar* (1994) donde presenta sus ideas sobre simplicidad y complejidad. Desarrolló el llamado *camino óctuple* que puso orden en el caos creado por el descubrimiento de unos 100 tipos de partículas en colisiones de alta energía. Postuló que todas, incluyendo el neutrón y el protón, se componen de tres bloques fundamentales que llamó quarks, idea plenamente confirmada por la experiencia. Colaboró en la formulación de la cromodinámica cuántica, que da cuenta de todas las partículas nucleares y sus interacciones. Se interesa por una variedad de problemas como lingüística, arqueología, historia natural, psicología del pensamiento creativo, evolución biológica y cultural y el aprendizaje. En el Instituto de Santa Fe se centró en sistemas complejos adaptativos y en el Programa de Idiomas Humanos.

En este capítulo se presenta un resumen histórico de las hipótesis sobre la estructura de la materia que comienza por las ideas de los griegos, pasa por las teorías de los químicos y llega a la moderna teoría atómica.

Esta historia, que surge de la inquietud del hombre por conocer el origen de las cosas, es una de aquellas de las que se tiene registro desde la Antigüedad. Se inicia como una inquietud filosófica que luego se fue materializando en sucesivos modelos cada vez más cercanos a la realidad, al constatarse las evidencias teóricas con las experimentales.

Actividad 7.1

Haga un registro de los sucesivos modelos de la materia y sus autores a medida que avanza en la lectura, utilizando el siguiente esquema (complete la tabla 7.1).

Tabla 7.1. Modelos de la materia

Año	Científico	País	Modelo	Justificación
400 a. C.	Demócrito	Grecia	Átomo	No

Con el fin de avanzar hacia lo más pequeño, en este capítulo retomamos la idea de la microscopía electrónica (capítulo 3) para describir los aceleradores que permitieron explorar el interior del protón y del neutrón, detectando los componentes fundamentales que componen esas partículas. Daremos una idea de cómo los físicos, tomando como modelo el trabajo sistemático de Mendeleiev consiguieron, en la década de 1960, ordenar un *verdadero zoológico* de partículas que se creían elementales, hasta llegar a las doce que hoy son aceptadas como las verdaderas *partículas fundamentales*, de lo que está hecho todo lo demás. El capítulo finaliza con la presentación de una somera idea sobre el bosón de Higgs.

Figura 7.1. Acelerador LHC del CERN, en Ginebra



Fuente: Maximilien Brice, CERN, 2008.

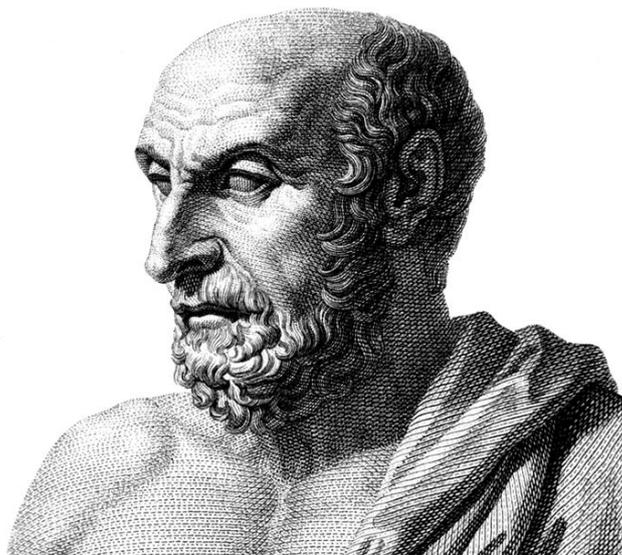
7.2. Demócrito

Hace más de veinte siglos Demócrito desarrolló una teoría, postulada por su maestro Leucipo, que sostenía que la materia está formada por partículas pequeñísimas. Como todas las teorías filosóficas griegas, esta idea no se apoyaba en hallazgos experimentales, sino que se basaba solo en el razonamiento. La teoría atomista de Demócrito puede ser esquematizada así:

- Los átomos son eternos, indivisibles, homogéneos, incompresibles e invisibles.
- Los átomos se diferencian solo por su forma y tamaño, pero no por cualidades internas.
- Las propiedades de la materia varían según el agrupamiento de los átomos.

Demócrito consideraba que toda la materia es una mezcla de elementos originarios que poseen las características de inmutabilidad y eternidad, concebidos como entidades infinitamente pequeñas y, por tanto, imperceptibles para los sentidos, a las que llamó *átomos* (*ἄτομοι*), que en griego significa ‘indivisible’.

Figura 7.2. Demócrito



Fuente: Alexander Day.

Los cambios observados en las propiedades, al pasar de un material a otro, eran atribuidos a las distintas combinaciones de átomos inmutables. Para posibilitar el movimiento de los átomos, postuló la existencia del espacio vacío como una entidad real en la cual los átomos podían moverse.¹

7.3. Tiempos modernos

En el siglo XVII el francés Descartes cuestionó la idea de átomos indivisibles y el concepto de vacío y con ello, la base de la teoría de Demócrito. Pensaba que el *vacío* representa una contradicción de términos, ya que donde hay espacio debe haber

¹ El análisis de la afirmación «La Naturaleza aborrece el vacío», sostenida por los aristotélicos, fue una de las discusiones clave de la revolución científica del siglo XVII, siendo Pascal su principal oponente. (*Horror vacui*, 2019, 14 de octubre.)

extensión y, por lo tanto, materia. A pesar de esta identificación de la materia con el espacio, ofreció una teoría completa de las partículas más pequeñas.

A comienzos del siglo XVIII Bernoulli propuso que las propiedades de los fluidos podían explicarse si estos se consideraban constituidos por un gran número de partículas infinitamente pequeñas que se mueven al azar con gran velocidad. En 1738 publicó un tratado sobre los gases, *Hydrodynamica*, que es considerado la primera introducción a la teoría cinética de la materia. Estas hipótesis fueron aceptadas y verificadas por los trabajos posteriores de Louis Proust, Joseph Louis Gay-Lussac, John Dalton y Amedeo Avogadro.

Proust fue el primero en acumular evidencia en favor de la *ley de las proporciones definidas*, que afirma que todo compuesto químico contiene proporciones fijas y constantes (en peso) de sus elementos constitutivos. A pesar de que otros ya habían supuesto la validez de este principio, Proust acumuló evidencia definitiva a su favor en una serie de experimentos sobre la composición de muchas sustancias, especialmente los óxidos de hierro.

La citada ley fue formulada en forma precisa en 1808, en la teoría atómica de Dalton, quien convirtió la filosofía atómica de los griegos en una teoría científica; su libro *Nuevo sistema de la filosofía química* constituye la primera aplicación de la teoría atómica a la química. Proveyó una imagen física de cómo los elementos se combinan para formar compuestos y dio una razón fenomenológica para apoyar la idea de que los átomos son reales. A partir de la ley de proporciones definidas, dedujo *la ley de las proporciones múltiples*, que establece que cuando dos elementos pueden formar más de un compuesto, combinándose en más de una proporción en peso, el peso de un elemento en un compuesto se encuentra en razón simple y entera a su peso en el otro compuesto. Dalton sabía que el oxígeno y el carbono pueden combinarse para formar dos compuestos diferentes y que el dióxido de carbono, CO_2 , contiene el doble de oxígeno, en peso, que el monóxido de carbono, CO . En este caso, la razón de la cantidad de oxígeno en un compuesto a la cantidad de oxígeno en el otro es la razón simple y entera 2 : 1.

Gay-Lussac tomó la relación entre las masas propuesta por Dalton y la extendió a una relación entre los volúmenes de los gases, que se conoce como *la ley de Gay-Lussac* para la combinación de gases. Su trabajo planteó la cuestión de si los átomos eran diferentes a las moléculas y, en ese caso, cuantos átomos y moléculas hay en un volumen dado de gas.

Figura 7.3. Amedeo Avogadro



Fuente: C. Sentier, 1856.

El enigma fue resuelto en 1811 por Avogadro, usando los resultados de los trabajos de Dalton y partiendo de dos hipótesis:

- 1) Los átomos de los gases elementales pueden unirse en moléculas en lugar de existir como átomos separados, como afirmaba Dalton.
- 2) Volúmenes iguales de gases (a la misma presión y temperatura) contienen igual número de moléculas.

Estas hipótesis explican por qué se requiere solo la mitad de volumen de oxígeno para combinar con un volumen de monóxido de carbono a fin de formar dióxido de carbono. Cada molécula de oxígeno tiene dos átomos, y cada átomo de oxígeno se une a una molécula de monóxido de carbono.

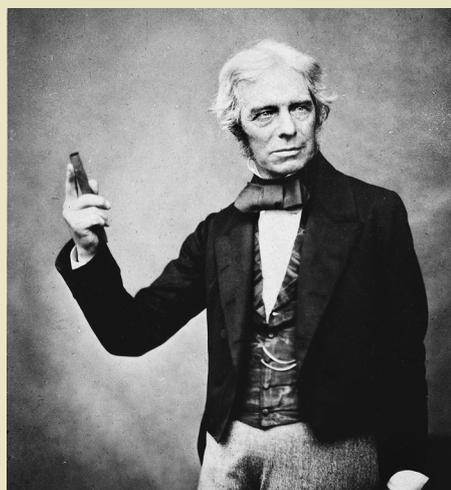
A pesar de estos avances, las ideas de Avogadro no fueron aceptadas hasta la década de 1860. En 1858 el químico italiano Stanislao Cannizzaro hizo cuidadosos experimentos de reacción entre gases que lo llevaron a revivir las ideas de Avogadro; expuso sus resultados en el Primer Congreso Internacional de Química, realizado en 1860 en Karlsruhe. Un asistente a ese congreso escribió luego que, cuando escuchó hablar de las teorías de Avogadro, «fue como si las vendas hubieran caído de mis ojos, la duda desapareció y fue reemplazada por una sensación de certeza muy pacífica». En pocos años, las hipótesis de Avogadro fueron ampliamente aceptadas.

El químico austriaco Johann Josef Loschmidt hizo avances importantes en el estudio de los hidrocarburos, que representaron también aportes al modelo atomista. Efectuó el primer cálculo preciso del tamaño de las moléculas de oxígeno y de nitrógeno llegando a un resultado algo menor que $10^{-9} m$ para el diámetro de las moléculas, bastante próximo al valor aceptado de $0,5 \times 10^{-9} m$.

Hacia 1860 el ruso Dimitri Mendeleiev desarrolló una tabla periódica de los elementos según el orden creciente de sus masas atómicas. Ubicó los elementos en filas horizontales, pasando a una nueva fila cada vez que las propiedades se repetían. Este esquema le permitió predecir con bastante exactitud las propiedades de elementos todavía desconocidos.

El descubrimiento del germanio y la similitud de sus propiedades con un elemento previsto por Mendeleiev para ese lugar de la tabla lograron la aceptación general del sistema de ordenamiento que, con leves cambios, continúa aplicándose hasta hoy. La razón por la que las propiedades de los elementos se repiten periódicamente solo fue aclarada en el siglo xx, por la mecánica cuántica.

Naturaleza atómica de la electricidad



Michael Faraday

Fuente: Maull y Polyblank, 1860 ca.

Las primeras teorías sobre la naturaleza de la electricidad la consideraban como un fluido. Una importante evidencia sobre la naturaleza corpuscular de la electricidad se debe a Faraday, quien demostró en un circuito serie que contenía una cuba con ácido y otra con una sal de Ag , la razón entre el peso de depositado en el electrodo negativo y la masa de hidrógeno acumulado en el mismo tiempo, toma el valor $107,1/1$, razón del peso atómico de Ag respecto al peso atómico del H . Esta evidencia y la de otros experimentos similares, llevaron a Faraday a enunciar las leyes de la electrólisis:

1. La cantidad de un elemento que se deposita en el electrodo de una celda es proporcional a la cantidad de electricidad que pasó por la celda.
2. Iguales cantidades de electricidad depositan igual número de equivalentes-gramo (peso molecular dividido por la valencia).

Estas experiencias permitieron la primera medición de la carga eléctrica a partir del número de Avogadro. Para un elemento de valencia v y peso atómico M el paso de una corriente I durante un tiempo t deposita una masa m y se cumple

$$I \times t = \frac{em}{M} v N_A$$

donde e es la carga del electrón. De esta manera es posible determinar la carga e con la precisión con que se conozca el número de Avogadro N_A .

En 1911 estudiando la emisión de partículas alfa por el elemento radio y por otros elementos,² Rutherford demostró que la carga nuclear en un átomo es proporcional al peso atómico del elemento.³

El modelo de Bohr (sección 8. 3) permitía recuperar los datos experimentales para el espectro de emisión del hidrógeno a partir de la relación también propuesta por Bohr, que establece que cuando un electrón decae desde un nivel atómico inicial con número cuántico n_i a un nivel final con número n_f la frecuencia de la luz emitida está dada por

$$h\nu = E_i - E_f = R_E \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (7.1)$$

La extensión del modelo de Bohr a átomos más complejos, como por ejemplo helio, que tiene dos electrones, no fue posible. Veremos en el capítulo 9 que esta situación solo fue superada cuando se elaboró una nueva teoría de la materia, la *mecánica cuántica*.

En 1912 el holandés Antonius van der Broek notó que el peso atómico de un elemento, expresado en múltiplos del peso del hidrógeno, era aproximadamente igual a la carga del núcleo, expresado en múltiplos de la carga elemental; más tarde esa cantidad de carga fue llamada *número atómico* y comenzó a ser usada para ordenar los elementos en la tabla periódica. Por su parte, Henry Moseley observó que la sistemática de las líneas de emisión de rayos x permitía ordenar los elementos de una forma que coincidía con la ordenación por los números atómicos, incluyendo los isótopos.

Actividad 7.2

Resuma los puntos señalados en esta sección en una recta histórica.

7.4. Evidencias directas sobre los átomos

Seguramente las teorías atómicas se hubieran afianzado rápidamente si un poderoso microscopio le hubiera permitido a Avogadro o a cualquiera de los demás científicos interesados en este tema ver los átomos en forma directa, un objetivo que aún hoy no es fácilmente alcanzable.

En 1827, el botánico escocés Robert Brown se sorprendió al observar que, con un microscopio de suficiente aumento, podía ver la agitación de partículas de polen suspendidas en agua, fenómeno que también pudo ver en una variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas.

Albert Einstein publicó en 1905 un trabajo, fundamental en la historia de la física, en el que propuso un modelo físico para describir el movimiento observado por Brown, el *movimiento browniano*. El resultado que obtuvo condujo a una confirmación de la teoría molecular de la materia. El físico francés Jean Baptiste Perrin realizó experimentos sobre el movimiento browniano—que analizó a la luz de los resultados de Einstein—y pudo así determinar el número de Avogadro, por lo cual le fue concedido el Premio Nobel en 1926.

2 La partícula alfa consiste de dos protones y dos neutrones y es idéntica a un núcleo de helio. Es una estructura muy estable.

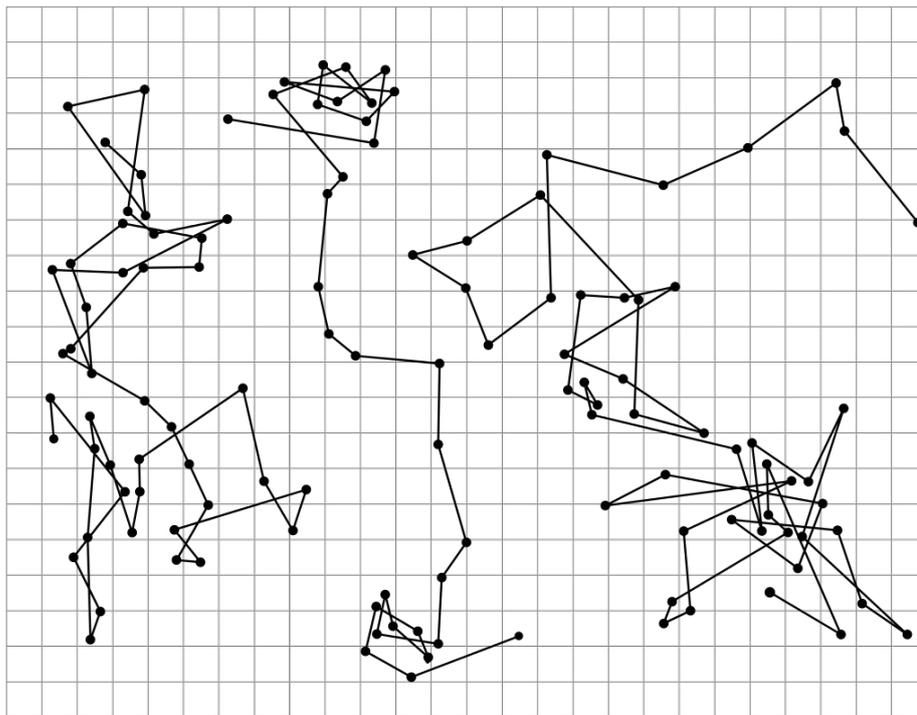
3 El peso atómico de un elemento (o masa atómica) es la masa de un átomo expresada en unidades de masa atómica ($1/12$ de la masa de un átomo de carbono-12). En un átomo, los protones y neutrones del núcleo dan cuenta de casi la totalidad de la masa, y la masa atómica tiene casi el mismo valor que el número másico $A = Z + N$ (Z número de protones, N número de neutrones).

La conclusión actual sobre este fenómeno es que, como las partículas en suspensión son de mucho mayor tamaño que las moléculas del líquido, el movimiento que se observa es el resultado de las colisiones de esas moléculas con las partículas en suspensión; por ello, las leyes del movimiento de esas partículas se relacionan con la dinámica molecular del líquido.

En el caso específico del movimiento aleatorio de las partículas de polen que flotan en agua, sabemos que una molécula de agua mide aproximadamente 1 nm (10^{-9} m) de longitud mientras que una partícula de polen tiene aproximadamente $1 \mu\text{m}$ (10^{-6} m) de diámetro, mil veces mayor. De este modo, una partícula de polen puede ser considerada como una gran pelota de básquet empujada constantemente por los choques de otras pelotas mucho más pequeñas.

La figura 7. 4 muestra la trayectoria de una partícula de polen suspendida en agua. El tipo de movimiento que realiza corresponde a lo que se denomina una *caminata aleatoria*.⁴ El problema es comparable al de un borracho que pretende regresar a su casa pero no consigue alejarse mucho del punto de partida porque cada nuevo paso que da no guarda ninguna correlación con el anterior.

Figura 7. 4. Trayectoria de una partícula suspendida en un líquido. Los quiebres en la trayectoria son evidencia de las colisiones con las moléculas del medio. Las imágenes corresponden al trabajo original de Perrin



Fuente: Jean Baptiste Perrin, 1909; MiraiWarren.

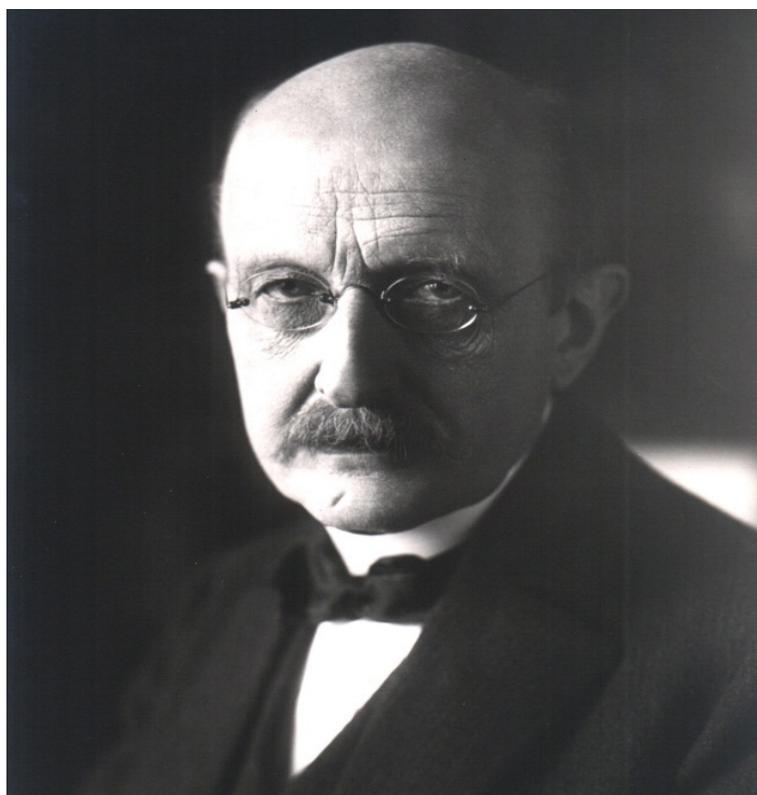
7.5. Un edificio perfecto

Cuando en 1875 Max Planck, quien entonces tenía 17 años, consultó a su profesor Philipp von Jolly sobre su idea de dedicarse al estudio de la física, este le respondió que en física lo esencial ya había sido descubierto y que quedaban pocos huecos por rellenar, una concepción que compartían otros científicos de su tiempo. Planck

⁴ Aleatorio, del latín *aleatorius*, propio del juego de dados.

respondió a su profesor que no tenía interés en descubrir nuevos mundos, sino en comprender los fundamentos de la física y finalmente se decidió por esta materia.

Figura 7.5. Max Planck



Fuente: Autor anónimo, ca. 1930.

Por esa época, el edificio de la física parecía estar firmemente establecido. Podían distinguirse claramente dos grandes constituyentes del universo: *materia* y *radiación*. La materia está formada por corpúsculos perfectamente localizables que obedecen las leyes de Newton de la mecánica, que se había aplicado exitosamente a los cuerpos de dimensiones macroscópicas y a los cuerpos celestes. Pronto fue extendida al campo microscópico, primero para explicar la teoría cinética de los gases y luego como herramienta de la hipótesis atómica.

Por otra parte, la radiación obedece las leyes de Maxwell y no hay inconveniente en describir esos sistemas como un continuo –los campos– con un número infinito de grados de libertad. Las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de *ondas*, que fueron demostradas experimentalmente por Hertz. Originariamente las *ondas electromagnéticas* fueron asociadas a vibraciones de un medio material, el éter, al cual se le atribuían diferentes propiedades según el tipo de experimento que quisiera explicarse.

Una de las preocupaciones de la física de esa época era determinar el estado de movimiento de la tierra con respecto al éter. Los experimentos realizados por Albert Michelson y Edward Morley, usando un interferómetro óptico, no daban respuesta al interrogante. Esto, junto a otras dificultades de la teoría clásica, dio inicio al desarrollo de la teoría de la relatividad por Einstein.

El descubrimiento en 1896 de la radiactividad por parte de Becquerel, que compartió el Premio Nobel de 1903 con Pierre y Marie Curie, puso a disposición de los físicos las partículas alfa que fueron luego empleadas por Ernest Rutherford en 1911 para ahondar los estudios sobre las propiedades de la materia.

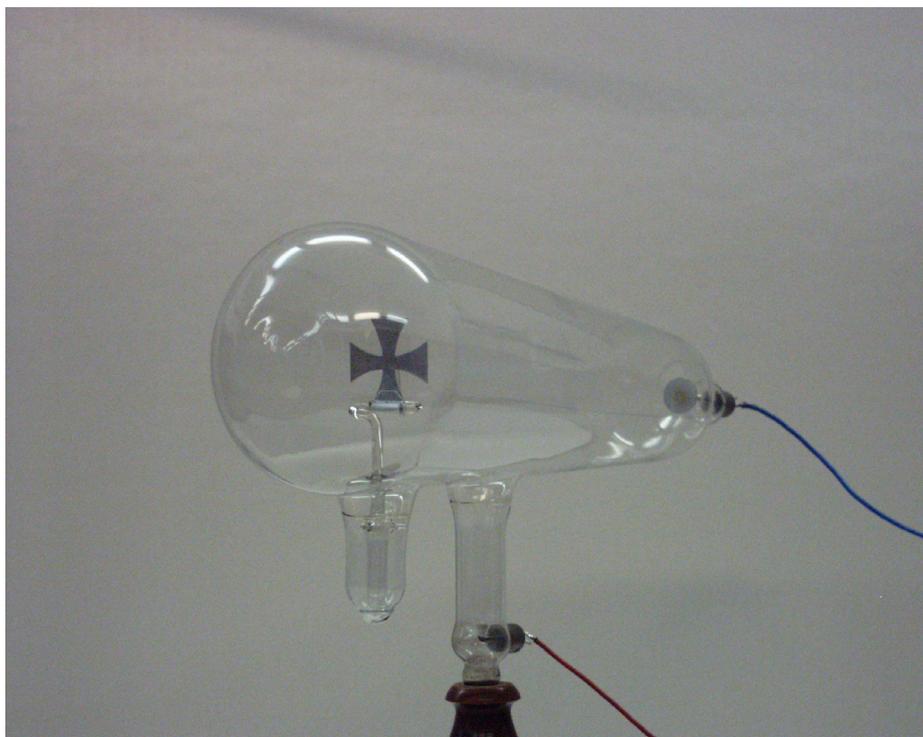
Este edificio empezó a temblar cuando se produjeron nuevos descubrimientos. El electrón fue identificado en 1897 por J. J. Thomson, como una partícula constitutiva del átomo. Al poco tiempo, se consiguió describir su movimiento en presencia de campos electromagnéticos y su interacción con estos. En 1910, Millikan determinó su carga en forma casi directa.

7.6. Thomson descubre el electrón

A fines del siglo XIX las descargas eléctricas en gases adquirieron importancia cuando permitieron establecer una relación entre la hipótesis atómica de la materia y los principios del electromagnetismo.

J. J. Thomson diseñó un dispositivo formado por un tubo que contenía un gas a baja presión, con electrodos metálicos en sus extremos a los que aplicaba una diferencia de potencial elevada, como en el tubo que se muestra en la figura 7.6. La baja presión disminuye la frecuencia de colisiones de las partículas que se propagan en el interior. Los rayos emergentes del cátodo pasaban por un pequeño orificio en una placa (colimador) y luego por entre dos placas metálicas a las que se aplicaba una diferencia de potencial, lo que creaba un campo eléctrico. Finalmente, los rayos se proyectaban sobre una pantalla fluorescente. Se llamaron rayos catódicos porque viajan del cátodo (-) al ánodo (+).

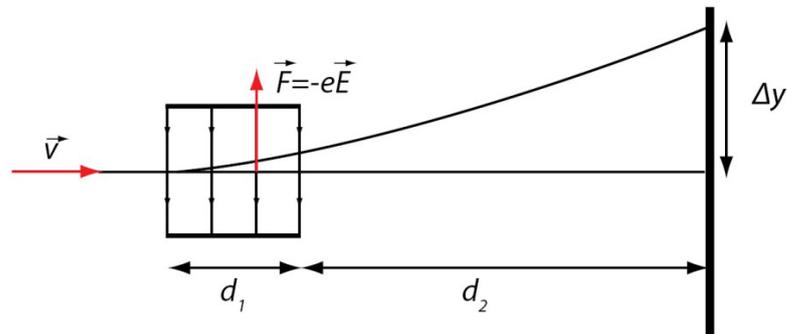
Figura 7.6. Tubo de rayos catódicos. Se observa el tubo donde está encerrado el gas y los dos electrodos que produce la descarga que ioniza al gas



Fuente: Zátanyi Sándor, 2002.

Thomson observó que el campo eléctrico desviaba los rayos catódicos hacia la placa positiva, lo que probaba que la carga de esos rayos era negativa. Probaba también que tenían masa, que se asociaba a la inercia. Por tanto, debía tratarse de una partícula, a la que se llamó *electrón*.

Figura 7.7. Esquema del dispositivo de Thomson para determinar la relación entre la carga e y la masa m del electrón



Fuente: Adaptado de Hiru.eus.

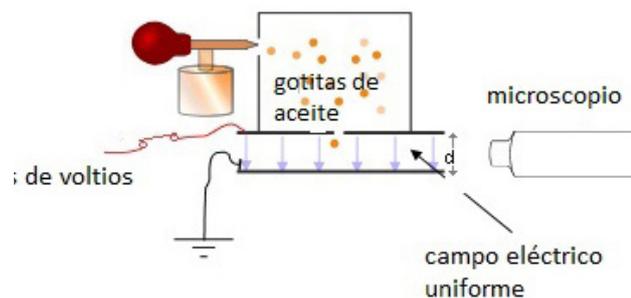
El resultado obtenido por Thomson para la razón entre la carga y la masa del electrón fue $\frac{e}{m} = 1,758796 \times 10^{11} \text{ Ckg}^{-1}$. En 1904 propuso el modelo del *budín de ciruelas* para el átomo, con el fin de dar cabida al electrón en el átomo. En este modelo, el átomo se compone de electrones, rodeados por una *sopa de carga positiva* para equilibrar la carga negativa de los electrones –como si fueran ciruelas con carga negativa rodeadas de un budín de carga positiva.

Se pensaba que los electrones (como los conocemos hoy en día) estaban en todo el átomo, pero con estructuras que permitían ubicar muchos electrones. En vez de una sopa, a veces se decía que el átomo tenía una *nube* de carga positiva.

7.7. El experimento de Millikan de la gota de aceite

Entre 1909 y 1913, Millikan desarrolló un conjunto de experimentos mediante los cuales intentaba medir la carga del electrón, demostrando así la naturaleza discreta de la carga eléctrica. El dispositivo utilizado constaba de dos láminas metálicas paralelas, como un condensador eléctrico. Por un pequeño agujero en la placa superior se introducían gotitas de aceite, eléctricamente cargadas por rozamiento en un pulverizador. Un haz de luz horizontal iluminaba las gotitas, que eran observadas a través de un lente o antejo especial. El brillo de las gotitas contra el fondo oscuro permite determinar la velocidad de su caída. La figura 7.8 muestra el sistema empleado.

Figura 7.8. Esquema del experimento de Millikan para determinar la carga del electrón



Fuente: Theresa Knott, 2004

En ausencia de campo eléctrico actúa el peso aparente $W = \frac{4\pi}{3} r^3 g (\rho - \rho_{aire})$

hacia abajo y la fuerza de fricción con el aire, hacia arriba. La fuerza de fricción F_f puede calcularse por la llamada *ley de Stokes*,

$$F_f = 6\pi r \eta v$$

donde v es la velocidad instantánea, η la viscosidad del aire y r el radio de la gota. La caída de la gota es acelerada al principio hasta que la fuerza de roce iguala al peso aparente y alcanza la *velocidad terminal*, v_1 y continúa cayendo a velocidad constante pues la aceleración es nula. Esta condición implica $F_f = W$ y por lo tanto

$$r^2 = \frac{9\eta v_1}{2g(\rho - \rho_{aire})}$$

Conocido r , puede calcularse la fuerza vertical debida al peso, $F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 g \rho$.

Si se vuelve a activar el campo eléctrico, actúa la fuerza eléctrica $F_E = qE$ donde q es la carga de la gota de aceite y E el campo eléctrico entre las placas, $E = \frac{V}{d}$ para

placas paralelas donde V es la diferencia de potencial y d la distancia entre las placas. Una forma de calcular q sería ajustar V hasta que la gota de aceite no caiga, algo difícil de lograr en la práctica. Además, la determinación de F_E no resulta simple debido a que la masa de la gota de aceite es difícil de determinar. Una alternativa más práctica es controlar el potencial V para que la gota de aceite se eleve con una nueva velocidad terminal v_2 . Entonces:

$$qE - F_g = 6\pi r \eta v_2 = F_g \frac{v_2}{v_1}$$

de donde sigue

$$q = \frac{F_g}{E} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Millikan encontró que la carga de las gotas correspondía a múltiplos enteros de $1,6C$, la carga del electrón.

La masa del electrón puede determinarse a través de la constante de Rydberg, ecuación (8.9), y de otras constantes fundamentales.

7.8. El experimento de Rutherford

El descubrimiento en 1896 de la radiactividad por parte de Becquerel permitió vislumbrar que se podía iniciar el estudio del núcleo atómico, donde quizá también las leyes conocidas iban a demostrar su capacidad de adaptación: desde los planetas más remotos hasta los recónditos rincones del núcleo atómico.

El conocimiento sobre el espectro de la radiación electromagnética avanzaba a la par de estos conocimientos sobre la estructura de la materia. Alrededor de 1910, pocos años después del descubrimiento del electrón, dos estudiantes avanzados de Rutherford –Hans Geiger y Ernest Marsden– realizaron experimentos de dispersión de partículas alfa que atravesaban una lámina de oro y encontraron que

Modelo de Bohr

Este modelo intentaba explicar la estabilidad de la materia y los espectros de emisión y absorción. Imaginó al átomo de hidrógeno con el protón en el centro y un electrón girando a su alrededor, como en un sistema planetario. Postuló que las órbitas resultan de la aceleración centrípeta que se debe a la fuerza atractiva de Coulomb. Por lo tanto se cumple

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{k_e e^2}{r^2}$$

donde m_e es la masa y e la carga del electrón y k_e la constante de Coulomb. De aquí sigue para el radio de la órbita

$$r = k_e \frac{e^2}{m v^2}$$

Para la energía tenemos

$$E = T + V = \frac{1}{2} m v^2 - k_e \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2} k_e \frac{e^2}{r}$$

Bohr postuló que solo están permitidas las órbitas cuya cantidad de movimiento angular cumple

$$L = n \hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

Donde $n \geq 1$ es un número entero (número cuántico principal). Los radios de las órbitas permitidas, resultan

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{k_e e^2 m_e}$$

El valor más pequeño ($n=1$) es el radio de Bohr y corresponde al estado fundamental del átomo.

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{k m e}$$

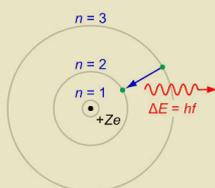
La energía de cada nivel es

$$E_n = \frac{-1}{2} k_e \frac{m_e e^4}{n^2 \hbar^2} = \frac{13,6}{n^2} eV$$

Adicionalmente, supuso que el electrón solo emite o absorbe energía cuando salta de una órbita permitida a otra. En estos saltos emite o absorbe un fotón cuya energía es la diferencia de energía entre ambos niveles. Entonces según la ley de Planck se cumple

$$h\nu_{n_1, n_2} = E_{n_1} - E_{n_2}$$

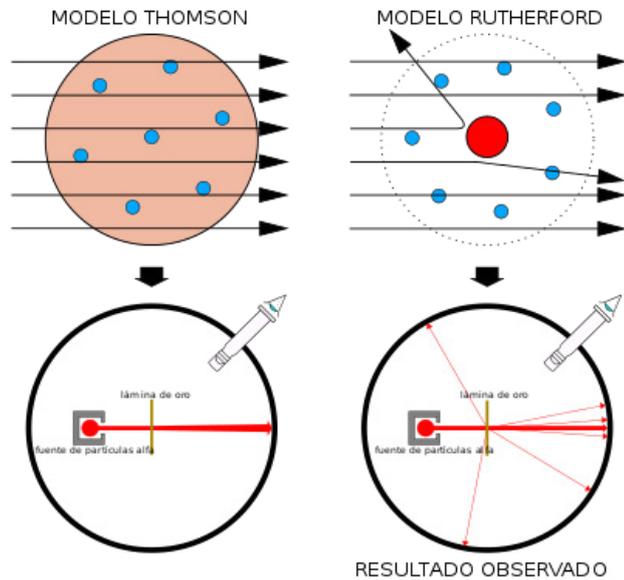
donde n_1 identifica la órbita inicial y n_2 la final, y ν_{n_1, n_2} es la frecuencia resultante.



Fuente: JabberWok, 2007.

algunas de estas eran dispersadas en ángulos muy grandes respecto a su dirección original, como si rebotaran en la lámina de oro.

Figura 7.9. El experimento de Rutherford



Fuente: Kurzon, 2014.

Rutherford mostró que esas observaciones no concordaban con el modelo atómico del *budín de ciruelas*, propuesto por Thomson, ya que un átomo de ese tipo solo produciría pequeñas desviaciones de las partículas incidentes. Concluyó que las grandes desviaciones se producían debido a que el átomo tiene una carga central concentrada en un volumen muy pequeño, el *núcleo atómico*. Los experimentos mostraban además que el núcleo contiene prácticamente toda la masa del átomo en un espacio reducido.

7.9. Otros descubrimientos

Protón y electrón se convirtieron en los pilares fundamentales de la materia y por décadas se pensó que, además de protones, el núcleo contenía también electrones, necesarios para explicar la existencia de los isótopos de un elemento químico. Un isótopo es una de dos o más formas de un elemento químico, que tienen, en el núcleo, el mismo número de protones (el mismo número atómico) pero diferente número de neutrones, y por tanto, diferente peso atómico. Todos los isótopos de un mismo elemento poseen propiedades químicas idénticas (ver capítulo 8). El desarrollo de la mecánica cuántica trajo consigo el *principio de exclusión* que prevé que la

localización en un espacio reducido conlleva un incremento de la energía cinética, lo que hace imposible que el electrón se localice en el núcleo. En 1932 el descubrimiento del neutrón por Chadwick echó luz sobre el tema.

La comprensión de que el protón y el neutrón eran la base del núcleo representó un importante avance en la sistematización de la estructura de la materia. Pero ya en 1933 se pensaba que el protón y el neutrón –llamados nucleones– debían ser partículas más complicadas que el electrón, puesto que tienen propiedades magnéticas no fácilmente explicables –momento magnético anómalo– que podría interpretarse como originado en corrientes eléctricas internas.

Problema resuelto: El intendente inquieto de un pueblo pujante le pide a su jefe de Plazas y Jardines que diseñe una escultura que rinda homenaje a los logros de la ciencia. El funcionario piensa unos días y le sugiere al intendente que la escultura represente un átomo; el intendente aprueba la idea pero con la condición de que la escultura esté hecha a escala. El jefe decide consultar a su hijo que es estudiante de física. Trate de razonar cuál fue la respuesta del estudiante.

Solución: según datos de la bibliografía tenemos para el radio del átomo de carbono $R_A = 70 \text{ pm} = 70 \times 10^{-12} \text{ m} = 7 \times 10^{-11} \text{ m}$ y para el radio del núcleo de carbono, $R_N = 2,7 \times 10^{-15} \text{ m}$. El cociente entre ambas cantidades es entonces

$$\frac{R_A}{R_N} = \frac{7 \times 10^{-11}}{3 \times 10^{-15}} = 2,3 \times 10^4$$

Si quisiéramos representar un núcleo atómico por una esfera del tamaño de una pelota de tenis (20 mm de radio), deberíamos poner el primer electrón a una distancia de 460 m. Con estos datos a la vista, el intendente desistió de la idea.

Las unidades más frecuentemente utilizadas para la medición de dimensiones atómicas o subatómicas son

$$1 \mu\text{m} (\text{micrómetro}) = 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ nm} (\text{nanómetro}) = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ \AA} = 100 \text{ pm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ pm} (\text{picometro}) = 10^{-12} \text{ m}$$

$$1 \text{ fm} (\text{femtometro}) = 10^{-15} \text{ m} (1 \text{ fermi})$$

7.10. Estructura interna del protón y del neutrón

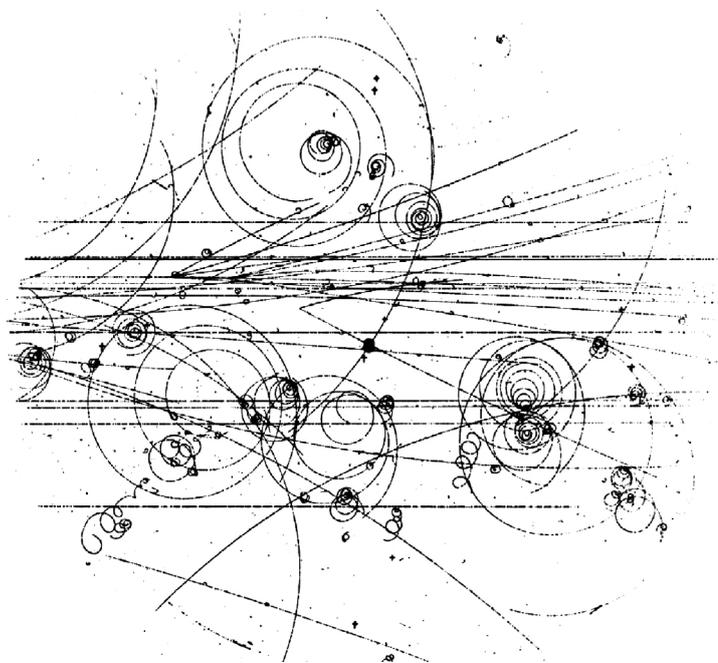
La cosmología moderna ha logrado una síntesis entre lo más pequeño y lo más grande, es decir, las partículas elementales por un lado y el universo y su origen, por otro. Para introducirse en el conocimiento de los componentes más íntimos de la materia, fueron necesarias las observaciones surgidas a partir de los aceleradores de partículas, que como vimos en el capítulo 3, actúan como gigantescos microscopios. Por otra parte, gracias a los avances en la astronomía con la construcción de modernos telescopios y la puesta en órbita de observatorios que permiten obviar las limitaciones impuestas por la atmósfera terrestre, surgió la posibilidad de estudiar la evolución de las estrellas, que servían así como gigantescos laboratorios, en los que es posible alcanzar mayores energías que las logradas en la tierra.

Haremos aquí una breve presentación de la historia del descubrimiento de las partículas elementales. Durante la década de 1950 se investigó la estructura del protón y del neutrón, bombardeando los mismos con electrones de energías menores a 1 GeV , de manera similar al experimento de Rutherford. La distribución de los electrones emergentes en los diferentes ángulos de salida indicaba que estos veían a los nucleones como esferas blandas ya que las trayectorias de electrones salientes hacia ángulos grandes eran muy escasas.

Con el objeto de obtener información sobre la distribución de la carga eléctrica en el interior del núcleo, en los años siguientes continuaron realizándose experimentos de colisión protón-protón y protón-neutrón con aceleradores que permitieron descubrir un gran número de partículas, la mayoría de ellas inestables, que se denominaron *hadrones* (*hadrón*, del griego *αδρον*, que significa ‘pesado’, ‘grosso’) nombre que incluye al protón y al neutrón.⁵

Estas partículas, que surgían como resultado de las colisiones, eran detectadas y estudiadas en la llamada *cámara de burbujas*, a través de las trazas que dejan a su paso. La figura 7.10 muestra una colección de estas trazas.⁶

Figura 7.10. Fotografía de las trazas de partículas elementales en la cámara de burbujas



Fuente: CERN, 1995.

La aparición de estas partículas trajo la necesidad de ordenar, sobre la base de la regularidad de sus propiedades, el conjunto de las partículas conocidas, de manera similar al trabajo que hizo Mendeleiev con los elementos químicos. Después de algunos años de trabajo pudo ponerse orden en estas partículas, especialmente a través de la obra de Murray Gell-Mann.

Una descripción matemática abstracta hecha por esos años resultó mucho más comprensible cuando se introdujeron tres bloques de construcción, los *quarks*. La palabra proviene del verso «three quarks for muster mark» de la obra *Finnegans Wake* del escritor irlandés James Joyce, que contiene juegos de palabras y deformaciones

⁵ Las partículas inestables decaen en otras partículas.

⁶ Recipiente lleno de un líquido transparente sobrecalentado, generalmente hidrógeno líquido. Como este se encuentra en un estado metaestable, el paso de una partícula provoca su vaporización, lo que hace visible la trayectoria.

fonéticas en varios idiomas. Gell-Mann tomó esa palabra simplemente porque en la obra de Joyce se dice que eran «tres quarks».

Los hadrones conocidos hasta entonces podían construirse con estos tres quarks y sus antipartículas, lo que implicaba una gran simplificación conceptual.

Los quarks fueron buscados en la naturaleza, en el agua de mar, en los meteoritos y en los rayos cósmicos como también en experimentos con aceleradores de alta energía. Por mucho tiempo no fue posible encontrarlos y una explicación, para algunos escépticos, era que se trataba solo de cantidades matemáticas incluidas en las ecuaciones de la física; otros pensaban, en cambio, que debía haber razones físicas profundas por las cuales la detección de los quarks resultaba difícil. Finalmente, en 1967 comenzó una serie de investigaciones conocidas como el *experimento SLAC-MIT*, en las que J. I. Friedman, H. W. Kendall y R. E. Taylor encontraron indicios de una estructura interna en protones y neutrones.⁷

El descubrimiento se hizo cuando los protones y los neutrones se iluminaron (bombardearon) con haces de un gigantesco microscopio electrónico (acelerador) de dos kilómetros de largo que generaba un haz de electrones con una energía de

entre 4 y 21 GeV . Para estas energías la longitud de onda $\lambda = \frac{h}{p}$, según de Bro-

glie (capítulo 3) es menor que el radio estimado del protón (se sugiere al lector estimar esa longitud de onda). Se realizaron mediciones para tratar de determinar la forma en que la carga y el magnetismo están distribuidos dentro de los nucleones. Estos experimentos pueden compararse con el experimento de Rutherford, en el que las partículas alfa dispersadas hacia atrás dieron información sobre la distribución de la carga eléctrica en el interior del átomo.

Figura 7.11. Acelerador SLAC de 50 GeV, para electrones y positrones. Mide 3,2 km y es el más largo en el mundo; pasa debajo de una autopista



Fuente: Peter Kaminski, 2004.

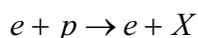
Los resultados indicaban que la estructura interna de protones y neutrones consiste de tres quarks –componentes fundamentales– que se mantienen unidos mediante un *pegamento* eléctricamente neutro llamado *gluones*.⁸

Los experimentos consistían en observar cómo el haz de electrones de alta velocidad se ve afectado cuando atraviesa un blanco de hidrógeno líquido, que contiene gran cantidad de protones. Los electrones dispersados se detectan con espectrómetros magnéticos. Uno de ellos detectaba electrones dispersados hacia adelante y el otro, a ángulos mayores, es decir, hacia atrás. Estas colisiones pueden considerarse elásticas.

7 SLAC son las iniciales de Stanford Linear Accelerator Center y MIT corresponde a Massachusetts Institute of Technology.

8 La palabra *glue* en inglés significa ‘goma de pegar’.

También se estudió lo que se denomina *dispersión inelástica profunda* de electrones, donde un electrón colisiona contra un protón, obteniéndose un electrón de menor energía y otros productos que se designan con X



donde X no es necesariamente un protón. Se encontró que la probabilidad para este fenómeno –donde el electrón incidente pierde gran parte de su energía original y emerge en un ángulo grande en relación a la dirección original– era considerablemente mayor que la esperada. Luego de un cuidadoso análisis, se hizo evidente que existía una estructura interna en los nucleones, determinada por centros de dispersión de *carozo duro*, un resultado similar al de Rutherford para el núcleo atómico.⁹

Los teóricos J. D. Bjorken y R. Feynman mostraron que los resultados no podían ser explicados completamente utilizando solo los quarks como carozos duros. La evidencia indicaba que había también componentes eléctricamente neutros que pronto se interpretaron como *gluones*, las partículas intermediarias de la fuerza fuerte. Esto introdujo una nueva era en la historia de la física.

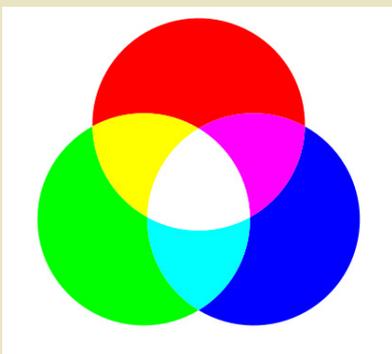
El 17 de octubre de 1990 la Real Academia de Ciencias de Suecia otorgó el Premio Nobel de Física a Jerome Friedman y Henry Kendall de MIT y Richard Taylor de la Universidad de Stanford, por sus investigaciones pioneras sobre la dispersión inelástica de electrones sobre protones y neutrones ligados, las que han sido de fundamental importancia para el desarrollo del modelo de quarks en la física de partículas.

7.11. Las partículas fundamentales

7.11.1. El modelo estándar

El modelo estándar de la física de partículas es una teoría acerca de la clasificación de todas las partículas subatómicas conocidas y de las interacciones entre ellas. Fue desarrollado a lo largo de la segunda mitad del siglo xx, como un esfuerzo de colaboración de científicos de todo el mundo. La formulación actual se completó a mediados de la década de 1970 luego de la confirmación experimental de la existencia de los quarks. Desde entonces, los descubrimientos del quark top (1995), el neutrino

⁹ Carozo duro no es ahora el núcleo atómico sino una región densa dentro del protón o del neutrón.



Fuente: Jorgelrm, 2012.

Los colores primarios

Si cubrimos la salida de luz de tres linternas con papel celofán rojo, verde y azul, respectivamente, podemos ver los colores que resultan al sumar los colores primarios, iluminando un fondo blanco con combinaciones de estos tres. La suma de dos colores primarios nos da un nuevo color. Así

- verde + azul = cian
- azul + rojo = magenta
- rojo + verde = amarillo

La suma de los tres nos da el blanco, es decir incoloro.

del leptón tau (2000) y, más recientemente, el bosón de Higgs (2013), han dado mayor credibilidad al modelo. Debido a su éxito en la explicación de una amplia variedad de resultados experimentales, el modelo estándar es a veces considerado como una *teoría de casi todo*.

Para facilitar la comprensión de esta sección introducimos aquí un glosario que resume la terminología empleada.¹⁰

Espín: grado de libertad o variable interna de las partículas fundamentales que se asocia con una *cantidad de movimiento angular intrínseca*, que solo toma valores múltiplos enteros o semienteros de la constante \hbar . Normalmente se indica solo el número entero o semientero correspondiente; así se dice que el electrón tiene espín $\frac{1}{2}$.

Fermión: partícula de espín $\frac{1}{2}$ que obedece el principio de exclusión de Pauli: *no puede haber dos partículas idénticas ocupando el mismo estado cuántico*. El nombre recuerda al físico italiano Enrico Fermi.

Bosón: partícula de espín 1. Un conjunto de ellas obedece la estadística de Bose Einstein, en la cual, en un estado cuántico dado puede ubicarse un número ilimitado de partículas, como por ejemplo los fotones en un haz de láser. El nombre recuerda al físico indio Satyendra Nath Bose.

Carga de color: propiedad de los quarks y los gluones relacionada con su interacción fuerte en el contexto de la teoría llamada *cromodinámica cuántica* (QCD). Tiene algunas analogías formales con la noción de carga eléctrica, pero existen diferencias (por ejemplo la carga de color no es una magnitud escalar). No tiene nada que ver con los colores visibles usuales, sino que simplemente es una forma de llamar y de diferenciar los diferentes tipos de una magnitud física asociada a los quarks.

Sabor (flavor): atributo que distingue a cada uno de los seis quarks: u (*up*), d (*down*), s (*strange*), c (*charm*), b (*bottom*) y t (*top*). En la terminología moderna se dice que los quarks se presentan en seis *sabores*, cada uno de los cuales puede tener uno de tres *colores*. De este modo los quarks serían, en total, 18.

7.11.2. Comportamiento de fermiones y bosones

Para ilustrar el comportamiento de estas partículas, imaginemos que hay una gran familia de hermanos idénticos (fermiones) que pasa la noche en el Hotel Fermión, mientras que otra familia de hermanos idénticos (bosones) decide pasar la noche en la Posada del Bosón. Por su carácter los fermiones se niegan a compartir una habitación, e insisten en tener habitaciones alejadas entre sí lo más posible. Por otro lado, los hermanos bosón prefieren compartir la misma habitación. Como los fermiones –por su carácter– alquilan más habitaciones que los bosones, los moteles prefieren hacer negocios con los fermiones. Algunos se niegan a alquilar habitaciones a los bosones.

Que no pueda haber más de un fermión en cada estado, explica por qué los electrones de los átomos van llenando sucesivas capas y generan así la periodicidad de la tabla periódica. Por otra parte, el hecho de que muchos bosones puedan acomodarse en un mismo estado, permite que los fotones de un láser formen un haz coherente, capaz de iluminar muy intensamente.

7.11.3. Las partículas fundamentales

A partir del descubrimiento de que el protón y el neutrón están compuestos por otras partículas, comenzó a usarse la expresión *partículas fundamentales* para

¹⁰ Hemos preferido mantener los nombres de las partículas y otros términos en idioma inglés porque su traducción al español varía de un país a otro.

Alcance de las fuerzas de intercambio

Las partículas que se intercambian para establecer una *fuerza de intercambio* entre otras dos, son *partículas virtuales*, esto significa que son creadas por una de las partículas interactuantes en el momento de comenzar su viaje hacia la otra y viven solo para hacer ese viaje. Este dura un tiempo Δt que está relacionado con la distancia ΔR que debe recorrer hasta la otra partícula. El alcance ΔR está determinado por el camino que puede recorrer la partícula portadora que tiene una masa m y una energía $E = mc^2$. Si para simplificar suponemos que el viaje de la partícula portadora se hace a la velocidad de la luz c , tendremos la relación $\Delta R = c\Delta t$. El principio de incerteza de la mecánica cuántica establece la relación

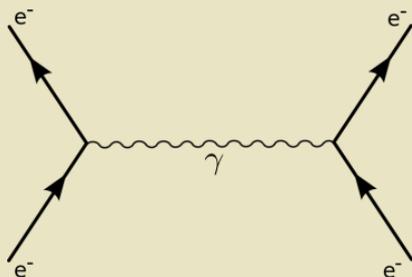
$$\Delta E \Delta t = mc^2 \Delta t > \hbar / 2$$

De donde sigue

$$\Delta R \approx c\Delta t \approx \frac{\hbar}{2mc}$$

Esta relación implica que mientras más pequeña sea la masa de la partícula portadora, mayor es el alcance de la fuerza. En el caso electromagnético la masa de la partícula intercambiada es nula (fotón) y el alcance es infinito. Para visualizar el intercambio de bosones que mencionamos, Richard Feynman inventó una representación gráfica que se conoce como *diagrama de Feynman*. El que se muestra más abajo corresponde a la dispersión electrón-electrón por intercambio de un fotón virtual. Debemos imaginar que la línea de tiempo corre de abajo hacia arriba.

Diagrama de Feynman para una colisión electrón-electrón



Fuente: Papa November, 2008.

designar aquellas que son los bloques que sirven para construir a todas las demás. Se dividen en dos grandes grupos:

1. Leptones y quarks (partículas de espín $\frac{1}{2}$, fermiones).
2. Transmisores de las fuerzas (partículas de espín 1, bosones, llamados *de medida*).

La figura 7. 12 las ilustra e indica sus propiedades.

Figura 7. 12. Las partículas fundamentales

Tres generaciones de la materia (fermiones)				
	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u arriba	c encanto	t cima	γ fotón
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d abajo	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s extraño	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b fondo	0 0 1 g gluón
Leptones	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν _e neutrino electrónico	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν _μ neutrino muónico	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν _τ neutrino tauónico	91.2 GeV 0 1 Z ⁰ bosón Z
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electrón	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muón	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tauón	80.4 GeV ±1 1 W [±] bosón W
				Bosones de gauge

Fuente: MissMJ; Alefisco, 2012.

Las columnas I, II y III corresponden a los fermiones, constituyentes de la materia. En la zona violeta se ubican los quarks *up*, *charm*, *top*, *down*, *strange* y *bottom*. En la fila inferior verde se ubican las partículas livianas o leptones (del griego *λεπτόν* ó *λεπτός*, que significa 'pequeño') *electrón*, *muón* y *tau*. En la fila verde superior aparecen los neutrinos ν_e , ν_μ y ν_τ asociados a cada leptón.

En la columna azul de la derecha están las partículas (bosones) que transmiten las fuerzas entre los quarks y los leptones. Estas son, de arriba hacia abajo:

- fotones (transmiten las interacciones electromagnéticas),
- gluones (transmiten las interacciones fuertes entre quarks),
- bosones Z y W (responsables de las interacciones débiles).

De entre los quarks, *up* y *down* tienen las masas más pequeñas; debido a esto generalmente son los más estables y los más comunes en la naturaleza. Los quarks más pesados cambian rápidamente en quarks *up* y *down* a través de un proceso de desintegración, en el cual un estado de masa mayor se transforma en un estado de masa menor. Los quarks *strange*, *charm*, *top* y *bottom* solo pueden ser producidos en las colisiones de alta energía, como las relacionadas con los rayos cósmicos y con los aceleradores de partículas.

7.11.4. Propiedades

- Cada quark tiene asociada una antipartícula, conocida como antiquark, en la cual sus propiedades tienen igual magnitud pero signo opuesto a las del quark.
- Cada quark puede llevar una de las tres cargas de color –llamadas por conveniencia roja, verde o azul– que tienen origen en la interacción fuerte.
- Los quarks *up*, *top* y *charm* llevan una carga eléctrica de $+2/3$, y los *down*, *strange* y *bottom*, una carga eléctrica de $-1/3$, permitiendo a cada uno participar en interacciones electromagnéticas.
- Los leptones –electrón, muon, y tau– no llevan carga de color –son neutros en este sentido– por lo que no participan en las interacciones fuertes.
- Los leptones llevan una carga eléctrica de -1 , que les permite participar en interacciones electromagnéticas.
- Los neutrinos no llevan carga eléctrica y por tanto no participan de las interacciones electromagnéticas.
- Los quarks y los leptones llevan varias *cargas de sabor*, lo que les permite interactuar recíprocamente, vía la interacción nuclear débil.

Los seis quarks han sido observados en experimentos con aceleradores. El último en ser descubierto fue el quark *top*, observado por primera vez en el Fermilab en 1995. Para lograr el descubrimiento de los bosones *Z* y *W* hubo que esperar la construcción de un acelerador de partículas suficientemente potente como para producirlos. La primera máquina de este tipo disponible fue el Súper Sincrotrón de Protones del CERN, donde se observaron señales inequívocas de bosones en enero de 1983 durante una serie de experimentos realizados por Carlo Rubbia y Simon van der Meer. Los experimentos se llamaban UA1 (Carlo Rubbia) y UA2 (Pierre Darrulat y S. van der Meer). UA1 y UA2 confirmaron la detección del bosón *Z* en mayo de 1983. Rubbia y van der Meer recibieron el Premio Nobel de Física de 1984.

7.12. Las interacciones

Existen cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza que explican el comportamiento de la materia conocida. Estas son:

- gravitatoria
- electromagnética
- nuclear débil
- nuclear fuerte

que dan lugar a las cuatro fuerzas homónimas.

La transmisión de estas cuatro fuerzas implica el intercambio de una o más *partículas portadoras*, llamadas *bosones de intercambio* (ver cuadro).

Los fenómenos eléctricos y magnéticos son conocidos desde la antigüedad. Un gran avance se logró a partir de 1800 cuando se descubrió que electricidad y magnetismo son dos aspectos fundamentales de la misma interacción. En 1862,

Maxwell logró describir ambos fenómenos en una *teoría unificada, el electromagnetismo*. Siguiendo ese ejemplo, Einstein en su momento intentó, sin éxito, unificar el electromagnetismo y la interacción gravitatoria, descrita por la *relatividad general*. En las últimas décadas se ha intentado unificar las interacciones mencionadas más arriba, pero el único avance concreto logrado hasta ahora ha sido la unificación de la interacción débil con la electromagnética, en la teoría de la *interacción electrodébil*, formulada por S. Glashow, A. Salam y S. Weinberg. Describiremos ahora brevemente cada una de las interacciones.

7.12.1. Interacción gravitatoria

Es la más conocida en el mundo macroscópico, pero sin embargo es la que plantea mayores problemas teóricos. A grandes distancias tiene mayor efecto que las demás por su acción sobre masas muy grandes como las de estrellas, planetas y galaxias. A distancias microscópicas –atómicas– es la más débil de todas. Según la hipótesis más aceptada, la interacción gravitatoria es transmitida por una partícula llamada *gravitón*, todavía no detectada.

Es un ejemplo de una fuerza que varía con la inversa del cuadrado de la distancia, es decir que su alcance es infinito, por ello se concluye que las partículas intercambiadas (gravitones) deben tener masa nula (ver cuadro). Es siempre atractiva y actúa a lo largo de la línea que une los centros de masa de los cuerpos que intervienen. En el capítulo 6 vimos que la fuerza gravitatoria entre dos masas m_1 y m_2 ubicadas a distancia r está dada por la ley de gravitación universal

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

donde $G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$. Las fuerzas sobre los dos cuerpos son iguales en

módulo, pero de sentido opuesto, según la tercera ley de Newton.

7.12.2. Interacción electromagnética

Actúa entre partículas eléctricamente cargadas e incluye la fuerza electrostática, entre cargas en reposo y la combinación de fuerzas eléctricas y magnéticas que actúa entre cargas en movimiento relativo.

La interacción electromagnética da lugar a dos fuerzas diferentes, observables en dos escalas de distancia:

- es la fuerza de largo alcance entre partículas cargadas que mantiene unidos a electrones y protones en el interior del átomo. Es más fuerte que la interacción gravitatoria y como esta, tiene un alcance infinito, por lo que se deduce que las partículas intercambiadas, fotones, tienen masa nula (ver cuadro); están descritos por la teoría llamada .
- es la fuerza dipolar de corto alcance entre átomos o moléculas neutras, que produce la cohesión en el seno de un líquido y la fuerza de roce entre sólidos macroscópicos.

Interviene en casi todos los fenómenos de nuestra experiencia cotidiana, que van desde la estructura de los materiales, las tormentas eléctricas y el arco iris, los aparatos electrodomésticos, el rayo láser y la radio.

7.12.3. Interacción nuclear débil

Se acopla a un tipo de carga llamada *sabor* (*flavor*), una propiedad de los quarks y los leptones. De intensidad menor que la fuerza electromagnética, su alcance es más reducido que el de la interacción fuerte. Es la causante de los cambios de sabor en estas partículas, es decir, es responsable de que los quarks y los leptones decaigan en partículas más livianas; además interviene en la desintegración beta. Actúa entre partículas de diversos sabores (todos los quarks y leptones) y es mediada por los bosones W^+ , W^- y Z^0 con masas de $80,401 GeV/c^2$ y de $91,1876 GeV/c^2$, respectivamente. Cada uno de los bosones W^+ y W^- es la antipartícula del otro, mientras que Z^0 es su propia antipartícula; todos tienen una vida media¹¹ de $10^{-25} s$. Los bosones W^\pm llevan una carga eléctrica de $+1$ y -1 y participan en las interacciones electromagnéticas mientras que Z^0 es eléctricamente neutra. Aplicando el criterio señalado en el cuadro lateral, el alcance resulta de $10^{-18} m$, aproximadamente 0,1 del diámetro de un protón.

La interacción débil es crucial para la estructura del universo ya que:

3. Interviene en la producción de energía en el Sol y las estrellas induciendo la transmutación $p \rightarrow n$ de modo que pueda formarse deuterio y luego por fusión de este, los demás elementos.
4. Provoca la transmutación de quarks que interviene en muchas desintegraciones de partículas nucleares, entre ellas el decaimiento beta. Es el único proceso en el que un quark puede cambiar a otro quark, o un leptón a otro leptón –los llamados cambios de sabor. Esta fuerza fue unificada con la electromagnética en lo que se conoce como interacción electrodébil, un logro teórico de Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg, quienes fueron acreedores al Premio Nobel en 1979.

7.12.4. Interacción nuclear fuerte

Se denomina *fuerte* pues es la más intensa de las cuatro fuerzas fundamentales: alrededor de cien veces mayor que la electromagnética, unas 110 veces mayor que la débil y alrededor de 10^{39} veces mayor que la gravitatoria. Logra mantener unidos los protones en el núcleo contrarrestando la repulsión electrostática entre ellos. Tiene un alcance muy corto y su intensidad aumenta con la distancia.

El modelo actual sostiene que está mediada por gluones y que actúa sobre los quarks, antiquarks y otros gluones. Todas estas partículas llevan *carga de color*. En el caso de una partícula compuesta por tres quarks con colores rojo, verde y azul no interactúa con cargas de color externas porque es neutra.

Como sucede con la interacción electromagnética, la interacción fuerte da lugar a dos fuerzas diferentes, observables en dos escalas de distancia:

- a escalas pequeñas, menos de $0,8 fm$ (radio de un nucleón)¹² es la fuerza –transmitida por gluones– que mantiene unidos a los quarks para formar protones, neutrones y otros hadrones.
- a escalas de 1 a $3 fm$ es la fuerza que une los protones y los neutrones para formar el núcleo de un átomo. Esta forma era conocida hasta hace unos años como *fuerza nuclear*. Actualmente y en el marco del modelo estándar se conoce como *fuerza nuclear residual*.

11 Tiempo t_m que debe transcurrir para que una población inicial de N_0 partículas baje a la mitad, es

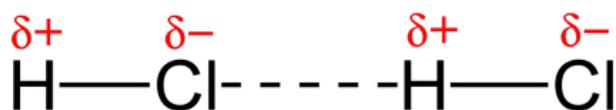
$$\text{decir, para que se cumpla } \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_m}.$$

12 Un femtómetro equivale a $10^{-15} m$; tiene el mismo valor y símbolo que otra unidad llamada *fermi*.

La fuerza nuclear residual es similar a la fuerza dipolar que actúa entre moléculas o átomos que están unidos por la fuerza electrostática. Un ejemplo de fuerza dipolar se da con las moléculas de ácido clorhídrico ClH , que son moléculas polares, la unión entre cloro e hidrógeno es covalente: el hidrógeno cede el electrón que tiene y el cloro lo toma y pasa de la estructura $[\text{Ne}]3s^2 3p^5$ a la $[\text{Ne}]3s^2 3p^6 = [\text{Ar}]$.

A pesar de que cada molécula es eléctricamente neutra, el momento dipolar que se genera por el desplazamiento del electrón desde el H al Cl hace que dos moléculas de ClH interactúen entre sí a través de la interacción dipolo-dipolo; este consiste en la atracción electrostática entre el extremo positivo de una molécula polar y el negativo de otra, llamado puente de hidrógeno (ver capítulo 12).

Figura 7.13. Interacción entre los dipolos eléctricos de dos moléculas de cloruro de hidrógeno



Fuente: Benjah-bmm27, 2007.

En la figura 7.13, los símbolos $\delta+$ y $\delta-$ indican que el exceso de carga en cada átomo es positivo ($\delta+$) o negativo ($\delta-$). Las fuerzas electrostáticas que dan origen a la unión química $\text{C}-\text{H}$ disminuyen con la distancia d —según la ley de Coulomb— con un factor $1/d^2$.

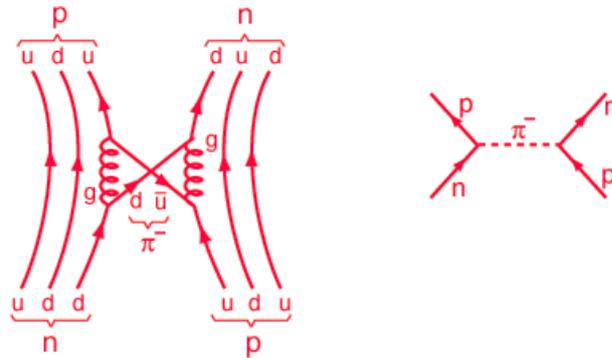
En cambio, las fuerzas dipolares varían según $1/d^3$ y solo son eficaces a distancias muy pequeñas; además son fuerzas más débiles que las coulombianas porque las cargas $\delta+$ y $\delta-$ son cargas parciales. Las energías de las interacciones dipolares rondan los 4kJ por mol, mientras los valores promedio para las uniones iónicas y covalentes son $\sim 400\text{kJ}$ por mol.

La partícula de intercambio para la fuerza fuerte es el gluón que media las fuerzas entre los quarks. Como los gluones y los quarks individuales están contenidos dentro del protón o neutrón, las masas atribuidas a ellos no pueden utilizarse en la relación que predice el alcance de la fuerza (ver cuadro).

En 1936 Yukawa había postulado la fuerza fuerte como originada en el intercambio en que las partículas intercambiadas era una partícula hipotética que llamó mesón (ver sección 7.12); por el alcance que debía tener la fuerza, la masa de ese mesón debía ser intermedia.

La figura 7.14 muestra el esquema de una interacción entre nucleones, intermedia por los mesones que conocemos en la actualidad; el esquema de la derecha muestra la interacción protón-neutrón a través del intercambio de piones. El esquema de la izquierda muestra la misma interacción en su aspecto *submicroscópico* en la que un quark d —componente del neutrón— intercambia un gluón con un quark u —componente del protón— lo que produce la conversión $p \leftrightarrow n$. Las leyes que rigen el comportamiento de la fuerza fuerte que liga a los quarks dentro de los nucleones surgen de la teoría llamada *cromodinámica cuántica*.

Figura 7.14. Interacción entre nucleones mediada por gluones, a través del intercambio de mesones



Fuente: Rod Nave, s.f.

La tabla 7.2 resume las propiedades de las cuatro fuerzas.¹³

Tabla 7.2. Fuerzas fundamentales

Interacción	Gravedad	Débil	Electromagnética	Fuerte	
		Electro débil		Fundamental	Residual
Actúa sobre	masa-energía	carga de sabor	carga eléctrica	carga de color	ver texto
Partículas afectadas	Todas	Leptones Quarks	Cargadas	Quarks gluones	hadrones
Partículas Intermediarias	gravitón (?)	W^+, W^-, Z^0	γ	Gluones	mesones
Intensidad para:					
2 quarks $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} m \\ 3 \times 10^{-17} m \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-41} \\ 10^{-41} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.8 \\ 10^{-4} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} 25 \\ 60 \end{array} \right\}$	no aplicable a los quarks
2 protones en el núcleo	10^{-36}	10^{-7}	1	no aplicable a hadrones	20

A diferencia de las otras fuerzas, la fuerza nuclear fuerte no disminuye de intensidad al aumentar la distancia. Más allá de una distancia límite (aproximadamente el tamaño de un hadrón), se mantiene en un valor de alrededor de $10.000 N$, no importa cuán grande sea la distancia entre quarks. Este fenómeno se denomina *confinamiento de color*, y tiene como consecuencia que solo pueden observarse como libres a los hadrones, no a los quarks individuales.

¹³ Gentileza de Diego Mazzitelli.

Esto resulta de que el trabajo que debería efectuarse en contra de una fuerza de $10.000 N$ para separar los quarks a una distancia de $1 fm$, es suficiente para crear pares partícula-antipartícula en una distancia de interacción muy corta. En otras palabras, la energía necesaria para apartar dos quarks a la distancia de $1 fm$ es suficiente para crear nuevos quarks que se aparean con los originales. Una evidencia de este fenómeno es el fracaso de los experimentos que tratan de detectar quarks libres.

Cuando en un experimento de colisión protón-protón uno de los quarks de un protón es golpeado por un quark muy rápido del otro protón, las partículas afectadas (quark y gluones) no son directamente observables, sino que se observa la emisión de haces de hadrones de nueva generación.

7.13. ¿Cómo se forman las partículas conocidas?

Los quarks son las partículas fundamentales del modelo estándar sobre las que actúan las *cuatro interacciones fundamentales* que dan origen a las *fuerzas fundamentales*. También son las únicas partículas conocidas cuya carga eléctrica *no es múltiplo entero de la carga elemental*. Se combinan formando sistemas compuestos (hadrones). Estos pueden ser de dos quarks (mesones) o de tres quarks (bariones). Como vimos, debido al fenómeno de *confinamiento*, los quarks no pueden ser observados en forma aislada, ya que solo se encuentran dentro de los bariones y de los mesones. Describiremos brevemente las propiedades de estos dos grupos. Las combinaciones posibles son:

bariones, del griego *βαρύς*, *barys*, que significa ‘pesado’.

Formados por tres quarks, son fermiones y tienen un número cuántico conservado llamado *número bariónico* (B) que puede definirse como un tercio del número de quarks N_q menos el número de antiquarks $N_{\bar{q}}$ en el sistema:

$$B = \frac{1}{3}(N_q - N_{\bar{q}})$$

Se puede ver que resulta $B = 0$ para los mesones y $B = 1$ para los bariones, que constituyen un conjunto de $6 \times 6 \times 6 = 216$ combinaciones, la mayoría de las cuales son inestables y decaen con distinta rapidez; solo el protón $p = (u, u, d)$ y el neutrón $n = (u, d, d)$ son estables. Una salvedad es que el neutrón es estable en el interior de los núcleos atómicos pero no en libertad, donde por acción de la fuerza débil, tiene una vida media de unos diez minutos.

Algunas combinaciones tienen importancia histórica, como la partícula omega menos, $\Omega^{-(s,s,s)}$ cuyo descubrimiento dio credibilidad a todo el esquema.

Mesones (del griego *μεσος*, *mesos*, que significa ‘medio’), formados por un quark y un antiquark, son bosones de espín 1. Los mesones más importantes son los tres mesones π piones. Ver tabla siguiente

Tabla 7.3.

Carga	Partícula	Composición
Positiva	$\pi^+ = (u, \bar{d})$	quark <i>up</i> y antiquark <i>down</i>
Negativa	$\pi^- = (d, \bar{u})$	quark <i>down</i> y antiquark <i>up</i>
Nula	$\pi^0 = (u, \bar{u})$	quark <i>down</i> y antiquark <i>down</i>

La masa de los piones cargados π^\pm es de $139\text{MeV}/c^2$ y la del pión neutro, $134\text{MeV}/c^2$. Fueron descubiertos por el brasileño César Lattes, el italiano Giuseppe Occhialini y el inglés Cecil Powell en 1947.

El modo de desintegración principal de los piones π^\pm es

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

mientras que la desintegración principal del π^0 es a dos fotones, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

Otros mesones de interés son los cuatro llamados mesones *K* o *kaones*:

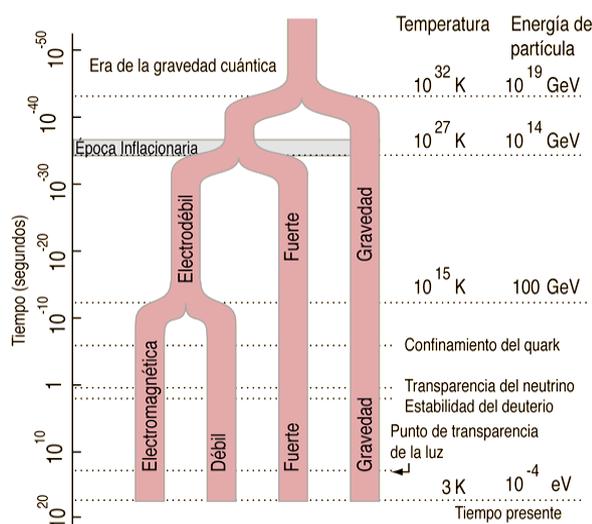
Tabla 7.4. Composición de los kaones

Carga	Partículas	Composición
+	$K^+ = (u, \bar{s})$	quark <i>up</i> + antiquark <i>strange</i>
-	$K^- = (s, \bar{u})$	quark <i>strange</i> + antiquark <i>up</i>
0	$K^0 = (d, \bar{s})$	quark <i>down</i> + antiquark <i>strange</i>
0	$\bar{K}^0 = (s, \bar{d})$	quark <i>strange</i> + antiquark <i>down</i>

La masa de estas partículas es de aproximadamente $495\text{MeV}/c^2$ y sus vidas medias son de alrededor de $1.2 \times 10^{-8}\text{s}$. A partir de su descubrimiento en la radiación cósmica, fueron una importante fuente de información sobre la naturaleza de las fuerzas fundamentales postuladas en el modelo estándar.

¿Por qué cuatro fuerzas? Las fuerzas en el universo son una manifestación de las cuatro interacciones fundamentales que ya discutimos. Una pregunta que surge es ¿por qué hay cuatro interacciones? ¿Por qué no una sola? La figura 7. 15 muestra la evolución de las interacciones en la historia del universo.

Figura 7.15. Evolución de las interacciones en la historia del universo



Fuente: Rod Nave, 2016.

De acuerdo con la teoría del Big Bang, al principio existía una única interacción y en la medida en que el universo se expandió y enfrió, esa interacción se fue separando en las actualmente conocidas: gravedad, electromagnética y las fuerzas nucleares débil y fuerte.

Los investigadores que iniciaron la búsqueda de una fuerza unificada lograron un primer paso hacia esa unificación con el descubrimiento de las partículas W y Z , los *bosones intermedios*, en 1983. Esta verificación confirmó las predicciones hechas por Weinberg, Salam y Glashow en 1979, que ya mencionamos. Estos avances teóricos y experimentales estimularon el siguiente paso, que era buscar la *gran unificación* necesaria para incluir la interacción fuerte.

La unificación electrodébil fue recibida como un gran avance pero quedaba un problema conceptual. Si la débil y la electromagnética son parte de una misma fuerza, ¿por qué la partícula intercambiada en la interacción electromagnética, el fotón, tiene masa nula, mientras que los bosones W y Z , asociados a la fuerza débil, tienen masas más de 80 veces la de un protón? Las fuerzas electromagnética y débil desde luego no tienen el mismo aspecto en el universo actual de baja temperatura, por lo que debe haber habido algún tipo de transformación cuando el universo se enfrió lo suficiente para que las energías de las partículas fueran inferiores a los 100 GeV . Las teorías atribuyen esa transformación a un campo llamado *campo de Higgs*, lo que requiere un nuevo bosón, el *bosón de Higgs*, como partícula intermediaria.

En física cuántica, todo se ve como una colección de excitaciones de los campos cuánticos. Estas excitaciones son transportadas por el campo en pequeños paquetes –cuantos– que se nos presentan en forma de partículas. Así, por ejemplo, los fotones son los cuantos del campo electromagnético. Las ecuaciones del modelo estándar tienen determinadas simetrías que requieren que todas las partículas tengan masa nula.

7.14. La idea de Higgs

Como la masa real de las partículas *no es nula*, se supone que deben haberla adquirido de alguna manera. La idea es que existe un campo que permea todo el espacio –el campo de Higgs– y que en algún momento después del Big Bang sufrió una

transformación –que se denomina *rotura espontánea de simetría*– y de allí surgió la interacción que les da masa a las partículas. Es decir, las partículas adquieren masa mediante la interacción con el campo de Higgs que impregna todo el espacio.

Este mecanismo dota de masa a los tres bosones Z , W^+ y W^- con valores alrededor de $80\text{GeV}/c^2$ (recordemos que la masa del protón es de $0,938\text{GeV}/c^2$). También partículas más comunes, el electrón y los quarks, adquieren su masa por este mecanismo.

El modelo estándar ha sido muy eficaz en predecir la existencia de ciertas partículas años antes de que fueran verificadas empíricamente. Su única incapacidad ha sido no poder incorporar la interacción gravitatoria.

El 4 de julio de 2012, un grupo de científicos que trabajaba con el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en el CERN anunció el descubrimiento de una partícula que se comporta de la manera que el bosón de Higgs debe comportarse. Este hallazgo podría marcar el comienzo de un período de nuevos descubrimientos sobre el universo.

Figura 7.16. François Englert y Peter Higgs en el CERN cuando se anunció el descubrimiento de la partícula de Higgs, el 4 de julio de 2012



Fuente: CERN, Maximilien Brice y Laurent Egli, 2012.

7.15. El Gran Colisionador de Hadrones

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) con el que, en 2013 se realizaron los experimentos que trataban de identificar el bosón de Higgs, consta de ocho tramos rectos unidos por ocho arcos de circunferencia, con una longitud total de 26659 m . Es el acelerador de partículas más grande y potente del mundo. Se puso en marcha en 2008 y sigue siendo el acelerador más grande y moderno del CERN.

Consiste en un anillo de 27 km de circunferencia en cuyo interior, dos haces de protones de alta energía viajan a velocidades cercanas a la de la luz, antes de que se los haga chocar entre sí. Los haces se desplazan en sentidos opuestos en tuberías separadas, que se mantienen en ultra alto vacío. Las partículas son guiadas alrededor del anillo acelerador por un fuerte campo magnético producido por electroimanes superconductores, construidos con bobinas de cable superconductor, es decir sin

resistencia o pérdida de energía, para lo cual los imanes se mantienen a $-271,3^{\circ}\text{C}$, una temperatura casi tan baja como la del espacio exterior. Por esta razón, parte del acelerador está conectado a un sistema de distribución de helio líquido, que enfría los imanes, así como a otros servicios de suministro.

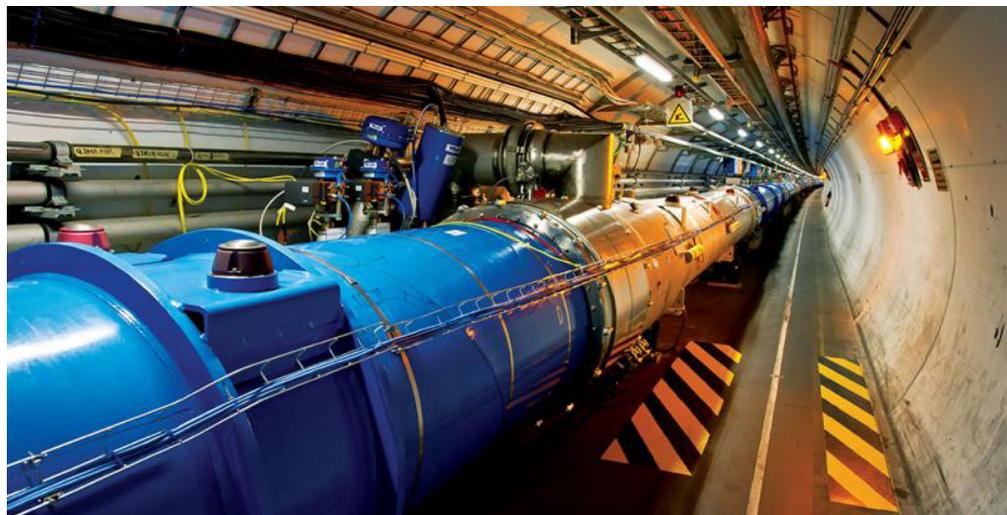
Se utilizan miles de imanes de diferente tipo y tamaño para guiar los haces alrededor del acelerador, que incluyen 1232 imanes dipolares de 15 m de largo que permiten hacer doblar los haces y 392 imanes cuadrupolares, ubicados cada 5 o 7 m , que mantienen centrados los haces. Justo antes de la colisión, se utiliza otro tipo de imán para reducir el diámetro de los haces a fin de aumentar las posibilidades de colisión. Las partículas son tan pequeñas que hacerlas chocar puede compararse con lanzar dos agujas, una contra otra, desde 10 km de distancia, con la precisión necesaria para que puedan chocar a mitad de camino.

Desde el Centro de Control del CERN se conforman los haces para que choquen en cuatro puntos que corresponden a las posiciones de los cuatro detectores de partículas, llamados ATLAS, CMS, ALICE y LHCb.

Tabla 7.5. Características del LHC

Circunferencia $\approx 27\text{ km}$	Velocidad $v = 0,999999991c$
Energía de protones 7 TeV	Factor de Lorentz $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 7460$

Figura 7.17. El túnel del LHC, con una circunferencia de 27 km .



Fuente: Maximilien, Brice, CERN, 2011.

Actividad 7.3

Como actividad sobre el tema de partículas fundamentales se sugiere utilizar el material del Taller del Fermilab en <https://ed.fnal.gov/samplers/bandc/bcmanual-5-0.pdf>. Fermilab Friends for Science Education. (2013). *Beauty and Charm at Fermilab. An Introduction to Particle Physics*. Fifth Edition.

PROBLEMAS

En la página web *Acercándonos al LHC* (http://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/1.home), de donde tomamos algunos de los ejercicios que se incluyen a continuación, se hace la siguiente presentación:



Los profesores y profesoras de Física de Enseñanza Secundaria suelen referirse al LHC o al CERN en el aula tomando en consideración fundamentalmente el enorme tamaño de los dispositivos utilizados, y también debido a la gran cantidad de científicos y científicas involucrados en sus experimentos.

Imágenes impresionantes del acelerador o de sus detectores aparecen en los libros de texto para acompañar el inicio de determinados temas. Siendo esta aproximación correcta, pues puede despertar la curiosidad de los alumnos y alumnas, es sin embargo incompleta dadas las posibilidades didácticas que pueden derivarse del estudio de los fenómenos que están presentes en este experimento.

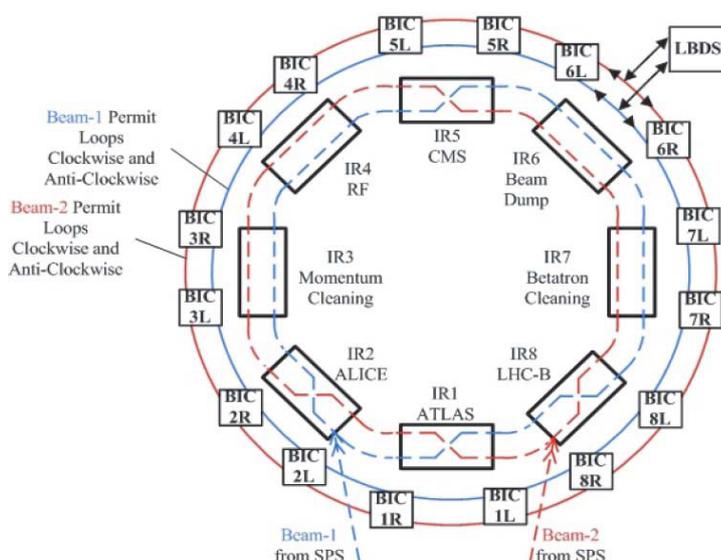
El objetivo de esta sección es introducir algunos cálculos físicos simples sobre los fenómenos que tienen lugar en el LHC. Pueden ser utilizados en el aula con el fin de estimular la curiosidad de los estudiantes, para ayudarlos a entender los conceptos físicos, y como un ejemplo de la relación entre las frías ecuaciones de la física en el pizarrón y el apasionante trabajo en la investigación científica.

Los cálculos que se encuentran en esta sección están adaptados a la física de la escuela secundaria y en la mayoría de los casos solo son aproximaciones muy simples a los resultados correctos. Como referencia general <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.

● PROBLEMA 7.1. ACELERADORES Y MOTOCICLETAS

El LHC consta de ocho tramos rectos unidos por ocho arcos de circunferencia, con una longitud total de $26.659 m^2$

Figura 7.18. Esquema del acelerador LHC del CERN.



Fuente: CERN Todd B, Dinius A, Nouchi P, Puccio B and Schmidt R., 2005.

En esta máquina se aceleran protones que viajan en 2808 grupos, cada uno con un número de protones igual a $1,15 \times 10^{11}$, a una velocidad $v=0,999999991c$, cercana a la de la luz, hasta alcanzar una energía de $7TeV$; $1TeV = 10^{12} eV$.

Se pide determinar:

1. La energía almacenada en cada uno de los paquetes de protones.
2. Comparar con la energía cinética de una motocicleta de $150 kg$ que viaja a $150 km/h$.

● **PROBLEMA 7.2. DISTANCIAS Y TIEMPOS EN LOS ACELERADORES**

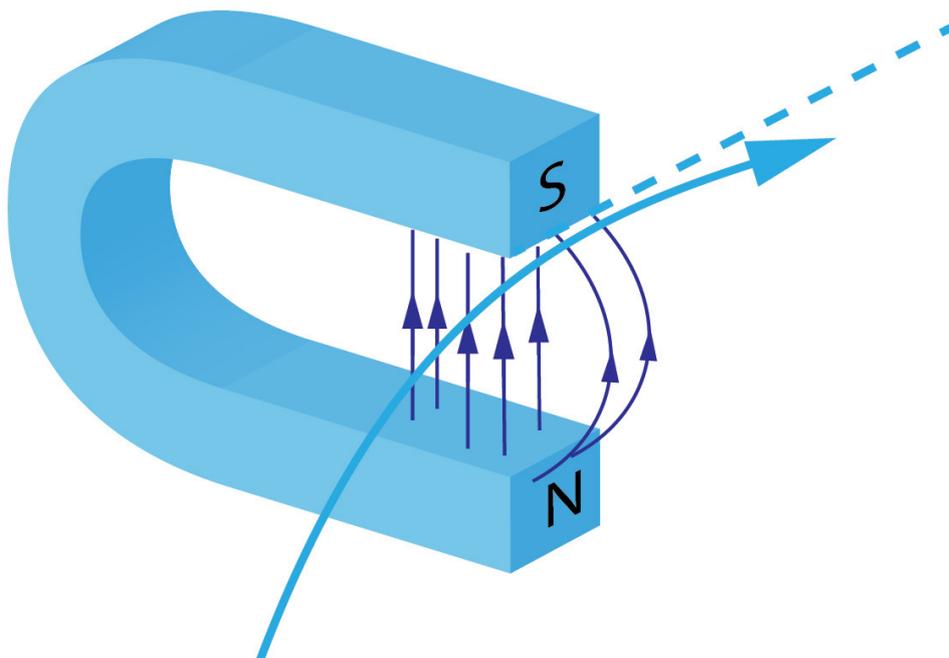
Para los protones del LHC, determine

1. El tiempo que tardan las partículas en realizar un giro completo en el túnel.
2. Cuántas vueltas alcanza a dar un protón en un segundo.
3. La distancia recorrida durante los 20 minutos que los protones necesitan para alcanzar la máxima energía. Compare esa distancia con la unidad astronómica (distancia tierra-sol).

● **PROBLEMA 7.3. FUERZAS EN LOS ACELERADORES**

Para que los protones sigan la órbita casi circular del LHC, en los sectores curvos debe actuar una fuerza centrípeta, como en todo movimiento circular. Esa fuerza es producida por 1232 imanes colocados en esos sectores, cada uno de los cuales tiene una longitud de $14,3 m$, lo que nos da para la longitud total de las partes curvas $1232 \times 14,3 = 17618 m$. Recordamos que el perímetro de la circunferencia del LHC es de $26659 m$, es decir que la longitud de las partes rectas es $9041 m$. Los imanes producen un campo magnético perpendicular a la trayectoria de los protones y la fuerza resultante es perpendicular al campo magnético y a la velocidad, lo que genera la trayectoria curva (haga un croquis con los vectores mencionados en este párrafo y compare con la figura 7.19).

Figura 7.19. Trayectoria de una partícula cargada en un campo magnético



Fuente: Adaptación de Xabier Cid Vidal y Ramón Cid Manzano.

Suponiendo que la velocidad de los protones es c (velocidad de la luz) y que su energía es de 7TeV , calcule:

1. El radio neto de la circunferencia que se obtendría eliminando en el LHC las partes rectas y colocando las partes curvas una a continuación de la otra.
2. El valor de la fuerza centrípeta que actúa sobre cada protón.
3. El valor de la fuerza total que actúa sobre todos los protones.
4. Según la tercera ley de Newton, el acelerador sufrirá una fuerza igual y contraria producida por cada protón. Considerando los dos haces con 2808 paquetes de protones cada uno y con un número de protones igual $1,15 \times 10^{11}$, calcule la fuerza de reacción sobre la parte curva del acelerador.

● **PROBLEMA 7. 4. COLISIONES EN LOS ACELERADORES**

Determinar a qué velocidad deben chocar dos electrones acelerados en el SLAC para que se libere energía suficiente para crear un par protón-antiprotón.

● **PROBLEMA 7. 5. INTERACCIONES**

Determinar el cociente entre la interacción gravitatoria y la interacción electrostática para el electrón y el protón en el átomo de hidrógeno.

● **PROBLEMA 7. 6. GRAVITACIÓN**

de lado, se encuentran tres masas puntuales de 200, 400 y 200 kg, respectivamente. Calcular la intensidad del campo gravitatorio en el baricentro del triángulo.

● **PROBLEMA 7. 7. GRAVITACIÓN Y ELECTRICIDAD**

Determine el valor de la carga eléctrica—del mismo signo— que deberían tener la Tierra y la Luna para compensar la atracción gravitatoria entre ellas.

Lista de referencias bibliográficas

- Cid Vidal, Xabier, Cid Manzano, Ramón. Acercándonos al LHC. http://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/1.home
Euskadi.eus. Hiru.eus. *El descubrimiento del electrón*, <https://www.hiru.eus/es/fisica/el-descubrimiento-del-electron>
Horror vacui. (2019, 14 de octubre). Wikipedia, La enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Horror_vacui
Menchaca, A. (1995). *El discreto encanto de las partículas elementales*. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/discreto>
Moreira, M. A. (2011). *Física de partículas. Un abordaje conceptual y epistemológico*. San Pablo: Editora Livraria da Física.
Sears, W. y Zemansky M. W. (2009). *Física universitaria con física moderna*, Vol. 2. México: Pearson Educación.
Tipler, P.A. (1994). *Física moderna*. Barcelona: Editorial Reverté.

Lista de figuras

- Anónimo. (ca. 1930). Retrato de Max Planck [Fotografía]. <https://library.si.edu/image-gallery/73553>
Brice, Maximilien, CERN. (2008). Aerial View of the CERN taken in 2008 [Fotografía]. <https://cds.cern.ch/record/1295244>.
Brice, Maximilien, CERN. (2011, 19 de enero). LHC tunnel [Fotografía]. <http://cdsweb.cern.ch/record/1324852>
CERN. (1995). Fotografía de las trazas de partículas elementales en la cámara de burbujas.
CERN. Brice, Maximilien y Egli, Laurent. (2012, 4 de julio). François Englert y Peter Higgs en el CERN [Fotografía]. <http://cds.cern.ch/record/1459503>
Cid Vidal, Xabier, Cid Manzano, Ramón. Movimiento simple. Trayectoria de una partícula cargada en un campo magnético. [Imagen animada]. https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.simple_movement
Day, Alexander. (s.f.). Demócrito [Grabado].

- Kaminski, Peter. (2004). Stanford-linear-accelerator-usgs-ortho-kaminski-5900 [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stanford-linear-accelerator-usgs-ortho-kaminski-5900.jpg>. Dominio público.
- Knott, Theresa. (2004). Simplified scheme of Millikan's oil-drop experiment [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simplified_scheme_of_Millikan%E2%80%99s_oil-drop_experiment.svg. CC BY-SA 3.0
- Mauil, Henry y Polyblank, George Henry (ca. 1860). Michael Faraday [Fotografía]. Wellcome Collection. <https://wellcomecollection.org/works/abbg8rwh>. CC BY 4.0
- Nave, Rod. (2016). Expansión del Big Bang y las fuerzas fundamentales [Diagrama]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Astro/unify.html>
- Nave, Rod. (s.f.). The Strong Force [Diagrama]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Forces/funfor.html>
- Perrin, Jean Baptiste. (1909). Mouvement brownien et réalité moléculaire [Diagrama]. Ann. de Chimie et de Physique (VIII) 18, 5-114. (Vectorización: Usuario;MiraiWarren; <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PerrinPlotz.svg>).
- Sándor, Zátyoni. (2002). Cathode rays in magnetic field [Fotografía]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Katódsugarak_mágneses_mezőben\(1\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Katódsugarak_mágneses_mezőben(1).jpg). CC BY-SA 3.0.
- Sentier, C. (1856). Amedeo Avogadro [Litografía].
- Todd B., Dinius A., Nouchi P., Puccio B. and Schmidt R. (2005). Architecture of Lhc Beam Interlock System, showing Beam Interlock Controllers (BIC) and Beam Permit Loops for all Lhc insertions. [Diagrama]. En The architecture, design and realisation of the Lhc beam interlock system icalleps (Geneva, 10-14 Oct. 2005) Europhys. Conf. Abstracts 29]. http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ica05/proceedings/pdf/p3_031.pdf
- Usuario:Benjah-bmm27. (2007). Dipole-dipole interaction between two hydrogen chloride (HCl) molecules. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dipole-dipole-interaction-in-HCl-2D.png>. Dominio público.
- Usuario:JabberWok (2007). Bohr atom model [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr_atom_model.svg. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Jorgelrm. (2012). Síntesis aditiva de color [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sintesis_aditiva_plano.svg. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Kurzon. (2014). El aparato de Geiger y Marsden [Diagrama]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geiger-Marsden_experiment_expectation_and_result_\(Spanish\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geiger-Marsden_experiment_expectation_and_result_(Spanish).svg). CC BY-SA 3.0.
- Usuario:MissM] [Traducción al español, Usuario:Alefsico]. (2012). El Modelo Estándar de partículas elementales [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-es.svg. CC BY-SA 3.0.
- Usuario:Papa November. (2008). Feynmandiagram [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Feynmandiagram.svg>. CC BY-SA 4.0.
- Wuertenberg, Michael. (2012). Murray Gell-Mann en World Economic Forum Annual Meeting 2012 [Fotografía]. https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Murray_Gell-Mann_-_World_Economic_Forum_Annual_Meeting_2012.jpg. CC BY-SA 2.0.

LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

(EL SEÑOR MENDELEIEV)

*Quisiera establecer un sistema no guiado por la casualidad,
sino por una especie de principio definido y exacto.*

Dimitri Mendeleiev

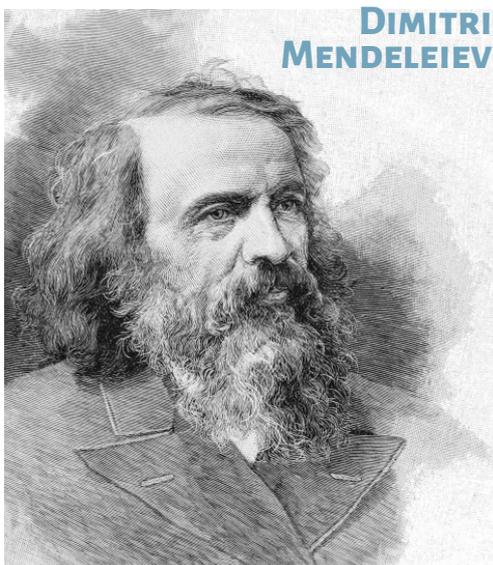
8.1. Introducción

La tabla periódica es un ordenamiento de los elementos químicos, organizado sobre la base de los números atómicos,¹ configuraciones electrónicas y propiedades químicas periódicas. La forma estándar consiste en una cuadrícula de los elementos, con filas denominadas *períodos* y columnas llamadas *grupos*. Representa más de un siglo de avances en la comprensión de las propiedades químicas.

En 1869 se produjo un acontecimiento muy importante, cuando Dimitri Mendeleiev publicó una versión de la tabla, basándose en descubrimientos propios y los anteriores de Antoine-Laurent de Lavoisier y John Newlands, donde los elementos se organizaban por peso atómico.

Algunas inconsistencias en el esquema de Mendeleiev fueron aclaradas cuando en 1913 Moseley descubrió que los átomos de un elemento dado tienen un número

¹ Número de protones.



DIMITRI MENDELEIEV

Egresó del Instituto Pedagógico de San Petersburgo en 1857 como el primero de su clase. Para acceder a un cargo de maestro de escuela presentó una tesis *Sobre volúmenes específicos* y otra para alcanzar una cátedra de química en la Universidad de San Petersburgo, *Sobre la estructura de las combinaciones silíceas*. Sistematizó las propiedades físico-químicas de los elementos y en 1869 publicó en su libro *Principios de la química*, la ley periódica de los elementos. A los 23 años estaba a cargo de un curso en la universidad. Fue a Heidelberg con una beca y realizó investigaciones con Kirchhoff y Bunsen. Participó en un congreso donde quedó impresionado por las ideas sobre el peso de los elementos planteadas por Cannizzaro. De vuelta en San Petersburgo se encontró sin trabajo fijo, lo que le dio tiempo para escribir su libro *Química orgánica*, influido por las ideas que había escuchado en Karlsruhe. En 1864 fue profesor del Instituto Tecnológico y en 1867 de la Universidad de San Petersburgo. Estaba a favor de la introducción de reformas en el sistema educativo y su liberalismo le impidió ser elegido presidente de la Academia de Ciencias. En un conflicto con las autoridades, intercedió a favor de los estudiantes y perdió su cargo. En 1955, el elemento químico número 101 fue designado como mendelevio (Md).

Fuente: Popular Science Monthly, Volume 40.

único de protones en su núcleo, igual al *número atómico* del elemento, pero pueden tener diferente masa, es decir diferente número de neutrones. Se trata de *isótopos* del mismo elemento. El nombre deriva de la raíz griega *iso*, que significa ‘igual’, y *topo*, que significa ‘lugar’, ya que ocupan el mismo lugar en la tabla. Al organizar los elementos en orden ascendente de número atómico –en lugar de masa atómica– logró solucionar los problemas de ordenamiento. Si bien son químicamente idénticos, los isótopos tienen propiedades que los diferencian entre sí. Un ejemplo es el del yodo: el isótopo más abundante de este elemento es el $^{130}_{53}I$; el isótopo $^{131}_{53}I$ es radiactivo y tiene importantes aplicaciones en medicina.

Fue un gigantesco triunfo de la teoría atómica que la mecánica cuántica pudiera –alrededor de 1926– explicar las razones físicas detrás de este ordenamiento descubierto empíricamente.

8.2. Un poco de historia

En 1661, Robert Boyle definió como *elemento químico* a toda sustancia que no puede descomponerse en otra más simple, por una reacción química. Esta definición sencilla fue usada durante más de doscientos años.

Más de cien años después, en 1789,² en su *Tratado elemental de química*, Lavoisier elaboró una lista de *sustancias* simples que creía no podían ser descompuestas en otras e incluían *oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, fósforo, mercurio, zinc y azufre*. Esto sirvió de base para la moderna lista de los elementos. En 1817, Döbereiner formuló uno de los primeros intentos de clasificar los elementos. Descubrió que podía ordenar una parte de ellos en grupos de tres, donde los miembros de cada grupo tienen propiedades químicas similares y calificó estos grupos como *tríadas*. Algunas de esas eran:

- cloro, bromo, yodo
- calcio, estroncio, bario
- azufre, selenio, telurio
- litio, sodio, potasio

Vemos que, en la tabla de Mendeleiev, los tres miembros de cada tríada están en la misma columna.

El geólogo francés Beguyer de Chancourtois, en 1862, fue el primero en notar la periodicidad de las propiedades de los elementos, cuando se los ordena por sus pesos atómicos. Ideó una forma temprana de la tabla periódica, que llamó *hélice telúrica*, porque el elemento central era el telurio. Con los elementos dispuestos en una espiral sobre un cilindro, por orden creciente de peso atómico, vio que los elementos con propiedades similares quedaban alineados verticalmente. El trabajo, que publicó en la revista de la Academia de Ciencias, utilizaba términos geológicos en lugar de químicos y no incluía el diagrama del cilindro. Como resultado, sus ideas recibieron poca atención hasta después de que la obra de Mendeleiev fuera publicada.

En 1865, el inglés Newlands clasificó los cincuenta y seis elementos conocidos en ese momento en once grupos, en función de sus propiedades. Observó que existían varios pares de elementos con propiedades similares, que se diferenciaban por un múltiplo de ocho en número de masa, y fue el primero en asignarles un número atómico. Cuando su *ley de las octavas* fue publicada, comparando esa periodicidad de ocho con la escala musical, fue ridiculizado por algunos de sus contemporáneos. Su conferencia en la Sociedad Química de marzo de 1866 no se publicó, con el argumento de que esos *temas teóricos pueden ser objeto de controversia*.

² Año de la Revolución Francesa; en 1794 un tribunal revolucionario condenó al famoso químico a morir guillotinado.

Los elementos químicos naturales corresponden a *números atómicos* que van desde 1 (hidrógeno) a 92 (uranio), que es el límite superior para la estabilidad nuclear; sin embargo, entre los noventa y dos elementos hay algunos que podemos llamar *cuasi estables*, pues decaen con un período de vida muy largo, del orden de los millones de años. Una excepción es el elemento número 43 (tecnecio) que es naturalmente inestable. Fue predicho por Mendeleiev y preparado por primera vez en un experimento realizado en 1937 en la Universidad de Palermo (Sicilia) por Perrier y Segrè. Es el más liviano de los elementos radiactivos naturales y no tiene isótopos estables.

Entre los elementos estables se incluyen los más conocidos como el oxígeno y el hidrógeno que forman el agua, el nitrógeno y el oxígeno que se encuentran en el aire y los minerales comunes como el hierro, el aluminio, el oro y la plata. Entre los inestables se encuentran los elementos radiactivos naturales, que tardan millones de años en decaer. Así, por ejemplo, un isótopo del torio, ${}^{232}_{90}\text{Th}$, se desintegra con una vida media de catorce mil millones de años y el ${}^{238}_{92}\text{U}$, de cuatro mil quinientos millones de años. Esto significa que en toda la historia de la Tierra, solo una parte de la reserva original de estos isótopos ha tenido posibilidad de desintegrarse.

Mendeleiev desarrolló una tabla periódica según el orden creciente de masas atómicas. Colocó los elementos en columnas verticales empezando por los más livianos y cuando llegaba a un elemento que tenía propiedades semejantes a las de otro ya ordenado, iniciaba una nueva columna. Al poco tiempo, perfeccionó su tabla acomodando los elementos en filas horizontales, sistema que le permitió predecir con bastante exactitud las propiedades de elementos no descubiertos hasta ese momento.

Entre esos había previsto en 1871 la existencia del elemento que llamó *eka-silicio*, con propiedades que correspondían a su lugar en la tabla periódica. El alemán Wilber demostró en 1886 la existencia de este elemento, el germanio, lo que confirmó la validez de la tabla, teniendo en cuenta las similitudes entre las propiedades predichas y las observadas. Este éxito logró la aceptación general de este sistema de ordenación que aún hoy sigue aplicándose. Además, Mendeleiev había previsto las propiedades de *compuestos desconocidos* hasta entonces, como los tetracloruros, de fórmula Cl_4X .

En la década de 1930 se descubrieron las llamadas *tierras raras*, un grupo con propiedades químicas muy similares entre sí, que hacía muy difícil su separación. Al agregar estos nuevos elementos a la tabla, se encontraron dificultades. Glenn

Masa atómica

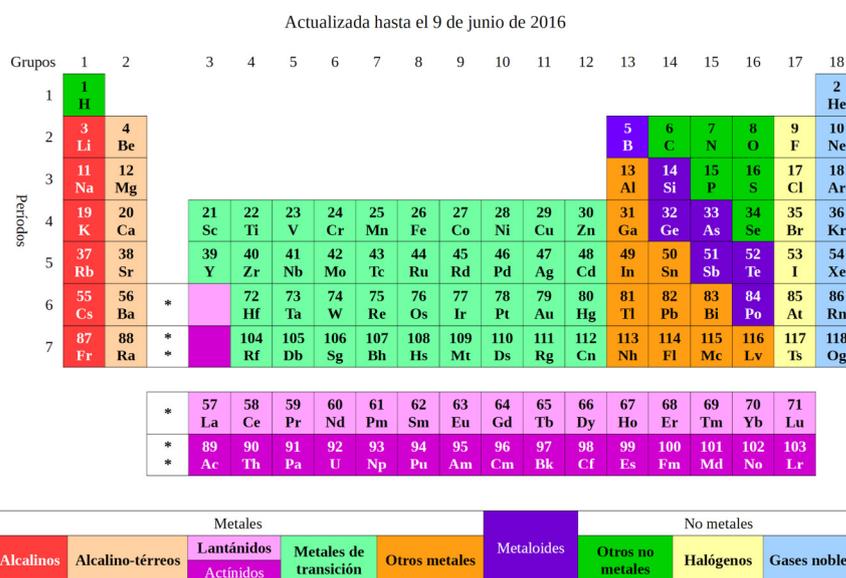
John Dalton fue el primero en proponer, en 1808, que los átomos tenían peso. Tal como él los definió, los átomos eran duros, sólidos, partículas indivisibles, sin espacios internos. Eran indestructibles y conservaban su identidad en todas las reacciones químicas. Más aún, cada elemento tenía su propio tipo específico de átomo, diferente a los de otros elementos. Propuso que los átomos eran materia tangible y por lo tanto tenían peso. Debido a que eran demasiado pequeños para ser vistos o medidos por los métodos comunes, los pesos absolutos de los átomos no podrían ser determinados. Las primeras mediciones se hicieron mediante la comparación de los pesos de varios átomos con el hidrógeno, que se eligió como unidad de comparación. Debido a que es la sustancia más liviana conocida, los pesos de los otros elementos estarían muy cerca de números enteros. El peso del oxígeno podría calcularse gracias a anteriores trabajos de Humboldt y Gay-Lussac, quien encontró que el agua consistía de dos elementos, hidrógeno y oxígeno, y que había ocho partes de oxígeno por cada parte de hidrógeno. Al carecer de conocimiento acerca de cuántos átomos de hidrógeno y de oxígeno se combinan en una molécula de agua, Dalton tuvo que volver a hacer algunas suposiciones. Supuso que la naturaleza es básicamente muy simple y, por tanto, un átomo de hidrógeno se combina con solo un átomo de oxígeno. De esa hipótesis y el hecho de que al hidrógeno se le asigna el peso de una unidad, se deducía que el oxígeno tendría un peso de ocho unidades. Si la relación entre el hidrógeno y el oxígeno en el agua no fuera uno a uno, pero otra, el peso del oxígeno tendría que ser ajustada en consecuencia. Dalton utilizó los resultados experimentales y un razonamiento similar para preparar la primera tabla de pesos atómicos; debido al desconocimiento acerca de las fórmulas reales de las sustancias, muchos de los pesos eran incorrectos y tuvieron que ser modificados posteriormente.

Seaborg, que entonces trabajaba con Enrico Fermi en Chicago, resolvió el problema *expulsándolos afuera*. Los llamó *lantánidos* y *actínidos* y esa expulsión permitió más tarde ubicar correctamente otro grupo de elementos –los *transactínidos*– creados artificialmente a través de *trasmutaciones nucleares*.³ Estas dos familias de elementos se muestran actualmente separados del cuerpo principal de la tabla. Seaborg fue uno de los principales codescubridores de plutonio, americio, curio, berkelio, californio, einstenio, fermio, mendelevio, nobelio y el *elemento 106* (cuyo nombre es el seaborgio, denominado así en honor de Seaborg, que aún vivía).

8. 2. 1. Estructura de la tabla periódica

La forma estándar de la tabla comprende una cuadrícula de 18×7 que contiene el cuerpo principal de los elementos. Debajo de ese cuerpo se ubica una fila doble más pequeña con los lantánidos y los actínidos.

Figura 8. 1. Tabla periódica de los elementos



Fuente: Salvador 85, 2016.

Por razones que veremos más adelante, la tabla también puede ser descompuesta en cuatro bloques:

- Izquierda: bloque s: columnas 1-2
- Derecha: bloque p: columnas 13-18
- Centro: bloque d: columnas 3-12
- Abajo: bloque f.

Las filas de la tabla se denominan *períodos*; las columnas de los bloques *s*, *d*, y *p* se denominan *grupos*, algunos de los cuales tienen nombres propios como los *halógenos* (F, Cl, Br, I, At); también los *gases nobles* (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, Og) forman un grupo importante.

Los elementos se ubican en orden creciente de número atómico. Una nueva fila (período) se inicia cuando las propiedades se repiten, lo que corresponde a que se ha completado una capa cerrada de electrones y la próxima tiene su primer electrón

³ Consiste en obtener nuevos núcleos estables o inestables a partir de núcleos específicos (núcleos blancos), utilizando como proyectiles otros núcleos o partículas simples (neutrones, protones, etcétera)

fuera de esa capa. Las columnas (grupos) están determinadas por la configuración electrónica del átomo; elementos con el mismo número de electrones en una subcapa particular, caen en la misma columna (por ejemplo, oxígeno y selenio están en la misma columna, ya que ambos tienen cuatro electrones en la capa más externa). Los elementos con propiedades químicas similares, generalmente se clasifican en el mismo grupo de la tabla periódica, aunque en el bloque *f*, y hasta cierto punto en el bloque *d*, los elementos en el mismo período tienden a tener propiedades similares entre sí. Por lo tanto, es relativamente fácil predecir las propiedades químicas de un elemento si se conocen las propiedades de los elementos que lo rodean.

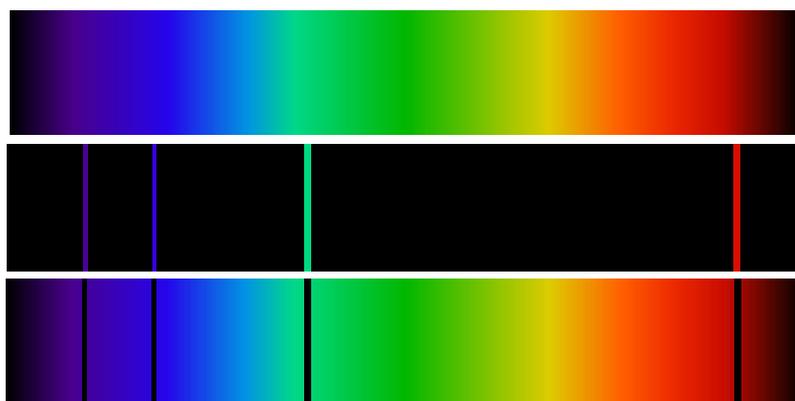
8.3. Las líneas de emisión atómica

Un importante aporte a la comprensión de la estructura atómica provino del estudio de las líneas de emisión atómica. Newton había estudiado en 1666 el fenómeno de la descomposición de la luz solar en los colores del arcoíris. Experimentos posteriores se usaron para descomponer y estudiar la luz de otras fuentes terrestres o astronómicas, como la llama de diferentes gases, la descarga eléctrica en tubos con gas o la luz de las estrellas. La descomposición de la luz mediante un prisma siempre fue la primera indicación de los espectros que se asocian unívocamente con determinados componentes químicos.

Podemos tener una idea somera de lo que esto significa, arrojando una pizca de sal de cocina a la llama de una hornalla de gas encendida. Veremos que, por unos momentos, la llama toma un color amarillento, que coincide con el de las lámparas de sodio del alumbrado público. El calor de la llama de gas excita a los átomos de *Na* contenidos en la sal; y al decaer emiten ese color característico.

En la figura 8.3 se muestran los niveles discretos de energía en el modelo atómico de Bohr, en particular, la transición desde $n = 3$ a $n = 2$, con emisión de un fotón de energía $h\nu$. Si ese átomo fuera iluminado con luz de esa frecuencia, esta sería absorbida y aparecería una línea oscura (de absorción) en el espectro. Estos fenómenos se ilustran en la figura 8.2.

Figura 8.2. Arriba: espectro continuo. Centro: líneas de emisión de un átomo. Abajo: líneas de absorción del mismo elemento químico

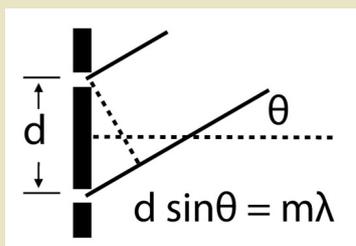


Fuente: Jhausauer, 2007.

En 1821 Fraunhofer introdujo un importante avance experimental mediante la sustitución de los prismas por una *red de difracción* para producir la luz dispersada. Utilizó las propiedades ondulatorias estudiadas por Young y realizó experimentos para demostrar los efectos de emplear luz que pasa por una, dos y más

Red de difracción

Para separar la luz de diferentes longitudes de onda con alta resolución se usa una *red de difracción*, más efectiva que un prisma. Por eso es indicada para la determinación de espectros atómicos en diversos instrumentos. Está formada por una gran cantidad de ranuras paralelas, estrechamente espaciadas. La condición de máxima intensidad es la misma que para una ranura o ranuras dobles,



pero al aumentar el número de rendijas, los máximos de difracción son más intensos y angostos, lo que aumenta la resolución.



Fuente: Deglr6328, 2005.

Espectro de hidrógeno obtenido excitando mediante una descarga eléctrica un tubo de vidrio fino con el gas, observado a través de una red de difracción.



Fuente: Luis Fernández García, 2005.

Las pistas de un CD actúan como una red de difracción, separando los colores de la luz blanca. La separación entre pistas en un cd es de $1,6 \mu\text{m}$ - 625 pistas por mm . La longitud de onda de la luz roja es de 600 nm , lo que da un primer máximo de difracción a 22° .

rendijas, con lo que desarrolló una red de difracción, que se comporta como cientos de rendijas, mejorando la resolución espectral. La técnica espectroscópica mejoró continuamente durante todo el siglo XIX.

El estudio sistemático de los espectros de los elementos químicos fue iniciado en 1860 por Kirchhoff y Bunsen, que aplicaron la técnica de Fraunhofer y pudieron efectuar una asociación unívoca de las líneas espectrales con diferentes elementos.

Alrededor de 1880, Rydberg estudió las líneas espectrales de los metales alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) que ocupan la misma columna que el hidrógeno en la tabla de Mendeleiev. Notó que las líneas aparecían ordenadamente en una serie y descubrió que podía simplificar el análisis usando el *número de onda* $1/\lambda$, la inversa de la longitud de onda, que mide el número de ondas que entran en la unidad de longitud. Buscó una función única que pudiera generar todas las series conocidas y elaboró una fórmula empírica para describir la relación entre la longitud de onda y números enteros. Reescribió la fórmula debida a Balmer⁴ en función de los números de onda $1/\lambda$ y arribó a la siguiente expresión para la longitud de onda de las líneas del hidrógeno

$$\frac{1}{\lambda} = R_\infty \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (8.1)$$

donde $R_\infty = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ es la *constante de Rydberg* y n_1 y n_2 son enteros positivos iguales o mayores que 1, con $n_1 < n_2$. La relación (8.1) nos da las series espectrales del hidrógeno⁵,

4 Algunos años antes Balmer había encontrado una sistemática para las longitudes de onda de una serie espectral del hidrógeno,

que respondía a la relación $\lambda = \frac{bm^2}{m^2 - 4}$ donde m es un entero y b una constante.

5 http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/analisis-aplicado-a-la-ingenieria-quimica/contenidos/course_files/Diapositivas_tema_6.pdf
<http://fresno.pntic.mec.es/~fgutie6/quimica2/ArchivosPDF/06EstructuraMateria.pdf>

Series espectrales del hidrógeno				
Serie	n_1	n_2	Luz	λ
Lyman	1	≥ 2	UV	91 nm
Balmer	2	≥ 3	Visible	364 nm
Paschen	3	≥ 4	IR	820 nm
Brackett	4	≥ 5	IRL	1458 nm
Pfund	5	≥ 6	IRL	2278 nm
Humphrey	6	≥ 7	IRL	3280 nm

Rydberg también derivó una relación para el espectro de los átomos *hidrogenoides* –con un solo electrón– (por ejemplo, He⁺, Li²⁺, Be³⁺ y B⁴⁺)

En este caso la relación resulta

$$\frac{1}{\lambda} = R_M Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (8.2)$$

donde ahora $R_M = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m_e}{M}}$ es la constante de Rydberg para el elemento en cuestión, Z

el número atómico, m_e la masa del electrón y M la masa atómica.⁶ Introduciendo un valor efectivo para Z , para tener en cuenta el efecto de compensación de la carga nuclear por la carga de los otros electrones –fenómeno llamado *apantallamiento*–; esta ley también provee las longitudes de onda correctas para electrones alejados del núcleo.

8.4. Modelo atómico de Bohr

En 1913 Niels Bohr desarrolló el modelo que lleva su nombre, con la intención de tener una representación del átomo capaz de explicar la estabilidad de la materia y los espectros de emisión y absorción discretos que se observan en los gases. Describió el átomo de hidrógeno con un protón en el núcleo y un electrón girando a su alrededor. Se consideraba que la mecánica de Newton –que funciona correctamente en la escala del mundo macroscópico y también para explicar la estructura del Sistema Solar– podía extenderse al ámbito atómico.

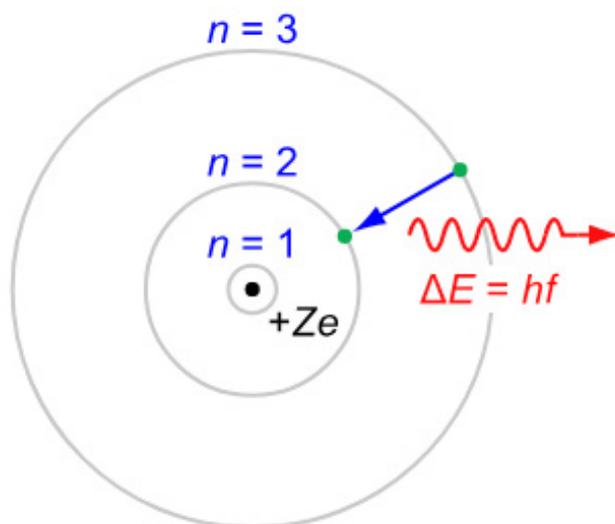
El modelo de Bohr partía conceptualmente de –y se basaba en– el modelo atómico de Rutherford, en el que los electrones giran en órbitas circulares alrededor del núcleo, ocupando la órbita de menor energía posible, es decir, la más cercana al núcleo.

Según el electromagnetismo clásico, una partícula cargada moviéndose en un círculo emite energía.⁷ Luego los electrones, en este modelo planetario, colapsarían sobre el núcleo en breve tiempo. Para superar esto, Bohr postuló que los electrones solamente podían moverse en órbitas específicas, caracterizadas por su nivel energético. Cada órbita se identificaba con un número entero $n \geq 1$ (regla 1). Este número se denomina *número cuántico principal*. Supuso además que la cantidad de movimiento angular del electrón estaba cuantizada y solo podía variar en múltiplos enteros de la constante de Planck, que tiene dimensiones de cantidad de movimiento angular (regla 2). De acuerdo al valor de n , calculó los radios de las órbitas permitidas y la correspondiente energía.

6 Esta expresión para la constante de Rydberg tiene en cuenta la corrección debida a que, tanto el electrón como el núcleo, se mueven alrededor del centro de masa común. En la expresión para la constante R_∞ se supone que el electrón se mueve alrededor de un núcleo fijo de masa infinita.

7 La teoría de Maxwell prevé que una partícula cargada, acelerada, emite radiación; el movimiento circular es un movimiento acelerado.

Figura 8.3. Diagrama del modelo atómico de Bohr



Fuente: JabberWok, 2007.

El modelo de Bohr es entonces una combinación de la mecánica clásica con reglas *ad hoc* diseñadas al solo efecto de lograr un resultado: es un *modelo heurístico*.⁸ La figura 8.3 muestra el modelo de Rutherford-Bohr del átomo de hidrógeno ($Z = 1$) o de un ión hidrogenoide (un solo electrón pero $Z > 1$), donde la carga negativa de los electrones rodea al núcleo atómico de carga positiva; los electrones ocupan las órbitas que se muestran como círculos grises. El salto de un electrón de una órbita a otra de menor radio está acompañado por la emisión de un *cuanto* (quantum) de energía electromagnética de valor $h\nu$, donde ν es la frecuencia de la luz emitida.

El electrón se mantiene en una órbita circular a causa de la atracción electrostática producida por el núcleo –el protón, en el caso del hidrógeno– debida a la ley de Coulomb,⁹

$$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8.3)$$

donde $q_1 = e$ es la carga del protón y $q_2 = -e$ es la del electrón. Como en el problema de Kepler, la fuerza atractiva (en este caso la fuerza de Coulomb) debe igualar al producto de la masa por la aceleración centrípeta. Por tanto se cumple

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{k_e e^2}{r^2} \quad (8.4)$$

donde m_e es la masa, e la carga del electrón y k_e la constante de Coulomb. Esta relación determina la velocidad orbital como función del radio

$$v = \sqrt{\frac{k_e e^2}{m_e r}}$$

y también nos permite determinar la energía total como función del radio, que resulta¹⁰

⁸ Según el diccionario de la RAE *heurístico* se denomina en algunas ciencias, a la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etcétera.

⁹ Comparar con la ley de Newton de la gravitación universal.

¹⁰ Comparar con el caso de la energía potencial gravitatoria.

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{k_e e^2}{r} = \frac{-1}{2} \frac{k_e e^2}{r} \quad (8.5)$$

Vemos que la energía total es negativa e inversamente proporcional a r . Esto significa que cuesta una cierta energía alejar al electrón del núcleo. Para valores muy grandes de r , la energía tiende a cero, lo que corresponde a un electrón en reposo infinitamente lejos del protón. Para iones hidrogenoides (un solo electrón ligado a un núcleo de carga Ze) debemos cambiar $k_e e^2$ por $Zk_e e^2$ donde Z es el número atómico (número de protones).

La regla cuántica de Bohr para la cantidad de movimiento angular (regla 2), que mencionamos más arriba, puede enunciarse para el caso presente, diciendo que el módulo $L = m_e v r$ de la cantidad de movimiento angular $\mathbf{L} = m_e \mathbf{v} \times \mathbf{r}$ debe ser un múltiplo entero de \hbar :

$$L = m_e v r = n \hbar \quad (8.6)$$

Sustituyendo esta condición en la expresión de la velocidad obtenemos el radio r_n de la órbita en términos de n :

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{k_e e^2 m_e} \quad (8.7)$$

El valor más pequeño de este radio se obtiene para $n = 1$ y se denomina *radio de Bohr*; corresponde al estado fundamental del átomo de hidrógeno,

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{k_e e^2 m_e} = 0,529 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (8.8)$$

Para la velocidad del electrón en la órbita correspondiente al número cuántico n podemos escribir $v_n = \frac{k_e e^2}{\hbar c} \frac{c}{n} = \alpha \frac{c}{n}$ donde

$$\alpha = \frac{k_e e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

es una combinación adimensional de las constantes naturales, llamada *constante de estructura fina*.

Vemos que la velocidad del electrón disminuye con n creciente y es una fracción del orden de un centésimo de la velocidad de la luz, una unidad natural de velocidad. También vemos aquí que la velocidad en una órbita dada disminuye a medida que aumenta el número cuántico n , una consecuencia de la disminución de la fuerza atractiva del núcleo con la distancia.

La velocidad del electrón en el estado fundamental del átomo de hidrógeno resulta

$v_1 = \alpha c = \frac{c}{137}$, es decir, del orden de un centésimo de la velocidad de la luz. Si se trata

de un átomo hidrogenoide –un ión con un núcleo de carga Ze – la velocidad del electrón en el nivel más bajo de energía resulta

$$v_1 = (Z\alpha)c \quad (8.9)$$

Para un ión con $Z = 92$ (uranio) esta velocidad vale $v = (92 / 137)c = 0,67c$, lo que significa que los electrones cercanos al núcleo, en un ión de ese tipo, se mueven a velocidades relativistas y su tratamiento requiere el uso de la *mecánica relativista*.

La energía del n -ésimo nivel está determinada por el radio r_n y resulta

$$E_n = \frac{-(k_e e^2)^2 m_e}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -Ry \frac{1}{n^2} \quad (8.10)$$

La combinación de constantes que aparece aquí vale

$$Ry = \frac{(k_e e^2)^2 m_e}{2\hbar^2} = 13,6 \text{ eV} \quad (8.11)$$

que se conoce como la *energía de Rydberg*, o simplemente *Rydberg*. Si escribimos la fórmula de Bohr para la energía emitida, en términos de la frecuencia ν de la luz emitida obtenemos

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R_E c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

y la combinamos con la relación de Einstein para la energía de un fotón

$$E = h\nu$$

obtenemos

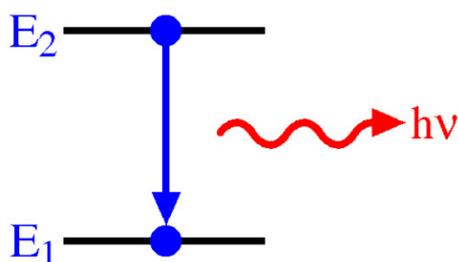
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{Rhc}{n_1^2} - \frac{Rhc}{n_2^2} \quad (8.12)$$

Vemos así que la fórmula empírica de Rydberg corresponde, en el modelo de Bohr, a la diferencia de energía entre dos niveles atómicos. La luz emitida tiene una energía dada por la diferencia de energía entre el nivel inicial en que se encontraba el electrón y el nivel final al que decae ($n_f = n_1; n_i = n_2$), es decir,

$$\Delta E = E_i - E_f = R_E \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (8.13)$$

donde $R = \frac{R_E}{hc}$.

Figura 8.4. Esquema de una transición entre niveles y la consiguiente emisión de luz



Fuente: PAR, 2005.

La coincidencia con las observaciones y la predicción de series espectroscópicas por entonces todavía no observadas ayudaron a brindar gran aceptación al modelo. Los físicos se lanzaron con entusiasmo a explicar la estructura y los espectros de los átomos más complejos. El resultado fue una gran desilusión porque, para átomos con más de un electrón, el modelo de Bohr no da respuestas satisfactorias. La primera luz de esperanza se encendió en París.

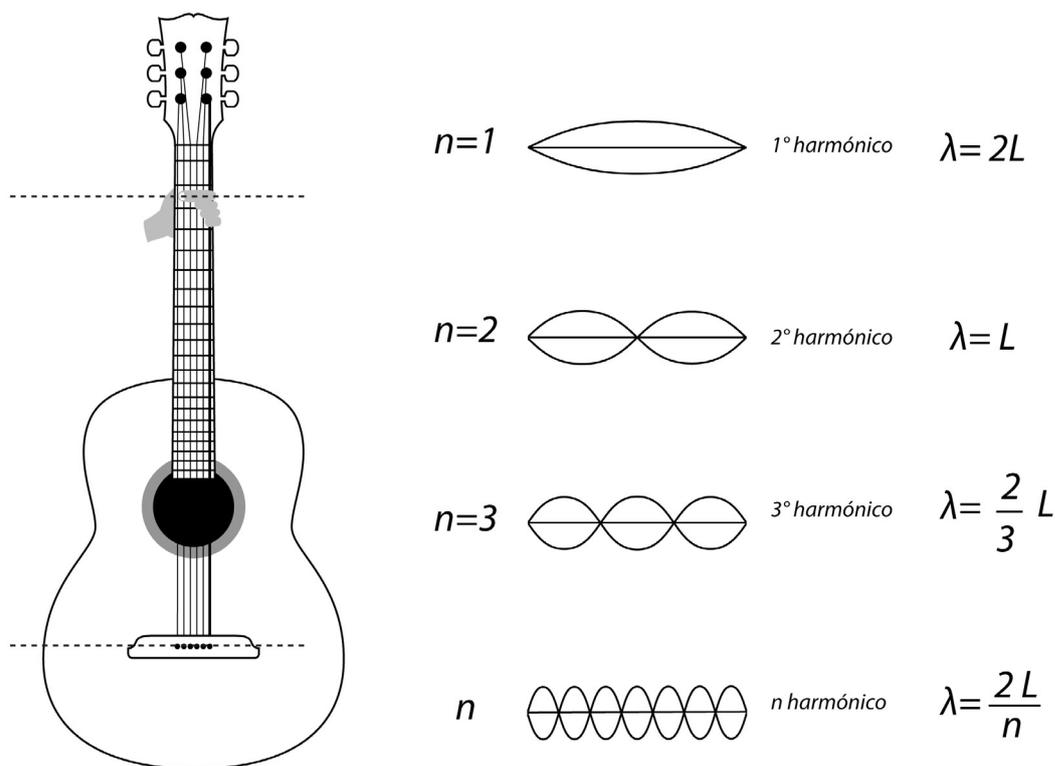
8.5. Hipótesis ondulatoria

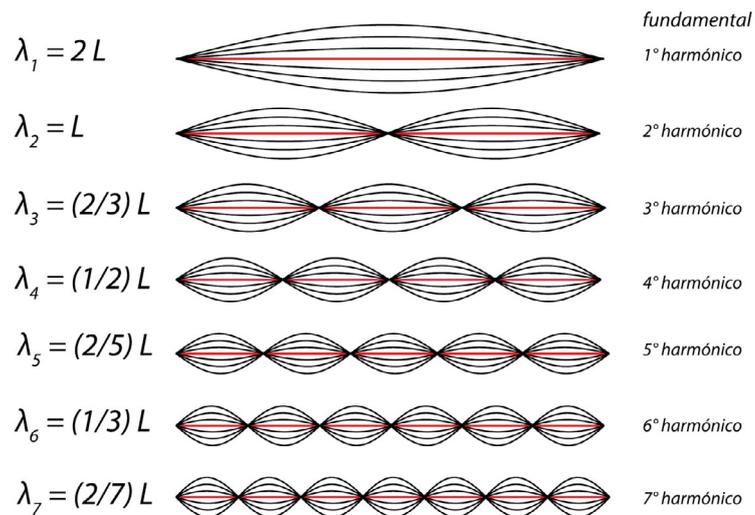
El físico francés Louis de Broglie postuló en 1922 que los electrones tienen un comportamiento ondulatorio. Decía de Broglie:

En conversaciones con mi hermano siempre llegábamos a la conclusión de que los rayos X se caracterizaban por ser corpúsculos y también ondas. Por ello, en el verano de 1923, concebí la idea de ampliar esta dualidad a las partículas materiales, especialmente a los electrones. Recordé que la teoría de Hamilton-Jacobi señalaba algo en esa dirección, ya que es aplicable a las partículas y, además, representa una óptica geométrica; en mecánica cuántica uno obtiene números enteros para los fenómenos, números que no se encuentran en mecánica pero que ocurren en manifestaciones ondulatorias y en todos los problemas que se ocupan del movimiento de las ondas.

Esta hipótesis se basa en la propiedad de las ondas, de ajustarse al espacio que ocupan. Una cuerda de guitarra vibra produciendo una nota que depende de su longitud. Cuando se la presiona sobre el mástil para cambiar la longitud disponible, la misma cuerda produce una nota diferente. El número de máximos y mínimos de una cuerda vibrante depende del espacio disponible.

Figura 8.5. Armónicos en una cuerda

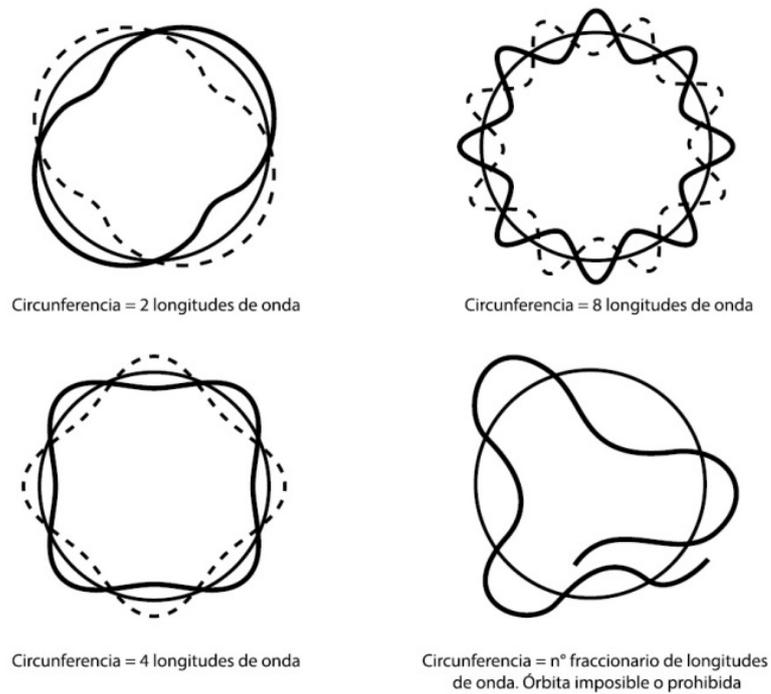




Fuente: Adaptado de Ricardo Cabrera, 2009.

Louis de Broglie imaginó que las reglas de cuantización de Bohr podrían derivarse del comportamiento de una onda, que se ajusta a la circunferencia de la órbita.

Figura 8.6. Ondas en una circunferencia



Fuente: Adaptado de ASOCAE ONGD, s.f.

A partir de esa idea, en 1926 Schrödinger derivó la ecuación diferencial –que lleva su nombre– para la función de onda $\psi(\mathbf{r}, t)$, que representa la onda que postuló de Broglie:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}; t)}{\partial t} = \left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}; t)$$

donde $V(\mathbf{r})$ es el potencial al que está sujeto el electrón. El primer éxito de esta nueva teoría fue la reobtención de los niveles del átomo de hidrógeno ya obtenidos con el modelo de Bohr, que tenían buen acuerdo con los experimentos. Para un estado estacionario de energía E se postula una función de la forma

$$\psi(\mathbf{r}; t) = e^{-iEt} \psi(\mathbf{r})$$

donde $\psi(\mathbf{r})$ satisface la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo,

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r})$$

Puede mostrarse que la solución de esta ecuación para el átomo de hidrógeno, se escribe en coordenadas esféricas, como producto de tres factores

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)P(\theta)F(\varphi)$$

Con esta forma para la solución, se obtiene una ecuación diferencial para cada variable.

Las soluciones de la ecuación de Schrödinger para valores negativos de E (condición de estado ligado) solo son posibles –como postulaba Bohr– para ciertos valores discretos de E . Esas soluciones están caracterizadas por tres números n, l, m asociado cada uno de ellos a:

- $n = 1, 2, 3$ energía de los estados
- $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ módulo de la cantidad de movimiento angular
- $m_l; -l \leq m_l \leq l$ proyección (según un eje) de la cantidad de movimiento angular.

La energía E que aparece en la ecuación toma el valor

$$E_n = \frac{-(k_e e^2)^2 m_e}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -Ry \frac{1}{n^2}$$

independiente de los otros números cuánticos l y m_l . Por tanto, el espectro de energía coincide con el obtenido por Bohr. Una diferencia esencial es que el esquema de Schroedinger puede extenderse a átomos con más de un electrón.

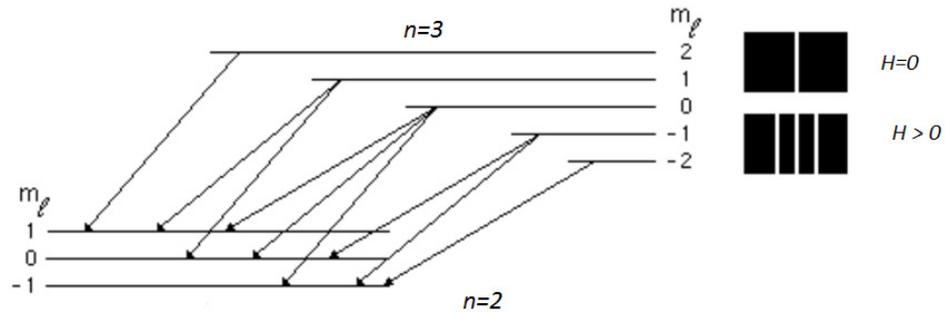
Como la energía solo depende del número cuántico n , los estados asociados con esa energía son todos los que corresponden a $n-1$ distintos valores de l y $2l+1$ valores de m_l ; un total de

$$g = \sum_l^{n-1} (2l+1) = n^2$$

Estos números permiten explicar los espectros atómicos, asociando las líneas espectrales a transiciones entre diferentes estados, como en el caso del átomo de Bohr. El número l está vinculado al desdoblamiento de las líneas espectrales en presencia de un campo magnético, fenómeno conocido como *efecto Zeeman*. Esto se explica por la aparición de subniveles que corresponden a las distintas energías de los electrones según el valor del número cuántico m . En una imagen semiclassical, y como se trata de una partícula cargada, puede decirse que al girar en su órbita el electrón genera un momento magnético orbital, que tiene distinta energía según

cuál sea su orientación respecto al campo magnético aplicado. El esquema de energías se vería como se indica en la figura 8.7.

Figura 8.7. Efecto Zeeman en la transición electrónica de la capa $n=3$ (M) a la capa $n=2$ (L). Cada capa se abre en orbitales de diferente impulso angular, por efecto de un campo magnético

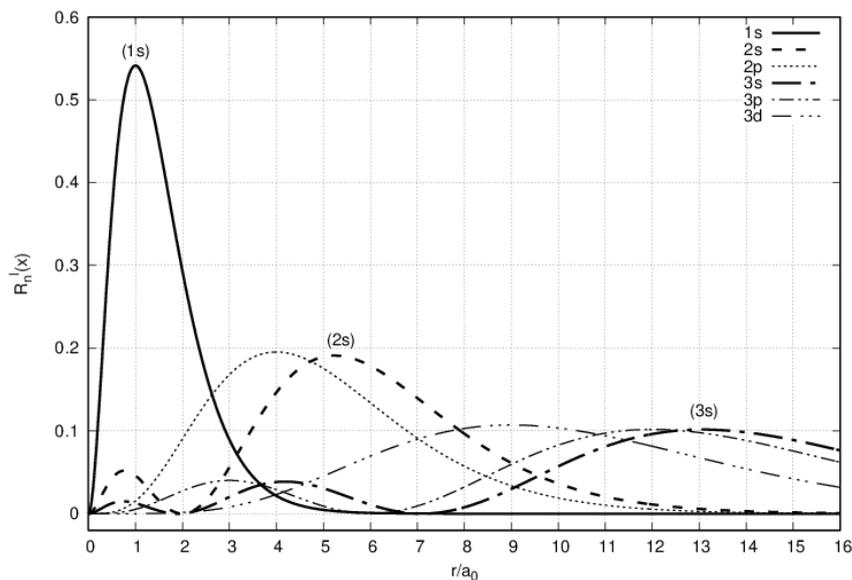


Fuente: Rod Nave, s.f.

Si se aplica un campo magnético, las líneas espectrales asociadas a la transición $n = 3 \rightarrow n = 2$ se desdoblán en varias líneas (*efecto Zeeman*), debido a la interacción entre el campo magnético y el momento dipolar magnético asociado a la cantidad de movimiento orbital. En el caso $H = 0$, las energías dependen solo del número cuántico principal n , y las emisiones se producen con una sola longitud de onda. Son visibles solo tres líneas ya que las transiciones siguen una *regla de selección*: el número cuántico m_l , cambia de a uno.

Para $l = 0$ la función $|\psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi)|^2$ no depende de los ángulos y, por tanto, la distribución de probabilidad $P_{nl}(r)$ depende solo del radio r . El estado de menor energía corresponde a $n = 1, l = 0$ asociado con la presencia del electrón más próximo al núcleo, donde la energía potencial eléctrica es más negativa. La figura 8.10 muestra la distribución espacial de la probabilidad de encontrar el electrón, en los estados $l = 0, l = 1$ y $l = 2$.

Figura 8.8. Densidad de probabilidad radial



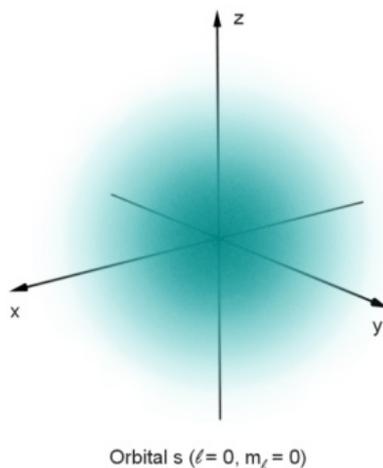
Fuente: Hernán Asorey, 2019.

Densidad de probabilidad radial

$$(n = 1, l = 0); (n = 2, l = 0, l = 1); (n = 3, l = 0, l = 1, l = 2).$$

La figura 8.9 muestra, con la ayuda de la densidad de puntos, la densidad de probabilidad de encontrar al electrón en el entorno del protón, para el orbital 1s .

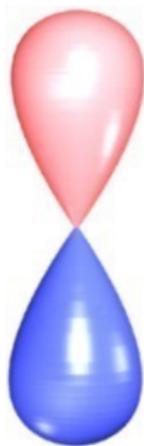
Figura 8.9. Densidad de probabilidad en el estado fundamental



Fuente: R. J. Hall, 2008.

En la figura 8.10 vemos la densidad de probabilidad (simplificada) de encontrar el electrón en el orbital 2p . Los colores indican el cambio de signo de la función de onda. Hay tres orbitales, orientados según cada uno de los ejes coordenados; la figura corresponde a la orientación el eje z .

Figura 8.10. Superficie de $|\psi(\vec{r})|^2$ para un orbital p ($l = 1$) . Los colores representan el signo de la función de onda



Fuente: Joël Gubler, 2006.

A pesar del éxito de la teoría en la obtención de los niveles de energía, inicialmente no se sabía qué podía representar la función $\psi(\mathbf{r})$; en 1926 Max Born sugirió que las soluciones de esta ecuación son tales que la cantidad $\psi(\mathbf{r})^2 dV$ representa la *probabilidad* de encontrar al electrón en el volumen dV alrededor del punto (\mathbf{r}) . La introducción del concepto de probabilidad en la física atómica significó una

revolución epistemológica de proporciones y fue muy resistida por algunos. En particular Einstein fue uno de los adalides de esta oposición; en una carta a Bohr donde se negaba a aceptar la hipótesis probabilística, la desechaba diciendo «Dios no juega a los dados». Una de las respuestas de Bohr a esta postura fue «deja de decirle a Dios lo que tiene que hacer».

La definición clásica de probabilidad es:

$$\text{Probabilidad de un suceso} = \frac{N^\circ \text{ de casos favorables}}{N^\circ \text{ de casos posibles}}$$

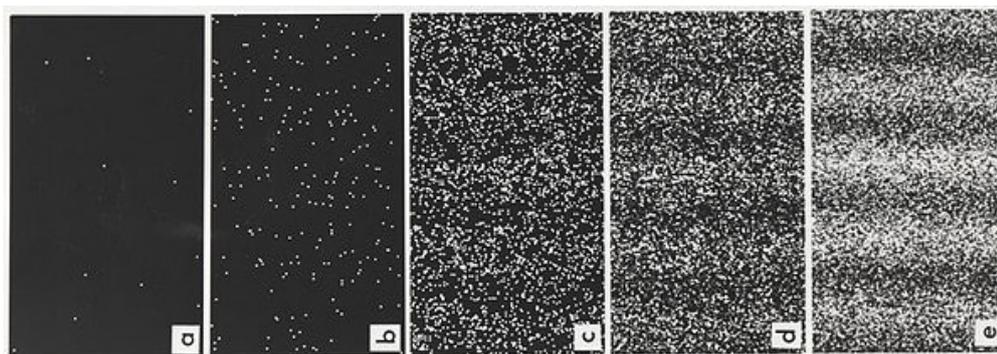
Cuando decimos por ejemplo, que la probabilidad de que una moneda caiga con la cara hacia arriba es de $1/2$, podemos interpretarlo de dos maneras:

1. Interpretación en un conjunto de sistemas idénticos: si arrojamos al aire simultáneamente cien monedas, encontraremos que en forma aproximada la mitad cae con la cara hacia arriba.
2. Interpretación en un único sistema: si arrojamos una sola moneda por vez decimos que, en cada tirada, existe una probabilidad $1/2$ de que la moneda caiga con la cara hacia arriba.

En el caso de la física atómica, quienes aceptaron la idea de que las probabilidades juegan un papel importante lo hicieron pensando en conjuntos de muchos átomos o de electrones. Las cosas funcionaron así durante varios años hasta que, a partir de 1970/1980, gracias a los avances tecnológicos, fue posible realizar experimentos que involucran un solo átomo o un solo electrón y así verificar que la mecánica cuántica prevé un comportamiento probabilístico para electrones –fotones o cualquier otra partícula– tomados de a uno.

La imagen en la figura 8.11 fue obtenida en los laboratorios de la empresa Hitachi, con un microscopio electrónico que permite reducir la intensidad del haz de modo que haya en el equipo un único electrón viajando por vez.

Figura 8.11. Difracción de electrones por dos rendijas

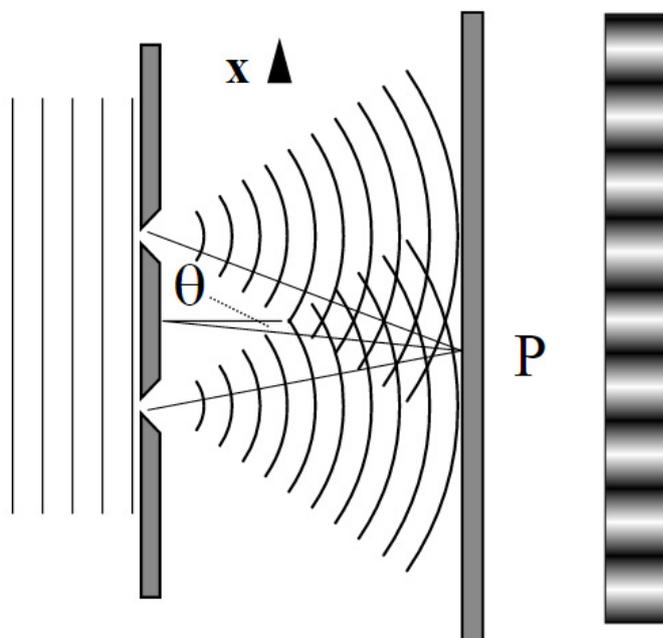


Fuente: Belsazar, 2006.

Si se observa las fotografías de izquierda a derecha, puede apreciarse la formación paulatina de un diagrama de interferencia de electrones cuando sus impactos se acumulan sobre una película sensible. En las fotos a y b se distinguen las marcas individuales de cada electrón que llega a la placa y en las sucesivas imágenes se observa la formación de un diagrama de difracción, como si fueran ondas. Este resultado puede obtenerse de la ecuación de Schrödinger.

El dispositivo permite el paso de los electrones por dos *ranuras* de manera semejante al experimento óptico de Young, esquematizado en la figura 8.12.

Figura 8. 12. Experimento óptico de Young



Fuente: Francesco Franco y Stannered, 2011.

En el experimento de Young, un haz de luz incidente desde la izquierda es dividido en dos al pasar por dos rendijas idénticas practicadas en la primera pantalla. Ambos haces interfieren al llegar a la segunda pantalla P y producen el diagrama de interferencia que se ve a la derecha. En el experimento de Hitachi (figura 8. 11) se da un tratamiento similar a un haz de electrones, con el resultado ya comentado.

Respecto a la interpretación de la mecánica cuántica y la llamada dualidad onda *corpúsculo*, podemos decir que los electrones se *propagan como ondas* (desde que salen del filamento caliente donde son emitidos) e *interactúan como partículas* (cuando dejan su huella en la pantalla fluorescente).

8. 6. Átomos de varios electrones

Para aplicar la mecánica cuántica a un átomo de n electrones, una posibilidad es suponer que, por razones energéticas, todos los electrones ocupan el estado de menor energía, es decir el nivel $1s$ calculado para el átomo de hidrógeno. De esa forma, todos los electrones se ubicarían muy cerca del núcleo, la energía sería un mínimo y el átomo sería muy estable. Un obstáculo para esa solución es *el principio de exclusión de Pauli*, que establece que, como los electrones son fermiones, no puede haber dos de ellos ocupando un mismo estado como, vimos en el capítulo 7.

Otra solución posible es determinar la configuración electrónica de esos átomos resolviendo la ecuación de Schrödinger para todo el sistema, teniendo en cuenta que los electrones interactúan con el núcleo atómico y también entre ellos. Esto es un problema complicado cuya solución requiere de cálculos numéricos, que solo pudieron encararse cuando se dispuso de potentes computadoras.

En la década de 1930 fue posible avanzar en la aplicación de los principios de la mecánica cuántica a los átomos con $Z > 1$ utilizando aproximaciones basadas en las soluciones de la ecuación de Schrödinger $\psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi)$ para un electrón, como si estos actuaran en forma independiente. Esto resulta posible por dos motivos:

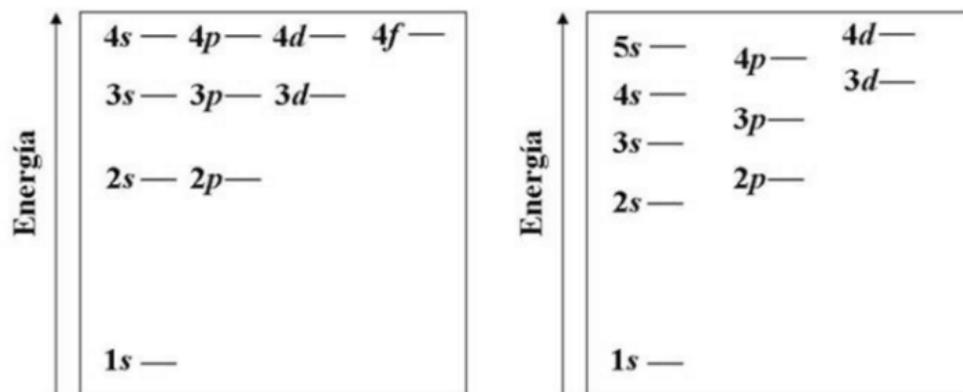
1. Los electrones se repelen mutuamente a causa de la interacción coulombiana, por lo cual en el átomo tienden a permanecer alejados entre sí, lo que limita el valor de la energía de interacción.
2. Los electrones obedecen el principio de exclusión de Pauli: no puede haber dos electrones en el mismo estado cuántico. Esta es otra razón por la que tienden a alejarse entre sí.

Por estas razones, es usual recurrir a una solución aproximada que describa la configuración electrónica de átomos de varios electrones mediante el llenado de sucesivas *capas* descritas con las soluciones de la ecuación de Schrödinger para un electrón, combinada con reglas empíricas basadas en el principio de Pauli y en consideraciones energéticas. En este capítulo, trataremos de presentar el fundamento físico de esas reglas empíricas.

Las soluciones de la ecuación de Schrödinger para un electrón se denominan *orbitales atómicos*, en recuerdo de su origen como *órbitas* en el modelo de Bohr.

Como vimos, el espectro de niveles del potencial de Coulomb es simple, como se muestra en la figura 8.13 (izquierda). La energía está determinada únicamente por el número cuántico principal n y hay n^2 estados con la misma energía, hecho que se denomina *degeneración* del nivel. Si se incluye la interacción repulsiva entre electrones, resultan los niveles de energía de un átomo polieletrónico, que se representan en la figura 8.13 (derecha). En ese caso la energía está determinada por el número cuántico principal n y el número cuántico secundario l .

Figura 8.13. Izquierda: Diagrama de energía de los orbitales atómicos de hidrógeno. Derecha: Diagrama de energía de átomos de muchos electrones



Fuente: Javier Pozuelo de Diego, 2008

La primera capa de electrones ($n = 1$) contiene solo el orbital $1s$. La segunda capa ($n = 2$) tiene un orbital $2s$ y tres orbitales $2p$. La tercera capa ($n = 3$) tiene un orbital $3s$, tres orbitales $3p$ y cinco orbitales $3d$, y así sucesivamente; la separación relativa en energía entre los orbitales se hace más pequeña para n creciente. De hecho, para n muy grande la separación se vuelve infinitamente pequeña.

Para extender el uso de las soluciones de la ecuación de Schroedinger a los átomos de varios electrones, en la década de 1930 se desarrollaron métodos de cálculo aproximado, que tenían en cuenta el efecto de los demás electrones en los niveles de uno dado, cálculos que se conocen como el *método de Hartree* o de *Hartree-Fock*.

En un átomo hidrogenoide, que contiene un solo electrón, todos los orbitales con el mismo valor de n tienen la misma energía, como en el hidrógeno. Cuando un átomo tiene más de un electrón esta degeneración se rompe, debido a la interacción entre electrones, que se combina con el hecho de que la fuerza nuclear atractiva que

percibe cada electrón disminuye (está *apantallada*) por efecto del resto de los electrones. Como vemos en la figura 8.8, los orbitales *s* tienden a estar más cerca del núcleo que los orbitales *p* y por tanto perciben una mayor fuerza atractiva y bajan en energía. Los orbitales *p* perciben la carga nuclear parcialmente blindada y por lo tanto suben su energía. Los orbitales *s* son en general más bajos en energía, seguidos por los orbitales *p*, los orbitales *d*, y así sucesivamente.

Se denomina *configuración electrónica* al modo en el cual los electrones están ordenados en un átomo. Los estados con el mismo número cuántico principal forman una capa (o nivel) que, por razones históricas, se denotan como capa *K*, capa *L*, capa *M*, capa *N*, etcétera.

Como vimos, el número cuántico *l* corresponde a la cantidad de movimiento angular del estado. También por razones históricas, a estas subcapas (o subniveles) se los denomina con una letra (*s, p, d, f, ...*), que hace referencia al tipo de orbital de que se trata. Esta nomenclatura proviene de las líneas espectroscópicas asociadas (en inglés *s sharp, p principal, d diffuse* y *f fundamental*, el resto de los nombres siguen el orden alfabético *g, h ...*). La tabla siguiente es un resumen de las propiedades de los orbitales atómicos hasta *l = 5*.

Tabla 8.2. Orbitales atómicos

Nombre	Significado Original	Número cuántico	Forma	Multiplicidad $2l + 1$
S	Sharp	$l = 0$	esférico	1
P	Principal	$l = 1$	mancuerna	3
D	Diffuse	$l = 2$	mancuernas cruzadas	5
F	Fundamental	$l = 3$	rosetón	7
G	orden alfabético	$l = 4$	¿?	9
H	orden alfabético	$l = 5$	¿?	11

En cada estado debemos considerar además una variable intrínseca del electrón, asociado al espín (ver capítulo 7), que se caracteriza por el valor de la proyección de este, que denominamos m_s , según un eje que toma los valores $m_s = \pm 1/2$.

Debido al principio de exclusión de Pauli, en el momento en que un estado es ocupado por un electrón, el siguiente electrón debe ocupar un estado cuántico diferente, es decir dos electrones no pueden tener los cuatro números cuánticos n, l, m, m_s iguales. Esto significa que cada uno de los estados $\psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi)$ puede ser ocupado por dos electrones con espines opuestos, es decir con distinta proyección sobre el eje *z* del espín electrónico m_s . Esto da un total de $2(2l + 1)$ electrones, tal como se puede ver en la tabla siguiente:

Tabla 8.3. Multiplicidad de los orbitales

Valor de <i>l</i>	Designación	Nº de electrones
0	S	2
1	P	6
2	D	10
3	F	14

Para describir las configuraciones electrónicas de los átomos se utiliza una notación estándar, que contiene la especificación de los orbitales atómicos, en la forma nl , por ejemplo

$$1s(n = 1, l = 0),$$

$$2p(n = 2, l = 1),$$

$$3d(n = 3, l = 2),$$

$$4f(n = 4, l = 3)$$

El número de electrones asignado a cada orbital (o al conjunto de orbitales de la misma subcapa) se indica como un superíndice. Por ejemplo, para hidrógeno, litio y fósforo tenemos:

Elemento	Cantidad de electrones	Configuración
<i>H</i> (hidrógeno)	1	$1s^1$
<i>Li</i> (litio)	3	$1s^2 2s^1$
<i>P</i> (fósforo)	15	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$

Para átomos más complejos esta notación es engorrosa; por eso se utiliza una que tiene en cuenta qué subcapas internas corresponden al gas noble inmediato anterior en la serie. Así, el fósforo difiere del neón ($1s^2 2s^2 2p^6$) únicamente por la presencia de una tercera capa y su configuración electrónica puede escribirse con referencia a la del neón como $[Ne]3s^2 3p^3$.

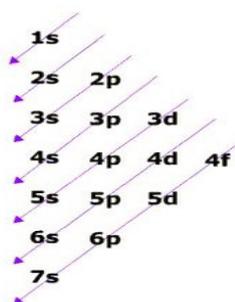
Gran parte de las propiedades químicas está determinada por las capas más externas.

La distribución de los electrones en los orbitales de los distintos niveles (configuración electrónica) se basa en tres principios:

1. Principio de mínima energía.
2. Principio de exclusión de Pauli.
3. Principio de máxima multiplicidad de Hund.

Según el *principio de mínima energía*, la configuración electrónica de un elemento está determinada por la ocupación sucesiva de los niveles (figura 8.13), comenzando por el nivel de menor energía ($1s$) y ocupando luego los niveles superiores, dando lugar a la regla de las diagonales (siguiente diagrama)

Figura 8.14. Regla de las diagonales que muestran el orden de llenado de los orbitales



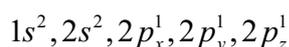
Fuente: CK-12 Foundation, Christopher Auyeung, Zachary Wilson, Joy Sheng, 2019

El *principio de exclusión de Pauli* implica que si dos electrones ocupan uno de los subniveles u orbitales, deben tener diferente valor para la proyección del espín, según una dirección dada en el espacio. Esto significa que en cada orbital puede haber un máximo de dos electrones con espines opuestos.

Los subniveles *s*, *p*, *d* y *f* pueden alojar un total de 2, 6, 10 y 14 electrones respectivamente; el *principio de máxima multiplicidad de Hund* o *regla de Hund* implica que cuando los niveles están parcialmente llenos, los electrones se distribuyen de modo que presentan el máximo número de espines con el mismo valor o, dicho de otra manera, los espines deben ser *paralelos*. Esto equivale a decir que para orbitales de igual energía pero diferente orientación espacial, primero deben llenarse hasta la mitad con electrones del mismo espín, para luego terminar de llenarse con electrones del espín contrario.

Ejemplo:

Consideremos la configuración electrónica del nitrógeno, que tiene en total 7 electrones. Primero asignamos dos electrones al subnivel *s* del nivel 1, es decir la configuración de ese nivel es $1s^2$. Para continuar con el llenado, notamos que el principio de exclusión de Pauli establece que cada orbital $2s$, $2p_x$, $2p_y$ y $2p_z$ puede contener como máximo dos electrones de espín opuesto. Una vez lleno el orbital $2s$ con dos electrones, debemos seguir con los orbitales $2p$, de energía algo superior. El llenado del átomo de 7 electrones es entonces



que podemos representar así.

↑↓ 1s	↑↓ 2s	↑ 2p _x	↑ 2p _y	↑ 2p _z
----------	----------	----------------------	----------------------	----------------------

8.7. Bloques de la tabla periódica

La forma de la tabla periódica está íntimamente relacionada con la configuración electrónica de los átomos de los distintos elementos. Por ejemplo, todos los elementos del grupo 2 tienen una configuración de $[GN]ns^2$ –donde $[GN]$ es la configuración del gas noble anterior– y sus propiedades químicas son semejantes. La capa electrónica más externa se denomina *capa de valencia* y –en una primera aproximación– determina las propiedades químicas. La tabla siguiente indica esta situación.

Símbolo	Elemento	Z	Configuración		
Li	Litio	3	↑↓ 1s ²	↑ 2s ¹	
Be	Berilio	4	↑↓ 1s ²	↑↓ 2s ²	
B	Boro	5	↑↓ 1s ²	↑↓ 2s ²	↑ 2p ¹
C	Carbono	6	↑↓ 1s ²	↑↓ 2s ²	↑↓ 2p ²
N	nitrógeno	7	↑↓ 1s ²	↑↓ 2s ²	↑↓, ↑ 2p ³
O	Oxígeno	8	↑↓ 1s ²	↑↓ 2s ²	↑↓, ↑↓ 2p ⁴
F	Flúor	9	↑↓ 1s ²	↑↓ 2s ²	↑↓, ↑↓, ↑ 2p ⁵
Ne	Neón	10	↑↓ 1s ²	↑↓ 2s ²	↑↓, ↑↓, ↑↓ 2p ⁶

8.7.1. Regla del octeto

Esta regla ayuda a explicar la estabilidad de algunas uniones químicas. La configuración más estable corresponde a aquella en que todos los orbitales están llenos (cada orbital con dos electrones, uno de espín $+1/2$ y otro de espín $-1/2$). Por ejemplo el oxígeno, que tiene configuración electrónica $1s^2 2s^2 2p^4$ es un elemento químicamente muy activo. Si captura electrones y alcanza la configuración $1s^2 2s^2 2p^6$ –con lo cual los niveles 1 y 2 estarían llenos– pierde su actividad.

La regla del octeto establece que el nivel electrónico se completa con 8 electrones, excepto el hidrógeno, que se completa con 2. Para formar agua, en la estructura del oxígeno resulta energéticamente favorable ganar los 2 electrones que le faltan; por eso se combina con 2 átomos de hidrógeno, cada uno de los cuales necesita 1 electrón –que recibe del oxígeno– y otorgan a dicho átomo 1 electrón cada uno. De este modo, cada hidrógeno completó el nivel 1 y el oxígeno completó el nivel 2. Este tipo de unión química se denomina enlace covalente.

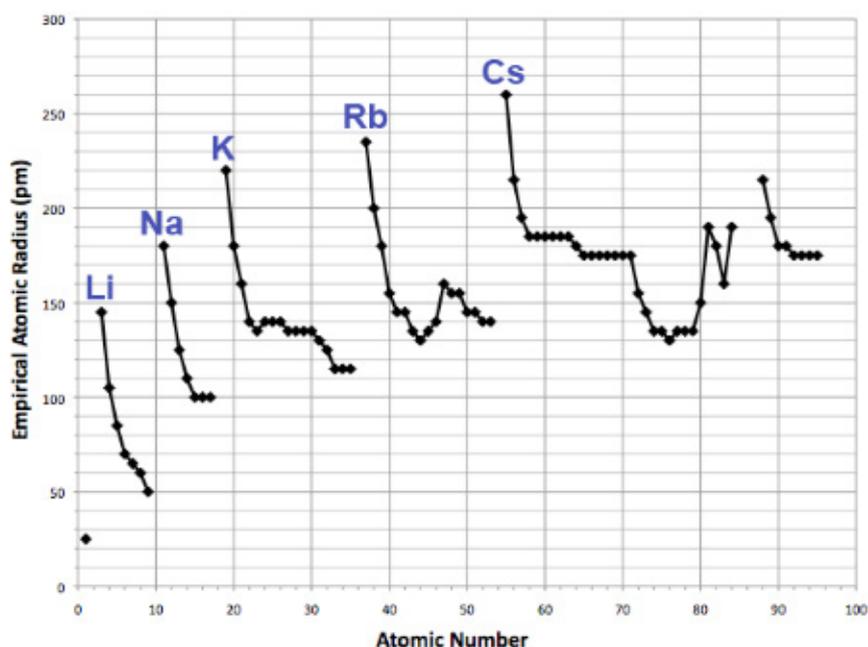
8.7.2. Propiedades periódicas

Mendeleiev había advertido la periodicidad que presentaban algunas propiedades de los elementos químicos. Ahora que sabemos cómo se ordenan en la tabla, podemos rever esa periodicidad, que pone en evidencia la periodicidad de la estructura electrónica de los elementos.

Radio atómico

El tamaño de un átomo no se puede definir con precisión, pero sí la distancia que hay entre los núcleos de dos átomos vecinos en un molécula, distancia que depende del tipo de unión entre los átomos; a partir de ello se define como *radio atómico* la mitad de la distancia interatómica en esa unión.

Figura 8.15. Variación del radio atómico a lo largo de la tabla



Fuente: StringTheory11, 2012.

La figura 8.15 muestra la variación de los radios atómicos a lo largo de los diferentes períodos de la tabla. Como primera característica vemos que los gases nobles tienen los radios atómicos más pequeños, lo que es consecuencia de la configuración de capa cerrada de esos elementos. Otra particularidad es que los metales alcalinos Li, Na, K, Rb, Cs, que tienen una configuración de gas noble más un electrón adicional, muestran los radios atómicos más grandes, como consecuencia de que la capa cerrada del gas noble produce un efecto de debilitamiento de la atracción electrostática nuclear sobre el electrón adicional, que por tanto resulta más alejado.

Para analizar la variación del radio atómico en un período (fila horizontal), veamos lo que pasa cuando vamos del Li = $(1s^2 2s^1)$ al Ne = $1s^2 2s^2 2p^6$. Mientras que el núcleo, de uno a otro elemento, ha aumentado en 8 protones, los siete electrones adicionales que tiene el Ne ocupan orbitales s o p con el mismo número cuántico principal ($n = 2$); estos nuevos electrones son poco apantallantes y repelen poco al electrón más externo. En el balance, la atracción nuclear supera a la repulsión electrónica y el radio disminuye.

Si analizamos el comportamiento en un grupo (columna vertical de la tabla) vemos que sucede lo contrario. Tomemos como ejemplo el primer grupo que va del H ($Z = 1$) al Ra ($Z = 88$); se han sumado 87 electrones, que van ocupando orbitales más internos (desde $n = 1$ hasta $n = 6$) ocasionando un importante efecto de apantallamiento. En el balance, la repulsión es muy grande frente a la atracción nuclear y esto permite que el electrón más externo esté poco atraído por el núcleo y por tanto el radio atómico aumente.

Potencial de ionización

El *potencial de ionización* P_I es la energía necesaria para arrancar un electrón de un átomo. El proceso de ionización puede representarse esquemáticamente, para un átomo A cualquiera, en la forma



donde P_I representa la energía necesaria para ionizar el átomo, A^+ es el átomo ionizado y e^- es el electrón arrancado. La energía P_I puede originarse por absorción de un fotón, por colisiones con otros átomos o de alguna otra manera. El potencial de ionización mide la facilidad con que un átomo neutro pierde un electrón para convertirse en un ión positivo (catión). La energía que debemos suministrar al electrón para arrancarlo tiene que ver con la mayor o menor energía de unión que lo liga al átomo, que depende de la atracción del núcleo y de la repulsión de los demás electrones.

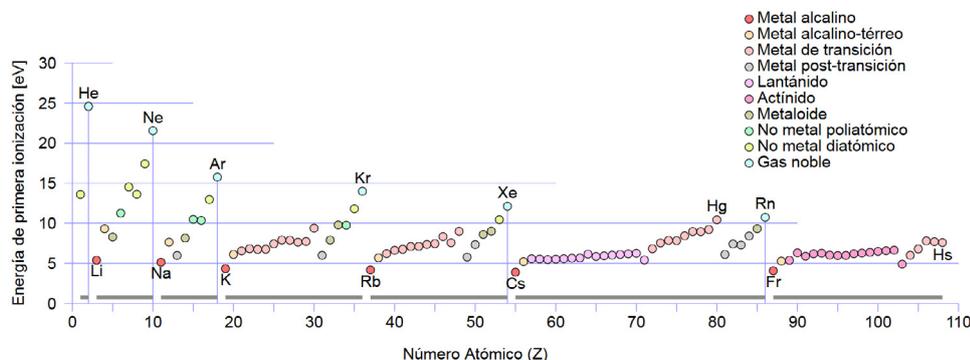
En principio, este proceso puede repetirse y las sucesivas cantidades de energía necesarias se llaman *segundo potencial de ionización*, *tercer potencial de ionización*, etcétera. El valor del potencial de ionización depende de:

- la carga del núcleo
Mientras más protones haya en el núcleo, mayor es la carga positiva y por tanto atrae más fuertemente a los electrones.
- la distancia del electrón al núcleo
La atracción decae rápidamente con la distancia: un electrón cercano del núcleo es atraído más fuertemente que uno alejado.
- el número de electrones que se interpone entre los electrones externos y el núcleo.

Tomemos por ejemplo el átomo de sodio, con la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. Entre el electrón externo $3s^1$ y el núcleo se interponen diez electrones en dos capas, en los niveles $n = 1$ y $n = 2$. La atracción producida por los

11 protones del núcleo se ve reducida por esos 10 electrones internos. Por consiguiente, sobre el electrón externo solo actúa una carga neta de aproximadamente +1 desde el centro y el P_i es bajo. Esta disminución de la atracción del núcleo por los electrones internos se conoce como *apantallamiento*.

Figura 8.16. Variación del potencial de ionización con el número atómico

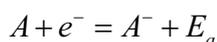


Fuente: Spunky Glrx, 2013.

De la figura 8.16 vemos que, cuando nos movemos en un grupo, el efecto de apantallamiento aumenta, como ya vimos en el caso del radio atómico y, por lo tanto, el potencial de ionización disminuye. Por el contrario, a lo largo del período, el radio disminuye y, por lo tanto, el potencial de ionización aumenta.

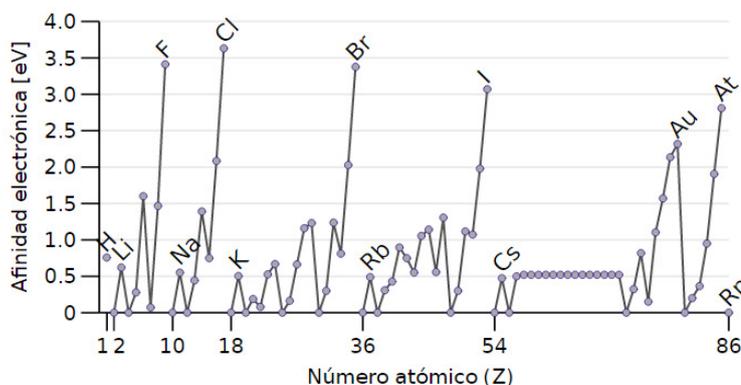
Electroafinidad

La electroafinidad o afinidad electrónica se define como la energía liberada cuando un átomo captura un electrón, convirtiéndose en un ion negativo (anión). Podríamos representar el proceso mediante la ecuación:



siendo E_a la electroafinidad. Es un proceso inverso al del potencial de ionización, que es *endoérgico* (consume energía), mientras este es *exoérgico* (desprende energía). Luego, cuanto mayor sea la energía desprendida, más estable será el producto (ion) formado: a mayor electroafinidad, mayor tendencia a formar iones.

Figura 8.17. Variación de la electroafinidad con el número atómico



Fuente: DePiep, 2012.

PROBLEMAS

● **PROBLEMA 8.1.**

El núcleo del ${}^{232}_{90}\text{Th}$ es el isótopo radiactivo de mayor vida media, que es de $1,405 \times 10^{10}$ años. Si la edad de la Tierra se calcula en $4,470 \times 10^9$ años, determine qué proporción de la cantidad inicial de Th presente al momento de formarse la Tierra, subsiste hasta la actualidad.

● **PROBLEMA 8.2.**

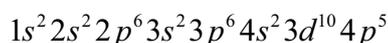
Haga un ejercicio práctico de probabilidades arrojando al aire una moneda cincuenta veces y anotando cuántas veces sale cara y cuántas veces, cruz.

● **PROBLEMA 8.3.**

Averigüe en qué difieren los conceptos de *masa atómica* y *número másico*.

● **PROBLEMA 8.4.**

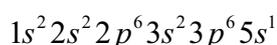
Un elemento químico tiene la configuración electrónica



Indique de qué elemento se trata, el grupo y el período al que pertenece.

● **PROBLEMA 8.5.**

Otro elemento químico tiene la configuración electrónica



Explicar razonadamente si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:

- El elemento descrito se encuentra en su estado fundamental.
- El elemento pertenece al grupo de los metales alcalinos.
- El elemento pertenece al 5° período del sistema periódico.
- Si el electrón pasara desde al orbital $5s$ al $6s$ emitiría energía luminosa que corresponde a una línea del espectro de emisión.

● **PROBLEMA 8.6.**

Explicar cuál es el modelo atómico vigente en la actualidad y cómo se llegó a este.

● **PROBLEMA 8.7.**

Indicar si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:

- a. Cuando un electrón pasa del estado fundamental a uno excitado emite energía.
- b. La energía de cualquier electrón de un átomo es siempre negativa.
- c. En el espectro de absorción los electrones pasan de un estado fundamental a uno excitado.

● **PROBLEMA 8.8.**

Escriba la definición de las siguientes propiedades periódicas:
Radio atómico, energía de ionización, electronegatividad.

● **PROBLEMA 8.9.**

¿Cómo varía el radio atómico en una familia y en un período de la tabla periódica?

● **PROBLEMA 8.10.**

Ubique los siguientes elementos en orden creciente de su radio atómico: Ca , Ba , Mg , Ra , Be , Sr , Ra , Ba , Sr , Ca , Mg , Be .

● **PROBLEMA 8.11.**

Considerando la ubicación de los siguientes elementos en el sistema periódico y las tendencias de las propiedades periódicas, indique cuál es la fórmula más probable entre los elementos Na y Cl con los elementos K y S ?

Lista de referencias bibliográficas

- Atomic Weight - History. (s.f.). <https://science.jrank.org/pages/634/Atomic-Weight-History.html>
- Flores Martínez, R. (s.f.). <http://fisicayquimicaenflash.es>
- Campoamor, C. (s.f.). Estructura de la materia. <http://fresno.pntic.mec.es/~fgutie6/quimica2/ArchivosPDF/06EstructuraMateria.pdf>
- ChangRy Goldsby, K. (2013). *Química*. Madrid: McGraw Hill.
- Educ.ar. (2012). La tabla periódica de los elementos - Recursos educ.ar. <https://www.educ.ar/recursos/70074/la-tabla-periodica-de-los-elementos>
- Química. (s.f.). <http://do4aguilarronald1f.blogspot.com/2015/05/quimica.html>
- Fitzpatrick, R. (s.f.). Fine Structure of Hydrogen. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qmech/lectures/node107.html>
- SparkNotes: Atomic Structure: Atoms and Atomic Orbitals. (s.f.). <https://www.sparknotes.com/chemistry/fundamentals/atomicstructure/section1/page/2/>
- Wikipedia contributors. (2019, 16 octubre). A chart used to organize elements based on atomic number. https://en.wikipedia.org/wiki/Periodic_table
- Nave, Rod. (2016). http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/HyperPhysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

Listado de figuras

- ASOCAE ONGD. (s.f.). Química. Espectros, átomos y núcleos. El modelo de la mecánica cuántica. [Diagrama]. <https://natureduca.com/quimica-espectros-atomos-y-nucleos-el-modelo-de-mecanica-cuantica-01.php>
- Asorey, Hernán. (2019). Densidad de probabilidad radial. [Gráfico].
- Cabrera, Ricardo. (2009). Armónicos en cuerdas. [Diagrama]. https://ricuti.com.ar/no_me_salen/ondas/Ap_ond_11.html
- CK-12 Foundation, Christopher Auyeung, Zachary Wilson, Joy Sheng. (2019). Aufbau principle. [Diagrama]. <https://www.ck12.org/chemistry/aufbau-principle/lesson/Aufbau-Principle-CHEM/>
- Fernández García, Luis. (2005). Colores de interferencia. Reflejos de un disco compacto. [Fotografía]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interference-colors.jpg>, (CC BY-SA 1.0).
- Franco, Francesco; User:Stannered. (2011). Diagram for the double-slit experiment. [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doubleslit.svg>, (CC BY-SA 3.0).
- Gubler, Joël. (2006). Spherical harmonic. [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Porbital.png>, (CC BY-SA 3.0).
- Nave, Rod. (s.f.). Zeeman Effect in Hydrogen. [Diagrama]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/zeeman.html>
- Pozuelo de Diego, Javier. (2008). Energía de los orbitales. [Diagrama]. <http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/Material-de-clase/tema-2.-estructura-electronica-de-los-atomos>.
- StringTheory11. (2012). Empirical atomic radius trends. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empirical_atomic_radius_trends.png, (CC BY-SA 4.0).
- Usuario:Belsazar. (2006). Double-slit experiment results Tanamura 2. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_experiment_results_Tanamura_2.jpg, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:Deglr6328. (2005). Diffraction grating. [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diffraction_grating.jpg, Dominio público.

Usuario:DePiep. (2012). Electron affinity of the elements. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron_affinity_of_the_elements.svg, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:JabberWok. (2007). Bohr atom model. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr_atom_model.svg, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:Jhausauer. (2007). Spectral lines. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectral_lines_en.PNG. Dominio público.

Usuario:PAR. (2005). AtomicLineSpEm. [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AtomicLineSpEm.png>, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:R]Hall. (2008). Orbital s1. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orbital_s1.png, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:Salvador85. (2016). Tabla Periódica de los Elementos. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tabla_Per%C3%B3dica_de_los_Elementos_9jun2016.png, (CC BY-SA 4.0).

Usuario:Sponk, Usuario:Clrx, (Traducción al español: Usuario:Wiki LIC). (2013). Gráfico de número atómico frente a energía de ionización. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:First_Ionization_Energy.svg, (CC BY 3.0).

EVOLUCIÓN ESTELAR

(EL SEÑOR HOUTERMANS)

Es razonable esperar que en un futuro no muy lejano podamos entender algo tan simple como una estrella.

Sir Arthur Eddington

9.1. La luz de las estrellas

El físico austríaco Fritz Houtermans (ver recuadro) fue el primero en postular que la luz, y por tanto la energía, emitida por las estrellas es de origen nuclear, producida a través de reacciones de fusión, es decir la unión de núcleos livianos para formar otros más pesados. Este proceso libera energía debido a que la masa del nuevo núcleo formado es menor que la suma de las masas de los componentes; debido a la relación de Einstein $E = mc^2$ esa diferencia de masa representa la energía liberada.¹

La mayoría de las estrellas inicia su combustión nuclear cuando su composición consiste en alrededor del 75% de hidrógeno y el 25% de helio, que es la proporción de estos elementos formada en los primeros instantes del universo. En el núcleo del Sol, como de otras estrellas, con temperaturas de $10^7 K$, el hidrógeno² se fusiona para formar helio mediante *la cadena protón-protón*, que se muestra en las reacciones que se indican más abajo.

- 1 Houtermans y Robert Atkinson efectuaron el primer cálculo de una reacción termonuclear en una estrella en 1929. Como la física nuclear no estaba aún desarrollada, esta hipótesis cayó pronto en el olvido. La idea fue relanzada por Hans Bethe y Carl von Weizsäcker diez años después.
- 2 En realidad a esas temperaturas se trata de H ionizado (protones).



Houtermans en Berna (1954).

Nacido en 1903 en Danzig, creció en Viena. Demostró afición por la ciencia desde joven y también capacidad para meterse en problemas: fue expulsado del colegio por leer el Manifiesto Comunista en un acto el 1º de mayo. Fue enviado al consultorio de Freud, quien lo expulsó cuando descubrió que le relataba sueños inventados. Se doctoró en Göttingen en 1927 con una tesis sobre fluorescencia resonante, dirigido por J. Frank. Allí comenzó una amistad con Gamow con quien compartía un particular sentido del humor. Desarrollaron la teoría del efecto túnel, usada para explicar el decaimiento α y la generación de energía en las estrellas por fusión nuclear. Por sus ideales, trabajó en Rusia, donde conoció a Landau y pasó unos años ocupado solo en la física. Acusado de espionaje, fue encarcelado en 1937 y la URSS lo entregó a la Gestapo de la que fue rescatado por intervención de von Laue. Trabajó en el programa nuclear alemán y notó la importancia del plutonio como fuente de energía. Arriesgando ser descubierto, advirtió a Fermi, líder del proyecto norteamericano de la bomba atómica, de los progresos de los alemanes. Murió en marzo de 1966.

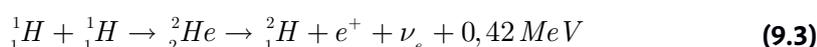
En lo que sigue utilizaremos la notación ${}^A_Z E$, donde E es el símbolo químico, A el número másico y Z , el número atómico. El primer paso implica la fusión de dos protones en deuterio, liberando un positrón y un neutrino, producto de la conversión de un protón en un neutrón. Este proceso ocurre en dos pasos; en el primero, dos protones se funden para formar un diprotón ${}^2_2 He$



sigue el decaimiento del *diprotón* en deuterio ${}^2_1 H$, con emisión de un positrón e^+ y un neutrino ν_e



que corresponde a la fórmula general



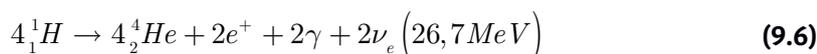
El llamado *diprotón* (${}^2_2 He$) es un núcleo atómico similar al helio, pero sin neutrones, que no puede existir de forma estable en las condiciones de la naturaleza.³ El positrón emitido en el decaimiento β^+ rápidamente se aniquila con un electrón; la energía de sus masas más su energía cinética es transferida a dos fotones



El deuterón producido en la primera etapa puede fusionarse con otro protón para producir el isótopo liviano del helio, ${}^3_2 He$:



Este proceso mediado por la fuerza fuerte es mucho más rápido que el primer paso, producido por la fuerza débil. Puede estimarse que, en las condiciones que reinan en el interior del Sol, cada nuevo núcleo de deuterio vive solo unos cuatro segundos antes de convertirse en ${}^3_2 He$. Las reacciones mencionadas más arriba quedan resumidas en la reacción global:



La relación entre masa y energía postulada por Einstein

$$E = mc^2 \quad (9.7)$$

juega un papel importante en este proceso ya que la energía liberada en estas reacciones se origina en la diferencia entre la masa de los elementos presentes al inicio de la reacción y la de los productos. Esta diferencia es negativa, debido a la energía de ligadura de los productos de la reacción y se denomina defecto de masa.

Para calcular las energías liberadas en cada uno de los procesos indicados, necesitamos conocer las masas de los núcleos que intervienen, que son:

$$Protón = m_p = 1,6726 \times 10^{-27} kg = 1,007276 uma = 938,2720 MeVc^{-2} \quad (9.8)$$

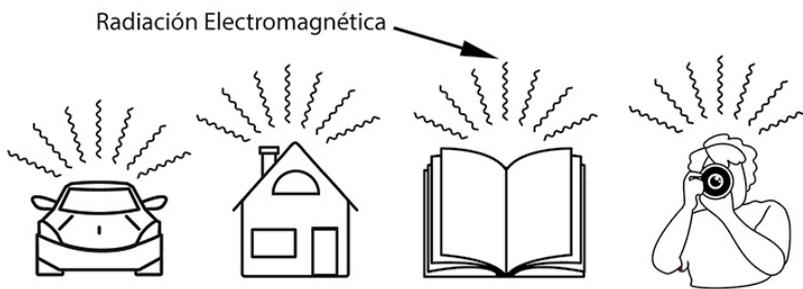
³ El diprotón no es en realidad una partícula, sino lo que técnicamente se denomina una *resonancia*. Su vida media es de $10^{-21} s$, unas 10 veces mayor que el tiempo que tarda un deuterón de $28 MeV$ en atravesar un núcleo, en un experimento de colisión (comentario de M. Mariscotti).

$$\text{Neutrón} = m_n = 1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,008665 \text{ uma} = 939,5656 \text{ MeV}c^{-2} \quad (9.9)$$

La energía que aparece en estas reacciones es energía cinética de las partículas de masa finita y energía electromagnética de los fotones. La transformación de esta energía en calor, antes de escapar de la estrella, lleva la temperatura en su interior a millones de grados ya que los fotones sufren innumerables colisiones y reabsorciones antes de alcanzar la superficie. Es posible estimar el tiempo que tardaría un fotón producido en el centro del Sol para llegar hasta la superficie, luego de sufrir gran cantidad de colisiones.⁴ El camino que debe recorrer es de aproximadamente 10^6 km (radio del Sol); en ese viaje sufrirá alrededor de 10^{24} colisiones, lo que le toma unos 10^{13} s , es decir algunos millones de años.

El incremento de temperatura resultante posibilita las reacciones de fusión mencionadas arriba, responsables de la luz y del calor que emite el Sol. Como resultado, la temperatura en la superficie del Sol alcanza unos 5.000 K . Como veremos más adelante procesos similares ocurren en las otras estrellas, cuyas temperaturas superficiales pueden variar entre 3.000 K y 10.000 K . Por tratarse de objetos calientes, la superficie de las estrellas irradia un continuo de longitudes de onda, como los objetos señalados en la figura 9.1.

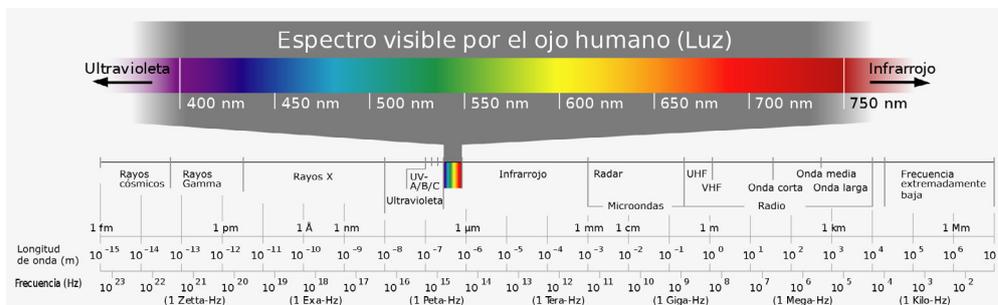
Figura 9.1. Todo cuerpo caliente emite radiación



Fuente: Adaptado de Sergio Torres Arzayús, 2007.

La radiación electromagnética emitida tiene una distribución en longitudes de onda (un *espectro*) que va desde las longitudes de onda muy pequeñas, correspondiente a los rayos gamma, hasta las microondas y las ondas largas de radio. La figura 9.2 muestra la amplitud del espectro electromagnético.

Figura 9.2. Espectro electromagnético



Fuente: Horst Frank y Jailbird, 2005.

4 La estimación corresponde a W. Thirring en el libro *Impresiones cósmicas* ya citado.

El espectro electromagnético abarca todo el rango de longitudes de onda conocidas, que incluye:

Tabla 9.1. Longitudes de onda

Tipo de radiación	Longitud de onda	Uso
Rayos gamma	$0 \text{ nm} < \lambda < 10^{-2} \text{ nm}$	radiación nuclear
Rayos X	$10^{-2} \text{ nm} < \lambda < 15 \text{ nm}$	medicina, industria
Ultravioleta	$15 \text{ nm} < \lambda < 4 \times 10^2 \text{ nm}$	Industria
Visible	$4 \times 10^2 \text{ nm} < \lambda < 7,8 \times 10^2 \text{ nm}$	azul < λ < rojo
Infrarrojo	$7,8 \times 10^2 \text{ nm} < \lambda < 10^6 \text{ nm}$	radiación térmica
Microondas	$10^6 \text{ nm} < \lambda < 3 \times 10^8 \text{ nm}$	Radar
Ondas de radio	$3 \times 10^8 \text{ nm} < \lambda < \text{km}$	radio, televisión

Ejemplos de objetos calientes de uso cotidiano que irradian energía son los filamentos de tungsteno de las lámparas incandescentes, que se calientan por el paso de una corriente eléctrica. La temperatura de funcionamiento de estas lámparas es muy elevada y emiten una luz blanquecina. Este tipo de artefacto se encuentra actualmente en desuso y ha sido reemplazado por las llamadas *lámparas de bajo consumo*, o por lámparas LED.

La intensidad y las características de la radiación emitida por un objeto caliente dependen no solo de la temperatura de la superficie, sino también de las características de esa superficie. Por esa razón se introdujo el concepto de *cuerpo negro*, un objeto ideal que emite energía de acuerdo a la llamada *ley de Planck*. Esta curva fue determinada experimentalmente a fines del siglo XIX y luego deducida teóricamente por Planck, en 1901; fue un importante aporte al origen de *la mecánica cuántica*.

El cuerpo negro ideal absorbe toda la radiación que llega a este sin reflejarla y solo emite la radiación correspondiente a su temperatura. Hacia fines del siglo XIX pudo medirse la radiación de un cuerpo negro con mucha precisión. La intensidad teórica de esta radiación podía en principio ser calculada utilizando las leyes de la termodinámica y del electromagnetismo. Varios físicos intentaron esto, entre ellos, Lord Rayleigh y James Jeans, cuyos resultados coincidían para bajas frecuencias (infrarrojo) con las mediciones, pero diferían fuertemente a altas frecuencias, lo que se llamó *la catástrofe ultravioleta*.

En 1900 el problema fue resuelto por Max Planck, quien postuló que la radiación no es emitida de manera continua sino en cuantos de energía discreta, a los que hoy llamamos fotones, cada uno de los cuales lleva una energía $h\nu$, donde h es una constante introducida en ese histórico momento.

Cuando la frecuencia de la radiación es baja, el efecto de la discretización se vuelve despreciable debido al minúsculo valor de la constante de Planck, y es perfectamente posible pensar al sistema como continuo, tal como lo hace el electromagnetismo clásico. Sin embargo, a frecuencias altas el efecto se vuelve notable.

La radiancia espectral de un cuerpo $B_\lambda(\lambda, T)$ es la cantidad de energía entregada como radiación a diferentes longitudes de onda. Se mide en términos de la potencia emitida por unidad de área del cuerpo, por unidad de ángulo sólido por unidad de longitud de frecuencia o longitud de onda y vale

$$I_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

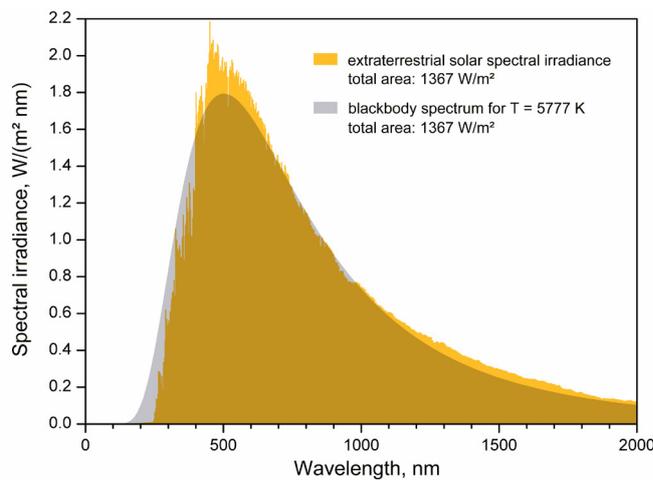
$$I_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (9.10)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, h la constante de Planck y c la velocidad de la luz. $I(\nu, T)$ es la cantidad de energía por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido por unidad de frecuencia.

En 1905, Einstein utilizó el concepto de fotón para explicar otro fenómeno descubierto en esos años, el llamado efecto fotoeléctrico. Este consiste en la generación de una corriente eléctrica al aplicar luz monocromática sobre un circuito formado por chapas metálicas.

En la figura 9.3 mostramos la intensidad de la radiación emitida por el Sol (área sombreada de amarillo) comparada con la curva teórica de un cuerpo negro a $5.778 K$ (curva gris que limita el área sombreada).

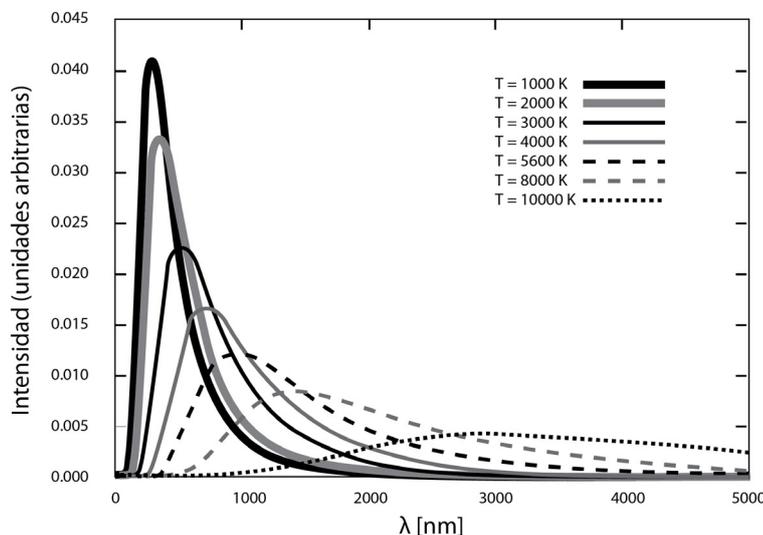
Figura 9.3. Comparación entre la irradiación de la fotosfera solar (amarillo) y la curva teórica de emisión de un cuerpo negro (en gris) a $5.777 K$



Fuente: Sch, 2006.

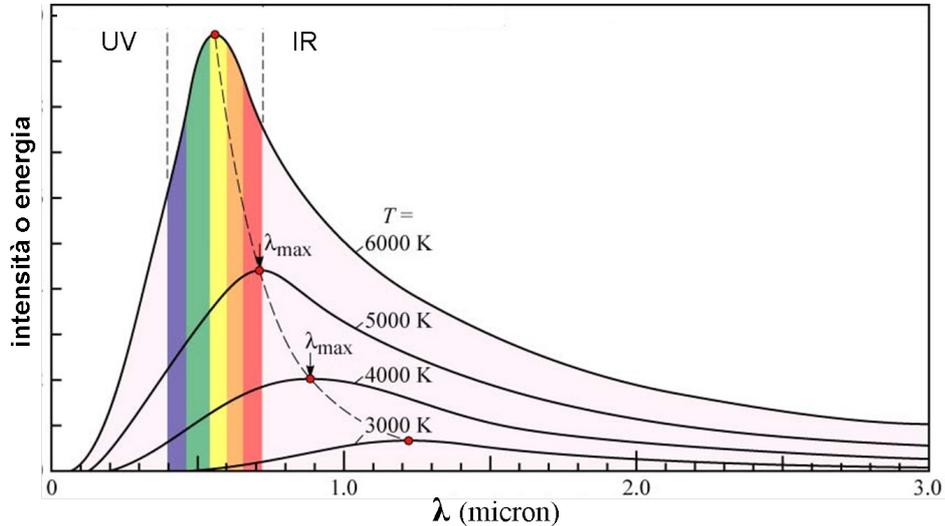
Vemos que el acuerdo es casi perfecto; las diferencias se deben a la propiedad de la superficie real, llamada *emisividad*. La figura 9.4 muestra el espectro del cuerpo negro para diferentes temperaturas; cada curva está representada con el color dominante con que se vería el objeto.

Figura 9.4. Espectro de emisión del cuerpo negro. El color de cada curva representa el color dominante, en cada caso, a la temperatura que se indica



La figura 9.5 muestra otra forma de representar la emisión del cuerpo negro para diferentes temperaturas. La curva para 6.000 K representa aproximadamente la curva correspondiente al Sol donde se ha indicado el espectro visible.

Figura 9.5. Radiación de un cuerpo negro, para diferentes temperaturas. La curva negra de 5000 K corresponde a la teoría clásica de Rayleigh-Jeans. En cada curva se marca el máximo. Se indica el espectro visible



Fuente: Darth Kule, 2010.

La emisión del cuerpo negro obedece a dos leyes que fueron deducidas empíricamente antes de que se conozca su fundamento. Conocida la ley de Planck, ambas leyes pueden ser deducidas a partir de la relación (9.10) para la radiancia.

Estas leyes son:

- Ley de Wien. El producto de la longitud de onda $\lambda_{m\acute{a}x}$ donde ocurre el máximo para cada curva, multiplicada por la correspondiente temperatura es constante, es decir⁵

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = \beta \quad (9.11)$$

donde $\beta = 2,9 \text{ mmK}$ es la constante de Wien.

- Ley de Stefan-Boltzmann. Establece que la energía total emitida por el cuerpo negro en todas las longitudes de onda y en todas direcciones es

$$L = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \sigma S T^4 \quad (9.12)$$

donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann y S , la superficie de la estrella. La cantidad L se denomina luminosidad y es la potencia emitida en todas direcciones por un cuerpo negro.

Para describir cuán brillante aparece una estrella vista desde la Tierra se define el *brillo aparente* b ; es la cantidad total de energía proveniente de la estrella, que

⁵ Es común en muchos textos designar la constante de Wien con la letra b que aquí reservamos para el brillo de las estrellas.

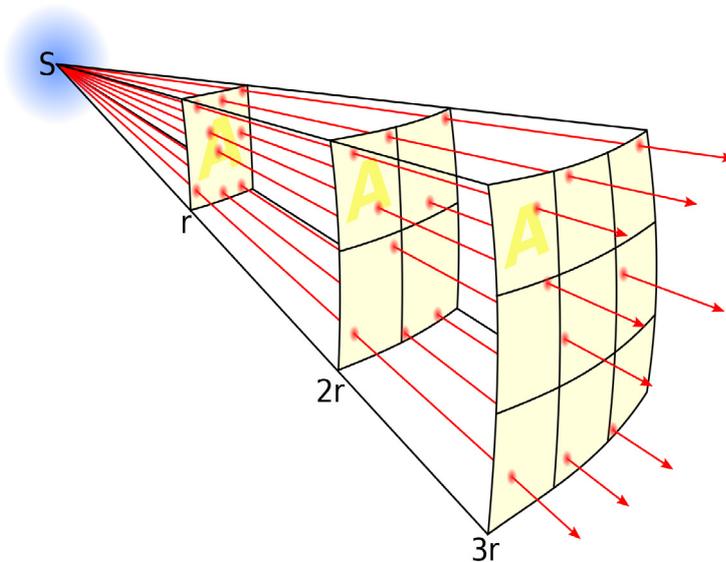
llega a la Tierra por metro cuadrado por segundo, incluyendo todas las frecuencias. Sus unidades son watt por metro cuadrado (W / m^2).

Dada una estrella situada a una distancia d de la Tierra, la relación entre el brillo aparente b y la luminosidad L está determinada por la *conservación de la energía*. La energía emitida por la estrella en un segundo, que llega a la Tierra es solo una fracción de la energía que atraviesa una esfera de radio d y se distribuye en el área $4\pi d^2$; un detector de radiación de $1m^2$ de superficie ubicado en la Tierra captaría una fracción $1 / (4\pi d^2)$ de esa radiación. Luego, la relación entre luminosidad y brillo es

$$b = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (9.13)$$

Es posible medir el brillo aparente b con un telescopio equipado con CCD, células fotoeléctricas que registran la intensidad de la luz recibida. Si bien medir la distancia puede no ser fácil, vimos en el capítulo 6 cómo ello es posible. Luego, poniendo todo junto podemos obtener L .

Figura 9.6. Disminución de la cantidad de energía por unidad de área que llega al observador, al aumentar la distancia r . Se ilustra la ley del cuadrado inverso. S representa una fuente ideal de radiación electromagnética y A representa una porción arbitraria de la superficie de una esfera de radio r .



Fuente: Borb, 2008.

La figura 9.6 muestra por qué la cantidad de energía que llega al observador, por metro cuadrado, disminuye debido a la variación del factor $\frac{1}{d^2}$ de la expresión anterior.

Esto implica que si vemos dos estrellas que parecen igualmente brillantes en la noche, puede tratarse de una estrella cercana relativamente débil y una estrella lejana, más luminosa.

La figura 9.7 muestra una fracción del cielo estrellado, es una fotografía satelital que evidencia la gran variedad de colores y de brillo de las estrellas

Figura 9.7. Fotografía satelital de una fracción del cielo que muestra la variedad en intensidad luminosa y en colores de las estrellas



Fuente: NASA, ESA, T. Brown, W. Clarkson, A. Calamida y K. Sahu, 2018.

Otra manera de clasificar las estrellas es a través de su magnitud, un sistema de clasificación introducido por los griegos, todavía en uso. A partir de las figuras 9.3 y 9.4 podemos ver que el color de una estrella nos brinda información acerca de la temperatura de su superficie.

9.2. Defecto de masa

Vimos al comienzo de este capítulo la importancia del defecto masa para explicar el origen de la energía en las estrellas. Analizaremos aquí algunos casos específicos. En los átomos, debido a la atracción electrostática, se produce la unión entre el núcleo y los electrones. En ese caso se habla de la *energía de ligadura*, que para el caso del hidrógeno es de $13,6 eV$. Usando la equivalencia $1 eV = 1,0735 \times 10^{-27} \text{ uma}$, tenemos

Tabla 9.2. Masa del protón y del electrón

Unidades	kg	uma	MeV / c^2
Protón	$1,67262164 \times 10^{-27}$	1,0072764668	938,272013
Electrón	$9,10938215 \times 10^{-31}$	$5,4858 \times 10^{-4}$	0,511

La suma de la masa de los componentes del átomo de hidrógeno es

$$m_H = m_p + m_e = 1,0072764668 \text{ uma} + 5,4858 \times 10^{-4} \text{ uma} = 1,007331325 \text{ uma}$$

Por otra parte, la energía de unión del electrón en el átomo es $\varepsilon = 13,6 \text{ eV}$ que expresado en unidades de masa resulta,

$$\mu = \frac{\varepsilon}{c^2} = 13,6 \times 1,0735 \times 10^{-27} \text{ uma} = 1,46 \times 10^{-26} \text{ uma} \quad (9.14)$$

$$\Delta m = m_p + m_e$$

El defecto de masa porcentual es entonces

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{1,46 \times 10^{-26}}{1,007331325} = 1,4494 \times 10^{-26} \quad (9.15)$$

Vemos que, en este caso, el equivalente en masa de la energía de unión es despreciable frente a la masa de los componentes y por tanto no hay aporte de la energía de unión al cambio de masa del hidrógeno respecto a un protón más un electrón, libres.

En el caso nuclear el equivalente en masa de la energía de ligadura es significativo frente a las masas involucradas. En un núcleo de masa m , formado por N neutrones y Z protones, el defecto de masa se define como

$$\Delta m = Nm_n + Zm_p - m \quad (9.16)$$

Analizaremos algunos ejemplos.

Deuterón

El sistema nuclear más sencillo es el deuterón, núcleo del isótopo del hidrógeno llamado deuterio. Este núcleo está formado por la unión de un protón con un neutrón, por acción de las fuerzas nucleares. Su símbolo es 2H o también D . La masa del deuterón vale $2,01355321270 \text{ uma}$ y por lo tanto el defecto de masa resulta

$$m = m_n + m_p - m_D = 1,0086649156 + 1,0072764668 - 2,01355321270 = 2,3882 \times 10^{-3} \text{ uma} \quad (9.17)$$

que equivale a $2,2246 \text{ MeV}$. Como en el deuterón hay dos partículas unidas, podemos calcular la *energía de unión por partícula*, que resulta ser $1,1123 \text{ MeV}$.

El defecto de masa porcentual representa en este caso

$$\frac{m}{m_D} = \frac{2,3882 \times 10^{-3}}{1 \times 1,0086649156 + 1 \times 1,0072764668} = 1,1861 \times 10^{-3} \quad (9.18)$$

esto es un milésimo de la masa del deuterón, mucho mayor porcentualmente que en el caso del átomo de hidrógeno.

Ejercicio: determinar el defecto de masa, la energía de unión y la energía de unión por nucleón para el núcleo de carbono¹².

Solución: vimos que el defecto de masa de un núcleo es la diferencia entre la masa de sus constituyentes y la masa real del núcleo. Como el número atómico del carbono es $Z = 6$, su núcleo está formado por seis protones y seis neutrones. La masa total de estas partículas es la siguiente:

Tabla 9.3. Masa total de partículas

Masa de 6 protones = $6 \times 1,0073 \text{ uma}$ =	6,0438 uma
Masa de 6 neutrones = $6 \times 1,0087 \text{ uma}$ =	6,0522 uma
Masa total	12,0960 uma
Masa del núcleo de carbono12 =	12,0000 uma
Defecto de masa	0,0960 uma

Como 1 uma equivale a 931 MeV , la energía de unión es:

$$E = 0,096 \text{ uma} \times 931 \text{ MeV} / \text{uma} = 89,4 \text{ MeV}$$

El núcleo de carbono12 está formado por 12 nucleones, en consecuencia, la energía de unión por nucleón es:

$$\frac{\Delta E}{A} = \frac{89,4 \text{ MeV}}{12} = 7,4 \text{ MeV} / \text{nucleón}$$

Isótopo ${}^3\text{He}$

El isótopo ${}^3\text{He}$ del He , contiene dos protones –como el núcleo del helio– más un neutrón y su masa es de $3,0160293 \text{ uma}$; por lo tanto, el defecto de masa vale

$$\begin{aligned} m &= m_n + 2m_p - m_{\text{He}} = \\ &= 1 \times 1,0086649156 + 2 \times 1,0072764668 - 3,0160293 = \\ &= 7,1886 \times 10^{-3} \text{ uma} = 6,6962 \text{ MeV} \end{aligned}$$

La energía de unión por nucleón resulta en este caso de $2,232 \text{ MeV}$, y el valor porcentual del defecto de masa vale

$$\frac{\Delta m}{m_n + 2m_p} = \frac{7,1886 \times 10^{-3}}{1,0086649156 + 2 \times 1,0072764668} = 2,3778 \times 10^{-3} \quad (9.19)$$

Partícula alfa

La partícula *alfa* –formada por dos protones y dos neutrones– es el núcleo de ${}^4\text{He}$, el isótopo estable del helio. El defecto de masa para este caso es

$$\begin{aligned} m &= 2m_n + 2m_p - m_\alpha = \\ &= 2 \times (1,0086649156 + 1,0072764668) - 4,001506179127 \\ &= 3,0377 \times 10^{-2} \text{ uma} = 28,281 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Esta energía de unión por partícula corresponde a una estructura nuclear muy estable. El valor porcentual del defecto de masa vale en este caso

$$\frac{\Delta m}{2m_n + 2m_p} = \frac{3,0377 \times 10^{-2}}{2 \times (1,0086649156 + 1,0072764668)} = 7,5342 \times 10^{-3} \quad (9.20)$$

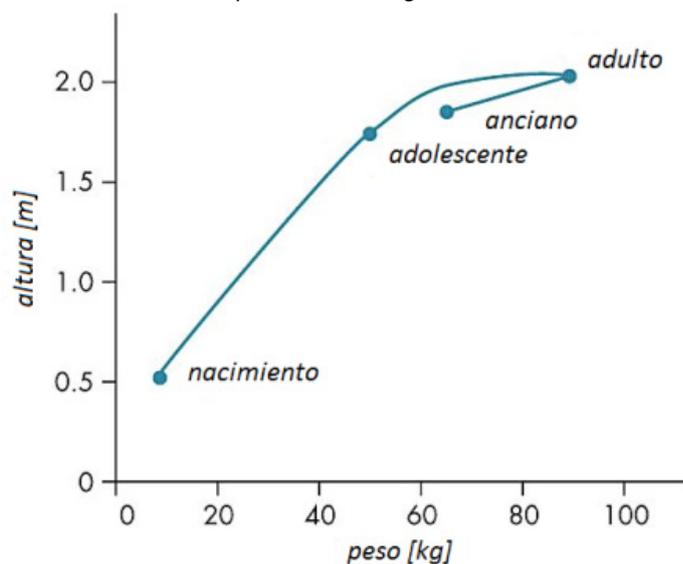
9.3. Formación y desarrollo de las estrellas

Sobre la base del conocimiento acumulado hasta hoy podemos decir que una estrella es una esfera luminosa de gas ionizado que se mantiene unida por su propia gravedad y que produce energía mediante procesos de fusión nuclear, ya mencionados en la sección 9.1.

Las teorías de la evolución de las estrellas se basan principalmente en los indicios obtenidos a partir de estudios relacionados con la luminosidad, el brillo y el espectro de la radiación que emiten. La observación ha demostrado que las estrellas conocidas pueden ser sistematizadas en una serie regular en la que las más brillantes son las más calientes y las más débiles, las más frías.

Como ayuda para comprender cómo funciona el diagrama de evolución de una estrella, imaginemos que quisiéramos registrar los cambios que el cuerpo de una persona sufre a medida que envejece. Podríamos hacer esto de muchas maneras; para simplificar utilizaremos dos variables fácilmente medibles, como son la altura y el peso de la persona. En ese caso, la historia de su desarrollo registrada en un diagrama de altura-peso sería como indica la figura 9.8.

Figura 9.8. Diagrama de evolución de la altura y el peso de una persona a lo largo de su vida



En la figura 9.8 se indica –en un gráfico altura-peso– el estado evolutivo de una persona en cuatro etapas de su vida, reflejando datos que conocemos sobre la evolución del cuerpo humano. Vemos que el sujeto incrementa su altura y su peso durante su infancia y adolescencia (15 a 20 años de vida). Ese período es seguido por otro (30 años, aproximadamente) en el que la altura se mantiene casi constante mientras el peso aumenta lentamente, hasta que alcanza la edad adulta. Hacia el final de su vida –ancianidad– el peso y la altura de la persona disminuyen lentamente.

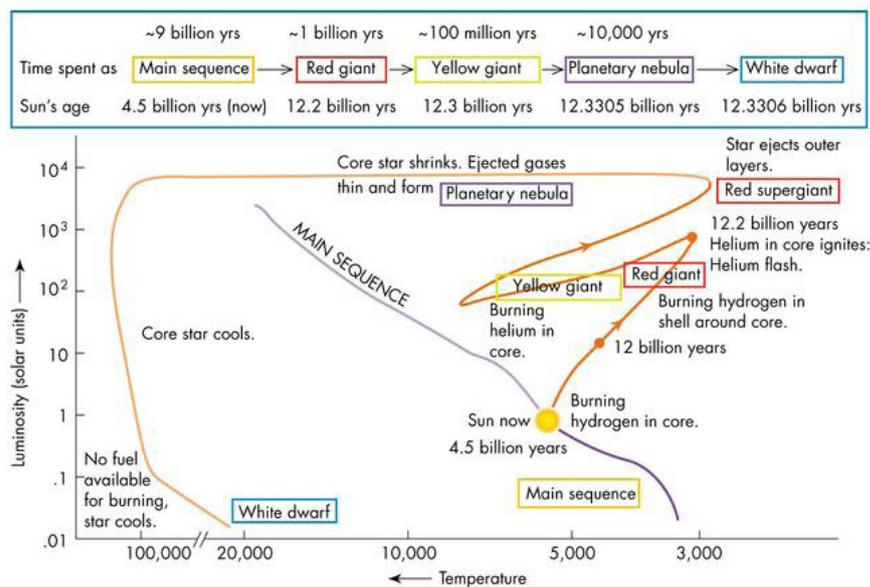
Antes del siglo xx, las estrellas se clasificaban principalmente por su brillo y su ubicación en el cielo. Los nombres de las estrellas más brillantes en cada constelación llevan las letras griegas que designan su orden de brillo. Por ejemplo, la estrella más brillante en la constelación Centaurus es *Alpha Centauri*, la segunda en brillo es *Beta Centauri*, la tercera, *Gamma Centauri* y así sucesivamente. Sin embargo, el brillo de una estrella y la pertenencia a una constelación no nos dicen nada sobre su verdadera naturaleza. Si observamos una estrella brillante, podría tratarse de una estrella extremadamente luminosa o de una menos luminosa pero muy cercana a

la Tierra; por otra parte, como vimos en el caso de la Cruz del Sur, dos estrellas que aparecen próximas en el cielo podrían no ser en realidad vecinas, sino encontrarse a gran distancia entre sí.

Las estrellas evolucionan muy lentamente en comparación con los tiempos de vida de la humanidad por lo que es difícil documentar los cambios reales que ocurren, registrando la posición de la estrella en un diagrama evolutivo, como el indicado en la figura 9.8. Las trayectorias evolutivas de las estrellas se basan en cálculos que utilizan modelos que tienen en cuenta la composición química variable y las consecuencias sobre su volumen y temperatura. El resultado es un diagrama similar al descrito para una persona, pero con otras variables.

De acuerdo con los modelos, el camino evolutivo de una estrella similar al Sol muestra que, al comienzo de su vida, el astro se contrae y aumenta su temperatura hasta que comienza la fusión nuclear en el núcleo. Después de moverse a través de la llamada *secuencia principal*⁶ –ver más adelante– la mayor parte de su vida, la estrella se expande rápidamente hasta convertirse en una *gigante roja*. Después de esta fase, la temperatura aumenta mientras la luminosidad se mantiene constante. Durante este período, la estrella arroja su parte más externa en forma de una *nebulosa planetaria*. Luego, de repente, se enfría y se oscurece hasta convertirse en una enana blanca.

Figura 9.9. Diagrama de la evolución de una estrella similar al Sol



Fuente: Sloan Digital Sky Survey.

Tabla 9.4. Etapas en la vida del Sol

Tiempo en cada fase (años)	9×10^{12} años	10^{12} años	10^8 años	10^4 años	
Estado	Secuencia ppal.	Gigante roja	Gigante amarilla	Nebulosa planetaria	Enana blanca
Edad (años)	$4,5 \times 10^{12}$	$12,2 \times 10^{12}$	$12,3 \times 10^{12}$	$12,3305 \times 10^{12}$	$12,3306 \times 10^{12}$
Sentido de flujo del tiempo	→				

Fuente: <http://skyserver.sdss.org/dr7/sp/astro/stars/stars.asp>

⁶ Se denomina secuencia principal a la región del diagrama de Hertzsprung-Russell en la que se encuentra la mayor parte de las estrellas.

El camino evolutivo de una estrella, predicho por los modelos teóricos, coincide con las observaciones de los cúmulos globulares. Estos grupos tienen la edad suficiente para que ya no avance en ellos la formación estelar. Las estrellas de gran masa han evolucionado hasta convertirse en gigantes y supergigantes mientras que las estrellas de masa más pequeña se encuentran todavía en su fase de secuencia principal.

9.4. Tipo espectral

Una clasificación usual de las estrellas se basa en sus *características espectrales*. La radiación electromagnética de la estrella se analiza mediante un prisma o una red de difracción. El espectro obtenido muestra el arcoíris de colores mezclados con líneas de absorción. Cada línea identifica la emisión característica de un ion de un cierto elemento químico (ver sección 8.2). La intensidad de la línea mide la abundancia relativa de ese ion. La abundancia de diferentes iones varía con la temperatura de la fotosfera (capa más externa). La clase espectral es un código breve que resume el estado de ionización y da una medida objetiva de la temperatura y la densidad de la fotosfera.

La mayoría de las estrellas se clasifican hoy en el sistema de Morgan-Keenan (MK), mediante las letras *O, B, A, F, G, K y M*, secuencia que va de las más calientes (tipo *O*) a las más frías (tipo *M*). Cada una de estas clases se subdivide a su vez utilizando un dígito numérico, 0 el más caliente y 9 el más frío (por ejemplo, *A8, A9, F0, F1* forman una secuencia de más caliente a más frío). La secuencia se ha ampliado con clases de otras estrellas que no encajan en el sistema clásico, como la clase *D* de las enanas blancas y de clase *C* para las estrellas de carbono.

La clasificación por tipo espectral se resume en la siguiente tabla

Tabla 9.5. Clasificación de las estrellas por tipo espectral

Clase	T (K)	Color	Masa/M _☉	Radio/R _☉	L/L _☉	Líneas hidrógeno	% de la secuencia Principal	Ejemplo
O	≥33.000	Azul	≥16	≥6,6	≥30.000	Débil-Media	~0.00003%	Σ Oriónis Spica
B	10.000-33.000	Azulado	2,1-16	1,8-6,6	25-30.000	Medio	0,13%	
A	7.500-10.000	Blanco	1,4-2,1	1,4-1,8	5-25	Fuerte	0,6%	Sirio
F	6.000-7.500	Blanco amarillento	1,04-1,4	1,15-1,4	1,5-5	Medio	3%	Canopis
G	5.200-6.000	Amarillo	0,8-1,04	0,96-1,15	0,6-1,5	Débil	7,6%	Sol
K	3.700-5.200	Anaranjado Amarillento	0,45-0,8	0,7-0,96	0,08-0,6	Muy débil	12,1%	Arturo
M	≤3.700	Anaranjado	≤0,45	≤0,7	≤0,08	Muy débil	76,45%	Antares
							Total 99,88	

Fuente: Adaptado de https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificación_estelar.

Los parámetros como masa, radio y luminosidad están referidos a aquellos correspondientes al Sol. En la octava columna se indica la fracción de la secuencia principal constituida por cada uno de los tipos espectrales. La nomenclatura *O, B, A, F* se origina en que las primeras determinaciones de luminosidad se referían solo a la intensidad de las líneas espectrales del hidrógeno, y se hizo un ordenamiento alfabético según la intensidad de esas líneas. Posteriormente se descubrió que en el espectro de las estrellas es posible detectar líneas de emisión de otros elementos, por lo que el orden alfabético original fue reemplazado por el de *clase de luminosidad*, que se indica en la tabla, donde se computa la emisión en todo el espectro.

Algunos comentarios sobre cada clase son:

- Clase *O* : emiten líneas de helio, oxígeno y nitrógeno, además de hidrógeno. Comprende estrellas muy calientes e incluye tanto las que muestran espectros de línea brillantes de hidrógeno y helio como las que muestran líneas oscuras de los mismos elementos.
- Clase *B* : muy luminosas. emiten líneas de helio neutro y líneas no muy intensas de hidrógeno. Junto a las de clase *O* , tienen gran masa y consumen su energía más rápidamente que las estrellas más pequeñas; viven apenas unos millones de años y no pueden alejarse demasiado de la región en la que nacieron por lo que suelen presentarse en grupos que se conocen como asociaciones *OBI* , como la de Orión que es el ejemplo más cercano.
- Clase *A* : son las más comunes que observamos a simple vista. Un ejemplo es Sirio, la más brillante vista desde la Tierra, más cercana pero no tan grande. Su espectro tiene intensas líneas Balmer de hidrógeno y también líneas de metales ionizados.
- Clase *F* : masa mayor que el Sol, son muy brillantes y pertenecen a la secuencia principal. Espectro con líneas de Balmer de hidrógeno, débiles y líneas de metales ionizados. Color blanco con ligero tono amarillo.
- Clase *G* : similares al Sol. Líneas de hidrógeno más débiles que las *F* y líneas de metales ionizados y neutros.
- Clase *K* : son de color naranja, más frías que el Sol. Algunas son gigantes (como Arcturus o Aldebarán A) e incluso supergigantes como Ómicron 1, mientras que otras como Alpha Centauri B pertenecen a la secuencia principal. Emiten líneas de hidrógeno muy débiles y algunas líneas de metales neutros.
- Clase *M* : la más común por el número de estrellas. Incluyen las enanas rojas; más del 90% de todas las estrellas son de este tipo como Próxima Centauri. También corresponde a la mayoría de las gigantes y a algunas supergigantes como Antares o Betelgeuse, así como a las variables Mira. El espectro tiene líneas de moléculas y de metales neutros; normalmente no muestra líneas de hidrógeno. El óxido de titanio puede dar origen a líneas intensas.

9.5. Diagrama de Hertzsprung- Russell

Cada una de las estrellas que observamos en el cielo, como en la figura 9.8, se encuentra en una etapa diferente de su desarrollo; con el conjunto de ellas pasa algo similar a lo que ocurre con una población humana, en la que conviven ejemplares de todas las edades.

Para comprender el significado del estudio de las estrellas que se encuentran en diferentes estadios de evolución, imaginemos que un visitante extraterrestre aterrizara entre nosotros y quiere estudiar la población de la Tierra durante el tiempo de su misión, un mes, muy breve comparado con la duración de la vida humana, digamos setenta y cinco años.

Algo similar ocurre con la experiencia humana frente a la observación de las estrellas. En el tiempo que tiene disponible el visitante extraterrestre encontraría que los miembros de la muestra tienen diferentes edades y se encuentran en diferentes etapas de su desarrollo. Pronto se dará cuenta de que esas etapas abarcan un tiempo mucho más largo que el que tiene disponible para su estudio. En el caso de las estrellas los astrónomos están ante una situación similar. Una manera de avanzar consistió en sistematizar los datos disponibles correspondientes a diferentes estrellas y buscar correlaciones entre sus distintos parámetros. Un gran paso en este sentido fue la introducción de un diagrama de temperatura-luminosidad, conocido como *diagrama de Hertzsprung-Russell* (HR).

En 1905 el astrónomo danés Einar Hertzsprung, e independientemente el estadounidense Henry Norris Russell, notaron que la luminosidad de las estrellas decrece a medida que nos movemos del tipo espectral O al tipo espectral M . Desarrollaron la técnica de graficar la magnitud absoluta (luminosidad) de una estrella en función de su tipo espectral para buscar familias de tipo estelar.

A medida que la estrella evoluciona, los cambios en su estructura interna eventualmente se reflejan en su apariencia. Aunque un único diagrama no puede describir la cambiante estructura interna, es posible registrar los cambios en la temperatura superficial y la luminosidad en el diagrama HR; el camino que sigue una estrella en un diagrama tal, a medida que evoluciona, se llama *trayectoria evolutiva* de la estrella.

Para comprender qué puede esperarse en un gráfico de ese tipo analizamos la ley de Stefan-Boltzmann, ecuación (9.12). Esta ley indica que la emisión de radiación aumenta con la temperatura T a la cuarta potencia y con el cuadrado del radio R de la estrella. Podemos expresar L, R y T en términos de unidades solares, de modo que

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 \quad (9.21)$$

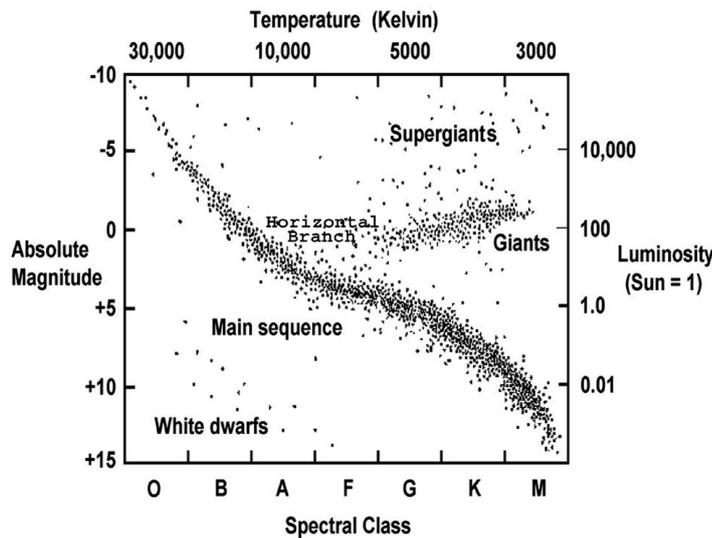
donde L_{\odot} , R_{\odot} y T_{\odot} son la luminosidad, el radio y la temperatura del Sol. Tomando logaritmos en ambos miembros de (9.21) obtenemos

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 2 \log \frac{R}{R_{\odot}} + 4 \log \frac{T}{T_{\odot}} \quad (9.22)$$

El diagrama HR es un diagrama log-log, ver figura 9.10. En ese diagrama, los gráficos de luminosidad en función de la temperatura decreciente nos dan una línea recta de pendiente -4 y cuya ordenada al origen es $2 \log \frac{R}{R_{\odot}}$. En las líneas de

pendiente (-4) se han marcado los sectores que corresponden a las enanas blancas (abajo izquierda) y enanas rojas (clasificación estelar tipo M y K) con masas de entre $0,1$ y $0,6 M_{\odot}$ (invisibles a simple vista). Arriba al centro se ubican las supergigantes con radios de 100 a $1000 R_{\odot}$ y más abajo, las gigantes rojas. La línea central descendente indica lo que se conoce como *la serie principal*, donde se ubica el Sol (a la altura de Luminosidad $L = 1$).

Figura 9.10. Regiones del diagrama HR



Fuente: NASA/CXC/SAO, 2012.

Energía gravitatoria

Durante la contracción de una estrella, se produce una conversión continua de energía potencial gravitatoria en energía térmica, de modo semejante a como la energía gravitatoria se convierte en energía cinética cuando un cuerpo cae en el campo atractivo de la Tierra. Puede demostrarse que la energía gravitatoria de una esfera de masa M y radio R está dada por la relación

$$U = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

Cuando la estrella se contrae, pasa de un radio R a un radio menor $R - \delta R$ y su energía gravitatoria cambia de U_i a U_f . La estrella dispone entonces de una energía

$$\Delta U = U_i - U_f = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \frac{\delta R}{R}$$

que convierte en energía térmica, a fin de mantener el equilibrio. El incremento de presión causado por el aumento de temperatura se opone a la fuerza de gravedad dentro de la nebulosa, lo que retarda la contracción. Por ello, este proceso puede tomar cientos de miles de años en una estrella masiva o decenas de millones de años en una estrella pequeña.

El núcleo se contrae hasta que la presión y la temperatura se elevan lo suficiente para que comiencen las reacciones termonucleares. En ese punto la estrella se enciende y comienza la conversión de hidrógeno en helio. La temperatura en el núcleo puede alcanzar millones de grados. Esa temperatura es necesaria para que la energía cinética de los protones les permita sobrepasar la barrera repulsiva creada por la fuerza electrostática entre cargas de un mismo signo (barrera coulombiana) dada por la energía potencial electrostática (positiva por tratarse de una fuerza repulsiva):

$$U_{coul} = k_e \frac{q_1 q_2}{r}$$

donde k_e es la constante de Coulomb

$$k_e = 8,9876 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$$

q_1, q_2 son las cargas de las partículas que interactúan y r la distancia entre ellas.

Después de que una estrella se ha encendido, esta genera energía térmica en la región de su núcleo denso, a través de la fusión nuclear de hidrógeno en helio. Durante ese proceso, la estrella se encuentra en la serie principal en una posición determinada por su masa y también sobre la base de su composición química y de otros factores.

Todas las estrellas de la serie principal están en equilibrio hidrostático, en el cual la presión térmica hacia el exterior del núcleo caliente se equilibra con la presión hacia el interior debida a la acción gravitatoria de las diferentes capas superpuestas. La fuerte dependencia de la velocidad de generación de energía en el núcleo con la temperatura y la presión ayuda a mantener este equilibrio. La energía generada en el núcleo hace su camino a la superficie y es irradiada hacia afuera en la fotosfera. La energía consiste en radiación electromagnética o energía cinética de convección de partículas, lo que ocurre en las regiones con gradientes de temperatura más pronunciados, mayor opacidad, o ambos.

Con referencia a la figura 9.10, la clasificación por tipo espectral resulta más precisa que los intentos por medir la temperatura de una estrella por el color. Frecuentemente la escala de temperatura en el eje horizontal se sustituye por los tipos espectrales *OBAFGKM*. Esto tiene la ventaja de ser más lineal que la temperatura (letras igualmente espaciadas) y contiene más información acerca de la estrella que solo su temperatura, como el estado de sus átomos.

El diagrama HR de temperatura-luminosidad nos da información interesante. Vemos que:

- La mayoría de las estrellas en la vecindad del Sol es más débil y más fría que el Sol.
- Hay un puñado de estrellas de color rojo y muy brillante (supergigantes rojas).
- Unas pocas estrellas de elevada temperatura, pero muy débiles (enanas blancas).

La conclusión a la que se arribó es que la mayoría de las estrellas comienza su vida en la secuencia principal y luego evoluciona a diferentes regiones del diagrama HR según sus características iniciales.

9.6. Luminosidad y masa de las estrellas

Vimos más arriba, ecuación (9.3), cómo puede determinarse la luminosidad de una estrella a partir de su brillo y su distancia a la Tierra. Una determinación aproximada de la temperatura de la superficie puede hacerse a

partir del color de la luz emitida, asociando este a las propiedades del cuerpo negro mostradas en la figura 9.4.

La masa de una estrella es más difícil de medir que las otras propiedades; solo es posible obtener una estimación confiable para las estrellas binarias, a través de su período de rotación. La tercera ley de Kepler permite deducir la masa total del conjunto y también las masas individuales. Los sistemas binarios son relativamente abundantes y su estudio revela datos importantes para la evolución de las estrellas en general. La tercera ley de Kepler también nos da información sobre la masa de una estrella en el caso en que haya uno o más planetas orbitando a su alrededor.

Para las estrellas de la serie principal, existe una relación semiempírica entre masa y luminosidad, representada por la ecuación:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = A \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^a \quad (9.23)$$

donde L_{\odot} y M_{\odot} son la luminosidad y la masa del Sol y a es un parámetro que varía en el rango $1 < a < 6$. Esta ecuación, con los valores $A = 1,5$ y $a = 3,5$ se utiliza comúnmente para estrellas de la secuencia principal con masas entre $2 M_{\odot}$ y $20 M_{\odot}$; no se aplica a las gigantes rojas, ni a las enanas blancas.

Las relaciones para estrellas con diferentes límites de masa son, en buena aproximación, las que se indican en la tabla siguiente:

Tabla 9.6. Estrellas con diferentes límites de masa

M	A	a
$0,43 M_{\odot}$	0,23	2,3
$0,43 M_{\odot} < M < 2 M_{\odot}$	1	4
$2 M_{\odot} < M < 20 M_{\odot}$	1,5	3,5
$20 M_{\odot} < M$	3.200	1

Estas relaciones se establecen empíricamente mediante la determinación de la masa de estrellas en sistemas binarios, porque puede conocerse su distancia a través de mediciones de paralaje estándar, u otras técnicas. Después de que se grafican suficientes estrellas en un gráfico log-log, se obtiene una línea recta cuya pendiente da el valor adecuado de a .

La relación masa/luminosidad es importante, ya que puede utilizarse para encontrar la distancia a sistemas binarios demasiado lejanos para aplicar mediciones normales de paralaje, usando una técnica llamada *paralaje dinámica*. En esta técnica, las masas de las dos estrellas en un sistema binario se estiman, por lo general, como iguales a la masa del Sol. Luego, utilizando las leyes de Kepler, se calcula la distancia entre ambas estrellas; la distancia a la Tierra puede encontrarse a través del arco subtendido en el cielo, dando una medición preliminar de distancia. A partir de esta medida y los brillos aparentes de las dos estrellas, pueden encontrarse las luminosidades, y utilizando la relación masa-luminosidad, las masas de cada estrella. Estas masas se utilizan para volver a calcular la distancia de separación, y el proceso se repite. El proceso se itera varias veces; con este método en algunos casos se alcanzó una precisión del orden del 5%. La relación masa/luminosidad también puede utilizarse para determinar el tiempo de vida de las estrellas suponiendo que la vida

es aproximadamente proporcional a M / L , es decir que las estrellas más masivas tienen una vida más corta.⁷

9.7. Vida de una estrella

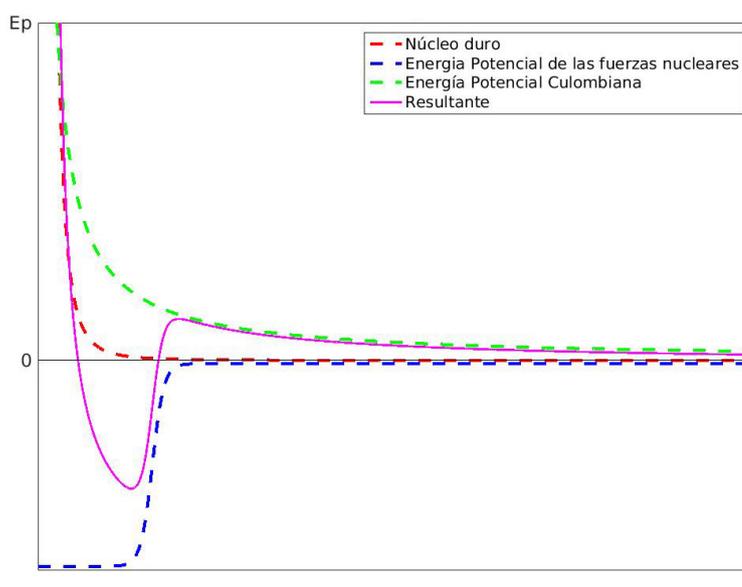
El modelo actualmente aceptado de la formación de estrellas supone que todo comienza a causa de la contracción gravitacional de una gran nebulosa de polvo interestelar y gas molecular, formada principalmente por hidrógeno. Si la masa de la nebulosa excede cierto valor, la presión debida a la gravedad supera la presión térmica expansiva del gas.

La nube comienza a colapsar y en su centro se forma un núcleo que crece en densidad y tamaño. Este núcleo produce un aumento de la fuerza gravitatoria que provoca una aceleración de la contracción. La fragmentación de una nebulosa grande puede dar origen a la nucleación de varias estrellas, que forman así un cúmulo. La cantidad de polvo y gas que se contrae, en cada región, determina la masa de la nueva estrella y el lugar que ocupará en el diagrama de Hertzsprung-Russell.

Para que la estrella se encienda, es necesario que los protones adquieran energía suficiente para superar la barrera creada por el potencial coulombiano repulsivo. Una vez superada esa barrera, a corta distancia actúa la fuerza nuclear atractiva. La combinación de estas fuerzas produce el potencial efectivo que se muestra en la figura 9.11.

Según la termodinámica, la temperatura es una medida de la velocidad media de las partículas del gas. Para gases habituales, la fracción de partículas que se mueven a una determinada velocidad aumenta como función de la temperatura, y así podemos obtener la fracción de partículas que se mueven a velocidades suficientemente altas para superar la barrera de Coulomb.

Figura 9.11. Potencial efectivo entre protones, atractivo a corta distancia y repulsivo a distancia intermedia



Fuente: WIKIFISICA2016, 2016.

⁷ Ver <http://www.astronomynotes.com/evolutn/s2.htm>

Debido al *efecto túnel cuántico*, postulado por Gamow, las partículas pueden penetrar la barrera a temperaturas menores que las necesarias para superarla (figura 9.11). Esto permite que las partículas alcancen distancias muy pequeñas a temperaturas más bajas. La combinación de este efecto y la distribución de velocidades da lugar a un número limitado de condiciones en las que la fusión puede ocurrir, conocido como *ventana de Gamow*.

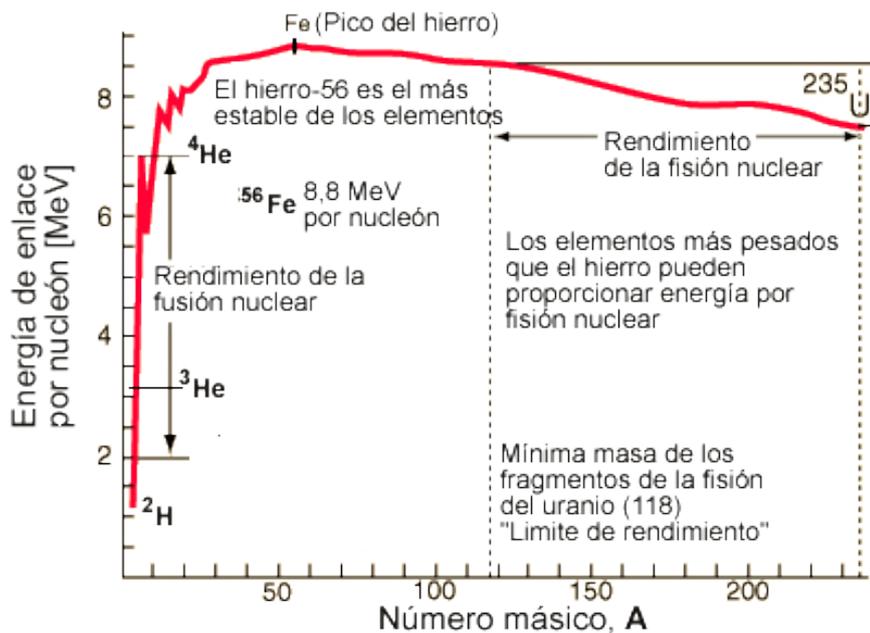
En esa situación, en el núcleo de la estrella se establece un equilibrio dinámico entre la gravedad, que empuja hacia adentro y la presión de la radiación, originada por la fusión nuclear, que empuja hacia el exterior, lo que regula el comportamiento del sistema. Radiación electromagnética y partículas rápidas forman un viento estelar que empuja hacia afuera los restos de gas y polvo que podrían haber caído sobre la estrella.

El sistema continúa emitiendo radiación de manera estable durante la mayor parte del resto de su vida. El brillo de una estrella de la serie principal es causado por la gran producción de energía a partir de la fusión de núcleos de hidrógeno para formar helio. El tiempo que una estrella de tamaño medio permanece en la serie principal puede alcanzar unos diez mil millones de años (la edad del Sol se estima en cinco mil millones de años). La masa de una estrella depende del lugar donde esta se une a la secuencia principal. Durante el tiempo que permanece allí, se vuelve más caliente y más luminosa. Las más masivas queman su combustible rápidamente, las más pequeñas, como el Sol, lo queman lentamente.

Cuando el contenido de helio en el núcleo alcanza el 12%, la fusión de hidrógeno se detiene. Sin la energía de estas reacciones, la estrella colapsa, eleva aún más su temperatura, iniciando así la fusión de helio y formando elementos más pesados. La vida de la estrella termina cuando se agota el combustible, es decir, cuando cesa la fusión de elementos ligeros para producir elementos más pesados y la estrella colapsa bajo la acción de su propia gravedad.

La producción de elementos pesados por fusión de los más livianos tiene un límite que puede verse a partir de la curva siguiente, que muestra la variación de la energía de unión (por nucleón) en los núcleos.

Figura 9.12. Energía de unión por nucleón



Fuente: Xenoforme, 2004.

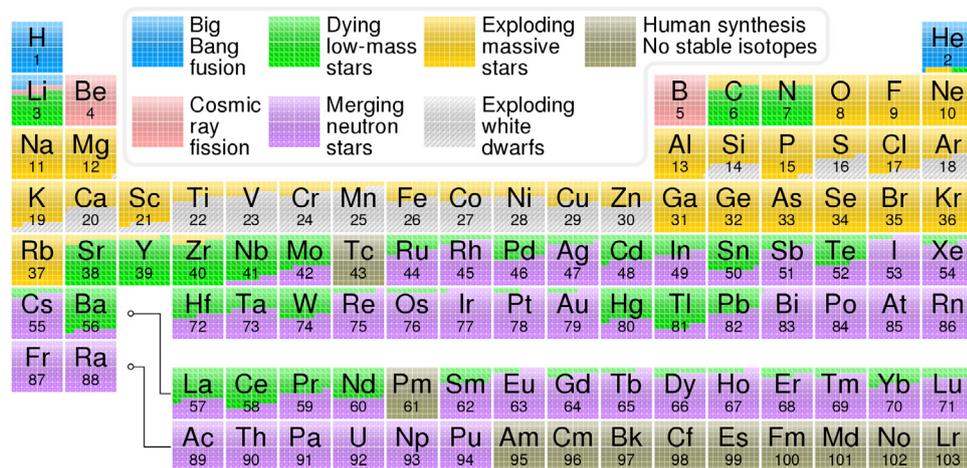
La figura 9.12 muestra la llamada *curva de Aston* que representa la energía de unión por nucleón. La curva muestra que –a través del proceso de fusión bajo presión– no es posible formar núcleos más pesados que el *Fe*. La figura tiene un máximo, el llamado *pico del hierro*, que es el núcleo más estable porque tanto para *fusionarlo* con otro como para *fisionarlo* es necesario invertir energía adicional.

La forma de esta gráfica se explica porque

1. Para átomos ligeros la fuerza nuclear fuerte es dominante, pero solo actúa a muy cortas distancias. Para núcleos más pesados la fuerza electrostática repulsiva –que es de largo alcance– actúa entre todos los protones.
2. En los núcleos más pesados la distancia promedio entre nucleones es mayor y la cohesión por interacción fuerte no es tan intensa.
3. Cuando aumenta la cantidad de protones, la fuerza electrostática de repulsión crece por el incremento de carga eléctrica positiva.
4. A partir del hierro, la barrera de potencial eléctrico que hay que pasar para añadir un protón más al núcleo supera al beneficio energético que otorga la interacción fuerte.
5. Los núcleos pesados pueden ser fisionados por interacción con distinto tipo de proyectiles. El núcleo de uranio puede sufrir *fisión inducida* por captura de un neutrón.
6. La energía obtenida por fisión está dada por el exceso de potencial eléctrico por encima de la cohesión por interacción fuerte, mientras que la energía de fusión es la energía que aporta la interacción fuerte que supera a las fuerzas repulsivas, sobre todo en los átomos más ligeros como el hidrógeno o el helio con poca carga positiva.

La figura siguiente muestra la tabla periódica con indicación del origen estelar de cada elemento, como indica el cuadro en la parte superior:

Figura 9.13. Tabla periódica indicando la nucleosíntesis de cada elemento



Fuente: CMGLEE, 2017.

Los rayos cósmicos pueden contribuir a la formación de elementos mediante el proceso de *fragmentación* (*spallation*). Esta es una forma natural de fisión nuclear y de nucleosíntesis que se refiere a la formación de elementos químicos a partir del impacto de los rayos cósmicos sobre un objeto.⁸ Estos causan fragmentación

⁸ Los rayos cósmicos, o radiación cósmica, son partículas cargadas de alta energía procedentes de fuera de la Tierra; contienen protones, partículas alfa y núcleos de algunos elementos. Aproximadamente el 1% también consta de electrones libres.

cuando una partícula del rayo (por ejemplo, un protón) impacta en la materia, incluyendo otros rayos cósmicos. El resultado es la expulsión de gran número de nucleones (protones y neutrones) del objeto golpeado. Este proceso ocurre, no solo en el espacio exterior, sino también en la alta atmósfera y la parte exterior de la corteza terrestre (normalmente, los diez metros superiores), debido al impacto constante de rayos cósmicos.

Se cree que la fragmentación por rayos cósmicos es responsable de la abundancia en el universo de algunos elementos livianos como litio, berilio y boro. Este proceso (nucleosíntesis cosmogénica) fue descubierto en la década de 1970: Los modelos de nucleosíntesis del Big Bang sugerían que la cantidad de deuterio era demasiado grande para ser consistente con la tasa de expansión del universo. Por eso, la fragmentación por rayos cósmicos fue investigada como un posible proceso para generar deuterio. A pesar de que los estudios concluyeron que no se pudo generar mucho deuterio por esa vía, los nuevos estudios mostraron que podría generarse litio, berilio y boro y, de hecho, estos isótopos están sobre-representados en los núcleos originados por los rayos cósmicos, en comparación con atmósferas solares.

Además de los elementos livianos ya mencionados, la fragmentación por rayos cósmicos puede formar tritio y los isótopos de aluminio, carbono (carbono-14), cloro, yodo y neón dentro de los materiales del Sistema Solar, razón por la cual se denominan *nucleidos cosmogénicos*.

9.8. La muerte de las estrellas

Cuando muere una estrella, el final puede representarse como un *funeral cósmico*, que puede ser de una de estas tres clases, a saber⁹

- Funeral de tercera clase
- Funeral de segunda clase
- Funeral de primera clase

9.8.1. Funeral de tercera clase

El funeral más modesto corresponde a estrellas aproximadamente tan pesadas, pero no mucho más pesadas, que el Sol. Han gastado grandes cantidades de energía y han padecido algunas contracciones y pueden llegar a convertirse en algo tan pequeño como la Tierra, esto es, en una *enana blanca*. La presión de la gravitación no es demasiado grande y el plasma puede soportarla. Agonizan irradiando la energía que les resta hasta que se enfrían completamente.

El destino detallado de cada estrella de esta categoría depende de su masa. En sus primeros años, el Sol pasó por una etapa tempestuosa, pero luego se estabilizó, brillando de manera relativamente calma. Para tener una idea del tiempo de vida del Sol, los astrónomos estudian otras estrellas similares que están en distintas etapas de su desarrollo. Así se ha predicho que el Sol podrá fusionar el hidrógeno de su núcleo en helio, aproximadamente al mismo ritmo durante otros cinco millones de años. Cuando se agote el combustible en el núcleo, el Sol todavía tendrá reserva de hidrógeno en las capas exteriores y el núcleo calentará esa cáscara; cuando se caliente lo suficiente como para fusionar hidrógeno en helio, continuará la producción de energía.

Esta transformación produce un gran cambio en la estructura de la estrella. La fuente de energía ya no es el núcleo denso y masivo, sino una cáscara cerca de la superficie. Esta se expandirá hasta 30 veces, convirtiendo la estrella en una *gigante roja*, similar a la estrella Arcturus, aunque mucho más pequeña que una supergigante,

⁹ Esta nomenclatura y parte de esta sección está tomada en la obra ya citada de W. Thirring.

como Betelgeuse. Es roja porque la temperatura exterior bajó de 5500 K a 2000 K . Esta etapa durará aproximadamente 2 millones de años.

Como resultado de los cálculos realizados en la década de 1970 se pensaba que el Sol, en la etapa de gigante roja, se expandiría hasta envolver a la Tierra. Cálculos más recientes basados en nuevas evidencias y modelos hacen pensar que eso no será así. Esto se basa en las estimaciones del tamaño de las gigantes rojas sobre la base de los datos del satélite Hipparcos y de los nuevos interferómetros ópticos e infrarrojos que pueden tomar imágenes de las grandes estrellas cercanas.

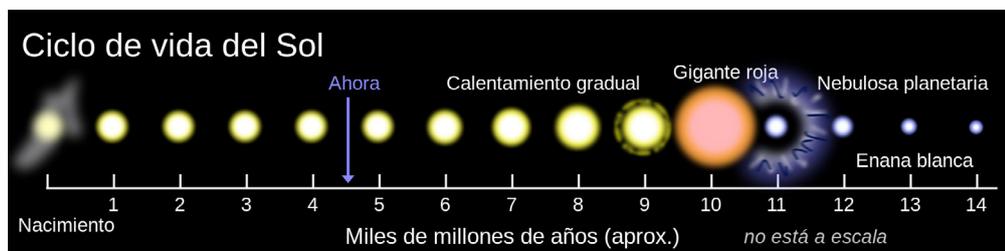
En su estado de estrella roja el Sol emitirá más energía, a pesar de la disminución de temperatura, a causa del incremento de su superficie, por lo que la situación en la Tierra será complicada para la vida. Además, el viento solar quizás evapore la atmósfera terrestre por completo. Si la humanidad encontrara la manera de huir hacia otros planetas, la buena noticia es que la gigante roja puede estar lo suficientemente caliente como para derretir las lunas ricas en agua, hoy congelada, de Júpiter y Saturno.

Mientras tanto, el helio que se produce en la cáscara caerá suavemente sobre el núcleo del Sol, incrementando su masa y contribuyendo a una mayor compresión. Esto aumentará la temperatura del núcleo hasta que bruscamente el helio se encienda y comience a fusionar en carbono; con este cambio, la fuente de energía está otra vez en el núcleo central. El Sol se contraerá de nuevo a un tamaño un poco más grande que su radio original y emitirá 10 veces más energía que lo que estamos acostumbrados ahora. Esta fase solo durará otros 500 millones de años, ya que hay muchos menos núcleos de helio—se requieren cuatro núcleos de hidrógeno para formar un núcleo de helio y tres de helio para formar uno de carbono—y la producción de energía es mucho menos eficiente.

A medida que el Sol agota el helio en el núcleo, comienza a utilizar nuevamente las reservas en sus capas exteriores y una vez más, se expande. Esta vez, crece tanto que su superficie exterior queda débilmente ligada gravitacionalmente al núcleo. El Sol apenas se mantiene unido a sí mismo. La etapa final de gigante roja se mantiene por unos 100 millones de años.

En este punto, comienza el final. Las capas exteriores, liberadas de la gravitación del núcleo, comienzan a alejarse. En el transcurso de unos 10.000 años, estas capas se extenderán hacia el espacio como una enorme esfera de gas iluminado por el núcleo caliente, ahora desnudo. Estas capas constituyen una *nebulosa planetaria*, llamada así porque en un telescopio la nube de gas se ve como el disco de un planeta. El núcleo caliente es ahora una *enana blanca*, una ceniza estelar. En este estado, el Sol brillará rojo por largo tiempo. El ciclo de vida del Sol se muestra en la figura siguiente.

Figura 9.14. Ciclo de vida del Sol.

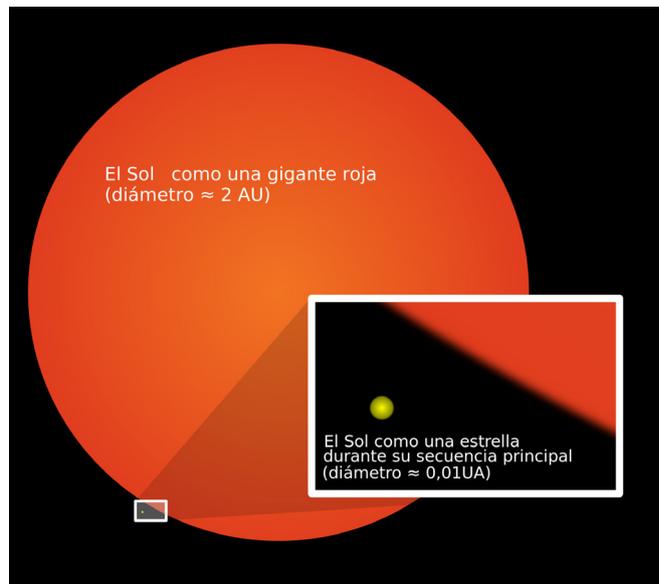


Fuente: NACLE2, 2009.

No habrá explosiones dramáticas: el Sol hubiera tenido que empezar con una masa por lo menos ocho veces más grande para morir la muerte espectacular de

una *supernova*. Pero, modesto en vida, el Sol morirá en su ley. Después de que se desvanezca la nebulosa planetaria, no habrá más fusión nuclear y el Sol estará muerto. La esfera de gas quedará a la deriva y finalmente se reunirá en una nueva nube para formar parte de la próxima generación de estrellas. Tal vez un día las cenizas del Sol serán atrapadas por otra estrella que está por nacer y todo comenzará otra vez.

Figura 9.15. Comparación entre el Sol actual (círculo amarillo) y el Sol como gigante roja



Fuente: Basquetteur, 2014.

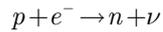
La figura muestra el tamaño actual del Sol comparado con el tamaño que alcanzaría como gigante roja, dentro de cinco mil millones de años.

Las estrellas de este tipo, si son suficientemente livianas, se congelan finalmente en un cristal. Los electrones forman un fondo homogéneo de carga negativa y los núcleos se ordenan en una red regular, llamada *red de Wigner*. Pueden convertirse en un cristal (una especie de diamante) del tamaño de la Tierra o del Sol actual, mucho más grande que los diamantes que conocemos, que se formaron bajo enormes presiones en la Tierra y son relativamente pequeños.

9.8.2. Funeral de segunda clase

Un funeral espectacular está reservado para estrellas que son apenas más pesadas que el Sol. Durante su vida gastaron más energía y por tanto se contraen en su interior más que las estrellas de la sección anterior. La distancia entre electrones se reduce a dos milésimos del radio del átomo de hidrógeno, es decir, 10^{-13} m frente a $5,3 \times 10^{-11}$ m. Este es un valor crítico para estas partículas pues la mecánica cuántica los obliga a oscilar muy rápidamente, casi a la velocidad de la luz. Su contribución a la energía aumenta como la densidad a la potencia $4/3$, la misma potencia de la densidad con la que crece la energía potencial negativa. Luego, la contribución positiva y la negativa son igualmente intensas, no se establece un equilibrio, sino que prevalece una de las dos, dependiendo de la masa total.

En estrellas suficientemente grandes gana la gravitación y cuanto más aumenta la densidad, es decir cuando la estrella se encoge, más energía se puede ganar. Entran en juego las fuerzas nucleares, no como fuente de energía sino como sumidero de energía, necesario si uno quiere liberarse de esta. Una posibilidad es que ocurra la reacción



La diferencia de masa $m_n - m_p$ es

$$m_n - m_p = 1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg} - 1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 2,3 \times 10^{-30} \text{ kg} = 1,29 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

Si la energía de los electrones es superior a esta diferencia, estos pueden zambullirse dentro de los protones para formar un neutrón y un neutrino que asegura el balance de energía y la transporta hacia afuera de la estrella. Con esto, al final solo quedan neutrones sin el respaldo de los electrones que protegerían a la estrella de su propia gravitación. La estrella se contrae sobre sí misma, los neutrones caen hacia el centro a causa de la enorme fuerza gravitatoria y el colapso ocurre en pocos segundos. Esto es una catástrofe conocida como supernova tipo II y la estrella alumbra con un brillo que sobrepasa al de toda su galaxia.



La Explosión de una Supernova

<http://www.recercaenaccio.cat/wp-content/uploads/documents/080212-supernovae-61916.pdf>

Autor: Enrique Fernández

En su caída hacia el centro, los neutrones son parcialmente rechazados por el flujo de neutrinos en sentido contrario. El resto cae hacia el mar de neutrones que se forma en el centro y rebotan allí. Las energías por partícula son tan elevadas como en una explosión nuclear. Es la explosión de una estrella entera, más de 10^{31} veces más grande que una bomba atómica, que produce una cantidad increíble de calor, fuente del destello luminoso.

Cuando esta conmoción llega a su fin, queda una estrella de neutrones –una estrella hecha solo de neutrones– con una densidad comparable a la materia nuclear, pero contenida en una esfera de 30 km de radio. Debido a la fuerza gravitatoria la superficie es muy pulida, quizás tiene un par de montañas, que no son de más de 1 mm de altura.

La figura 9.16 muestra una foto de la Supernova 1987 A, en las afueras de la nebulosa Tarántula en la Gran Nube de Magallanes,¹⁰ una galaxia enana cercana al Sol, aproximadamente a $51,4 \text{ kiloparsec}$ de la Tierra.

Figura 9.16. Supernova 1987 A



Fuente: ESA/Hubble & NASA, 2011.

¹⁰ El número que aparece en el nombre de la supernova corresponde al año de la observación.

Identificable a simple vista desde el hemisferio sur, su luz llegó a la Tierra en febrero de 1987 y su brillo alcanzó su punto máximo en mayo, con magnitud aparente de aproximadamente 3. Fue la primera oportunidad para los astrónomos modernos de ver una supernova cercana y las observaciones proporcionaron mucha información útil. Es la supernova más cercana observada desde SN 1604 (Supernova observada por primera vez el 9 de octubre de 1604, por Kepler. Tuvo lugar en la propia Vía Láctea, pero no hay registro fotográfico).

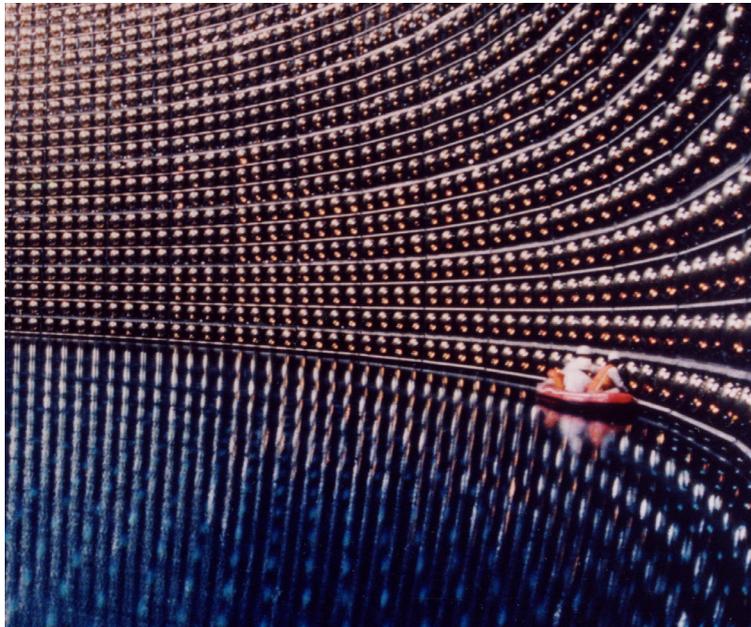
Dos o tres horas antes de que la luz visible de la supernova llegó a la Tierra, pudo observarse una explosión de neutrinos en tres observatorios. Estos neutrinos, producidos simultáneamente con el colapso del núcleo, precedieron a la emisión de luz visible que se origina cuando la onda de choque elástica alcanza la superficie estelar. Las observaciones de neutrinos fueron a las 7:35 *am UT*, de acuerdo al siguiente detalle de observatorios:

Tabla 9.7. Observaciones de neutrinos

Observatorio	País	Observado
Kamiokande II	Japón	11 antineutrinos
Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB)	USA	8 antineutrinos
Baksan	Rusia	5 antineutrinos

La figura 9.17 muestra el observatorio de neutrinos de Kamiokande, Japón. En la foto, el tanque está semivacío pues los operarios se encuentran realizando tareas de mantenimiento.

Figura 9.17. Interior del observatorio de neutrinos Kamiokande



Fuente: Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo, 2007.

Como resto de la supernova queda un pulsar, una estrella de neutrones que emite radiación periódica. Posee intenso campo magnético que induce la emisión de pulsos de radiación electromagnética a intervalos relacionados con el período de rotación.

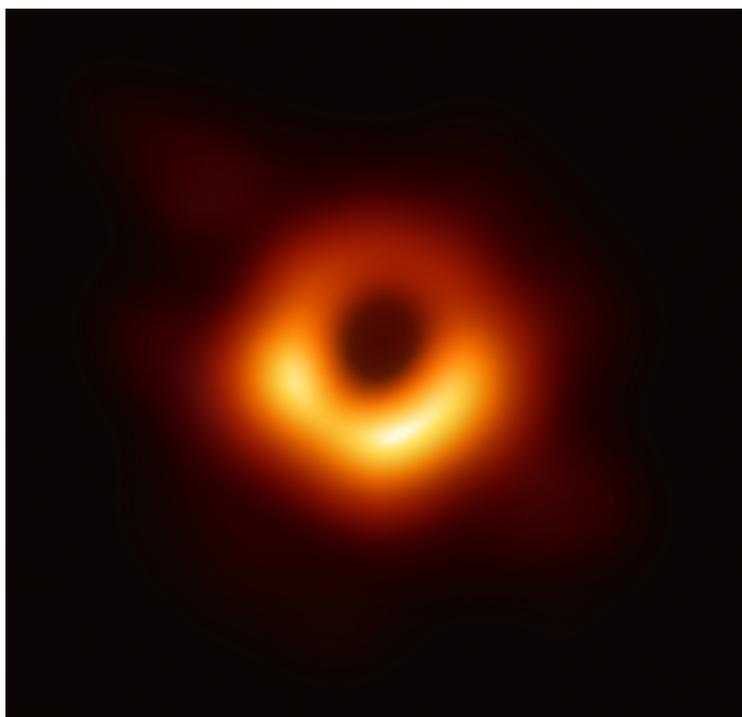
Pueden girar sobre sí mismos varios cientos de veces por segundo; un punto de su superficie puede estar moviéndose a velocidades de hasta $70.000\text{ km} / \text{s}$. Tienen un tamaño de entre 10 y 20 km , solo el potente campo gravitatorio de la estrella (dada su enorme densidad) es capaz de evitar que se despedacen por la fuerza centrífuga.

9.8.3. Funeral de primera clase

El funeral más intenso está reservado para estrellas que tienen una masa más de diez veces mayor que la del Sol. Son las más abundantes y brillan intensamente en el cielo, como por ejemplo Sirio. Su destino es una supernova tipo I, tal que la estrella de neutrones que se origina es demasiado grande y por ello, inestable. Ni siquiera la materia nuclear puede resistir la fuerza gravitatoria y todo es engullido hacia adentro por el «insaciable apetito de un agujero negro». Un agujero negro es virtualmente invisible ya que la luz no pueda escapar de este. Es posible localizarlos observando sus efectos sobre las estrellas y los gases en su vecindad. Podemos inferir su presencia debido al movimiento de la materia a su alrededor. Los elementos pesados importantes para todo tipo de vida son los residuos de los reactores nucleares cósmicos, que fueron cocinados entre las brasas de las estrellas que explotan. Si solamente hubiera funerales de tercera clase, esos elementos permanecerían en el interior de las estrellas encerrados por toda la eternidad y nada ni nadie podría haberlos sacado fuera del cristal de las estrellas.

La figura 9.18 muestra el último agujero negro anunciado, el 10 de abril de 2019, a las 15:07 horas. La Fundación Nacional para la Ciencia y el Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT) han contribuido en observaciones que rompen paradigmas sobre el colosal agujero negro en el centro de la lejana galaxia Messier 87. La imagen del M87 proviene de observaciones del EHT realizadas el 10 de abril de 2017 y es representativa de las imágenes obtenidas durante la campaña de 2017. La imagen es el resultado de combinar tres métodos distintos de generación de imágenes.

Figura 9.18. Radio-imagen del agujero negro Pōwehi, ubicado en Messier 87



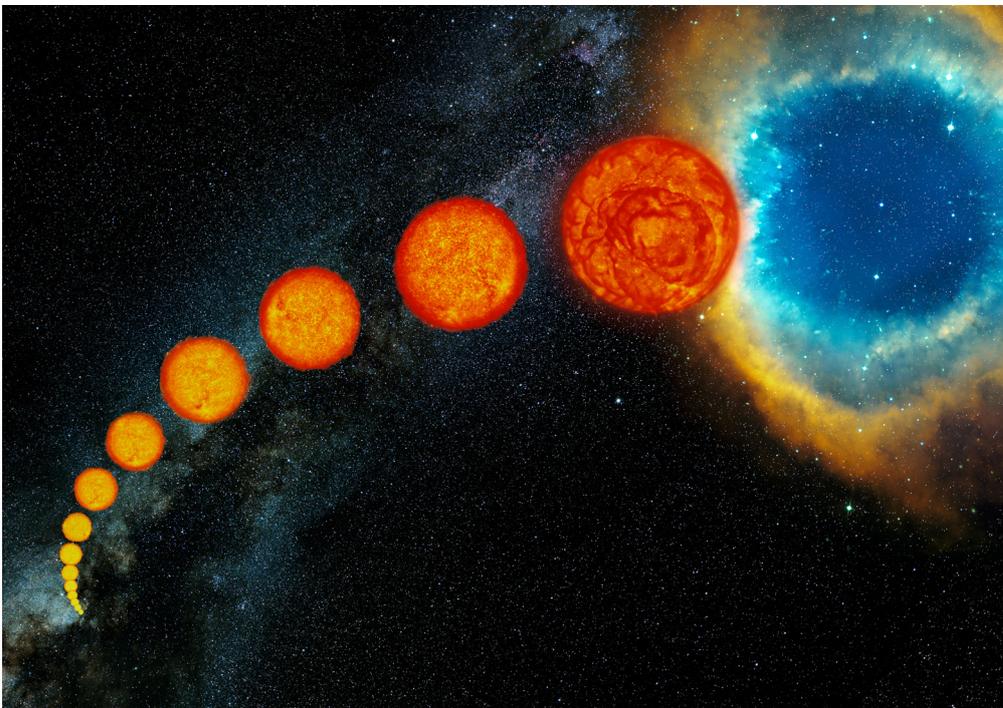
Fuente: Event Horizon Telescope, 2019.

La imagen se muestra en unidades de temperatura de brillo, $T_b = \frac{S\lambda^2}{2k_B} \Omega$, donde S es

la densidad de flujo, λ es la longitud de onda de observación, k_B la constante de Boltzmann y Ω el ángulo sólido de observación

En una supernova, la estrella se rompe explosivamente, como las frutas de algunos árboles que explotan en un incendio de bosques y esparcen sus semillas. De esta manera, un trozo de chatarra estelar alcanza a ser bien cocido, de modo que los elementos más livianos que el hierro pueden ser cocinados. En el último segundo también se irradian algunos neutrones, lo que permite que el resto de los elementos químicos pueda completarse y la gigantesca explosión se catapulte al espacio. Después de millones de años –¿o fueron mil millones?– llegaron a un entorno acogedor, nacieron nuestros planetas y floreció nuestra Tierra.

Figura 9.19. Representación artística del ciclo de vida de una estrella similar al Sol



Fuente: European Southern Observatory, 2009.

La evolución de una estrella y la duración de su vida dependen de su masa y su composición química. Sin embargo, puede afirmarse que, en general, las diferentes fases de evolución son casi las mismas para todas las estrellas; lo que cambia es que la vida es mucho más breve para una estrella de gran masa que para una pequeña, y cambia la duración de cada uno de los estadios

La figura 9.19 muestra las etapas en la vida de una estrella que se forma a partir de una nebulosa (inferior izquierda) compuesta de partículas de polvo e hidrógeno gaseoso. La gravedad une este material en glóbulos, cuyos centros se calientan hasta que las reacciones de fusión hacen que el hidrógeno comience a convertirse en helio. Después de decenas de miles de años, la estrella central con más masa empieza a agotar su combustible nuclear y explota como una supernova, dejando tras ella un púlsar.

PREGUNTAS

- **PREGUNTA 9.1.**
¿Puede señalar la diferencia entre un agujero negro y una estrella de neutrones?
- **PREGUNTA 9.2.**
¿Cuántas clases de finales hay para las estrellas y de qué depende que terminen de una forma o de otra?
- **PREGUNTA 9.3.**
Si el elemento químico más pesado que puede generarse en una estrella por fusión de los núcleos más livianos es el hierro, ¿cómo se formaron los elementos más pesados que hay en la Tierra?
- **PREGUNTA 9.4.**
¿Cómo se determina la temperatura de una estrella?
- **PREGUNTA 9.5.**
¿Qué se representa en un diagrama de Hertzsprung Russell?
- **PREGUNTA 9.6.**
En su opinión ¿cuál fue el mayor aporte de Houtermans a la ciencia?

PROBLEMAS

- **PROBLEMA 9.1.**
Use la relación entre luminosidad y distancia para responder a cada una de las siguientes preguntas.
 - a. Una estrella tiene la misma luminosidad que el Sol ($3,8 \times 10^{26} W$), pero se encuentra a una distancia de 10 años luz . ¿Cuál es su brillo aparente?
 - b. Suponga que una estrella tiene el mismo brillo aparente que Alfa Centauri A ($2,7 \times 10^8 W / m^2$), pero se encuentra a una distancia de 200 años luz . ¿Cuál es su luminosidad?
 - c. Una estrella tiene una luminosidad de $8 \times 10^{26} W$ y un brillo aparente de $3,5 \times 10^{12} W / m^2$. ¿A qué distancia de la Tierra se encuentra?
 - d. Suponga que una estrella tiene una luminosidad de $5 \times 10^{29} W$ y un brillo aparente de $9 \times 10^{15} W / m^2$. ¿Cuán lejos está?
- **PROBLEMA 9.2.**
Las estrellas de neutrones son objetos muy densos que se forman como resultado de la explosión de una supernova; muchos de estos objetos giran muy rápidamente. Suponga que la masa de una estrella de neutrones esférica es el doble de la masa del Sol y su radio es $11 km$. Determine la velocidad angular máxima que puede tener para que el material en su superficie, en el ecuador no sea expulsado a causa de la fuerza centrífuga.

● **PROBLEMA 9.3.**

Cuando el Sol pase por la etapa de gigante roja, tendrá un radio de $2UA$. A partir de las propiedades del cuerpo negro, estime la temperatura superficial del astro, calcule la potencia que irradiará en ese estado y compare con la potencia actual. ¿Cómo se comparará la gravedad en la nueva superficie del Sol con la gravedad en la superficie actual?

● **PROBLEMA 9.4.**

Una vez que el Sol agote su combustible nuclear, colapsará para convertirse en una enana blanca. En este estado, tendría aproximadamente la misma masa que tiene ahora, pero su radio sería igual al radio de la Tierra.

- Calcule la densidad media de la enana blanca.
- Determine la aceleración de la gravedad en la superficie.
- Calcule la velocidad final con que un objeto de $1kg$ caería desde una altura de 10 m de la superficie de la enana blanca.
- Determine el período de un péndulo de 1 m de longitud y compare con el de un péndulo en la superficie de la Tierra.

● **PROBLEMA 9.5.**

Calcule la energía que se libera al convertir $0,003\text{ kg}$ de ^{235}U en energía por un proceso de fisión. ¿Qué cantidad de masa de H tendrá que consumirse por fusión para lograr la misma cantidad de energía?

Energía de fusión de dos núcleos de H para producir He es $1,442\text{ Mev}$

$$m(\text{U}) = 235\text{ uma} ; m(\text{H}) = 1\text{ uma} ; c = 3 \times 10^8\text{ m / s}$$

● **PROBLEMA 9.6.**

Calcule la aceleración de la gravedad g en una estrella de neutrones de 30 km de radio y una densidad igual a la de la materia nuclear.

● **PROBLEMA 9.7.**

Considere un átomo de $^{16}_8\text{O}$, y calcule

- el defecto de masa en unidades de masa atómica.
- la energía total de ligadura, en MeV .
- la energía de ligadura promedio por nucleón.

● **PROBLEMA 9.8.**

En general, para que un núcleo sea estable, las fuerzas atractivas entre nucleones deben equilibrar las fuerzas repulsivas asociadas con la carga de los protones. El núcleo de ^4_2He es particularmente estable. Para ayudar a entender por qué esto es así, considere cuántos pares de

- protones interactuantes hay en un núcleo de ^4_2He ;
- nucleones interactuantes hay en un núcleo de ^4_2He ;
- explique brevemente por qué sus respuestas en (a) y (b) apoyan la idea de que el núcleo de ^4_2He es particularmente estable.

● **PROBLEMA 9.9.**

El núcleo de $^{208}_{82}\text{Pb}$ es estable, lo que es relativamente raro para un núcleo de gran masa. Calcule para ese caso:

- el defecto de masa, en unidades atómicas;
- la energía de unión total, en MeV ;
- energía de unión total promedio por nucleón.

● PROBLEMA 9.10.

Los estudios sobre la relación entre el Sol en nuestra galaxia (Vía Láctea) revelan que este está situado cerca del borde exterior del disco galáctico, a unos 30.000 años luz ($1 \text{ año luz} = 9,46 \times 10^{15} \text{ m}$) del centro galáctico. El Sol tiene una velocidad orbital de aproximadamente 250 km/s alrededor del centro galáctico.

- ¿Cuál es el período de movimiento galáctico del Sol?
- ¿Cuál es el orden de magnitud de la masa de la Vía Láctea?
- Supongamos que la galaxia se compone sobre todo de estrellas similares al Sol, que es típico. ¿Cuál es el orden de magnitud del número de estrellas en la Vía Láctea?

Lista de referencias bibliográficas

- Altschuler, D. R. (2004). *Hijos de las estrellas: nuestro origen, evolución y futuro*. Madrid: Akal.
- Barrow, J. D. y Tipler, F. J. (1986). *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford: Oxford University Press.
- Bennett, J. O., Donahue, M. O., Schneider, N. S. (2015). *The Essential Cosmic Perspective*. Boston: Pearson.
- Hamuy, M. y Masa, J. (2008). *Supernovas*. Santiago: Ediciones B Chile.
- Khriplovich, I. B. (1992). *The Eventful Life of Fritz Houtermans*, Physics Today, Volume 45.
- Lípari, S. (2005). *Evolución en el cosmos: del Big Bang a la vida-conciencia*. Observatorio Astronómico de Córdoba.
- Merdows, A. J. (1986). *Evolución estelar*. Barcelona: Editorial Reverte.
- Thirring, W. (2008). *Impresiones cósmicas*. Buenos Aires: Ediciones El Zorzal.

Listado de recursos

- <http://www.esritoscientificos.es/trab1a20/carpetas/nuclear/nu02.htm#04>
- <http://www.caosyciencia.com/ideas/articulo.php?id=030204>
- http://www.oac.uncor.edu/documentos/conferencias/confeo5_lipari.pdf
- <http://www.monografias.com/trabajos/evoestelar/evoestelar.shtml#ixzz3A2OEBN8m>
- http://www.astro-tom.com/technical_data/magnitude_scale.htm

Lista de figuras

- ESA/Hubble & NASA. (2011). SN 1987A (id: potw1142a). [Fotografía]. <https://www.spacetelescope.org/images/potw1142a/>
- European Southern Observatory (ESO), Steinhöfel. (2009). The life of Sun-like stars (Id: eso0948a). [Gráfico]. <https://www.eso.org/public/images/eso0948a>
- Event Horizon Telescope (EHT). (2019). First Image of a Black Hole. (Id: eso1907a). [Fotografía]. <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>
- Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo. (2007). Interior del observatorio de neutrinos Kamiokande. [Fotografía].
- NASA, ESA, T. Brown (STScI), W. Clarkson (University of Michigan-Dearborn), A. Calamida y K. Sahu (STScI). (2018). Milky Way Bulge. [Fotografía]. <https://spacetelescope.org/images/op01801a/>
- NASA/CXC/SAO. (2012). The HR diagram. [Diagrama]. http://chandra.harvard.edu/edu/formal/variable_stars/HR_student.html
- Sloan Digital Sky Survey. (s.f.). An HR diagram showing the evolutionary track of a sun-like star. [Diagrama]. <http://skyserver.sdss.org/edr/en/astro/stars/stars.asp>
- Torres Arzayús, Sergio (2007). Exploremos el universo. [Gráfico]. http://astroverada.com/_Main/T_blackbody.html
- Usuario:Basquetteur. (2014). Sun red giant-es Sol gigante roja. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_red_giant-es_Sol_gigante_roja.svg, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:Bob. (2008). Inverse square law. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inverse_square_law.svg, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:Cmglee. (2017). Nucleosynthesis periodic table. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleosynthesis_periodic_table.svg, (CC BY-SA 3.0).

Usuario:Darth Kule. (2010). Black body curves of Plank. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body.svg. Dominio público.

Usuario:NACLE2. (2009) Ciclo vital del Sol. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Life_Cycle_spa.svg. Dominio público.

Usuario:Sch, (2006). The effective temperature, or blackbody temperature, of the Sun. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EffectiveTemperature_300dpi_e.png

Usuario:WIKIFISICA2016. (2016). Energía potencial asociada las fuerzas que actúan entre nucleones vecinos. [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epuclear2.jpg>, (CC BY-SA 4.0).

Usuario:Xenoforme. (2004). Energía de unión por nucleón. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energía_por_nucleón.png, (CC BY-SA 3.0).

Usuarios:Horst Frank y Jailbird. (2005). Electromagnetic spectrum-es. [Diagrama]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg, (CC BY-SA 3.0).

ORIGEN DEL UNIVERSO

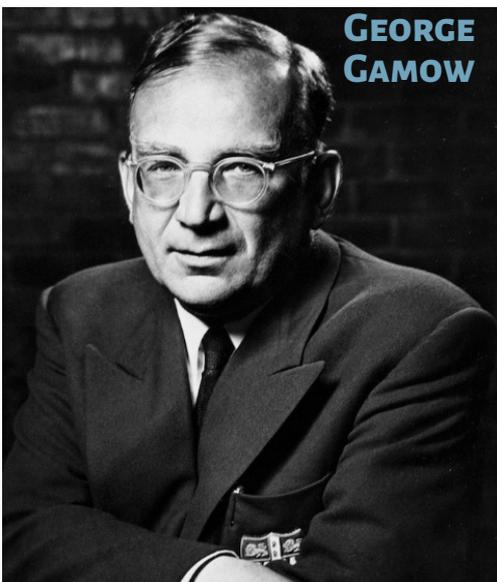
(EL SEÑOR GAMOW)

*Lo más incomprensible del universo
es que sea comprensible*
Albert Einstein

10.1. Introducción

El concepto de universo incluye los planetas, las estrellas y las galaxias, como también el contenido del espacio intergaláctico, toda la materia y toda la energía; en un sentido amplio incluye también al tiempo y al espacio. Como veremos más adelante, se sabe hoy que el universo *observable* tiene un diámetro de unos 28×10^9 parsecs o sea, $8,641 \times 10^{23}$ km.

Los primeros modelos fueron desarrollados por los antiguos filósofos griegos e indios. Casi todos los pueblos antiguos describen de una u otra manera el origen del universo. En la tradición judeo-cristiana ese origen está descrito en el libro del Génesis. Respecto al Sistema Solar, los modelos citados postulaban un sistema geocéntrico, es decir que ubicaban a la Tierra en el centro del universo. Entre los griegos Aristarco, quien hizo determinaciones bastante aproximadas de las distancias Tierra-Sol y Tierra-Luna, postuló un sistema heliocéntrico, que fue desechado por razones religiosas, imponiéndose finalmente el modelo



Nació en 1904 en Odessa. Estudió con A. Friedman en Leningrado y se doctoró en Göttingen, con una investigación sobre el núcleo atómico. En 1928-1931 estuvo con Bohr en Copenhague y luego con Rutherford en el Cavendish. Propuso el modelo de *la gota líquida* para el núcleo y colaboró en física estelar con Atkinson y Houtermans. En 1931 fue elegido miembro de la Academia de Ciencias de la URSS, donde trabajó antes de decidirse a emigrar por la creciente opresión comunista. En 1933 asistió a la Conferencia Solvay en Bruselas y luego obtuvo un trabajo en el Instituto Curie; en 1934 fue contratado por la Universidad George Washington. Fue uno de los primeros defensores de la teoría del Big Bang de Lemaître. También es reconocido por su explicación de la desintegración alfa de los núcleos por efecto túnel. Se ocupó de la formación estelar, nucleosíntesis estelar, nucleosíntesis del Big Bang y de genética molecular. Hizo importantes aportes en educación y es reconocido por sus libros de divulgación, muchos de los cuales aún se reimprimen. Integró el Physical Science Study Committee que propuso importantes cambios en la enseñanza de la física en EEUU. Murió en 1968, en Estados Unidos de Norteamérica.

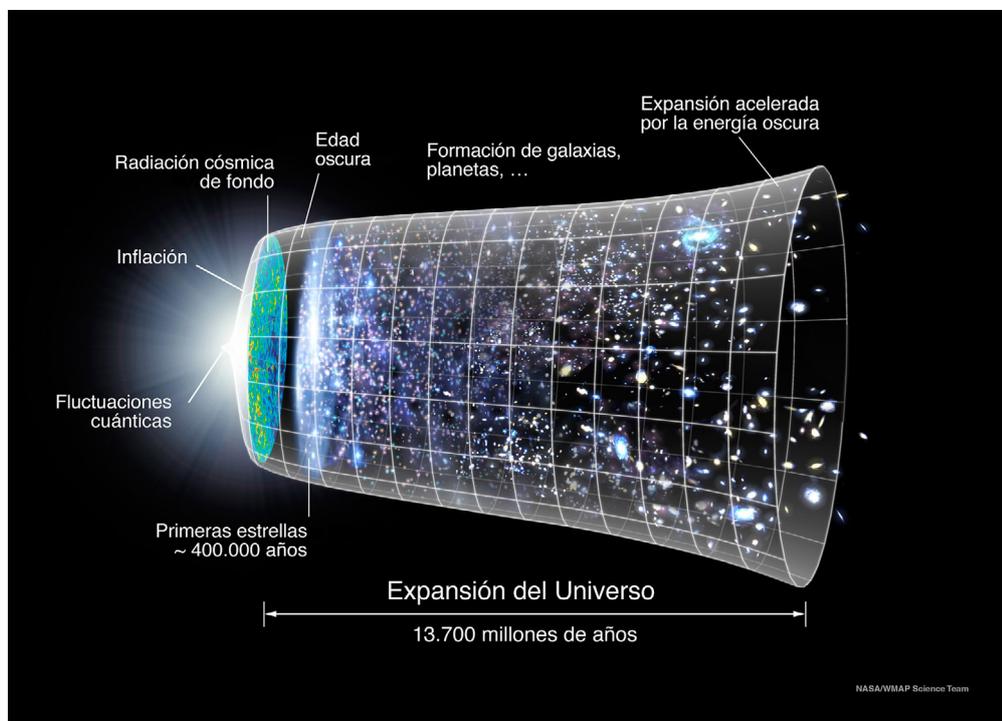
geocéntrico del también griego Tolomeo. A través del tiempo, las observaciones astronómicas más precisas de Tycho Brahe y otros, llevaron a Nicolás Copérnico a desarrollar un modelo *heliocéntrico* del Sistema Solar.

Por su parte, el desarrollo de la ley de gravitación universal de Newton se basa en las leyes del movimiento planetario descubiertas por Kepler, obtenidas gracias al trabajo de Copérnico y fundada en las observaciones de Brahe. Otros avances en la observación permitieron concluir que nuestro Sistema Solar se encuentra en la Vía Láctea, y es uno de muchos sistemas solares y galaxias en el universo. Se supone que las galaxias se distribuyen de manera uniforme en todas direcciones, lo que significa que el universo no tiene un centro. Los descubrimientos realizados en el siglo XX sugieren que el universo tuvo un principio y que se expande a un ritmo creciente.

Dado que los descubrimientos científicos vinculados con la teoría del Big Bang son mencionados frecuentemente por los medios de comunicación y que el diseño curricular en distintas jurisdicciones educativas lo incluye, daremos aquí una descripción de este, pues creemos que es positivo que los docentes cuenten con herramientas para responder las preguntas de los alumnos al respecto.

La teoría del Big Bang, el modelo cosmológico predominante que describe el desarrollo del universo, postula que el espacio y el tiempo fueron creados, junto con la materia, en un instante inicial. También supone que la materia inicial se volvía menos densa a medida que el espacio se expandía. Después de una expansión inicial, el universo se enfrió, permitiendo que se formaran las primeras partículas subatómicas y luego los átomos simples. Nubes gigantes de materia más tarde se fusionaron, por acción de la gravedad, para formar estrellas. La edad del universo estimada sobre la base de esta teoría es de $13.799 \pm 0,021$ millones de años.

Figura 10.1. Representación artística de la historia del universo



Fuente: NASA, Ryan Kaldari (adaptación al español: Luis Fernández García). Basquetteur.

Los logros científicos en esta área representan un triunfo notable de la ciencia, es decir, un triunfo de la humanidad, que nos acerca al conocimiento de nuestro propio origen. Algunas ideas fundamentales de la teoría del Big Bang pueden ser presentadas a los estudiantes de la escuela secundaria ya que pueden ser entendidas en ese nivel sin perder rigor, como por ejemplo:

- El fenómeno de *corrimiento al rojo* de la luz emitida permite medir la velocidad de una galaxia que se aleja de nosotros.
- Las galaxias parecen alejarse cada vez más unas de otras –están cada vez más separadas entre sí– sugiriendo que hace millones de años estaban todas juntas en un mismo lugar.
- Las galaxias más distantes se alejan a una velocidad mayor.
- El espacio, el tiempo, la energía y la materia fueron creados en el momento inicial. (Page Keeley y Cary Ivan Sneider, 2012)

10.1.1. Un origen remoto

Algunos filósofos de la antigüedad, como Aristóteles, pensaban que el universo había existido eternamente, es decir que no tuvo principio ni tendrá fin. Aún en tiempos modernos hubo físicos, como el propio Einstein, que adherían a esa idea a través de la llamada *teoría del universo estacionario*. Sin embargo, la investigación astronómica, en particular el trabajo de Hubble, encontró indicaciones de que el universo no es estático; antes bien, como consecuencia de esos trabajos surgió la idea de que el universo está en continua expansión.

La evidencia de esta expansión llevó a postular que el universo pudo haber comenzado en un *instante inicial*. La ciencia moderna ha encontrado evidencias, basadas en observaciones, que indican que el universo se originó en un estado de alta densidad, expandiéndose bruscamente a partir de ese estado. Los restos de esa expansión original son todavía visibles y eso es lo que nos permite deducir algo sobre el origen.

Las evidencias que mencionamos son

- La expansión del universo.
- La radiación cosmológica de microondas (RCM).

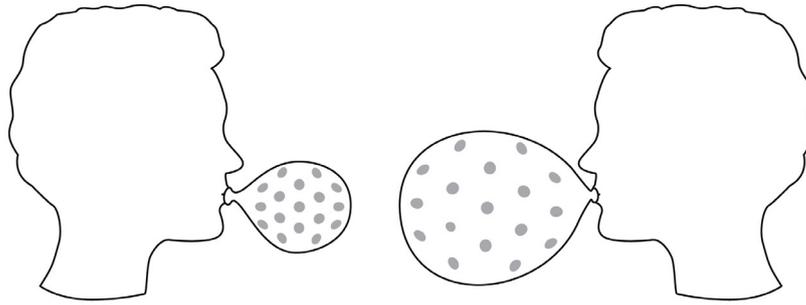
Analizaremos cada una de ellas.

10.1.2. Expansión del universo

La hipótesis de que el universo se expande se basa en observaciones astronómicas que muestran que los espectros de emisión (ver sección 4.9) de las galaxias más lejanas están desplazados hacia longitudes de onda más largas (frecuencias más pequeñas) que si las fuentes emisoras estuvieran en reposo. El fenómeno se denomina *corrimiento al rojo* y se debe al llamado *efecto Doppler*.

La expansión supone que cada parte del universo se aleja de cualquier otra. Si bien este fenómeno tiene lugar en un espacio tridimensional, podemos hacer una analogía en dos dimensiones que permite entender mejor el fenómeno. Si tomamos un globo de goma (figura 10.2) y lo inflamos un poco, podemos marcar con una fibra diez puntos sobre la superficie del globo. Si inflamos más el globo, expandiéndolo, veremos que cada uno de los puntos que hemos marcado se aleja de cada uno de los otros. Si consideramos la expansión de la superficie del globo –espacio bidimensional– veremos que no es una expansión respecto a un centro ya que el fenómeno trata a todos los puntos por igual.

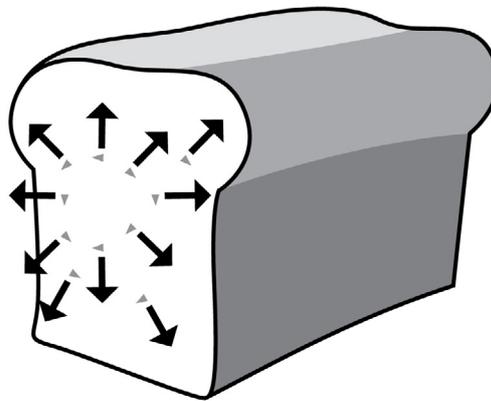
Figura 10.2. Modelo bidimensional de la expansión del universo



Fuente: Adaptado de J. A. Wheeler, 1994.

Un modelo algo más realista, al menos porque todo en él ocurre en tres dimensiones, es el siguiente: consideremos un pan de Navidad que se prepara agregando a la masa cruda una cierta cantidad de pasas de uva. Cuando la masa se expande por acción de la levadura, las pasas se alejan unas de otras. Podemos imaginar a la masa del pan como el espacio transparente que observamos en el universo y las pasas de uva como las galaxias. Si pudiéramos sentarnos en una de las pasas y miráramos a las otras a nuestro alrededor, veríamos cómo estas se alejan a medida que la masa se expande, porque el espacio está en constante expansión; mientras más lejos estén las pasas, más rápidamente se alejarían de nosotros.

Figura 10.3. Cada pasa de uva, de un trozo de pan de Navidad que leva, verá cada una de las otras pasas alejándose de ella



Fuente: Adaptado de Rod Nave.

El modelo del Big Bang fue desarrollado gracias al esfuerzo de diversos científicos, que fueron construyéndolo a través de los años. La teoría se desarrolló a partir de observaciones empíricas y avances teóricos. El astrónomo norteamericano Vesto Slipher, a través de investigaciones realizadas en la década de 1910 –que continuó el franco-alemán Carl Wilhelm Wert–, determinó que la mayor parte de las nebulosas espirales se alejan de la Tierra; pero esos astrónomos no especularon sobre la importancia cosmológica de sus observaciones.

La teoría de la relatividad general fue aplicada formalmente a la cosmología por primera vez por el ruso Alexander Friedman en 1922 y el sacerdote jesuita belga Georges Lemaître en 1927. Trabajando independientemente, ambos mostraron

que la teoría de Einstein resulta en un universo en constante expansión. Las conclusiones están contenidas en las llamadas ecuaciones FLRW (Friedman-Lemaître-Robertson-Walker) que describen un universo que, en principio, puede expandirse o contraerse.

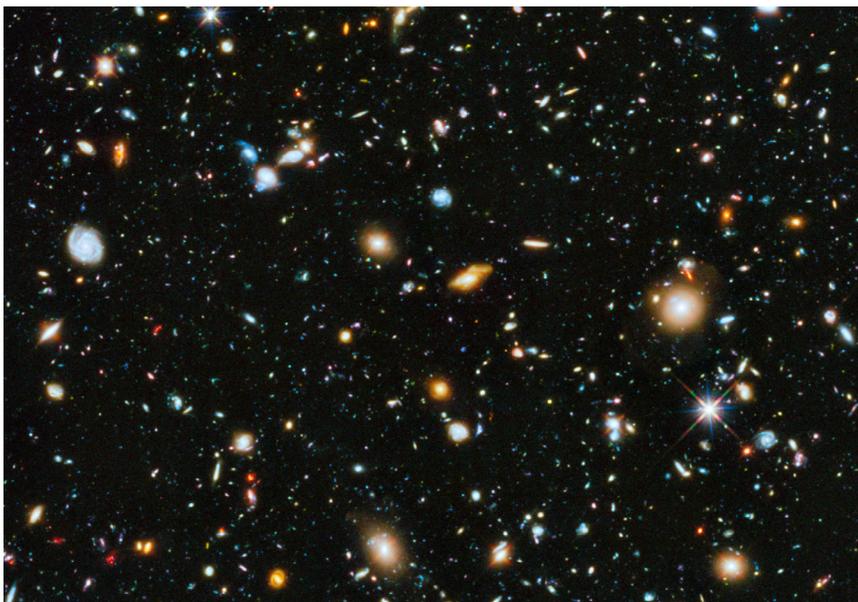
En un artículo publicado en 1931 en la revista inglesa *Nature* postuló que, si el universo está en expansión y pudiera retrocederse en el tiempo, debería haber ocupado un espacio cada vez más pequeño, hasta que en algún momento original todo el universo debió encontrarse concentrado en una especie de *átomo primitivo*. Esto es lo que casi todos los científicos afirman en la actualidad, pero antes de 1931 nadie había elaborado ese pensamiento.

Desde tiempos de Aristóteles, toda una corriente filosófica sostenía que el universo debía ser estacionario. El propio Einstein consideraba que los resultados de las ecuaciones FLRW eran erróneos y como se derivaban de su teoría de la relatividad general, trató de enmendarla agregando a las ecuaciones la llamada *constante cosmológica*, con el objeto de frenar la expansión. Más tarde, cuando la expansión del universo fue ratificada por las observaciones, llamó a este paso suyo «el peor error de mi vida».

En 1948 Gamow retomó las ideas de Lemaître y planteó que el universo podía haberse iniciado a partir de una gran expansión del espacio. A esta idea se oponía el modelo del *estado estacionario* de Fred Hoyle, según el cual la disminución de la densidad que produce el universo al expandirse se compensa con una creación continua de materia. La idea del estado estacionario surge de la aplicación del llamado principio cosmológico perfecto, que sostiene que para cualquier observador el universo debe parecer el mismo en cualquier lugar del espacio. La versión perfecta de este principio incluye el tiempo como variable por lo cual el universo no solamente presentaría el mismo aspecto visto desde cualquier punto, sino también en cualquier instante de tiempo.

Durante algunos años ambas teorías tuvieron adeptos y detractores. Las observaciones fueron apoyando cada vez más claramente la idea de que el universo evolucionó a partir de un estado inicial denso y caliente.

Figura 10.4. La Vía Láctea



Fuente: NASA, ESA, H. Teplitz and M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Arizona State University) y Z. Levay (STScI).

10.1.3. Efecto Doppler

Para comprender cómo los científicos llegaron a la conclusión de que el universo está en expansión, debemos entender el fenómeno del corrimiento al rojo de la luz emitida por las galaxias que se alejan de la Tierra. La base de la comprensión de ese fenómeno es el *efecto Doppler*, así llamado en honor al físico austríaco Christian Doppler, quien propuso el mecanismo por primera vez.

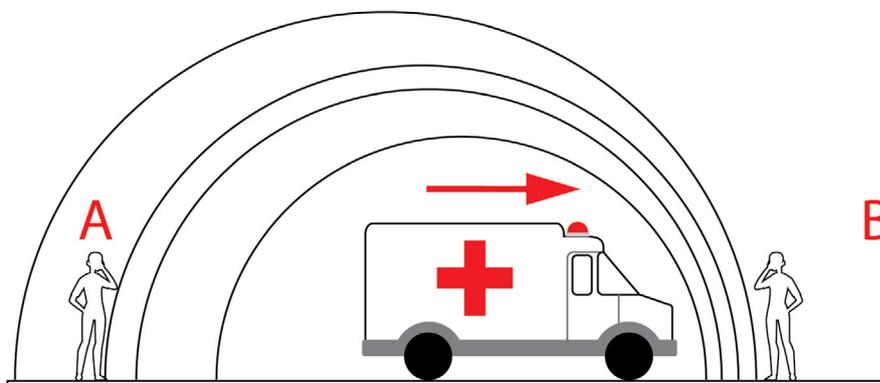
Los elementos característicos de una onda que intervienen en el siguiente análisis son:

- Período: tiempo T que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente.
- Amplitud: distancia vertical entre una cresta y el punto medio de la onda. Nótese que pueden existir ondas cuya amplitud sea variable, es decir, crezca o decrezca con el paso del tiempo.
- Frecuencia f : número de veces que es repetida dicha vibración por unidad de tiempo. En otras palabras, es una simple repetición de valores por un período determinado. Satisface la relación $f = 1/T$
- Longitud de onda λ : distancia que hay entre dos crestas consecutivas.
- Velocidad de propagación v : velocidad a la que se propaga el movimiento ondulatorio. Satisface $v = \lambda / T$.

El efecto Doppler consiste en el cambio de la longitud de onda del sonido o de la luz a causa del movimiento relativo de la fuente respecto al observador. El efecto es fácilmente perceptible en las ondas sonoras, por ejemplo, en la sirena de una ambulancia que se acerca, pasa a nuestro lado y finalmente se aleja. Cuando la ambulancia se acerca, percibimos un sonido más agudo que cuando se aleja. El efecto es todavía más notable si vamos en automóvil en sentido contrario a la ambulancia, pues en ese caso la velocidad relativa del observador y de la fuente resulta ser mayor. Debemos notar que el conductor de la ambulancia percibe siempre el mismo tono de la sirena, independientemente de que la ambulancia esté detenida o en movimiento pues él está en reposo respecto a la fuente, es decir, la sirena.

En la figura 10.5 se ilustra el efecto del movimiento de la fuente sonora sobre la longitud de onda del sonido percibido por los observadores A y B.

Figura 10.5. Efecto Doppler. Ondas emitidas por una fuente en movimiento, de izquierda a derecha. La longitud de onda es mayor a la izquierda (la fuente se aleja) y menor a la derecha (la fuente se acerca)



Fuente: Adaptado de Daniel Pastor Galán, 2008.

Cada circunferencia de la figura corresponde a un frente de onda esférico, emitido desde sucesivas posiciones de la ambulancia que avanza de izquierda a derecha. Las ondas que percibe el observador A aparecen más separadas, lo que corresponde a una longitud de onda mayor que la original (sonido más grave), mientras que las ondas que percibe el observador B aparecen más juntas, lo que corresponde a una longitud de onda menor que la original (sonido más agudo). A partir de la observación del movimiento del emisor, del observador y de los sucesivos frentes de onda, obtendremos ahora la relación que describe el efecto Doppler.

Observador A, fuente se aleja

Supongamos que el observador A se encuentra en reposo con respecto al aire – medio en que las ondas sonoras se propagan con velocidad v_S – mientras que la fuente se aleja de él con velocidad v_F , como se ilustra en el sector izquierdo de la figura 10.5.

Si suponemos que la primera cresta de la onda es emitida a un tiempo inicial $t = 0$, sabemos que luego de transcurrido el período T de la onda (tiempo en el que la onda se desplaza una longitud de onda) esa primera cresta ha viajado hacia la izquierda la distancia $d = v_S T$, que corresponde a la longitud de onda λ_0 del sonido, es decir $d = v_S T = \lambda_0$. Como la fuente se mueve con velocidad v_F , en ese tiempo esta se desplazó hacia la derecha una distancia $d_F = v_F T$. Para el observador A, la distancia entre la primera y la segunda cresta de la onda, que corresponde a la nueva longitud de onda λ' , es por tanto

$$\lambda' = d + d_F = v_S T + v_F T = \lambda_0 \left(1 + \frac{v_F T}{\lambda_0} \right) = \lambda_0 \left(1 + \frac{v_S}{V} \right) \quad (10.1)$$

El cambio en la longitud de onda vale entonces

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{v_F}{v_S} \quad (10.2)$$

Efecto Doppler y corrimiento al rojo

El cambio de frecuencia de la luz emitida por una fuente en movimiento fue propuesto en 1842 por el físico austríaco Christian Doppler. La idea era solo una hipótesis pues en esa época no se había detectado el cambio de color al que se refería Doppler en su trabajo. La idea fue aplicada a ondas de sonido por el holandés Buys Ballot en 1845, quien confirmó que el tono era más alto cuando el sonido era emitido por una fuente sonora que se acerca y más bajo cuando se aleja. La relación que vincula la longitud de onda original λ con la realmente observada λ' es

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{v_f}{c} \right) \Rightarrow \Delta\lambda = \lambda \frac{v_f}{c}$$

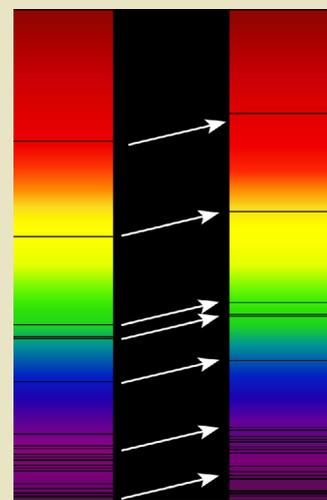
Donde hemos definido el corrimiento $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$.

La figura muestra, a la izquierda el espectro del hidrógeno de la luz solar y a la derecha, el espectro visible de un supercúmulo de galaxias distantes. En astronomía es común utilizar el factor

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}} = \frac{f_{emit} - f_{obs}}{f_{obs}}$$

que se relaciona con la frecuencia (o longitud de onda) observable mediante

$$z + 1 = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{emit}} = \frac{f_{emit}}{f_{obs}}$$



Fuente: Georg Wiora, 2005; Kes47, 2011.

La longitud de onda λ' percibida por el observador A es mayor que la emitida por la fuente. Para determinar la correspondiente frecuencia f' partimos de

$$f_0 = \frac{v_s}{\lambda}$$

y obtenemos

$$f' = \frac{v_s}{\lambda'} = \frac{v_s}{v_s + v_F} \frac{1}{T} = \frac{v_s}{v_s + v_F} f_0 \quad (10.3)$$

Vemos que la frecuencia f' percibida por el observador A es menor que la frecuencia f_0 emitida por la fuente.

Observador B, fuente se acerca

Para considerar la situación del observador B de la figura 10.5, nuevamente suponemos que la primera cresta de la onda es emitida a un tiempo $t = 0$; sabemos que luego de transcurrido el período T de la onda, esa primera cresta ha viajado hacia la derecha la distancia $d = v_s T$, que corresponde a la longitud de onda λ_0 del sonido, es decir $d = v_s T = \lambda_0$. Como la fuente se mueve con velocidad v_F , en ese tiempo esta se desplazó hacia la derecha una distancia $d_F = v_F T$. La distancia entre la primera y la segunda cresta de la onda, que corresponde a la nueva longitud de onda, es por tanto

$$\lambda'' = d - d_F = v_s T - v_F T = \lambda_0 \left(1 - \frac{v_F T}{\lambda_0} \right) = \lambda_0 \left(1 - \frac{v_F}{v_s} \right) \quad (10.4)$$

La longitud de onda λ'' percibida por el observador B de la figura es menor que la emitida por la fuente. El cambio en la longitud de onda vale

$$\Delta\lambda = \lambda'' - \lambda_0 = -\lambda_0 \frac{v_F}{v_s} \quad (10.5)$$

Las características del sonido percibido hacia adelante o hacia atrás de una ambulancia que se mueve pueden asociarse directamente con la frecuencia. La frecuencia f_0 , del sonido emitido por una fuente en reposo indica cuántas oscilaciones se producen por unidad de tiempo en un lugar del espacio y es, por tanto, la inversa del período T ,

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{v_s}{\lambda_0}$$

En esta relación vemos que frecuencia y longitud de onda son inversamente proporcionales. La frecuencia percibida por el observador A es entonces $f' = \frac{v_s}{\lambda'}$, esto es

$$f' = \frac{v_s}{\lambda'} = \frac{v_s}{\lambda_0 \left(1 + \frac{v_F}{v_s} \right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_F}{v_s} \right)} \frac{v_s}{\lambda_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_F}{v_s} \right)} f_0 \quad (10.6)$$

Como el denominador es mayor que la unidad, resulta que $f' < f_0$. Así por ejemplo si una fuente emite sonido de una frecuencia de 500 Hz cuando está en reposo, cuando se mueve a 50 m/s la frecuencia percibida hacia atrás será

$$f' = \frac{500\text{ Hz}}{\left(1 + \frac{50}{343}\right)} = \frac{500\text{ Hz}}{(1 + 0,146)} = 436\text{ Hz} \quad (10.7)$$

Por tanto, la frecuencia del sonido percibido por el observador A en reposo, que ve alejarse el vehículo, disminuye y percibe un sonido más grave. Por otra parte, la frecuencia percibida por el observador B en reposo, que ve al vehículo acercarse, es

$$f'' = \frac{v_s}{\lambda''}, \text{ esto es}$$

$$f'' = \frac{v_s}{\lambda''} = \frac{v_s}{\lambda_0 \left(1 - \frac{v_F}{v_s}\right)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{v_F}{v_s}\right)} \frac{v_s}{\lambda_0} = \frac{1}{\left(1 - \frac{v_F}{v_s}\right)} f_0 \quad (10.8)$$

Como el denominador es ahora menor que uno el observador que ve acercarse el vehículo percibe una frecuencia mayor que la emitida por la sirena, $f'' > f_0$.

Fuente sonora en reposo, observador en movimiento

En el caso en que la fuente sonora se mantiene en reposo la onda tiene una velocidad v_s , una frecuencia f y una longitud de onda $\lambda = v_s / f$. Para un observador en movimiento, el tono (frecuencia) del sonido sube (más agudo) si se acerca a la fuente y baja (más grave) si se aleja. Notamos que, para este observador, la distancia entre sucesivas crestas de la onda es la misma que para un observador en reposo y, por tanto, la longitud de onda permanece constante.

Si el observador se mueve hacia la fuente, ve llegar las sucesivas ondas con mayor velocidad pues a la velocidad de la onda debe sumarse la propia velocidad v_{Obs} del observador.¹ La velocidad resultante es entonces $v'_s = v_s + v_{Obs}$. Usando esa relación tenemos para la frecuencia f' medida por el observador que se acerca

$$f' = \frac{v'_s}{\lambda} = \frac{v_s + v_{Obs}}{\lambda} = f + \frac{v_{Obs}}{\lambda} = f \left(1 + \frac{v_{Obs}}{v_s}\right) \quad (10.9)$$

que es mayor que f .

Para considerar el caso en que el observador se aleja de la fuente basta con cambiar el signo de v_{Obs} . Así obtenemos

$$f' = f \left(1 - \frac{v_{Obs}}{v_s}\right) \quad (10.10)$$

¹ Esta es la relación que usaríamos si, desde un andén, observáramos un pasajero de un tren que arroja una pelotita hacia adelante: a la velocidad de la pelotita debemos sumar la velocidad del tren y restarla si el pasajero arrojará la pelota hacia atrás

Las relaciones (10.4) y (10.5) pueden combinarse en

$$f' = f \frac{v_s \pm v_{obs}}{v_s \mp v_F} \quad (10.11)$$

El signo superior debe usarse si la fuente y/o el observador se acercan entre sí y el signo inferior en el caso en que ambos se alejen entre sí.

10.1.4. Aplicaciones del efecto Doppler

Consideremos ahora el caso en que el sonido se refleja en un objeto en movimiento. El sonido reflejado puede considerarse como sonido emitido por el objeto que se mueve y por tanto la frecuencia reflejada es diferente de la frecuencia incidente. Si ambas señales sonoras se combinan electrónicamente, es posible determinar la velocidad del objeto en movimiento. Esta técnica es usada para medir la velocidad de los automóviles en un control de tránsito, o la velocidad del flujo sanguíneo en algunas aplicaciones médicas.²

10.2. El caso de la luz

De acuerdo con la teoría de la relatividad de Einstein, la velocidad de la luz c es independiente del estado de movimiento de la fuente o del observador. Como resultado, en el caso de la luz las dos situaciones anteriores para el efecto Doppler del sonido se reducen a una sola. Transcribimos aquí solamente el resultado.

Si una fuente de frecuencia f_F se aleja con velocidad v respecto de un observador, este medirá la frecuencia f dada por

$$f' = f_F \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad (10.12)$$

donde v es la velocidad relativa entre el observador y la fuente y c indica la velocidad de la luz en el vacío. En términos de la longitud de onda ($\lambda = c / f$) esta relación se escribe

$$\lambda' = \lambda_F \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \quad (10.13)$$

No damos aquí los detalles, pero puede mostrarse que cuando la velocidad v de la fuente respecto al observador es baja comparada con la velocidad de la luz, la relación (10.12) puede aproximarse por una más simple, que es similar a la obtenida para el sonido

² En el caso del control de velocidad en el tránsito puede utilizarse el efecto Doppler para el sonido, o para las ondas de radar. Para distancias pequeñas entre los automóviles y el puesto de observación, normalmente se usa el efecto Doppler de sonido.

$$\lambda' \approx \lambda \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (10.14)$$

donde el caso $(+v/c)$ corresponde a un alejamiento relativo entre fuente y observador, y el caso $(-v/c)$ a un acercamiento relativo. En este caso la longitud de onda de la luz recibida por el observador aumenta, lo que produce el llamado *corrimiento al rojo*. Si la fuente se acerca al observador la velocidad es negativa y la longitud de onda es menor, la frecuencia de la luz es mayor, produciéndose el *corrimiento al azul*. Las componentes de un sistema estelar binario pueden mostrar *corrimiento al azul* cuando se mueven hacia la tierra.

A partir de (10.9) obtenemos para el corrimiento en longitud de onda

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda \frac{v}{c} \quad (10.15)$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = -\lambda \frac{v}{c} \quad (10.16)$$

10.3. Las observaciones de Hubble

En la década de 1920, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble combinó las mediciones de distancias de galaxias con mediciones del corrimiento al rojo debido a la recesión o alejamiento relativo entre ellas según el efecto Doppler. Hubble pasó gran parte de su vida profesional trabajando en astronomía observacional, en el Observatorio de Monte Wilson, donde se encontraba el telescopio más potente del mundo en ese momento.³ En 1929, sus observaciones de las estrellas variables Cefeidas en las nebulosas espirales le permitieron calcular las distancias a esos objetos. Descubrió que estaban a distancias que las ubicaban fuera de la Vía Láctea y determinó que se alejaban de la Tierra como si el universo se expandiera constantemente.

Con la ayuda de M. Humason extendió un trabajo anterior de Slipher utilizando el telescopio del Monte Wilson. Fotografió con tiempos de exposición largos, los espectros de galaxias muy débiles. Mediante la medición del desplazamiento de ciertas líneas espectrales en relación con las líneas producidas por lámparas de referencia en el laboratorio pudo calcular el valor de la velocidad de las galaxias.

En unas pocas galaxias cercanas registró velocidades que indicaban que se acercaban a la Vía Láctea, porque presentaban corrimiento al azul, pero la mayoría tenía velocidades de recesión, indicando que se alejan de nuestra galaxia. Hubble encontró que las que tienen una imagen más pequeña en las fotografías, tenían mayor desplazamiento al rojo.

Así descubrió que existía una relación lineal entre ambas magnitudes, es decir, cuanto más lejos se halla una galaxia, mayor es su corrimiento al rojo. El coeficiente de proporcionalidad se denomina *constante de Hubble* H_0 y la relación entre ellas es la ley de Hubble,

$$V = H_0 D \quad (10.17)$$

³ El físico argentino Enrique Gaviola, quien contribuyó con importantes descubrimientos a la física y la astronomía, viajó a EEUU en 1935 para supervisar el acabado de un telescopio para el observatorio astronómico de Córdoba. El método desarrollado por Gaviola fue aplicado luego en la construcción del telescopio del Observatorio de Monte Wilson y en la preparación del espejo del Observatorio de Monte Palomar.

que nos dice que la velocidad con que vemos alejarse a una galaxia es proporcional a la distancia que nos separa de ella.

Figura 10.6. Edwin Hubble (1889-1953)

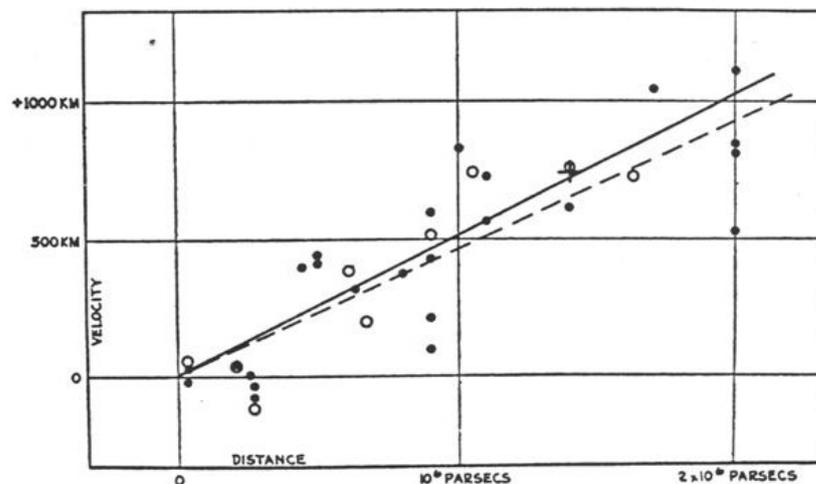


Fuente: Johan Hagemeyer, 1931.

Aunque los datos originales tenían una dispersión considerable (causada por el movimiento de rotación de cada galaxia individual, llamada *velocidad peculiar*) Hubble pudo encontrar una tendencia lineal para las 46 galaxias que había estudiado y obtuvo un valor para la constante H_0 de 500 km / s / Mpc mucho mayor que el valor aceptado actualmente debido a errores en sus calibraciones de distancia.

En 1958 se obtuvo la primera estimación confiable de H_0 , que resulta de 75 km / s / Mpc . En la figura 10.7 se nota, para pequeñas distancias, que algunas galaxias se mueven con velocidades negativas: esas son las galaxias que en el momento de la observación se acercan a la nuestra porque describen un movimiento de rotación.

Figura 10.7. Ilustración del trabajo original de Hubble



Fuente: Edwin Hubble, 1929.

Hubble interpretó la relación entre distancia y velocidad como una prueba de que el universo está en expansión. Posteriormente, los modelos teóricos cosmológicos basados en la teoría de la relatividad general permitieron explicar esta expansión, que surge de forma natural a partir de las ecuaciones de campo de la teoría. Como ya dijimos, Einstein se oponía inicialmente a esta idea, pero al conocerse los resultados publicados por Hubble, viajó especialmente a Monte Wilson en 1931 para agradecerle por sus observaciones, que proporcionaron las bases empíricas de la cosmología moderna.

10.3.1. La constante de Hubble y la edad del universo

La figura 10.7 corresponde al trabajo original de Hubble; notamos en esta que la tasa de crecimiento de la velocidad con la distancia es constante, por eso la pendiente de la recta es constante. Suponiendo que H_0 sea efectivamente constante podemos imaginarnos correr el tiempo (o lo que es lo mismo, las distancias) hacia atrás; cuando la recta llega al origen, habremos llegado al punto cero, origen de la expansión. En ese caso obtenemos de la ecuación (10.17)

$$\frac{d}{V} = \frac{1}{H_0}$$

Ahora bien, la distancia recorrida dividida por la velocidad representa el tiempo empleado, es decir que

$$t_{Univ} = \frac{d}{V} = \frac{1}{H_0} \quad (10.18)$$

Esto significa que la edad del universo (el tiempo transcurrido desde el momento inicial de la expansión hasta el momento actual) está aproximadamente dada por la inversa de la constante de Hubble. Si H_0 es 75 km/s/Mpc , entonces la edad del universo resulta

$$t_{Univ} = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{\left[\frac{75 \text{ km}}{\frac{s}{\text{Mpc}}} \right]} = \frac{\text{Mpc}}{75 \left[\frac{\text{km}}{s} \right]}$$

Explícitamente tenemos

$$1 \text{ pc} = 3,09 \times 10^{16} \text{ m}; \text{ luego}$$

$$1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 10^6 \times 3,09 \times 10^{16} \text{ m} = 3,09 \times 10^{22} \text{ m} = 3,09 \times 10^{16} \text{ km}.$$

Para la edad del universo nos queda entonces

$$t_{Univ} = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{\left[\frac{75 \text{ km}}{\frac{s}{\text{Mpc}}} \right]} = \frac{3,09 \times 10^{19} \text{ km}}{75 \left[\frac{\text{km}}{s} \right]} = \frac{s}{2,4272 \times 10^{-18}} = 4,12 \times 10^{17} \text{ s}$$

Si expresamos esta cifra en años tenemos

$$t_{Univ} = 1,3 \times 10^{10} \text{ años} \quad (10.19)$$

De acuerdo con los datos sobre la constante de Hubble, esa edad podría variar desde los 10.000 millones hasta los 20.000 millones de años aproximadamente, lo que evidentemente es una incertidumbre demasiado grande.

Hacia principios de 1970 el valor estimado de H_0 variaba entre 50 km/s/Mpc y 100 km/s/Mpc , según el método empleado. Hasta hace unos años los errores en la estimación de H_0 se debían principalmente a limitaciones instrumentales, por ello cuando se lanzó el telescopio espacial Hubble, una de sus prioridades era la determinación de H_0 aprovechando las excepcionales capacidades del instrumento. Tras varios años de estudio, en 2001 se publicaron los resultados de este proyecto

que arrojaban un valor de $H_0 = 72 \pm 8 \frac{\text{km}}{\text{s}} / \text{Mpc}$ según el cual la edad del universo

debía ser de unos 10.000 millones de años, insuficiente para dar cuenta de las estrellas más antiguas de los cúmulos globulares, cuya edad se estima en unos 14.000 millones de años.

Teniendo en cuenta la dependencia temporal de cada una de las variables que aparecen en la ecuación (10.17), es posible mostrar que la ley de Hubble implica que la expansión de las distancias, con el tiempo, es exponencial. En efecto, en la ley de Hubble (10.16) la velocidad V es la variación temporal de la distancia D , es decir

que podemos escribir $V = \frac{dD}{dt}$. Luego se cumple

$$\frac{dD}{dt} = H_0 D$$

de donde sigue

$$D = D_0 e^{H_0(t-t_0)} \quad (10.20)$$

Observaciones de supernovas lejanas revelan que existe algún otro factor que impulsa la expansión del universo, que se ha denominado *energía oscura*. Esto implica que la expansión del universo se está acelerando debido a la acción de esta energía por lo que su edad, teniendo en cuenta esta aceleración, se acerca a los 14.000 millones de años, en coincidencia con la edad de las estrellas más antiguas.

En el año 2001 la NASA lanzó la sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, en español *sonda Wilkinson para medir la anisotropía de microondas*) destinada a estudiar la radiación de fondo de microondas (ver sección siguiente). Esta radiación aporta datos sobre el universo primigenio, incluyendo el valor de H_0 , por lo que al estudiarla los cosmólogos disponen de un segundo método, alternativo al corrimiento al rojo de galaxias, para el cálculo de H_0 . En 2003 se publicaron los primeros resultados del WMAP que daban un valor de $71 \pm 4 (\text{km/s}) / \text{Mpc}$ para H_0 .

En 2006, análisis más detallados de los datos permitieron estimar H_0 en $70 (+2.4 / -3.2) (\text{km/s}) / \text{Mpc}$, la medida de la constante de Hubble de mayor precisión obtenida hasta la fecha.

Una estimación reciente (año 2011) dio el valor $H_0 = 73,8 \pm 2,4 (\text{km/s}) / \text{Mpc}$, usando una nueva cámara infrarrojo del telescopio espacial Hubble (HST, Hubble Space Telescope) para medir la distancia y el corrimiento al rojo de un grupo de objetos astronómicos.

10. 4. Radiación de fondo de microondas

En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson, de los laboratorios Bell en Holmdel, Nueva Jersey, estaban experimentando con una antena hipersensible de seis metros en forma de bocina, construida originalmente para detectar el eco de ondas de radio que rebotaban en globos cautivos metalizados.

Figura 10. 8. La antena utilizada por Penzias y Wilson



Fuente: Fabioj, 2007.

Para medir ondas de radio muy débiles, debieron eliminar del receptor todas las interferencias reconocibles. Así lo hicieron con las señales no deseadas de radar y de radiodifusión y suprimieron las interferencias provocadas por el calor en el propio receptor enfriándolo con helio líquido a -269°C , solo 4°C por encima del cero absoluto.

Cuando Penzias y Wilson analizaron sus datos encontraron un bajo nivel de ruido constante y misterioso. Este ruido residual era cien veces más intenso de lo que esperaban, se distribuía de forma homogénea en el cielo y estaba presente de día y de noche. Estaban seguros de que la radiación con una longitud de onda de $7,35\text{ cm}$ que detectaban, no provenía de la Tierra, el Sol, o de nuestra galaxia. Después de revisar a fondo el equipo, sacar algunos nidos de paloma de la antena y de limpiar los excrementos acumulados, el ruido se mantenía. Concluyeron que provenía de fuera de nuestra galaxia, a pesar de que no estaban al tanto de ninguna fuente de radio que pudiera dar cuenta del fenómeno observado.

En esa misma época, a 60 km del lugar, Robert H. Dicke, Jim Peebles y David Wilkinson, de la Universidad de Princeton, se disponían a buscar la radiación de microondas en esa región del espectro. Dicke y sus colegas habían previsto que el Big Bang no solo debió dispersar la materia que luego se condensó en las galaxias, sino que también debió haber lanzado una enorme cantidad de radiación, y pensaron que con la instrumentación adecuada, esa radiación debía ser detectable.

Penzias y Wilson tomaron conocimiento del trabajo de Dicke y se dieron cuenta de la importancia de su propio descubrimiento. La radiación detectada por ellos

tenía exactamente las características de la radiación predicha por Dicke y sus colegas. Ambos grupos decidieron publicar sus resultados en dos trabajos que aparecieron simultáneamente en la revista *Astrophysical Journal Letters*. En el suyo, Dicke y sus colaboradores describen la importancia de la radiación cósmica de fondo, como prueba de la teoría del Big Bang. En la segunda nota, de Penzias y Wilson titulada *Una medida del exceso de temperatura de la antena a 4080 megaciclos por segundo*, los autores señalaron la existencia de ruido de fondo residual y atribuyen una posible explicación a la dada por Dicke en su trabajo. Por su descubrimiento Penzias y Wilson recibieron el Premio Nobel de Física en 1978.

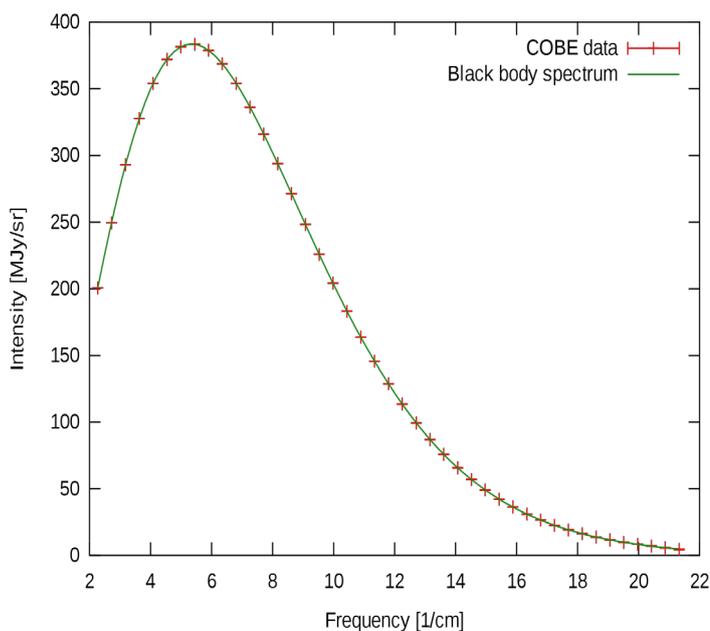
10.4.1. Relación con el Big Bang

El Big Bang no es una explosión de materia que se esparce para llenar un espacio vacío: es el espacio-tiempo el que se expande, y su expansión causa el incremento de la distancia física entre dos puntos cualesquiera en el universo. El hecho de que tanto el espacio como el tiempo se inician en el Big Bang, llevó al escritor Mark Midbon a llamar a ese inicio «un día sin ayer».

Cuando los objetos están ligados entre sí (por ejemplo, por una galaxia), no se alejan con la expansión del espacio-tiempo, debido a que las leyes de la física que los gobiernan son uniformes e independientes del espacio métrico. Más aún, la expansión del universo en las escalas actuales locales es tan pequeña que cualquier dependencia de las leyes de la física con la expansión no sería medible con las técnicas actuales. Por otra parte, no es tampoco una explosión en el sentido clásico del término, ya que no se propagó fuera de sí mismo.

El fondo cósmico de microondas (FCM) y la relación entre el corrimiento al rojo y la distancia cosmológica, se consideran como la mejor evidencia disponible de la teoría del Big Bang, lo que restringió el interés por las teorías alternativas, como la del estado estacionario, convirtiendo a la teoría inflacionaria del Big Bang en el modelo más aceptado, denominado modelo cosmológico estándar.

Figura 10.9. Espectro de RCF y microondas, datos del instrumento FIRAS en el satélite COBE. Las variables y el error estándar están ocultos por la curva teórica



Fuente: Quantum Doughnut, 2011.

A fines de 1940 Alpher y Herman llegaron a la conclusión de que si hubo una brusca expansión del universo, esta habría enfriado la radiación de alta energía inicial llevándola hacia la región de microondas y a una temperatura de aproximadamente $5K$. Esa predicción parecía entonces alejada de la realidad, pero la idea era exactamente la correcta: estos autores predijeron el FCM. Luego de 15 años Penzias y Wilson descubrieron que era real.

Al continuar la expansión, la temperatura de la radiación también disminuyó lo que explica por qué actualmente es de solo unos $2,7K$, como se muestra en la figura 10.7 que representa el espectro de cuerpo negro medido con más precisión en la naturaleza.

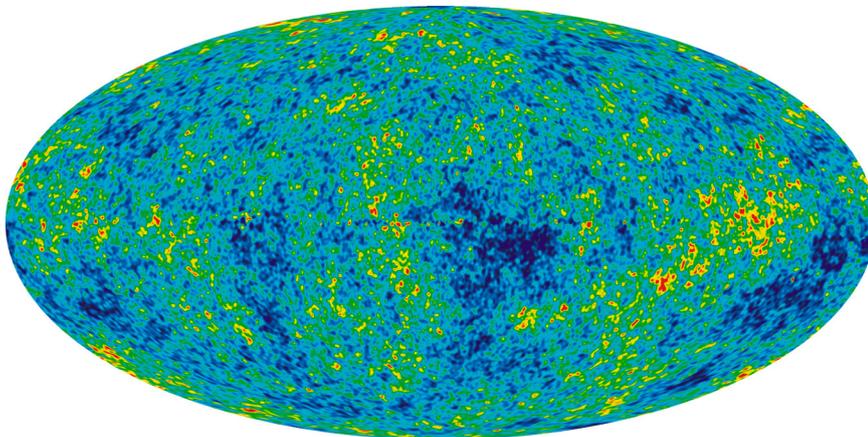
Es interesante resaltar que la predicción de este espectro de cuerpo negro casi perfecto, como también la predicción de las anisotropías que muestra, es un éxito de la teoría del Big Bang.

10.4.2. La sonda espacial Planck

Es un observatorio espacial operado por ESA, lanzado en 2009 y diseñado para observar las anisotropías del fondo cósmico de microondas (FCM) en las frecuencias de microondas e infrarrojo, con alta sensibilidad y gran resolución angular. Se ubicó en un punto fijo a $1,5 \times 10^6 km$ de la Tierra en conjunción (punto L2). Inició sus estudios en febrero de 2010 y completó su ciclo en marzo de 2013.

La misión complementó y mejoró las observaciones de la sonda WMAP de la NASA, que había medido las anisotropías del FCM con menor resolución y sensibilidad. Fue una fuente importante de información pertinente a varios temas cosmológicos y astrofísicos, como probar las teorías de los inicios del universo y el origen de la estructura cósmica. Los datos publicados en 2013 mostraron un mapa completo del fondo cósmico de microondas.

Figura 10.10. Imagen de la sonda Planck de la anisotropía en temperatura del fcm



Fuente: NASA / WMAP Science Team

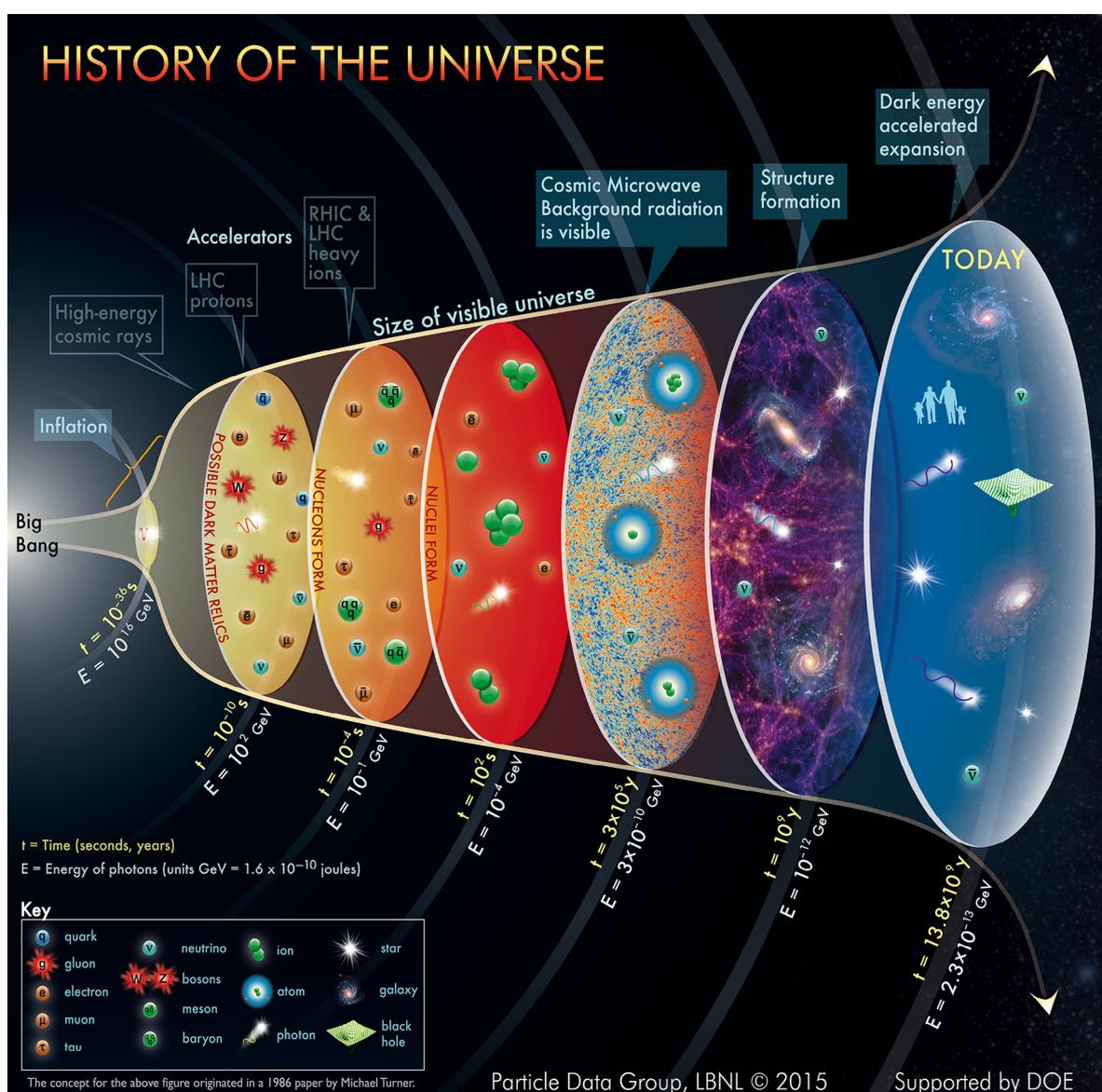
El mapa sugiere que el universo es algo más viejo de lo que se pensaba hasta entonces. Según el mapa, las leves ondulaciones de temperatura que se observan se fijaron cuando el cosmos tenía unos 370.000 años. Las huellas indican ondulaciones que surgieron muy temprano en la historia del universo, como los primeros $10^{-30} s$. Actualmente se piensa que estas ondulaciones dieron origen a la vasta red cósmica de cúmulos galácticos y a la materia oscura. Según el equipo, el universo tiene $(13,798 \pm 0,037) \times 10^{15}$ años de edad, y contiene 4,9 de materia ordinaria, 26,8 de materia oscura y un 68,3 de energía oscura. La constante de Hubble medida es de $67,80 \pm 0,77 (km / s) / Mpc$.

10.5. Historia del universo

En sus primeros momentos el universo estaba lleno homogénea e isotrópicamente de una energía muy densa y tenía una temperatura y una presión correspondientemente altas. Sufrió una expansión y un enfriamiento, pasando por cambios de fase, análogos en la vida cotidiana a la condensación del vapor o a la congelación del agua, pero relacionados en su caso con las partículas fundamentales.

Temperaturas aún más bajas condujeron a nuevos cambios de fase, que rompieron la simetría original y dieron su forma actual a las fuerzas fundamentales de la física y a las partículas elementales.⁴ Más tarde, protones y neutrones se combinaron para formar núcleos de deuterio y de helio, en un proceso llamado *nucleosíntesis primordial*.

Figura 10.11. Visión artística de la evolución del universo, ilustrado en dos dimensiones espaciales y una dimensión temporal



Fuente: Particle Data Group, Lawrence Berkeley National Lab, 2015.

4 Un ejemplo de cambio de fase que rompe la simetría es el que ocurre cuando el agua se congela. En el estado líquido el sistema tiene simetría de traslación, que se pierde cuando aparecen los cristales de hielo.

A medida que el universo se enfriaba, la energía cinética de la materia se redujo y la energía gravitacional comenzó a dominar sobre la radiación. Pasados 300.000 años, los electrones y los núcleos se combinaron para formar los átomos (mayoritariamente de hidrógeno). Esta disminución en el número de electrones libres permitió a la radiación desacoplarse de los átomos y viajar por el espacio prácticamente sin obstáculos. Este es el origen de la radiación de fondo de microondas.

Al pasar el tiempo, algunas regiones ligeramente más densas de la materia casi uniformemente distribuida crecieron por acción de la fuerza gravitatoria, haciéndose aún más densas y dando origen a nubes galácticas, estrellas, galaxias y el resto de las estructuras astronómicas que actualmente se observan.

Los detalles de este proceso dependen de la cantidad y el tipo de materia que haya en el universo. Los tres tipos posibles se denominan materia oscura fría, materia oscura caliente y materia bariónica. Las mejores medidas disponibles (provenientes del WMAP) muestran que la forma más común de materia en el universo es la materia oscura fría. Los otros dos tipos de materia solo representarían el 20% de la materia del universo.

10.5.1. Etapas de la historia del universo

Las unidades de medida del SI (kg , m , s) están ligadas a propiedades específicas de la Tierra, como su masa, su circunferencia y la duración de su período de rotación. Para visitantes de otras constelaciones estas unidades serían totalmente extrañas. En cambio, debido a la universalidad de las leyes físicas las constantes fundamentales: velocidad de la luz c , cuanto de acción \hbar y constante gravitatoria G , serían familiares para esos visitantes. Si definiéramos una masa, una longitud y un tiempo a partir de ellas, serían universalmente reconocidas. Planck introdujo precisamente ese tipo de unidades:

- masa $M_p = (\hbar c / G)^{1/2}$
- longitud $L_p = (\hbar / M_p c) = (G\hbar / c^3)^{1/2}$
- tiempo $t_p = L_p / c = (G\hbar / c^5)^{1/2}$

Estas cantidades son muy pequeñas y valen

$$M_p = 10^{-8} \text{ kg};$$

$$L_p = 10^{-35} \text{ m};$$

$$t_p = 10^{-43} \text{ s}$$

Quienes trabajan en la cosmología moderna piensan permanentemente en términos de estas unidades. En la tabla siguiente se ve la importancia que tienen estas unidades, en particular el tiempo de Planck t_p .⁵ No hay una idea clara acerca de lo que sucedió antes de los primeros tres minutos de vida del universo, pues las huellas de ese tiempo se han perdido y la información disponible no alcanza para tener un cuadro completo; el tema ha sido objeto de especulaciones que tratan de armar un escenario coherente. La siguiente tabla muestra las eras o etapas en la evolución del universo:

⁵ La Resolución adoptada por la CGPM en su reunión de 2011 reflejó la intención del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) de proponer una revisión del SI que ligara las definiciones del kilogramo, ampere, kelvin y mol, a valores numéricos exactos de la constante de Planck h , carga elemental e , constante de Boltzmann k y constante de Avogadro N_A , respectivamente, así como de revisar la forma de definir el SI y de formular la redacción de las unidades SI de tiempo, longitud, masa, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa, tal que las constantes de referencia sobre las que se basa el SI revisado aparecieran de manera explícita.

Tabla 10.1. Épocas del universo

Nombre	Tiempo	Corrimiento al rojo	Temperatura / Energía	Descripción
Planck	$<10^{-43}$ s		$>10^{32}$ K $>10^{19}$ GeV	Más allá del alcance de las teorías físicas, actuales. Efectos cuánticos dominaban la gravedad.
gran unificación	$<10^{-36}$ s		$>10^{16}$ GeV	Las tres fuerzas están unificadas.
Inflacionaria Electrodébil	$<10^{-32}$ s		10^{28} K– 10^{22} K	La inflación cósmica expande el espacio en un factor de 10^{26} en un tiempo de 10^{-33} s. El universo se enfría desde 10^{27} K a 10^{22} K. La fuerza nuclear fuerte se separa de la electrodébil.
de los quarks	$>10^{-12}$ s		10^{12} K	Las cuatro fuerzas se han separado; las energías son muy elevadas para que los quarks se condensen en hadrones, y forman un plasma de quarks y gluones. Energías similares a las que se alcanzan en el LHC.
de los hadrones	10^{-6} s–1s		10^{10} K	Los quarks se ligan en hadrones. La asimetría materia-antimateria originada en las fases anteriores elimina los anti-hadrones.
desacoplamiento de neutrinos	1s		1MeV 10^{10} K	Los neutrinos dejan de interactuar con la materia bariónica.
de leptones	1s–10s		10^{10} K– 10^9 K	Leptones y anti-leptones está en equilibrio
de fotones	10s– 10^{13} s; <380 ka		10^9 K– 10^4 K	El universo consiste en un plasma de núcleos, electrones y fotones; las temperaturas muy elevadas para que los electrones se ligan a los núcleos.
nucleosíntesis	10s– 10^3 s		10MeV–100keV 10^{11} K– 10^9 K	Protones y neutrones se ligan formando los primeros núcleos, hidrógeno y helio-4. También pequeñas cantidades de deuterio, helio-3 y and litio-7.
dominio de la materia	47ka–10Ga ¹	3600–0.4	10^4 K–4.000K	La densidad de energía de la materia domina a la densidad de energía de la radiación y a la densidad energía oscura, esto desacelera la expansión.
Recombinación	380ka	1.100	4.000K	Electrones y núcleos forman átomos neutros y el universo se hace transparente. La recombinación dura unos 100 ka. Se originan los fotones del fcm. Radio de espacio es de 42×10^6 años luz.
oscura	380ka–150Ma	1.100–20	4.000K–60K	Tiempo entre la recombinación y la formación de las primeras estrellas. La única radiación emitida son las líneas del hidrógeno.
edad estrellada	150Ma–100Ga	20– -0.99	60K–0.03K	Tiempo entre la primera formación de estrellas metálicas hasta el cese de la formación de estrellas.
Reionización	150Ma–1Ga	20–6	60K–19K	Los objetos astronómicos más distantes observables con telescopio datan de esta época; hasta 2017, la galaxia más distante observada era GNz11, con un <i>redshift</i> de 11.09. Se forman las primeras estrellas metálicas.
formación de galaxias y evolución	1Ga–10 Ga	6–0.4	19K–4K	Las galaxias se unen en <i>proto-clusters</i> de aproximadamente 1 Ga, en grupos de galaxias a partir de 3 Ga y en supercúmulos de alrededor de 5 Ga.
dominio de la energía oscura	>10 Ga	<0.4	<4 K	Densidad de materia cae por debajo de la densidad de energía oscura, la expansión del espacio se acelera. Tiempo de formación del Sistema Solar.
tiempo presente	13.8Ga	0	2.7K	Los fotones más lejanos visibles son fotones FCM (Fondo Cósmico de Microondas). Llegan de una esfera de radio 46×10^{12} años luz. El volumen esférico se conoce como universo observable.
¿futuro?	>100 Ga	<-0.99	<0.1 K	La era estrellada termina a medida que las estrellas mueren. Suponiendo que el protón puede decaer, la materia se evaporaría en una era oscura.

Nota: Ga, Ma y ka corresponden a Gigaanum, Megaanum y kiloanum.

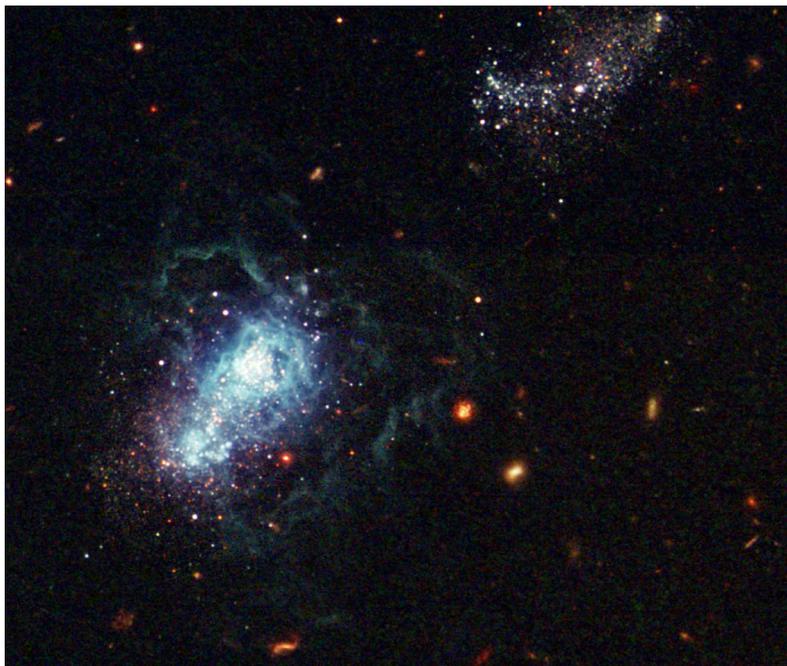
Los planetas conocidos, sólidos como la Tierra, son muy recientes. Para que existan es necesario fabricar una cantidad suficiente de los elementos químicos que forman su base rocosa: oxígeno, silicio, hierro, magnesio. Esta fase implica la actividad combinada de más de una generación de estrellas, que requiere miles de millones de años. Esos elementos planetarios son indispensables para la aparición de la vida.

Por otra parte, una capa de agua líquida parece necesaria para que ocurran las experiencias prebióticas. En cuanto a los seres vivos, las observaciones están limitadas a nuestro planeta. Aquí, los más antiguos fósiles datan de tres mil quinientos millones de años. En esa época, el universo era bastante adulto.

El universo actual parece estar dominado por una forma no identificada de energía conocida como *energía oscura*. Aproximadamente el 70% de la densidad de energía del universo actual está en esa forma. Una de las propiedades características de este componente es que provoca que la expansión del universo se aparte de una relación lineal entre velocidad y distancia; el espacio-tiempo se expande más rápidamente que lo esperado a grandes distancias. La energía oscura toma la forma de una constante cosmológica en las ecuaciones de campo de Einstein de la relatividad general, pero los detalles de esta ecuación de estado y su relación con el modelo estándar de la física de partículas continúa siendo investigada tanto en el ámbito teórico, como a través de observaciones.

Otros misterios aparecen cuando se investiga más cerca del principio, cuando las energías de las partículas eran más altas de lo que ahora puede estudiarse mediante experimentos. No hay ningún modelo físico convincente para los primeros 10^{-33} segundos del universo, antes del cambio de fase que forma parte de *la teoría de la gran unificación*. En el *primer instante* la teoría gravitacional de Einstein predice una *singularidad gravitacional*, un lugar donde las densidades son infinitas. Para resolver esta paradoja física, hace falta una teoría de la gravedad cuántica, que aún no existe. La comprensión de este período de la historia del universo figura entre los mayores problemas no resueltos de la física.

Figura 10.12. Imagen del telescopio Hubble que muestra una galaxia joven y cercana en formación



Fuente: NASA, ESA, Y. Izotov y T. Thuan.

Problema resuelto 1.

Una ambulancia se acerca con una velocidad de 20 m/s a un semáforo en rojo ubicado en una esquina mientras un peatón en reposo junto al semáforo observa la escena. Con la intención de cruzar sin detenerse, el conductor de la ambulancia hace funcionar la sirena, que emite un sonido de 350 Hz . ¿Cuál es la frecuencia que percibe el peatón?

Solución.

La frecuencia percibida por el observador que ve acercarse a la ambulancia es

$$f'' = \frac{1}{\left(1 - \frac{v_F}{v_s}\right)} f_0 = \frac{1}{\left(1 - \frac{20\text{ m/s}}{340\frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)} 350 = 372\text{ Hz}$$

Problema resuelto 2.

Un chofer conduce una ambulancia a la velocidad máxima permitida en ruta y encuentra que unos doscientos metros adelante el camino está cortado al tránsito. A unos cien metros delante de la ambulancia se encuentra una gran pared que cierra el galpón de una fábrica. Al advertir que el tránsito está cortado, el conductor hace funcionar la sirena –cuya frecuencia es de 600 Hz – para abrirse paso y continúa la marcha. Un agente de policía ubicado al costado del camino unos pocos metros antes del cartel observa la escena.

1. El sonido que percibe el agente de policía proviene directamente de la ambulancia que se acerca ¿será más agudo, más grave o igual al que emite la ambulancia? ¿Cómo se relaciona este fenómeno con la frecuencia?
2. Una parte del sonido viaja directamente hasta el cartel indicador y se refleja llegando también al agente ¿hay alguna manera en que este pueda diferenciar el sonido que proviene directamente de la ambulancia del sonido que viene reflejado?
3. Dato: Velocidad del sonido en el aire $v_s = 1224\text{ km/h}$ (340 m/s).

Solución:

1. Para el caso en que la ambulancia se acerca al observador, este percibirá un sonido más agudo que el real, porque las ondas le llegan con mayor frecuencia. Para calcular las frecuencias del sonido que percibe el observador tendremos en cuenta que este se encuentra en reposo, es decir que $v_0 = 0$. Suponemos

que la máxima velocidad permitida en ruta es de $80\frac{\text{km}}{\text{h}} = 8,33\text{ m/s}$.

Como la ambulancia se acerca al observador corresponde al caso del observador B del texto y podemos usar la expresión (10.7) con $v_F = 8,33\text{ m/s}$ y obtenemos

$$f'' = \frac{1}{\left(1 - \frac{8,33}{340}\right)} f_0 = 615\text{ Hz}$$

2. Para el caso en que el sonido viaja hasta la pared, la frecuencia que llega allí es f , la misma que percibe el observador; como la pared está en reposo, la señal reflejada también tendrá esa frecuencia que así llega al observador.

10. 6. Conservación de la energía

Es lícito preguntarse si el proceso de creación de las partículas fundamentales: quarks, leptones, bosones de medida, gravitones, bosones de Higgs es posible desde el punto de vista de la *conservación de la energía*. Para responder a esta cuestión, supongamos que se genera un germen de materia de masa M concentrado en un espacio de radio R y que acercamos una partícula de masa m hasta la distancia R de la primera. Según vimos en la sección 5.13, de acuerdo con la ley de gravitación universal, la energía gravitatoria del sistema de dos masas es

$$E_{grav} = \frac{-GMm}{R} \quad (10.21)$$

que es negativa. Por otra parte, la energía positiva de la partícula de masa m es por lo menos igual a su energía en reposo mc^2 . Para que este proceso de creación respete la conservación de la energía, la cantidad E_{grav} debe ser igual o mayor que mc^2 , es decir

$$\frac{GMm}{R} > mc^2 \quad (10.22)$$

Sorprendentemente no importa cuánto vale la masa m , esta se simplifica en la relación (10.22). Por tanto, mientras se cumpla la condición $\frac{GM}{R} > c^2$ tenemos partículas de cualquier masa cuya energía gravitatoria es más negativa que su energía en reposo cambiada de signo.

La condición (10.22) puede escribirse en la forma $\frac{R}{M} < \frac{G}{c^2}$, que vincula la distancia R y la masa M con las constantes G y c . Podemos escribir esta desigualdad para masas y distancias dadas por las unidades de Planck introducidas anteriormente, para afianzar la idea de la utilidad de esas unidades; así reemplazamos R por la longitud de Planck L_p y M por la masa de Planck M_p . La condición de estabilidad implica

$$\frac{R}{M} = \frac{L_p}{M_p} = (G\hbar / c^3)^{1/2} (\hbar c / G)^{1/2} = G / c^2 \quad (10.23)$$

lo que significa que con esos valores para masa y distancia, la condición se cumple justo en el límite.

PREGUNTAS

● **PREGUNTA 10.1.**

Cuando usted está en una calle y escucha a los autos que pasan, ¿en qué momento se percibe más agudo el sonido de los motores? ¿Cuándo un auto se acerca o cuando se aleja?

● **PREGUNTA 10.2.**

Si la fuente y el observador se encuentran en reposo, frente a una pared ¿varía la frecuencia que percibe el observador cuando el sonido se refleja en la pared?

● **PREGUNTA 10.3.**

Indique en qué casos f_0 es mayor que f :

- La fuente en reposo y el observador se alejan.
- La fuente en reposo y el observador se acercan.
- El observador en reposo y la fuente se acercan.
- El observador en reposo y la fuente se alejan.
- El observador y la fuente se alejan mutuamente.
- El observador y la fuente se acercan mutuamente.
- El observador se acerca a una fuente sonora que se encuentra en reposo.

● **PREGUNTA 10.4.**

Cuando el Sol alcance su etapa de gigante roja, ¿podrá la expansión del universo evitar que la Tierra sea absorbida por el astro?

● **PREGUNTA 10.5.**

Explique el concepto de corrimiento al rojo

PROBLEMAS

● **PROBLEMA 10.1.**

Mostrar que para que una ley de expansión del tipo

$$\vec{v} = f(\vec{r}, t)$$

sea la misma para todos los observadores, la función f debe satisfacer la relación

$$f(\vec{r}_{CA} - \vec{r}_{BA}, t) = f(\vec{r}_{CA}, t) - f(\vec{r}_{BA}, t)$$

donde ABC son tres puntos en el espacio. Mostrar que la única solución de esta ecuación está dada por la ley de Hubble.

● **PROBLEMA 10.2.**

Determinar la masa del Sol a partir del período de traslación de la Tierra en su órbita.

● **PROBLEMA 10.3.**

Determinar la masa de la Tierra a partir del valor de la aceleración de la gravedad en nuestro planeta ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$). Comparar ese valor con el que se obtiene a partir del período de la Luna.

● **PROBLEMA 10.4.**

Un sistema binario tiene una paralaje de $0,8''$ y las dos estrellas tienen una separación angular de $0,01''$ y un período de rotación de 100 años. Determinar la masa del sistema.

● **PROBLEMA 10.5.**

La masa de Júpiter es de $1,899 \times 10^{27} \text{ kg}$ y su período orbital es $11a 315d 1,1h$. Determinar el radio medio de la órbita y la posición de su baricentro con el Sol.

● **PROBLEMA 10.6.**

En el libro El Principito el personaje visita un pequeño asteroide llamado B612. Si el asteroide tiene un radio de 20 m y una masa de 10^4 kg , calcule la aceleración de la gravedad y la velocidad de escape en el asteroide.

● **PROBLEMA 10.7.**

La órbita del cometa Halley tiene una excentricidad $\varepsilon = 0,967$ y su distancia al perihelio es de $0,307499 \text{ UA}$. Encontrar el período orbital y la velocidad en el perihelio y en el afelio.

● **PROBLEMA 10.8.**

¿Cuánto tiempo tomará para que el radio vector del Sol a la Tierra gire 90° , a partir del perihelio? El período de la Tierra son $T = 365,24 \text{ días}$ y la excentricidad de la órbita es $\varepsilon = 0,01673$, respectivamente.

● **PROBLEMA 10.9.**

Los astrólogos sostienen que nuestra personalidad está determinada por la posición de los planetas en el momento de nuestro nacimiento. Los científicos afirman que estos efectos gravitacionales son tan pequeños que son totalmente insignificantes. Compare la atracción gravitatoria entre usted y Marte con la atracción gravitatoria entre usted y su médico de 80 kg en el momento de su nacimiento, si el médico estuvo parado a $0,5 \text{ m}$ de usted. (Nota: masa de Marte $M = 6,42 \times 10^{23} \text{ kg}$, distancia media Tierra-Marte $d_{T-M} = 7,83 \times 10^{10} \text{ m}$).

● **PROBLEMA 10.10.**

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, contiene aproximadamente 4×10^{11} estrellas con una masa promedio de $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ cada una. ¿A qué distancia está la Vía Láctea de la galaxia más próxima, Andrómeda, si esta contiene aproximadamente el mismo número de estrellas y ambas se atraen entre sí con una fuerza $2,4 \times 10^{30} \text{ N}$?

● **PROBLEMA 10.11.**

Se presume que hay un agujero negro cuando una estrella visible es atraída por un compañero invisible cuya masa es más de 3 veces la masa del Sol.

- Si una gigante roja es acelerada gravitacionalmente a $0,075 \text{ m/s}^2$ hacia un objeto que se encuentra a $9,4 \times 10^{10} \text{ m}$ de distancia, ¿cuán grande debe ser la masa del cuerpo que no se ve?
- ¿Cuántas veces más masivo que el Sol es ese objeto? ($M_s = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$).

● **PROBLEMA 10.12.**

El satélite de Saturno, Titán, orbita ese planeta en poco menos de 16 días, a una distancia media de $1,216 \times 10^9 \text{ m}$ del centro del planeta. Utilice esta información para encontrar la masa de Saturno.

● **PROBLEMA 10.13.**

¿A qué distancia del centro de la Tierra debe estar una nave espacial para que experimente la misma atracción gravitatoria por parte de la Tierra y de la Luna cuando se encuentra a la misma distancia de ambos?

$$(M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}, M_L = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg}, d_{T-L} = 3,84 \times 10^8 \text{ m}).$$

● **PROBLEMA 10.14.**

Una fuente sonora que emite un sonido de frecuencia 380 s^{-1} se acerca con una velocidad de 25 m/s hacia un observador que se encuentra en reposo. ¿Cuál es la frecuencia detectada por el observador?

Solución: $410,15 \text{ Hz}$

● **PROBLEMA 10.15.**

Un autobús viaja con una velocidad de $16,6 \text{ m/s}$, y su bocina emite un sonido cuya frecuencia es de 270 s^{-1} . Si una persona camina en el mismo sentido a una velocidad de 3 m/s , ¿qué frecuencia percibe?

Solución: $281,35 \text{ Hz}$

● **PROBLEMA 10.16.**

Una persona percibe que la frecuencia del sonido emitido por un tren es 350 s^{-1} cuando se acerca el tren y de 315 s^{-1} cuando se aleja. ¿Cuál es la velocidad del tren?

Solución: $17,89 \text{ m/s}$.

● **PROBLEMA 10.17.**

Un murciélago que persigue una mosca emite ultrasonido a una frecuencia de 55 kHz . El murciélago se mueve a la velocidad $v_1 = 13 \text{ m/s}$ y la mosca a la velocidad $v_2 = 2,4 \text{ m/s}$ ambos en la misma recta y no hay viento apreciable. Calcular en estas condiciones:

a. Frecuencia con la que llegan las ondas a la mosca.

Solución $56,78 \text{ kHz}$.

b. Frecuencia que detectará el murciélago para el sonido reflejado en la mosca.

Solución: $58,54 \text{ kHz}$

● **PROBLEMA 10.18.**

Un observador se mueve a una velocidad de 42 m/s hacia un en reposo, que ejecuta la nota $La(440 \text{ Hz})$. ¿Qué frecuencia percibirá el observador, sabiendo que la velocidad

del sonido es aire $v_s = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$?

Solución: Si el observador se acerca hacia la fuente, implica que la velocidad con que percibirá cada frente de onda será mayor, por lo tanto la frecuencia aparente será mayor a la real (en reposo). Para que esto ocurra debemos aplicar el signo (+) en la ecuación

$$f' = f \left(1 \pm \frac{v}{v_s} \right)$$

Luego

$$f' = 440 \left(1 + \frac{42}{340} \right) \text{ Hz} = 494,353 \text{ Hz}$$

En este caso particular, el trompetista emite la nota *La* a 440 Hz ; sin embargo, el observador percibe una nota que vibra a una frecuencia de $494,353\text{ Hz}$, que se aproxima mucho a la frecuencia de la nota *Si*. Esa nota es el tono que suena en algunos teléfonos indicando que se puede comenzar a llamar.

● **PROBLEMA 10.19.**

Una ambulancia que se desplaza a 120 m/s lleva la sirena encendida que emite un sonido con una frecuencia de 300 Hz . Un peatón que está parado en la vereda percibe una variación de la frecuencia del sonido de la sirena cuando la ambulancia se acerca y luego cuando se aleja. ¿En qué momento la frecuencia es menor?

Lista de referencias bibliográficas

- Cepa, J. (2007). *Cosmología física*. Madrid: Ediciones Akal.
- Gangui, A. (2005). *El Big Bang: la génesis de nuestra cosmología actual*. Buenos Aires: Eudeba.
- Goodstein, D. L. y Goodstein, J. R. (1996). *Feynmans lost lecture. The motion of planets around the sun*. New York: W. W. Norton & Company.
- Keeley, P. y Sneider, C. I. (2012). *Uncovering Students Ideas in Astronomy*. Washington, D. C.: National Science Teachers Association.
- Kendall, H. W. y Panofsky, W. (1971). *Sci. American*, 224(6).
- Nave, Rod. HyperPhysics <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>
- Thirring, W. (2008). *Impresiones cósmicas*. Buenos Aires: Ediciones El Zorzal.
- Weinberg, S. (2009). *Los tres primeros minutos del Universo*. Madrid: Alianza Editorial.
- Wheeler, J. A. (1994). *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza Editorial.

Listado de recursos

- <http://www.educacionplastica.net/zirkel/elipseTan1.html>
- <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/336k/Newton/nodes5.html>
- http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/062/htm/sec_8.htm
- <http://homepages.wmich.edu/~korista/Newton-Kepler.html>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler's_laws_of_planetary_motion
- <http://www.bobthealien.co.uk/table.htm>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Configuraci%C3%B3n_de_la_%C3%B3rbita_de_los_planetas
- <http://www.astrosurf.com/astronosur/planetas.htm>
- <http://mais-ccd-spectroscopy.com/Order%20and%20Distance%20to%20Planets.pdf>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/\(3753\)_Cruithne](http://es.wikipedia.org/wiki/(3753)_Cruithne)
- http://es.wikipedia.org/wiki/Núcleo_de_la_Tierra
- http://es.wikipedia.org/wiki/Formaci%C3%B3n_y_evoluci%C3%B3n_del_Sistema
- <http://ciencia-geo.blogspot.com.ar/2010/02/forma-de-la-tierra-interpretaciones.html>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/raddat2.html#c1>
- <http://www.bobthealien.co.uk/table.htm>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Universe#Dark_energy
- http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1990/press.html
- <http://www.learner.org/courses/physics/unit/text.html?unit=1&secNum=5>
- <http://www.creces.cl/new/index.asp?imat=%20%20%3E%20%2050&tc=3&nc=5&art=371>
- <http://www.as.utexas.edu/astronomy/education/spring09/scalo/secure/301Sp09.Ch3.5+4DoppSpectra.pdf>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation
- http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background_radiation
- http://laplace.us.es/wiki/index.php/Efecto_Doppler#Efecto_Doppler_para_ondas_sonoras
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/doppler/doppler.html>

<http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/hubble.html>

Lista de figuras

- Usuario:Fabioj. (2007). Bell Labs Horn Antenna Crawford Hill NJ. [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bell_Labs_Horn_Antenna_Crawford_Hill_NJ.jpg, (CC BY-SA 3.0).
- Usuario:Wiora, Georg (Dr. Schorsch). (2005); Obra derivada:Kes47 (2011). [Gráfico]. Redshift. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Redshift.svg>, (CC BY-SA 3.0).
- Hubble, Edwin. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Mar 1929, 15 (3) 168-173; [Gráfico]. DOI: 10.1073/pnas.15.3.168,
- Hagemeyer, Johan. (1931). Studio portrait photograph of Edwin Powell Hubble. [Fotografía]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Studio_portrait_photograph_of_Edwin_Powell_Hubble.JPG. Dominio público.
- Particle Data Group, Lawrence Berkeley National Lab. (2015). History of the universe. [Gráfico]. <http://particleadventure.org/history-universe.html>
- NASA, ESA, Y. Izotov (Main Astronomical Observatory, Kyiv, UA) and T. Thuan (University of Virginia). Blue Compact Dwarf Galaxy. I Zwicky 18. [Fotografía]. http://hubblesite.org/image/1621/news_release/2004-35
- NASA, ESA, H. Teplitz and M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Arizona State University), and Z. Levay (STScI). (2014). Hubble Ultra Deep Field 2014 (HUDF 2014). [Fotografía]. <https://hubblesite.org/contents/media/images/2014/27/3380-Image.html>
- NASA, Ryan Kaldari, [adaptación al español: Luis Fernández García], [adaptación digital: Basquetteur]. Cronología de la expansión del Universo. [Gráfico]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolucion_Universo_CMB_Timeline300_no_WMAP.jpg, (CC0 1.0).
- NASA, WMAP Science team. Imagen de la sonda Planck de la anisotropía en temperatura del FCM. [Fotografía]. <https://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html>
- Usuario:Quantum Doughnut. (2011). Cmb. [Diagrama]. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cmbr.svg>. Dominio público.

AUTORÍAS Y COLABORACIONES

Hernán Asorey

Se formó como físico en el Instituto Balseiro (IB) desde la licenciatura hasta el doctorado. Realizó una estancia posdoctoral en la Universidad de Santander (Colombia), y hasta la fecha formó a más de quince físicos de cuatro países. Participó en el desarrollo del Observatorio Pierre Auger, el sistema de detección de rayos cósmicos más grande del mundo, instalado en Mendoza, Argentina. El amplio rango de sus intereses lo llevó a convertirse en jefe del Departamento Física Médica del Centro Atómico Bariloche (CNEA). También es un apasionado por la enseñanza de la física, habiendo sido reconocido varias veces como mejor profesor en varios de los establecimientos donde se desempeñó.

Carola Graziosi

Se formó como profesora en Física en el Instituto Superior de Profesorado de Río Negro. Actualmente dirige la Escuela de Producción, Tecnología y Medio Ambiente de la UNRN. Presidió la Asociación de Profesores de Física de Argentina, posición desde la que organizó las actividades del Año Internacional de la Física, en 2005. Trajo a la Argentina las International Junior Science Olympiads (IJSO) y, en ese contexto, fue elegida Vicepresidente para el continente americano del Comité Internacional de las IJSO (2001-2010).

Arturo López Dávalos

Es profesor emérito y fue vicerrector organizador de la UNRN. Su trabajo científico es en temas de magnetismo y superconductividad. Su formación científica incluyó estancias en las universidades de Viena, Grenoble, Ginebra, California y Autónoma de Madrid. Publicó con Damián Zanette *Fundamentals of Electromagnetism* (Springer Verlag, 1999). Fue director del CAB-IB en el período 1986-1993, habiendo dictado allí varias materias básicas y de su área de trabajo. Su obra abarca, además de publicaciones científicas en colaboración con sus colegas y alumnos, obras literarias que incluyen una biografía y una obra de teatro, ambas vinculadas a la historia de la ciencia en Argentina. Fue vicepresidente de la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU) entre 1996 y 1998.

Física IA

De las galaxias a los quarks

Arturo López Dávalos ; Hernán Asorey ; Carola Graziosi.

Primera edición - Viedma : Universidad Nacional de Río Negro, 2020.

334 p. ; 29,7 x 21 cm. - (Lecturas de cátedra)

ISBN 978-987-4960-29-0

1. Física. 2. Astrofísica. 3. Partícula elemental. I. Asorey, Hernán. II. Graziosi, Carola.
CDD 523.01



 Universidad Nacional
de Río Negro

© Universidad Nacional de Río Negro, 2020.
editorial.unrn.edu.ar
Belgrano 526, Viedma, Río Negro, Argentina.

© Arturo López Dávalos, 2020.
© Carola Graziosi, 2020.
© Hernán Asorey, 2020.
© Del prólogo Arturo Menchaca Rocha, 2020.
Queda hecho el depósito que dispone la Ley 11.723.

Dirección editorial: Ignacio Artola
Coordinación de edición: Diego Martín Salinas
Edición de textos: Diego Martín Salinas
Corrección de textos: Cecilia Soto
Corrección de prueba: Marian Pou Moragues
Diagramación y diseño: Sergio Campozano
Imagen de tapa: Editorial UNRN, 2020



Licencia Creative Commons. BY-NC-ND

Usted es libre de: compartir-copiar, distribuir, ejecutar
y comunicar públicamente esta obra bajo las condiciones de:
Atribución - No-comercial - Sin obra derivada

FÍSICA IA

De las galaxias a los quarks

fue compuesto con la familia tipográfica Alegreya y Liberation en sus diferentes variables.

Se editó en mayo de 2020 en la Dirección de Publicaciones-Editorial de la UNRN.

Física IA

De las galaxias a los quarks

Este libro propone un recorrido que reconstruye y actualiza la mirada fascinada que, desde la Antigüedad al presente, condujo a la humanidad a preguntarse sobre el origen del universo, las distancias y la evolución de las estrellas, la estructura de la materia, los elementos químicos, la energía, la fuerza y el movimiento, entre otros temas.

Desde esas ideas generales –presentadas a partir de las biografías de los principales científicos de cada disciplina–, el camino se abre hacia actividades, problemas, experimentos, ejercicios conceptuales y matemáticos, aplicaciones en la vida cotidiana y una variedad de recursos disponibles en Internet que facilitan el aprendizaje de los conceptos específicos, las leyes y las teorías de la física.

Este enfoque, destinado a estudiantes que se forman para enseñar Física, busca renovar la curiosidad necesaria para la comprensión.

Se trata de aprovechar e integrar la multiplicidad de herramientas hoy disponibles, ya que, al decir de los autores, «un punto importante en la formación de los futuros docentes es la idea de que las clases, además de ser sólidas y rigurosas, deben captar la atención de los alumnos, y ante todo, deben ser interesantes para el profesor. Solo así este podrá ayudar a sus estudiantes a ver el mundo que los rodea de una forma distinta, a apreciar con entusiasmo su belleza y a comprender que la física está en todas partes».



 Universidad Nacional
de Río Negro

