

Una ventana a la **CIENCIA**

Fco. Miguel Marqués Moreno



EL GRIAL NUCLEAR

¿Perdición o salvación de nuestra especie?



edUPV

Universitat Politècnica de València

El grial nuclear

¿Perdición o salvación de nuestra especie?

Enero de 2023

Fco. Miguel Marqués Moreno

Una ventana a la ciencia; 2

© Fco. Miguel Marqués Moreno

© 2023, Editorial Universitat Politècnica de València

Distribución:

Telf. 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es / Ref. 6483_01_01_01

ISBN: 978-84-1396-071-5 (versión impresa)

ISBN: 978-84-1396-110-1 (versión electrónica)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

AUTOR

Doctor en Física Nuclear (premio extraordinario) por la Universitat de València. Desde 1995 trabaja para el CNRS francés, donde es director de investigación en el LPC (Laboratorio de Física Corpuscular) de Caen. Su área de investigación es el estudio de núcleos atómicos con exceso de neutrones, y en particular es un especialista en "núcleos neutros", sistemas formados únicamente por neutrones. Ha publicado más de 80 artículos en revistas internacionales y liderado varios proyectos en los aceleradores de partículas GANIL (Francia) y RIKEN (Japón). Participa en la divulgación de conocimientos a través de numerosas charlas, exposiciones, y la edición y publicación de libros. Ha dirigido la Escuela Internacional Joliot-Curie de Física Nuclear, y en la actualidad es editor de la revista internacional Few-Body Systems.

RESUMEN

Hace poco más de un siglo conseguimos entrar en el átomo y descubrimos un inmenso vacío alrededor de un núcleo diminuto y extremadamente denso. Para averiguar qué contenía ese núcleo tuvimos que abrirlo, liberando inevitablemente la energía colosal que se esconde en su seno. ¿Se tratará de una caja de Pandora que nos condena a desaparecer, o más bien de un cofre del tesoro que nos salvará? Este libro cuenta la apasionante historia que llevó a la apertura del núcleo atómico, mostrando a través de esquemas sencillos cuáles han sido, y podrían ser, las aplicaciones más funestas y extraordinarias de tanta energía. El lector podrá hacerse así una idea global de una dualidad de la energía nuclear que se extiende hasta la actualidad, en la que la amenaza de un conflicto nuclear comparte los titulares con la esperanza de las centrales de fusión.

*A Alejandro, Cristina y Diego,
el sentido de esta carrera de relevos.*

*Que puedan llevar nuestro testigo
a dondequiera que se propongan.*

UN VIAJE AL CENTRO DEL ÁTOMO

El viaje más fascinante que jamás hayamos realizado no nos llevó a atravesar desiertos, ni a surcar océanos, ni a dejar atrás la atmósfera. Fue un viaje en el que unos pocos usaron su cerebro en los sótanos de modestos laboratorios para recorrer la apenas milmillonésima de milímetro que nos separa del centro del átomo. Se trata de una distancia insignificante, pero ese viaje ha cambiado nuestro destino para siempre. En sólo tres décadas pasamos de ignorar el contenido del átomo a ‘entrar’ en él para adiestrarlo y liberar su inmensa energía, poniendo así en peligro por primera vez a nuestra propia especie. Soy físico nuclear y aficionado a la historia, y tras la lectura del libro de Alan Lightman *The discoveries*, y sobre todo del de Richard Rhodes *The making of the atomic bomb*, decidí preparar una charla sobre esta aventura, con multitud de detalles y anécdotas que poco a poco fueron desapareciendo para no sobrepasar la hora (hoy en día todos tenemos prisa). Sin embargo, muchos de ellos eran la parte más interesante de la historia, y pensando en cuál sería el formato que podría darles cabida de nuevo me dije: ¿por qué no un libro?

El que este viaje al centro del átomo sea un gran desconocido se debe sobre todo a la creencia de que la física nuclear es algo demasiado difícil de explicar. Es cierto para los detalles, como en casi todas las disciplinas. Los principios, en cambio, deben poder simplificarse con un poco de esfuerzo hasta el nivel de un no iniciado. ¡De hecho es la mejor forma de estar seguro de que uno mismo los ha entendido! Eso sí, en el viaje que nos ocupa el esfuerzo tendrá que ser mayor debido a un ‘pequeño’ obstáculo: nuestra intuición. Conforme nos adentremos en el

átomo, iremos abandonando las leyes de la física clásica para descubrir una serie de paradojas contrarias a nuestra percepción de la realidad. Quizá sea necesario un mínimo de cultura científica si se pretende entenderlo todo, pero espero que el esfuerzo realizado permita también a los que no la tengan llegar a entender una gran parte de la historia.

El azar quiso que la recta final del viaje coincidiera con una guerra mundial. La confrontación y el miedo llevaron a algunos contendientes a acelerarlo de forma vertiginosa, en búsqueda del arma definitiva. Pero la fisión del átomo, la construcción de la bomba... ¿no son secretos militares? Ya ha pasado más de medio siglo desde los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki, nuestro único uso de la energía atómica como arma. Desde entonces, investigaciones periodísticas, publicaciones de biografías, entrevistas a los protagonistas... han ido desvelando las partes más importantes del rompecabezas. Ciertos detalles aún permanecen clasificados, pero no supondrán un obstáculo para la ilustración a grandes trazos de las distintas etapas.

La decisión de usar la bomba marcó el siglo XX, y es normal que todos tengamos una opinión, más o menos fundada, sobre ella. En cualquier caso fue guiada por un contexto muy duro, y no es justo hacer valoraciones ignorándolo. Un objetivo de este libro es recrear ese contexto aprovechando la multitud de fuentes que se han vuelto accesibles con la globalización de la información, en la medida de lo posible citando a los protagonistas, para así comprender mejor la cadena de acontecimientos que llevó a hacer desaparecer ciudades enteras. Veremos que a menudo no fue el aspecto científico el más complicado del viaje, sino el humano. La historia resumida suele simplificar demasiado las cosas. Mirándola más de cerca vemos que los personajes no se dividen en buenos y malos, sino que se distribuyen a lo largo de una gama muy amplia, unos más cerca que otros de cada extremo.

Tras el punto álgido de este viaje, la liberación descontrolada de la energía atómica en 1945, el último capítulo del libro nos lleva hasta el presente (y futuro próximo). Las noticias nos hablan de países que intentan dotarse de armamento atómico.

Irán está “enriqueciendo el uranio”: ¿enriqueciéndolo en qué, y para qué? Otros trafican con plutonio de las antiguas repúblicas soviéticas: ¿con qué objetivo? Mientras tanto, las potencias occidentales intentan vigilar todos estos movimientos: ¿hasta qué punto se puede? Países como Corea del Norte o Rusia esgrimen la amenaza de un ataque nuclear: ¿hay que tomarla en serio? ¿Cuáles serían las consecuencias? Las armas atómicas detuvieron la espiral de guerras mundiales que en la primera mitad del siglo XX se cobró una centena de millones de vidas, pero desde entonces vivimos expuestos a un riesgo de extinción de la especie: ¿podemos evaluarlo? Ya estamos intentando controlar en la Tierra la fuente de energía que hace brillar nuestro Sol y las demás estrellas, la *fusión* del átomo. Pero las estimaciones más optimistas apuntan al horizonte 2050: ¿por qué nos cuesta tanto? ¿Será el reactor ITER la solución a todos nuestros problemas energéticos?

Las respuestas a todas estas preguntas se encontraban sumergidas entre notas, ficheros y carpetas, una cantidad de información inmensa que debía transmitir de forma comprensible a un público en general ajeno a la ciencia. En esta tarea de interfaz, que iba a dictar nada menos que si el libro era publicable o no, han jugado un papel esencial dos personas. Mi suegro Javier, sin miedo a atacar con entusiasmo textos que eran incomprensibles (¡y sin miedo a decirme “*No se entiende nada!*”), que desde el principio me ha obligado a insistir en la pedagogía. Y sobre todo mi hermano Fernando, un lector más meticuloso que algunos correctores de ortografía, capaz de abstraerse de su cultura científica para juzgar la accesibilidad del texto, de guardar una visión de conjunto conforme avanzaba el libro y se añadían nuevas rúbricas, y que a pesar de haber releído muchos pasajes siempre estaba dispuesto a releer la versión siguiente, que yo le volvía a vender como ‘definitiva’. Mi agradecimiento a ellos, el gran filtro de este libro.

También quiero agradecer a todos los que, al asistir a las charlas que he dado sobre el tema, han interaccionando conmigo para hacer que sus contenidos fuesen evolucionando hacia una forma cada vez más didáctica. En la recta final, gracias a

dos de mis antiguos profesores, Jesús Navarro y Berta Rubio, y a dos colegas de profesión, Ismael Martel y Ángel Sánchez, por su ánimo y por su consejo en la búsqueda de un primer editor, la Universidad de Huelva, que permitió que este libro viera la luz en un principio. Con el tiempo, la actualidad ha hecho que reconsidere muchos contenidos, y he aprovechado para añadir más esquemas y simplificar las explicaciones. Y gracias a la Universitat Politècnica de València, que ya me publicó otro libro sobre las paradojas de la Teoría de la Relatividad (*El límite del vértigo*), puedo por fin publicar una versión bastante mejorada de este libro, que esta vez sí se corresponde con la que desde un principio tenía en mente.

Por último, agradecer a mis padres que nos hayan pasado su testigo y empujado siempre hacia adelante, con un aliento constante que aún seguimos notando a pesar de la distancia y el tiempo. Que mi padre, que pudo escuchar de mi madre el primer capítulo, pueda terminar el libro desde donde esté.

CRONOLOGÍA

- Siglo V a. C.** Introducción del concepto de átomo.
- 1895** Descubrimiento de los rayos X.
- 1896** Descubrimiento de la radioactividad.
- 1897** Descubrimiento del electrón.
- 1900** Aislamiento de los primeros elementos radioactivos.
- 1911** Descubrimiento del núcleo atómico.
- 1913** Modelo cuántico del átomo.
Medida de la carga de su núcleo.
- 1914-18** Primera Guerra Mundial.
- 1919** Ruptura del núcleo y descubrimiento del protón.
Medida de la masa de cientos de núcleos.
- 1932** Invención del ciclotrón.
Descubrimiento del neutrón y del positrón.
- 1933** Descubrimiento de la radioactividad artificial.
- 1934** Inducción de la radioactividad con neutrones lentos.
- 1938** Descubrimiento de la fisión del uranio.
- 1939** Identificación del U235 como mayor fuente de la fisión.
Medida de la emisión de neutrones en la fisión.
Estallido de la Segunda Guerra Mundial.
- 1940** Estimación de la masa crítica del U235.
Informe sobre las propiedades de una 'super-bomba'.
Búsqueda de agua pesada como moderador de neutrones.

- 1941** Descubrimiento del plutonio y medida de su fisión.
Entrada en la guerra de Estados Unidos.
Interrupción del programa nuclear soviético.
- 1942** Abandono de los programas nucleares alemán y japonés.
Inicio del Proyecto Manhattan.
Síntesis del plutonio.
Primera reacción en cadena controlada por el hombre.
- 1943** Construcción de Los Álamos, Oak Ridge, y Hanford.
Desarrollo de las bombas de disparo y de implosión.
Bombardeo indiscriminado de ciudades alemanas.
- 1944** Primeros gramos de plutonio en Los Álamos.
Modificación del bombardero B-29 para lanzar la bomba.
Construcción de la base de B-29 en Islas Marianas.
- 1945** Bombardeo incendiario de Tokio.
Experimento del Dragón sobre la masa crítica del U235.
Ensayo *Trinity* de la bomba de plutonio en Alamogordo.
Lanzamiento de *Little Boy* sobre Hiroshima.
Lanzamiento de *Fat Man* sobre Nagasaki.
Fin de la Segunda Guerra Mundial.
- 1946** Reacción en cadena controlada en Moscú.
Construcción de Sarov, el Los Álamos soviético.
- 1948** Bloqueo de Berlín Oeste.
- 1949** Ensayo de la bomba atómica soviética en Semipalatinsk.
- 1950-53** Guerra de Corea.
- 1951** Diseño Teller-Ulam de la bomba H.
- 1952** Explosión de *Mike*, primera bomba H.
- 1954** Explosión de *Bravo*, la bomba H americana más potente.
Explosión de *Joe-4*, la primera bomba H soviética.
- 1961** Explosión de *Zar Bomba*, la más potente de la historia.

- 1962** Crisis de Cuba y creación del “Teléfono Rojo” entre EEUU y la URSS.
- 1968** Creación del Tratado de No Proliferación.
Consolidación del tokamak para la fusión controlada.
- 1974** India consigue la bomba atómica.
- 1991** El JET produce energía a partir de la fusión.
- 1998** Pakistán consigue la bomba atómica.
- 2003** Corea del Norte retira su firma del TNP.
- 2008** Empieza la construcción del reactor de fusión ITER.
- 2015** Irán dice renunciar al programa nuclear militar.
- 2020-30** ¿ITER multiplicará por 10 la energía que consume?
- 2030-40** ¿DEMO enviará la energía de fusión a las redes?
- 2050** ¿La Tierra se cubrirá de ‘estrellas’?

ÍNDICE

Prólogo	1
1. Las muñecas rusas	5
La prehistoria del átomo	5
Mensaje en una botella	8
Aterrizaje en el núcleo	18
La Gran Guerra	29
La última muñeca	39
2. La caja de Pandora	45
Una caja fuerte	45
Elementos extraterrestres	47
El auge del fascismo	53
El rompecabezas del uranio	56
Se abre la caja	62
3. Vientos de guerra	73
El uranio pequeño	73
Una masa crítica	79
El peso del agua	85
El dios de los muertos	89
Cita en Copenhague	93
4. El control del átomo	101
Guerra total	101
El Tifón se congela	106
Las pilas exponenciales	111

Plutonio a la vista	114
El navegante italiano	117
5. El Proyecto Manhattan _____	125
El genio de la bomba	125
Álamos en el desierto	130
La riqueza del uranio	138
Un plutonio muy lejano.	145
El gordo y el flaco	152
6. Las puertas del infierno _____	159
Sodoma y Gomorra	159
Un Sol menguante	167
El sueño del dragón	173
El día de la bestia	181
El noveno círculo	191
7. La espada de Damocles _____	209
Primer relámpago	209
El Sol sale dos veces	220
El planeta de los simios.	235
Policías nucleares	244
Estrellas en la Tierra	250
Epílogo _____	263
Fuentes _____	271
Figuras _____	277

PRÓLOGO

El avance de la ciencia básica requiere tres ingredientes fundamentales: herramientas, curiosidad y azar. Los tres son necesarios y ninguno de ellos es suficiente.

El primero es el más fácil de entender, como dijo Robert Oppenheimer: *“Los grandes descubrimientos científicos no se han hecho porque fuesen útiles, se han hecho porque era posible hacerlos”*. Demócrito imaginó el átomo en el siglo V a. C., pero no lo pudo descubrir porque carecía de instrumentos capaces de sondear la materia a una escala tan pequeña. La historia se repitió mucho más tarde para científicos tan ilustres como Isaac Newton. Toda la curiosidad del mundo no habría bastado hasta que a finales del siglo XIX nos equipamos de herramientas capaces de recibir las señales del átomo, presentes desde el origen de nuestra especie pero hasta entonces invisibles a nuestros ojos. No deja de ser una paradoja que Demócrito pudiese imaginar el átomo, cuando era algo desconocido e inalcanzable, y que 2500 años después la mayoría de la gente lo desconozca, aunque ya sepamos que existe y cómo es.

El segundo ingrediente es la curiosidad, la individual de los científicos pero también la de la sociedad que les debe proporcionar las herramientas. Richard Feynman comparó la física, y la ciencia básica en general, con el sexo: *“Está claro que puede tener aplicaciones prácticas, pero no es por eso que lo hacemos”*. La curiosidad es una característica esencial de nuestra especie, que nos ha hecho ser lo que somos y probablemente nos ha permitido estar aquí para contarlo. Hace 100 000 años, ¿era África demasiado pequeña para los pocos Homo Sapiens que allí vivíamos? ¿Por qué abandonamos la seguridad de lo

conocido para aventurarnos a cruzar montañas, ríos, mares y desiertos? Llegamos a Europa, a la India, pero no eran las riquezas de cada valle lo que nos obsesionaba, era descubrir qué había al otro lado de las cimas que lo rodeaban. Las playas paradisíacas del sudeste asiático no nos bastaron, preferimos subirnos a balsas rudimentarias y lanzarnos al mar, hasta tropezar con Australia. Los hielos del estrecho de Bering no fueron obstáculo, las riquezas de América del norte no interrumpieron nuestro camino hacia la Tierra de Fuego. Y toda la diversidad que nuestra curiosidad generó nos hizo más inteligentes, más fuertes, menos vulnerables. Desgraciadamente, la curiosidad es un ingrediente que se nos acaba. Conocemos las herramientas que necesitamos, pero nuestras sociedades cada vez están menos dispuestas a invertir en ellas si no ven un beneficio evidente a corto plazo, y en parte por ello cada vez hay menos vocaciones para usarlas. Sabemos qué haría falta para pisar Marte, pero pocos son los que consideren esa inversión como una de las prioridades de nuestra especie. Y cuando haga falta ir ya será demasiado tarde, no bastará con querer hacerlo.

Unos minutos después del *Big Bang* en el universo había sobre todo hidrógeno, que acabó formando las primeras estrellas. En ellas se combinó para producir otros elementos ligeros, y la explosión de éstas creó los elementos más pesados y los esparció por el espacio. Seguía habiendo sobre todo hidrógeno, para formar otra generación de estrellas, pero ahora los demás elementos pudieron formar a su alrededor planetas rocosos capaces de albergar el desarrollo de la vida. Sin embargo, ésta se iba a desarrollar muy despacio, necesitaba energía y tiempo, una fuente casi eterna. La mayor parte de la energía en las estrellas se obtiene combinando núcleos de hidrógeno para formar helio, en un ciclo de reacciones rápidas... excepto una, mucho más lenta. Gracias a ella el universo no se reduce a estrellas que al poco de formarse explotan, sino que se consumen lentamente, bañando con su luz los planetas que las rodean durante miles de millones de años. Hasta que en algunos de ellos (¡por lo menos en uno!) se desarrolla la vida y llega a adoptar una forma capaz de preguntarse cómo ha lle-

gado allí, y de encontrar la respuesta. Todo este rodeo para decir que no deberíamos arruinar la magia de este proceso limitándonos a sobrevivir. Es nuestra obligación aprovechar que hemos alcanzado el nivel que nos permite hacernos preguntas para hacérselas. Tenemos el imperativo moral de investigar, descubrir, empujar lo más lejos posible los límites del conocimiento, del espacio, del tiempo. No pasemos a la historia como la primera generación de Homo Sapiens que dejó de hacerlo.

A veces oímos que la edad de oro de la física fue el siglo XX y que ahora ya está todo descubierto. De hecho ya a finales del siglo XIX pocos querían ser físicos porque se creía que en física no quedaba nada por descubrir. A esa máxima se aferran en parte los que no quieren seguir buscando, sin darse cuenta de que siempre se ha mirado hacia atrás, y hacia adelante, de una forma similar: a toro pasado, creemos que los descubrimientos que ya se han hecho eran los que faltaban, cómo no, y al mismo tiempo no somos capaces de imaginar qué es lo que queda por descubrir... hasta que se descubra. Como si fuese necesario imaginarlo antes. Cuando los descubrimientos que se avecinan son tan sorprendentes que escapan a nuestra imaginación, sólo disponemos de un arma, nuestra curiosidad. Como dijo Isaac Asimov: *“La frase más excitante que se puede escuchar en ciencia, la que precede a la mayoría de los descubrimientos, no es ‘¡Eureka!’ [lo encontré], sino ‘Qué curioso...’”*.

Y llegamos al último ingrediente, el azar. Nuestra sociedad confunde a menudo dos cosas que tienen muy poco que ver: la ciencia aplicada y la ciencia básica. En la primera, investigamos para aplicar algo conocido a un uso más o menos definido. El interés es inmediato, se puede programar desde arriba, se pueden exigir resultados. En la segunda, buscamos lo desconocido: ¿cómo se va a poder justificar el interés, o programar, o exigir resultados, de la búsqueda de algo que no conocemos? La única programación posible es poner a gente competente a buscar, darles los medios, y cruzar los dedos para que el azar sople en nuestra dirección. Cuando nuestros ancestros se subieron a balsas en las costas de Indonesia, no llegaron a Australia necesariamente los más inteligentes, sino los que más suerte

tuvieron. El viaje al centro del átomo está plagado de descubrimientos, y como veremos la gran mayoría se debieron al azar. Sí, las personas que intervinieron eran excepcionales, pero también fueron libres para dejarse guiar por su intuición, no tuvieron que rendir cuentas sin cesar, y fue esa libertad la que les permitió estar listas cuando el azar llamó a su puerta.

LAS MUÑECAS RUSAS

Durante 2400 años el átomo fue sólo una idea, rebatida por muchos, desconocida por casi todos, hasta que el azar hizo que a finales del siglo XIX alguien recibiese sus señales. A partir de ahí un puñado de científicos empezó a descodificar esas señales, a jugar con él, como decía Rutherford a “*torturarlo*”, hasta que se fueron desvelando las diferentes estructuras en su interior cual muñecas rusas. En 1932, con el descubrimiento del neutrón, terminó esa primera fase de exploración del átomo, ya no quedaban más muñecas.

La prehistoria del átomo

En el siglo V a. C. el filósofo griego Demócrito desarrolla la *Teoría atómica del universo* de su mentor Leucipo. No se apoya en la experiencia, sino en razonamientos lógicos. Se pregunta qué pasaría si fuésemos capaces de dividir la materia una y otra vez, y concluye que llegará un punto en el que no podremos dividirla más, el “átomo” (indivisible en griego). Como no se pueden dividir, los átomos son eternos y homogéneos, y su pequeño tamaño los hace invisibles para el hombre, dándole a la realidad que nos rodea una apariencia continua. Estos átomos se mueven en el vacío y no son puntos, tienen distintas formas, algunas tan retorcidas que hacen que se enganchen unos a otros para formar estructuras más o menos sólidas a nuestra escala. Los objetos nos parecen fríos o calientes, dulces o salados, pero esas sensaciones no existen como tales, son el resultado de la forma en la que los átomos del objeto interaccionan con los átomos de nuestros órganos sensitivos. De ahí su famosa frase: “*Por convención lo dulce; por convención lo amargo; por convención el color; pero en verdad, átomos y vacío*”.

Hoy sabemos que los átomos no son indivisibles, aunque hayamos conservado el nombre griego original, ni homogéneos. Y afortunadamente no todos son eternos, algunos se desintegran emitiendo señales que nos han permitido descubrirlos. Pero tenemos que reconocer a los griegos el esfuerzo intelectual de imaginar la materia a escalas inalcanzables, sobre todo en una sociedad tan atrasada, materialmente. Porque intelectualmente estaban muy por delante de su tiempo: ya sabían que la Tierra era redonda (viendo su sombra en la Luna durante los eclipses de nuestro satélite), incluso Eratóstenes midió su radio, Herón usó el vapor para mover una máquina... Sin embargo, la visión atomista no era unánime, algunos griegos ilustres se opusieron tenazmente. Platón esgrimía que átomos chocando entre sí en el vacío nunca podrían producir la belleza del mundo. Y Aristóteles rechazaba la noción de vacío y postulaba que los cuatro elementos, aire, agua, tierra y fuego, no estaban formados por átomos, sino que eran continuos (Fig. 1.1).



Figura 1.1: Aristóteles y Demócrito se sentaban en las mismas sillas, pero no las imaginaban igual. Aristóteles (izquierda) veía la realidad como un continuo formado por cuatro elementos, aire, agua, tierra y fuego; Demócrito (derecha) proponía un mundo hecho de átomos y vacío (revista *Science & Vie*, 2008).

A este brillante despertar del conocimiento siguieron muchos siglos de oscuridad, en los que la humanidad lo olvidó todo: el átomo, la esfera terrestre, las máquinas de vapor... Primero por la decadencia del mundo griego y el auge de Roma, mucho más pragmática y menos dada a las ideas sin aplicación inmediata. Y después por el desarrollo del cristianismo, que como todas las grandes religiones no podía tolerar la posibilidad de que encontrásemos respuestas contrarias a su dogma. Con el Renacimiento se desarrollan las herramientas que permiten la observación del mundo macroscópico, y el hombre empieza a entender el movimiento de los planetas alrededor de nuestro Sol, a recuperar los siglos perdidos.



Pero el mundo microscópico todavía queda lejos, sólo al alcance de la imaginación. A principios del siglo XVIII, Isaac Newton escribe en su *Óptica*: “*Me parece probable que Dios en un principio creó la materia como partículas en movimiento, sólidas, masivas, duras, impenetrables, de tal tamaño y número, y con tales otras propiedades, y en tal proporción al espacio, que la mayoría condujeron al fin para el que Él las había creado*”. A estas alturas el átomo es aún una opinión, pero algunas teorías empiezan a asumir su existencia cuando la descripción de ciertos fenómenos lo requiere, como la teoría de Dalton para explicar las proporciones de los compuestos.

En la segunda mitad del siglo XIX, James Maxwell publica *Moléculas*, y añade a esta visión mecánica del mundo una dimensión temporal, cíclica: “*Aunque en el transcurso del tiempo se hayan producido, y puedan aún producirse, catástrofes en los cielos, aunque sistemas antiguos se hayan disuelto y otros nuevos hayan evolucionado de sus ruinas, las moléculas con las que estos sistemas se construyen, las piedras fundadoras del universo material, permanecen intactas. Tal y como fueron creadas, perfectas en número, tamaño y peso*”. Maxwell prefiere utilizar el término “molécula” ya que, aunque se sigue extendiendo la idea de la existencia del átomo, nadie sabe lo que es: “*En cada molécula de agua hay dos moléculas de hidró-*

geno y una de oxígeno. No puedo decir si éstas son o no átomos fundamentales ... Un átomo, si es que eso existe, debe ser una molécula de una substancia elemental. Por lo tanto, como toda molécula no es un átomo, pero todo átomo es una molécula, usaré la palabra ‘molécula’ como término más general’. Es sólo un detalle semántico, lo importante es el concepto.

Aunque no sabe lo que son, Maxwell ya introduce la idea de que los átomos fueron creados y son siempre los mismos, que se han podido combinar en el pasado para formar un objeto, pero que se pueden combinar de nuevo para formar otro, o incluso alguien, una idea que poca gente puede concebir hoy. Por ejemplo, prácticamente todo el hidrógeno que hay en el agua (tres cuartas partes de nuestro cuerpo) es exactamente el mismo que se formó unos minutos después del *Big Bang*. No sólo somos “polvo de estrellas”¹, como dice la famosa fórmula, sino que una parte de nosotros ¡fue testigo directo de los primeros minutos del universo! Cuando muramos, todo nuestro hidrógeno pasará de nuevo a la naturaleza, devolveremos el préstamo para que pueda formar parte de otro objeto, o por qué no de otro ser vivo.



A pesar de que aún faltan las herramientas adaptadas a la observación del mundo microscópico, nuestro pensamiento se va acercando a la realidad. Pero algunos conceptos todavía fallan. No todos los átomos son perfectos, ni permanecen intactos, algunos ‘nos llaman’.

Mensaje en una botella

A mediados del siglo XIX, científicos van de pueblo en pueblo deleitando a la gente con el ancestro del tubo de neón. Se trata de un tubo de cristal con cables conectados en sus extremos y del que se extrae casi todo el aire. Al aplicar una diferencia de potencial entre los cables, en el interior del tubo se producen

¹Los elementos más pesados que el helio (todos excepto el hidrógeno) se forman durante las últimas etapas de la vida de la mayoría de las estrellas, y se esparcen por el espacio tras su explosión y muerte.

destellos de formas y colores varios, casi mágicos. Y el átomo va a elegir este tubo, como si fuese una botella lanzada al mar, para enviarnos sus señales. Aumentando el vacío dentro del tubo observan que son rayos que parecen venir del extremo con carga negativa o cátodo, y por ello les van a llamar “rayos catódicos” (Fig. 1.2).

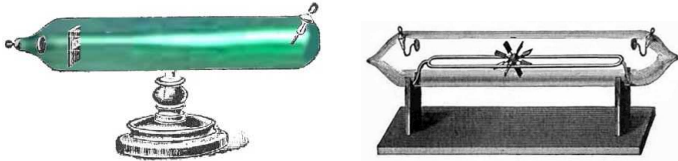


Figura 1.2: Tubos de vacío en los que se emitían rayos catódicos (izquierda), que se supo que venían del cátodo gracias al giro de una rueda de aspas (derecha).

Uno de los que estudia estos rayos es Joseph Thomson. En 1897 descubre que están formados por lo que llama “corpúsculo negativo”, una partícula que no depende del gas que llene el tubo. Introduciendo unas aspas (Fig. 1.2), el sentido de su giro le dice que la partícula va desde el cátodo a la izquierda del tubo hacia el extremo positivo a la derecha, por lo que su carga debe ser negativa. Y el hecho de que éstas giren le dice que tiene masa. Curvando la trayectoria de la partícula con imanes ve que su masa es casi 2000 veces menor que la del átomo más ligero, el de hidrógeno, por lo que no es un átomo...

Años más tarde Thomson recordaba cómo *“en un principio muy pocos creyeron en la existencia de estos cuerpos más pequeños que los átomos. Incluso un físico distinguido que asistió a mi charla me dijo que creía que les estaba tomando el pelo”*. Se trata de la primera partícula subatómica, que será bautizada como “electrón”. Enseguida se reconoce que es la portadora de la corriente eléctrica, y de la carga negativa dentro del átomo (que en su conjunto es neutro). Thomson obtendrá el Nobel de

Física en 1906, y los rayos catódicos traerán hasta hace pocos años las imágenes a nuestras pantallas de televisión.



Unos años antes, en 1895, Wilhelm Röntgen está experimentando con un tubo de vacío para estudiar esos rayos catódicos, que aún no se sabe que son electrones. Trabaja en una habitación a oscuras, cubriendo el tubo con una funda de cartón negro para confinar los rayos, cuando de repente observa un débil resplandor en una pantalla de material fosforescente en otra parte de la habitación. Tras muchas pruebas ve que lo que sea que atraviesa el tubo, el cartón y el aire también vela unas placas fotográficas. Su sorpresa no ha terminado: cuando pone la mano delante, ¡ve la imagen de su esqueleto!

En su artículo *Sobre un nuevo tipo de rayos* escribe: “*Por brevedad me gustaría usar el término ‘rayos’, y para distinguirlos de otros les llamaré ‘rayos X’ ... A pesar de muchos intentos, no he conseguido desviar los rayos X con un imán [demuestra que no tienen carga] ... Concluyo que los rayos X no son rayos catódicos, sino que son producidos por los rayos catódicos al golpear la pared de cristal del tubo ... Se producen sombras muy bien definidas si se colocan materiales más o menos transparentes entre el tubo y una placa fotográfica ... algunas imágenes de sombras son muy atractivas, como por ejemplo ... la de los huesos de la mano*”.

Para demostrar la existencia de estos rayos, que atraviesan materiales menos densos que los huesos, realiza la primera radiografía (Fig. 1.3) con la ayuda de su esposa, quien al ver su esqueleto exclamó: “*¡He visto mi muerte!*”. Como muchos de los personajes de esta historia, Röntgen trabaja para extender los límites del conocimiento, no para su beneficio personal, y reconociendo de inmediato el uso práctico de su descubrimiento se niega a patentarlo, para que la humanidad lo disfrute. También rechaza dar su nombre a los rayos, aunque en alemán todavía se les llama “rayos Röntgen”. Se le considera el padre del diagnóstico radiológico, y en 1901 se le concedió el primer Nobel de Física, cuyo dinero donó a su universidad.

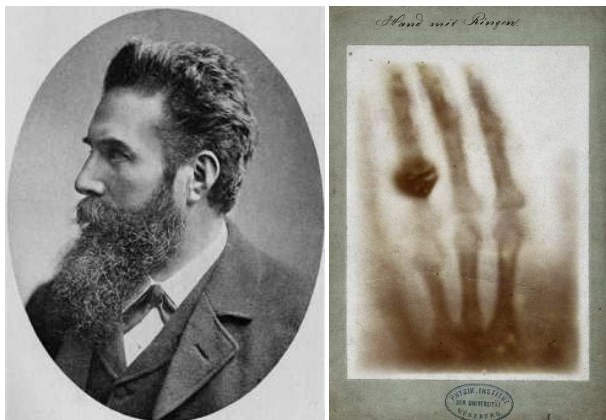


Figura 1.3: Wilhelm Röntgen, el descubridor de los rayos X. A la derecha, la primera radiografía (titulada *Hand mit Ringen*, mano con anillos), de la mano de su esposa.



Los primeros mensajes del átomo no son voluntarios, los provocamos. Los rayos catódicos se producen porque aplicamos una diferencia de potencial entre los extremos del tubo de vacío, y aunque los hemos identificado con el electrón desconocemos qué papel juega éste dentro del átomo. Y los rayos X se producen porque hacemos chocar esos rayos catódicos contra la pared del tubo, pero como su nombre indica aún no sabemos qué son. Viendo que la materia nos responde cuando la sometemos a ciertos estímulos, los científicos se van a dividir entre los que siguen investigando la naturaleza de estas respuestas y los que van a buscar estímulos nuevos.

Henri Becquerel es de éstos últimos. En 1896 está trabajando con varios materiales fosforescentes, y se le ocurre otro estímulo, la luz del Sol. Su técnica consiste en sellar placas fotográficas con papel opaco, para evitar que la luz las vea, disponer la substancia fosforescente según una silueta determinada sobre un papel, y exponer el conjunto al Sol durante unas horas. Si el Sol ha estimulado una respuesta de la ma-

teria capaz de atravesar el papel opaco, verá la silueta de la substancia dibujarse en la placa cuando la revele.

Empieza sus experimentos con sales de uranio, y tras diferentes exposiciones observa efectivamente la silueta de las sales en la placa, concluyendo que la luz solar activa la fosforescencia de la sal. Y entonces el invierno francés da un empujón a sus investigaciones de una forma inesperada. El 26 de febrero ha preparado una de sus placas con una Cruz de Malta entre la sal y la placa, pero como el cielo está nuboso la guarda en un cajón a cubierto de la luz, esperando a que cambie el tiempo. El 1 de marzo, cansado de esperar, revela la placa antes de desecharla y preparar una nueva... y observa sorprendido ¡la silueta de la Cruz de Malta!

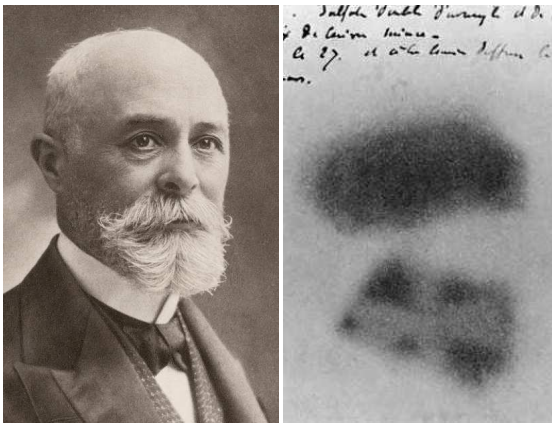


Figura 1.4: Henri Becquerel, el descubridor de la radioactividad. A la derecha, imagen registrada por una placa fotográfica expuesta a una sal de uranio. Se observa la sombra de una Cruz de Malta colocada entre la sal y la placa.

¿Cómo han llegado las señales a la placa? ¿Se trata de un error de sellado? No, el origen está en la sal, porque la silueta es muy clara (Fig. 1.4), y no tienen nada que ver con el estímulo solar, ausente del cielo parisino. Tras una serie de pruebas, concluye que la imagen la produce una radiación energética

y penetrante, emitida por la materia inerte sin estímulo de ningún tipo: la “radioactividad”. Comprueba que estas señales espontáneas procedentes de la materia vienen del uranio en la sal y que, al contrario que los rayos X, pueden desviarse con un campo magnético: se trata de partículas cargadas. Por fin el átomo nos ha hablado, sin que le preguntemos nada.



Por esas fechas una física y química polaca, Maria Skłodowska, llega a París para completar sus estudios y hacer una tesis. Empieza a trabajar con Pierre Curie, con el que se casa en 1895 afrancesando su nombre al que pasará a la historia, Marie Curie. Fascinada por el sorprendente descubrimiento de Becquerel, elige como posible tema de tesis los “rayos uránicos”, y con la ayuda de Pierre empieza a estudiar diferentes minerales de uranio, para comprobar la relación entre su nivel de radioactividad y la proporción del elemento. En 1898 intentan separar el uranio de dos de estos minerales, la pechblenda y la torbenita, y descubren que el mineral restante ¡es aún más radioactivo! Se apresuran a publicar esta primera observación en la *Académie des Sciences*: *“Es un hecho excepcional, y nos lleva a creer que estos minerales pueden contener un elemento mucho más radioactivo que el uranio”*.

La mayoría de estos científicos no buscan el beneficio material, pero quieren al menos el reconocimiento moral. Para algunos las investigaciones se vuelven obsesivas, por el miedo a que otros se lleven los laureles de un descubrimiento al alcance de la mano, y un ejemplo es la carrera por encontrar ese *“elemento mucho más radioactivo que el uranio”*. Marie recordó que en esos momentos sintió *“un deseo apasionado por comprobar esa hipótesis lo más rápidamente posible”*. Inocentemente, ella y Pierre (que ya ha abandonado sus otras investigaciones) empiezan machacando 100 g de pechblenda en un mortero, sólo para darse cuenta de que lo que buscan está presente en cantidades tan ínfimas que necesitarán procesar ¡toneladas del mineral! La buena noticia es que ese elemento, que aun tan

escaso hace que la pechblenda sea tan radioactiva, debe ser muchísimo más radioactivo que el uranio.



Figura 1.5: Pierre y Marie Curie, los descubridores de los elementos radioactivos polonio y radio, con su hija Irène.

En julio del 98 anuncian la existencia de un elemento que llaman “polonio”, por el país de origen de Marie, y en diciembre la de un segundo elemento que llaman “radio” (rayo en latín), por la gran cantidad de radiación que emite, según Marie “*al menos un millón de veces más que una cantidad similar de uranio*”. Becquerel y los Curie compartirán el Nobel de Física en 1903, aunque Pierre y Marie no tuvieron tiempo ni de ir a recogerlo, enfrascados en la titánica tarea de aislar muestras puras de polonio y radio. En 1902 consiguen separar 0,1 g de cloruro de radio a partir de una tonelada de pechblenda, y Marie continuará hasta conseguir aislar metal de radio puro en 1910, lo que le valdrá el Nobel de Química. A pesar de sus esfuerzos no pudo aislar el polonio, que se desintegra demasiado deprisa para que sus técnicas rudimentarias le hubiesen permitido conseguir una cantidad suficiente.

Marie Curie fue la primera mujer en obtener un Nobel, la primera persona en obtener dos en campos distintos, la pri-

mera mujer que dio clases en La Sorbona, y la única mujer (hasta el 2015) que yace en el Panteón de París por méritos propios. Como muchos otros científicos de la época, morirá de leucemia relativamente joven a causa de su exposición repetida a las radiaciones, de cuyos efectos sobre el organismo aún no son muy conscientes. Pierre será una de las pocas excepciones que confirma la regla, al morir atropellado por un carruaje en las calles de París en 1906. La tradición científica familiar se prolongará con la continuación de los trabajos de Marie, y más tarde con su hija Irène y su yerno Frédéric Joliot.



Las señales del átomo han generado una sucesión frenética de descubrimientos alrededor del cambio de siglo. En muy poco tiempo se ha descubierto que la materia responde a ciertos estímulos emitiendo electrones y rayos X, y que de forma espontánea los átomos de ciertos elementos emiten radiación. Pero seguimos sin saber qué es un átomo, ni en qué consiste esa radiación... En 1899 Ernest Rutherford se propone poner orden en la disciplina. Empieza estudiando la radiación emitida por el uranio y el torio, y descubre que hay dos tipos, *“una que se absorbe fácilmente, que llamaremos radiación α , y otra con un carácter más penetrante, que llamaremos radiación β ”*. Pronto se descubre un tercer tipo mucho más penetrante, una especie de rayos X de alta energía, que Rutherford llamará *“radiación γ ”*. Los tres tipos de radiación conservan hoy su nombre original, las tres primeras letras del alfabeto griego por su orden de descubrimiento.

En 1900 Rutherford recibe la ayuda del químico Frederick Soddy, y ambos estudian de forma exhaustiva las tres radiaciones. Lo primero que van a descubrir es que cada tipo de radiación de cada elemento tiene una *“semivida”* característica, relacionada con la inversa de la probabilidad de que el elemento emita la radiación (a mayor probabilidad, menor semivida) y que hace que su actividad disminuya con el tiempo de forma exponencial. Como vemos en la Figura 1.6, la fórmula puede parecer complicada pero el concepto de semivida es sencillo,

se trata simplemente del tiempo tras el cual la radioactividad disminuye exactamente a la mitad.

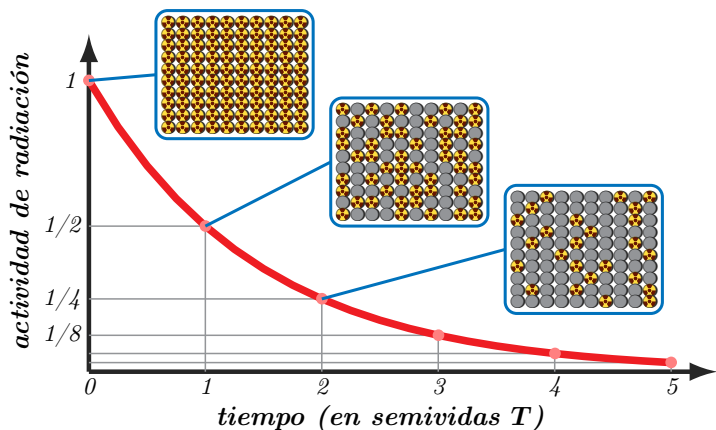


Figura 1.6: Disminución de la actividad de una fuente radioactiva con el tiempo t en función del número de semividas T que pasan, según la expresión $e^{-t(\ln 2/T)}$ (curva roja). Las cápsulas azules representan cómo tras el paso de cada semivida se reduce aleatoriamente el número de átomos radioactivos a la mitad.

Esta constatación va a tener dos consecuencias fundamentales. La primera es que si creásemos una base de datos con estas semividas, la medida de la semivida de una radiación a priori desconocida nos podría decir de forma inequívoca de qué elemento se trata. La segunda, y quizá más importante, es que la radioactividad supone un cambio.

Ya han descubierto que los rayos β son electrones, y que los rayos α tienen carga opuesta (+) y son más difíciles de desviar, o sea más masivos, ¡más que un átomo de hidrógeno! De hecho, en 1908 Rutherford va a demostrar que las partículas α son átomos de helio con una carga positiva 2 veces mayor que la del electrón. Cuando el átomo emite (pierde) una parte, cambia de identidad, deja de ser lo que era. Por eso la radioactividad en la Figura 1.6 disminuye con el tiempo: cada vez que un átomo radia, ése desaparece como tal de la muestra cual abeja que ha

clavado su aguijón, como vemos en las cápsulas azules de esa figura. A mayor probabilidad de que un átomo radie, menor será el tiempo en el que su número se reduzca a la mitad.

Rutherford y Soddy publican sus conclusiones en *El cambio radioactivo*. Midiendo la energía de las partículas emitidas, sobre todo de las α , estiman la escala de energía que acompaña a este cambio: “*La energía del cambio radioactivo debe ser al menos 20 000 veces, y quizá un millón de veces, mayor que la de cualquier cambio molecular*”. Como sólo miden la energía que ha sido emitida, suponen que ésta no es más que una parte de toda la energía interna del átomo, que se manifiesta cual punta de iceberg sólo en el caso de los átomos radioactivos, pero que seguramente todos los átomos poseen.

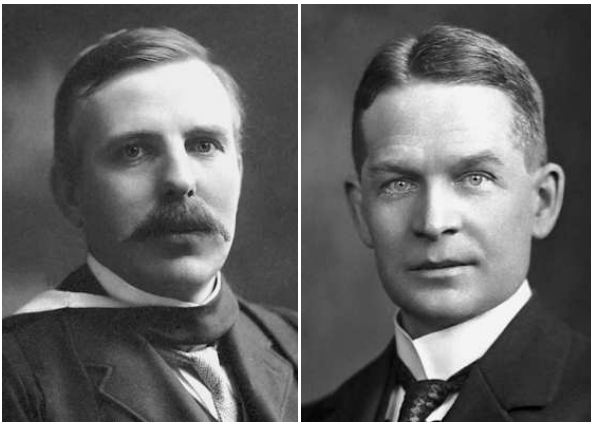


Figura 1.7: Ernest Rutherford (izquierda) y Frederick Soddy (derecha) sentaron las bases para el desarrollo de la física nuclear con la publicación de *El cambio radioactivo*.

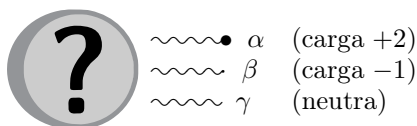
En 1904 Soddy incluye en *La interpretación del radio* una advertencia apocalíptica: “*Es posible que toda la materia posea (latente y ligada dentro de la estructura del átomo) una cantidad de energía similar a la del radio. El hombre que controle la palanca con la que la naturaleza regula la emisión de esta energía poseerá un arma con la que destruir la Tierra. El*

hecho de que existimos es una prueba de que esa liberación masiva de energía no ha ocurrido; el que no haya ocurrido es la mejor garantía posible de que nunca ocurrirá. Confíemos en que la naturaleza guarde su secreto”. Soddy recibirá el Nobel de Química en 1921.

Curiosamente, *La interpretación del radio* va a inspirar a H.G. Wells en su novela *El mundo se libera*, publicada justo antes de la Gran Guerra. En ella imagina que el hombre consigue accionar la ‘palanca’ que mencionó Soddy y construye bombas atómicas, hasta que en 1956 una guerra mundial destruye las capitales del mundo. Sin embargo, no es más que ciencia ficción: imagina las bombas atómicas como explosivos convencionales continuos, que siguen explotando durante la semivida del elemento radioactivo en cuestión...



Llegados a este punto, 15 años después del descubrimiento de los rayos X, ¿qué sabemos del átomo?



- Algunos emiten radiación, con cierta semivida.
- Ésta puede ser α (helio), β (electrón), o γ ('luz').
- Su energía refleja la que debe esconder el átomo.
- Al emitirla el átomo cambia de identidad, se transforma.

Pero seguimos sin saber qué es el átomo.

Aterrizaje en el núcleo

Rutherford ha recibido el Nobel de Química en 1908, lo que para él ha sido en parte una decepción por considerar que “*la ciencia es física o filatelia*” (es decir, que los grandes descubrimientos se hacen en física y las demás disciplinas se limitan a clasificar). Sus partículas α le fascinan. Ha descubierto que son átomos de helio con carga +2, lo que las hace fáciles de

manipular con campos eléctricos y magnéticos, y representan la radiación más energética que se conoce, de millones de eV^2 . Para hacernos un idea, una partícula α de 6 millones de eV (MeV) se desplaza a unos ¡60 millones de $km/h!$ ³ Todas estas características hacen de ellas unos proyectiles únicos con los que poder bombardear los demás átomos.

En 1911 quiere bombardear átomos de oro. ¿Por qué? La escala del átomo y de sus partículas es demasiado pequeña para el ojo humano, incluso para los más potentes microscopios actuales que no pueden ir más allá del Ångström (10^{-10} m). Sin embargo, las partículas que tienen carga dejan un pequeño rastro en forma de luz al atravesar ciertos materiales. Los físicos podemos así observar las partículas a través de ese rastro que dejan en lo que llamamos “detectores”. No detectamos la partícula, detectamos su paso. Y ya que no podemos ver el átomo, al menos podremos deducir cómo es por la manera en la que nos devuelve las partículas que le enviamos.

Rutherford va a construir un ‘cañón’ de partículas α metiendo radón dentro de una caja de plomo con un agujero (Fig. 1.8). Así, el plomo absorbe la radioactividad α del radón excepto a lo largo del eje del agujero. Perpendicular al eje coloca una lámina de oro finísima (media milésima de mm) rodeada por el detector, una pantalla con sulfuro de zinc que produce pequeños destellos observables en la oscuridad cuando las partículas α chocan con ella. ¿Qué espera observar? Por los rayos β saben que el átomo contiene carga negativa en forma de electrones, 1 el hidrógeno, 2 el helio... Pero el átomo es neutro, así que debe contener una carga positiva equivalente.

Como los electrones pesan mucho menos (2000 veces) que el átomo, esta carga positiva debe constituir la casi totalidad de

²La energía en el átomo se mide en “electronvoltios” (eV), la energía que adquiere un electrón sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio. Es la escala típica de los procesos químicos. Sus múltiplos son el keV (kilo, mil), el MeV (mega, millón), el GeV (giga, mil millones), etc.

³Para manejar a la vez las energías gigantescas y las distancias minúsculas del átomo, usaremos la notación científica: 10^x representa un 1 seguido de x ceros, y 10^{-x} quiere decir $1/10^x$. Por ejemplo, 10^8 es 100 000 000 (cien millones) y 10^{-3} es $1/1000$ (una milésima).

Para seguir leyendo,
inicie el proceso de
compra, click aquí