

# Viaje al centro del átomo

**L**os átomos son los ladrillos con los que está conformada la materia. Pero esos ladrillos solo constituyen el inicio de la historia. En un átomo, un séquito de electrones remolina en torno a un núcleo: si se ampliara un átomo a las dimensiones de la Tierra, su núcleo sería más pequeño que París. El núcleo es un mundo completo en el corazón del universo atómico. Es mucho más complejo que la bolita de materia que uno ingenuamente se imagina. Es un mundo variado, regido por efectos cuánticos, en el que ningún núcleo se asemeja a su vecino. Y con elementos cada vez más pesados descubiertos en el laboratorio, es un mundo que los investigadores continúan explorando.

## La asombrosa diversidad de los núcleos atómicos

Es minúsculo y sin embargo de una insólita complejidad. A más de cien años de su descubrimiento, el núcleo atómico conserva enormes secretos. ¿Cómo explicar su comportamiento? ¿Cómo comprender la diversidad y la abundancia de los elementos observados en el universo? Hay tantas preguntas sin respuestas ciertas que nadie ha logrado aún describir el átomo en un marco global. 'Estoy estupefacto de advertir que para los núcleos pesados el modelo cambia prácticamente en cada experiencia', confiesa un físico teórico experto en cálculos *ab initio*, es

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Los ladrillos que componen la materia que nos rodea todavía encierran secretos en su diversidad y en su estructura. Para penetrarlos, los físicos estudian en el laboratorio núcleos atómicos exóticos, es decir, inexistentes en la naturaleza.

decir, en partir de las interacciones más fundamentales para recomponer el rompecabezas del núcleo.

Con los trabajos de Ernest Rutheford (1871-1937), se consideró al átomo como un todo. Joseph John Thomson (1856-1940) había hablado antes de un budín con pasas: una masa con cargas positivas en la que están incrustados los electrones negativamente cargados. En 1911, Rutheford puso a prueba el modelo de Thomson, su antiguo director, bombardeando una delgada hoja de oro con partículas alfa, idénticas a núcleos de helio. Constató, para su sorpresa, que algunas volvían atrás. 'Fue tan increíble como haber disparado un proyectil de grueso calibre sobre una hoja de papel de seda y haberlo recibido de rebote', explicó Rutheford antes de concluir que un átomo está formado por un núcleo de protones, denso y minúsculo, rodeado a buena distancia por electrones. Después, en 1932, James Chadwick (1891-1974) descubrió el neutrón, lo que permitió a Werner Heisenberg (1901-1976) y Dimitri Ivanenko (1904-1994) sugerir, unos meses más tarde, una descripción del núcleo que sigue vigente: es un ensamble de nucleones, es decir, protones y neutrones, con un diámetro de alrededor de un femtómetro ( $1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$ ), cien mil veces más pequeño que el séquito de electrones y, por ende, que el átomo.

Esta visión permitió realizar avances espectaculares, por ejemplo, en las aplicaciones de la física nuclear, entre ellas, liberar energía de manera controlada o explosiva,

así como sondear y curar el cuerpo humano. Esta representación permitió también describir los núcleos estables y los que no lo son. Después de haber concebido el núcleo como una gota líquida —lo que permite entre otras cosas estimar su masa de manera aproximada—, los físicos se inclinaron por un modelo de capas, como usan para representar los niveles de energía de los electrones en su nube. Para cada tipo de núcleo, una primera capa puede albergar dos partículas; la segunda, seis, y la tercera, doce. Y de la misma manera que un átomo es químicamente más estable si su capa externa de electrones está completa, un núcleo tiene mayor estabilidad si su capa periférica de protones o de neutrones está llena. Ello arroja números calificados de 'mágicos', como 2 (primera capa completa), 8 (las dos primeras) o 20 (las tres primeras). Los números siguientes son 28, 50, 82 y 126. Cuando los núcleos son 'mágicos' por partida doble, es decir tanto por sus neutrones como por sus protones, resultan particularmente estables y más abundantes que los núcleos vecinos, como es el caso del helio 4 (2 protones, 2 neutrones), del oxígeno 16 (8 protones, 8 neutrones) o del plomo 208 (82 protones, 126 neutrones), el más pesado de los núcleos estables del universo. Y como ciertas capas poseen varias subcapas de energías próximas, existen también núcleos con una de esas subcapas llena. Esto explica, por ejemplo, la estabilidad del carbono 12 (6 protones, 6 neutrones), a pesar de que su número de nucleones no sea 'mágico'.

## LA BÚSQUEDA DEL CÁLCULO *AB INITIO*

**D**urante mucho tiempo, los físicos buscaron la manera más efectiva de construir modelos matemáticos o modelizar los núcleos atómicos. 'Ella consiste en partir de un objeto relativamente bien conocido y luego describir las diferencias que aparecen cuando se le agregan nucleones', aclara Duguet, y prosigue: 'Se puede considerar los isótopos de flúor (9 protones) como la suma de un núcleo de oxígeno doblemente «mágico» (8 protones, 8 neutrones) más un protón y algunos neutrones, y luego calcular los efectos inducidos por los últimos'. Este tipo de descripción conduce a una multitud de modelos difíciles de armonizar. 'El cálculo *ab initio* permite apuntar a modelos más globales, que se apoyan en escalas más fundamentales. Para núcleos con masas inferiores a 12, este enfoque resultó eficaz a partir de la década de 1980.'

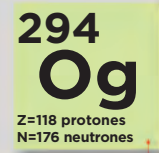
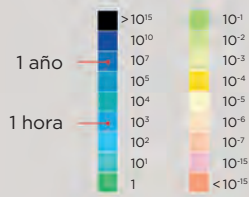
Para reducir la complejidad de la ecuación de Schroedinger, que gobierna el estado cuántico del núcleo, y extender el campo de aplicación de estos métodos, los físicos teóricos procuran primero organizar los procesos según su importancia. Así, solo toman en cuenta las interacciones de dos o tres nucleones y descartan las otras por su menor influencia. 'Se constata que es necesaria una interacción

de tres nucleones para que aparezca el apareamiento espín-órbita y para explicar el número «mágico» 28. Hacen falta más esfuerzos para esperar comprender los números «mágicos» más allá de ese o determinar el conjunto de núcleos autorizados por las leyes de la mecánica cuántica y la interacción fuerte.' Algo sin sentido, teniendo en cuenta que la complejidad de las ecuaciones a resolver crece exponencialmente con el número de partículas.

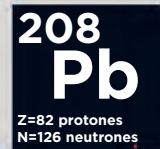
De diez años a esta parte, los métodos *ab initio* han realizado grandes progresos gracias a nuevos enfoques teóricos y al rápido aumento de la capacidad de las computadoras. Cada vez más, los investigadores arraigan su trabajo en la cromodinámica cuántica, que gobierna las partes constitutivas de los nucleones, para deducir las restricciones vigentes en el seno del núcleo. En cuanto al razonamiento *ab initio* más fundamental, que aspira a describir el núcleo a partir de sus partes más elementales, encuentra una dificultad adicional: contrariamente a los nucleones, los quarks alcanzan velocidades relativistas cercanas a la de la luz. Hay para ocupar cerebros y computadoras por décadas.

Sobre una misma línea horizontal aparecen todos los isótopos de cada elemento, cuyos núcleos atómicos tienen idéntico número de protones y diferente número de neutrones.

Segundos de vida medio de los núcleos atómicos



**Organesón**  
El elemento más pesado descubierto en laboratorio.  
Número atómico 118  
Masa atómica 294



**Plomo**  
Número atómico 82  
Masa atómica 208



**Uranio**  
El elemento más pesado presente de modo natural en la Tierra.  
Número atómico 92  
Masa atómica 238

**Tierra incógnita**  
Por fuera de este límite aproximado no es posible que se formen núcleos atómicos

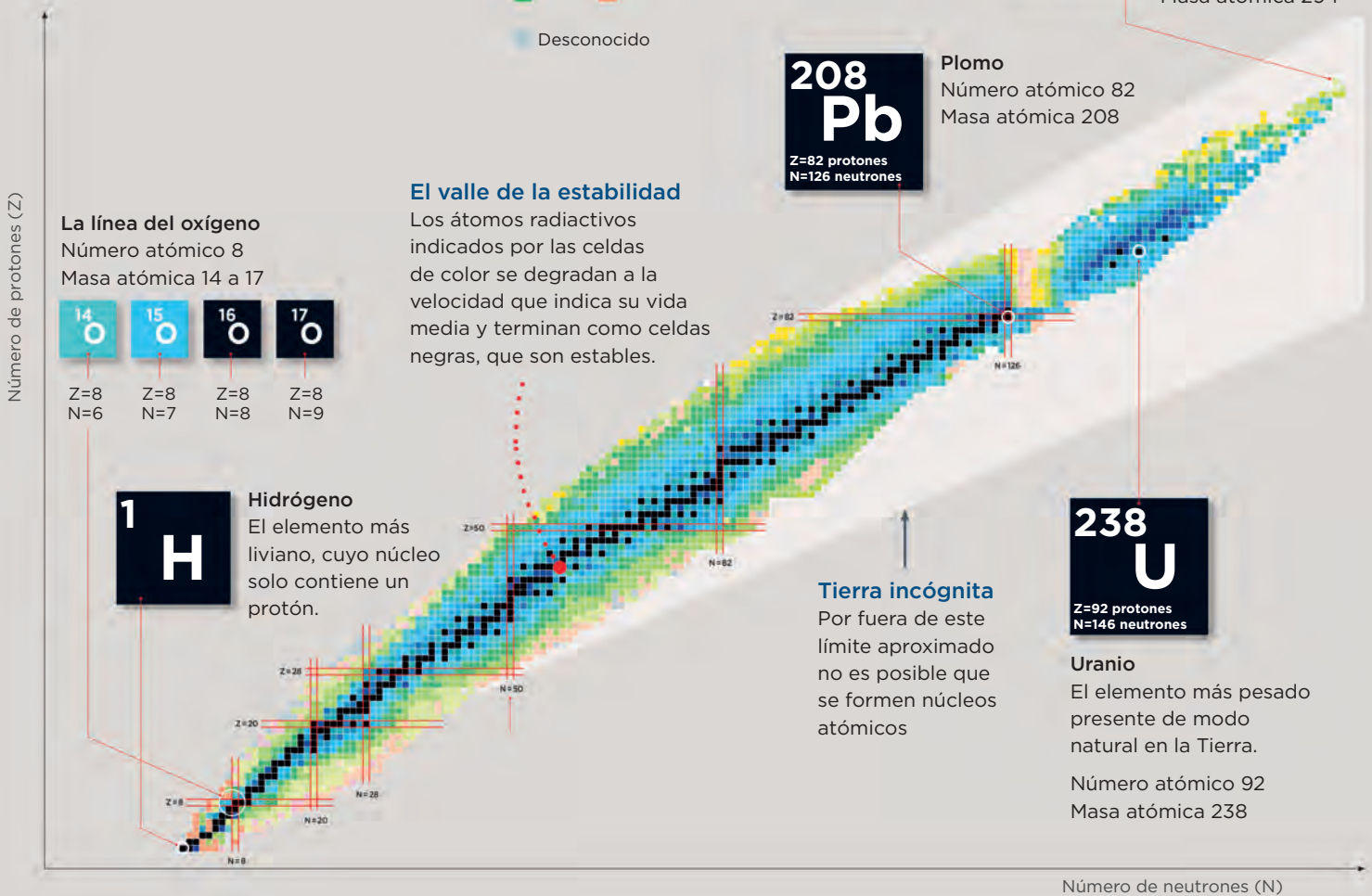
### El valle de la estabilidad

Los átomos radiactivos indicados por las celdas de color se degradan a la velocidad que indica su vida media y terminan como celdas negras, que son estables.

**La línea del oxígeno**  
Número atómico 8  
Masa atómica 14 a 17



**Hidrógeno**  
El elemento más liviano, cuyo núcleo solo contiene un protón.



Distribución de los núcleos atómicos según el número de protones y neutrones que los componen. Los colores indican el tiempo de vida media de los núcleos, es decir, el tiempo en que se desintegra la mitad de los núcleos debido a la radiactividad; las celdas negras indican núcleos estables. *New Scientist* y National Nuclear Data Centre

## El valle de estabilidad

Si se representa en dos dimensiones la distribución de los núcleos conocidos en función de los números de sus protones y neutrones, y se agrega en la tercera dimensión su falta o debilidad de cohesión, la cual hace inestables a los núcleos, se advierte que se forma un valle bordeado de pendientes escarpadas. Ese valle reúne los 291 núcleos estables conocidos existentes en el universo, los que en su mayoría poseen un ligero ex-

cedente de neutrones, necesario para compensar la repulsión electrostática entre protones. A ambos lados del valle se ubican los núcleos inestables, que se precipitan por las pendientes al sufrir uno o varios procesos nucleares hasta que llegan al valle. Así, en el flanco de los núcleos ricos en neutrones, el cesio 143 (55 protones, 88 neutrones) experimenta cinco transformaciones sucesivas de neutrón en protón (desintegración beta menos, que emite un electrón y la antipartícula del neutrino) que lo transforman en neodimio 143 (60 protones,

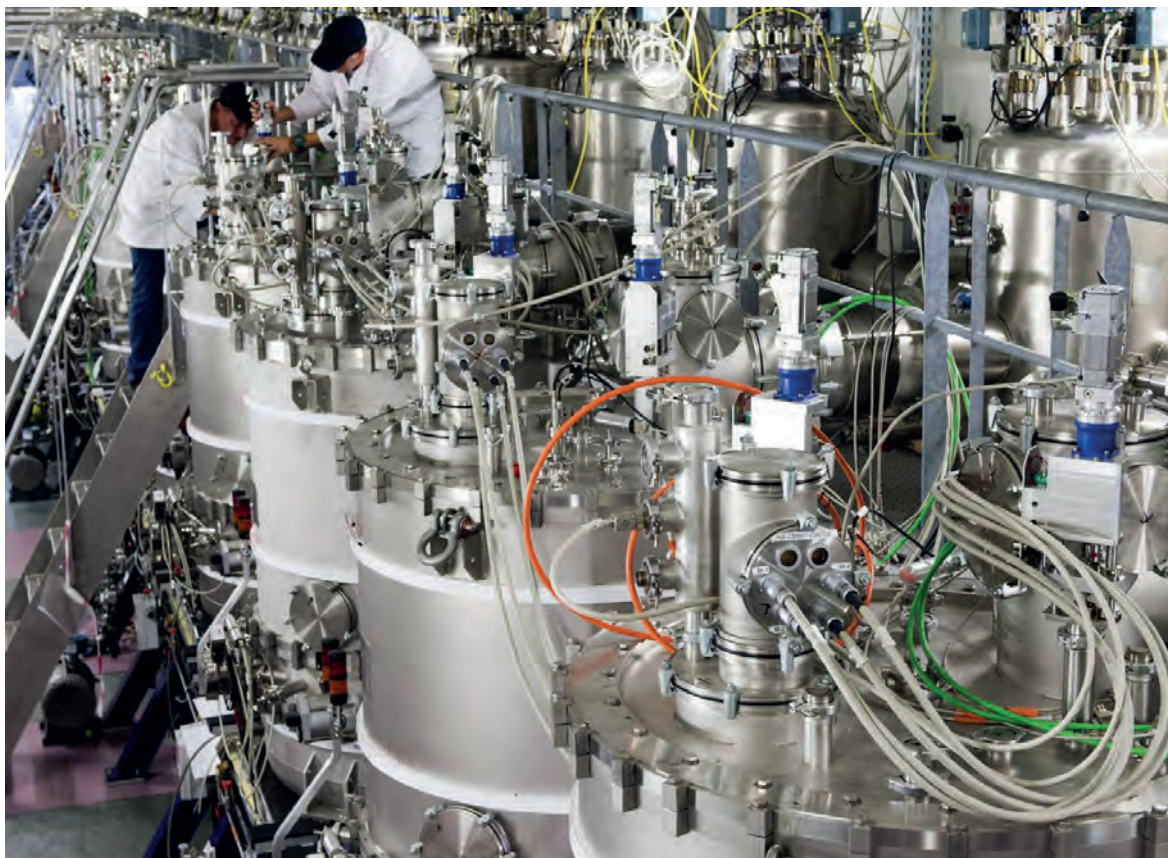
83 neutrones), que es estable. Del otro lado del valle se ubican los núcleos demasiado ricos en protones, como el oxígeno 14, con 8 protones y 6 neutrones. Este sufre una desintegración beta más, que transforma un protón en neutrón y emite un antielectrón y un neutrino, de lo que resulta un átomo estable de nitrógeno 14. Otros núcleos, más pesados, sufren desintegraciones alfa y beta. Y los núcleos más pesados son susceptibles de fisión, que los divide en dos o tres fragmentos, los cuales, a su vez, sufren desintegraciones hasta arribar al valle de estabilidad.

Fuera de los núcleos estables, los físicos han podido crear, entre todos los posibles, cerca de tres mil núcleos exóticos, es decir, que no se encuentran naturalmente en la Tierra. Lo hicieron en los reactores nucleares o en los aceleradores de partículas, como el Gran Acelerador Nacional de Iones Pesados (Ganil), instalado en Caen. Existirían miles de otros núcleos. Los investigadores procuran encontrar los límites de la estabilidad, es decir, la curva que engloba todos los núcleos formados y aglutinados por la fuerza nuclear. Para los núcleos más livianos, esa línea resulta definida por los modelos matemáticos y verificada experimentalmente. 'Se constata, por ejemplo, que no existe un diprotón [helio sin neutrones], ni un dineutrón', explica Thomas Duguet, del Comisariado de Energía Atómica (CEA).

## Repensar los modelos

Para los núcleos más pesados, todavía inaccesibles a la modelización y a la simulación numérica, pues se requeriría manejar demasiados parámetros, solo la experimentación permite establecer la mencionada línea. 'Para los núcleos ricos en neutrones, solo se lo puede hacer hasta ocho protones', continúa Duguet. 'Para aquellos ricos en protones, se puede llegar hasta 91 protones', precisa Vittorio Somà, también teórico del CEA. Más allá de eso, la línea se traza hasta cierto punto a dedo.

Para avanzar, los investigadores se empeñan en crear nuevos núcleos exóticos y, también, en repensar los modelos. 'Uno se pregunta hasta qué punto es posible describir las propiedades del núcleo a partir de las interacciones elementales entre nucleones', comenta Somà. A lo largo de las décadas, los descubrimientos sobre el núcleo y sus componentes han reforzado el misterio. Para empezar, protones y neutrones no son partículas elementales. Ambos están formados por quarks, minúsculas partículas ligadas por los gluones, las partículas que sirven de vehículos a la interacción fuerte. Esta es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, relativamente bien descrita por la cromodinámica cuántica, pero acerca de la cual nadie sabe cómo verdaderamente origina la fuerza nuclear,



Acelerador lineal construido en el Ganil, en Caen, Normandía.

Comparando el silicio 34 con el azufre 36, ambos con 20 neutrones, los físicos pudieron deducir que hay la misma densidad de neutrones en ambos núcleos. Por el contrario, la densidad de protones del silicio 34 es 40% inferior a la del azufre. 'Todo sucede como si uno de los niveles de energía correspondiente a protones cercanos al centro del núcleo atómico estuviese vacío, de donde proviene la semejanza con un halo', en palabras de Sorlin. Esto constituye una singularidad, que se encuentra asociada con el apareamiento espín-órbita, y que aparece en el origen de la mayoría de los

números 'mágicos', como 28, 50, 82 y 126. Su constatación abre nuevas perspectivas a los modelos, pues en tanto que la densidad de nucleones se mantenía cercana en todos los núcleos, no era posible estudiar su relación con la interacción espín-órbita. El silicio 34 resulta así una mina de información para los físicos teóricos, en especial para modelizar mejor los núcleos producto de explosiones estelares y padres de núcleos estables. Muy recientemente, la medición indirecta de la estructura del halo de silicio 34 fue corroborada por el equipo de Duguet.

principal fuente de cohesión de los neutrones. Peor aún, la incesante danza de los quarks y los gluones a veces transforma los neutrones en protones e, inversamente, por efecto de otra de las fuerzas elementales de la naturaleza, la interacción débil, por el proceso de desintegración beta. Una tercera fuerza fundamental, la interacción electromagnética, complica las cosas, pues aleja los protones por la repulsión de Coulomb. Se agregan también efectos de borde, pues los nucleones ubicados en la periferia del núcleo tienen menos vecinos que aquellos cercanos al centro. Además, está el principio de exclusión de Pauli que impide que, en su comportamiento cuántico, los fermiones —protones y neutrones son fermiones— ocupen el mismo estado. Esa naturaleza cuántica dota a las partículas de un espín, que se puede describir como un sentido de rotación sobre ellas mismas, que interactúa con sus desplazamientos en el seno del núcleo. Tal interacción se conoce por apareamiento espín-órbita, cuya importancia en la física nuclear se reconoce cada día más. 'Es un verdadero rompecabezas', subraya Olivier Sorlin, investigador del Consejo Nacional de Investigación Científica (CNRS) en el Ganil, 'porque el núcleo crea su propio potencial, su propia reserva de energía'. Y Jean-Paul Ebran resume: 'Estamos ante un problema de N cuerpos que resulta tanto más complejo por la existencia de cuatro tipos de fermiones en el núcleo, pues cada uno de los neutrones y de los protones tiene dos estados posibles de espín'.


Para un sistema con dos o tres partículas que interactúan, la modelización matemática está al alcance de los físicos. De la misma manera, en sistemas que incluyen un número considerable de elementos, los métodos de la física estadística describen cierto número de magnitudes observables, como la temperatura y la presión de un gas. Pero la mayor parte de los núcleos atómicos caen entre esas dos aguas, lo cual dificulta particularmente la determinación de su geometría y de sus propiedades.

Por largo tiempo considerados esféricos —como lo son los núcleos 'mágicos'—, los núcleos atómicos exhiben una asombrosa diversidad. Algunos tienen forma de pelota de rugby; otros, de plato volador, o de pera, o de banana. Determinadas geometrías, como la de la esfera, se caracterizan por una saturación de nucleones: alejándose del centro, la densidad se mantiene primero constante y luego de derrumba violentamente. Sin embargo, hay núcleos que escapan de esa regla. Así, algunos tienen la geometría de una aureola, con una densidad que decrece con lentitud en la periferia, por ejemplo, el litio 11. Y hay más extraños. Mientras se ha constatado que la densidad central es similar en la mayoría de los núcleos, existe por lo menos uno que escapa a esa regla. En 2016, un grupo de investigadores conducido por el mencionado Sorlin descubrió en un experimento realizado en los Estados Unidos que el núcleo de silicio 34 tiene forma de halo. Este tipo de investigaciones ayuda a comprender cómo se forman los números 'mágicos' y por qué algunos pueden desaparecer si se agregan neutrones a un elemento. 'Nuestro grupo había observado la desaparición del número 28 en el silicio 42, que es un núcleo muy deforme', señala el nombrado.

Otros trabajos confirmaron que ciertos núcleos presentan una estructura de naturaleza molecular. En 2014, el grupo teórico del nombrado Ebran demostró, para toda una serie de núcleos, que entre ellos aparecen algunos muy pequeños. Eso explica, por ejemplo, ciertas observaciones de carbono 12 que revelan un reagrupamiento de nucleones en forma de tres núcleos de helio. La estructura molecular explica su proceso de formación, por la fusión de un berilio —a su vez originado en la fusión de dos helios— y de un tercer helio. 'En su estado fundamental, el núcleo de neón 22 presenta un núcleo de carbono 12 en el centro y dos de helio; los dos últimos neutrones refuerzan los vínculos entre esos tres núcleos', sostiene Ebran, y agrega: 'Esa estructura

molecular se advierte hasta el calcio (20 protones), más allá del cual los agregados tienen menos tendencia a formarse. Pero en la superficie de ciertos núcleos pesados la formación de un agregado resulta favorable en materia energética, lo que permite, por ejemplo, interpretar la radiactividad alfa del polonio 212'.

Los progresos de la física nuclear son muy esperados por los astrofísicos, a quienes les falta información para entender en detalle el funcionamiento de las estrellas, en especial, de los acontecimientos cataclísmicos que padecen. También necesitan ese conocimiento para deducir la abundancia relativa de núcleos atómicos en el cosmos, dado que solo los más livianos –hidrógeno y helio esencialmente– datan de los primeros instantes de existencia del universo, mientras todos los demás se originaron en las menos frecuentes reacciones de fusión. Una parte de esos núcleos se formó en las estrellas, cuya

duración hace posible lo improbable; la otra lo hizo en el transcurso de procesos todavía mal comprendidos desencadenados por los mencionados acontecimientos cataclísmicos, por ejemplo, las supernovas y las fusiones de estrellas de neutrones. Ante los numerosos procesos que dependen de quarks y de gluones, cuyos efectos en gran escala nos resultan difíciles de describir, los físicos esperan explorar los núcleos en forma más detallada, con los electrones, que son 1800 veces más livianos que los protones y los neutrones. En los Estados Unidos, los físicos trabajan sobre un colisionador de electrones con iones, un proyecto que está bastante avanzado pero cuyo calendario pende de la imprevisibilidad del actual ocupante de la Casa Blanca. En Europa, el CERN contempla desde hace tiempo agregar al Gran Colisionador de Hadrones una línea de electrones y así disponer de un Gran Colisionador de Hadrones-Electrones. Hay apuro. 

## GLOSARIO

**Desintegración alfa.** Degradación radiactiva por emisión de partículas alfa. Por cada partícula emitida por un átomo radiactivo, este ve reducido su número atómico en 2 unidades.

**Desintegración beta.** Degradación radiactiva por emisión de partículas beta. Puede ser beta menos (-), la emisión de un electrón y una antipartícula del neutrino, o beta más (+), la emisión de una antipartícula del electrón (o positrón) y un neutrino.

**Gluones.** Partículas que sirven de vehículos a la interacción fuerte por la que los quarks se aglutinan y forman protones y neutrones.

**Masa atómica.** Indica para cada elemento el número de nucleones (protones + neutrones) del núcleo de sus átomos.

**Neutrones.** Partículas sin carga eléctrica que se encuentran en el núcleo de todos los átomos salvo el de hidrógeno.

**Nucleones.** Son las partículas que componen el núcleo atómico, en particular, protones y neutrones.

**Número atómico.** Indica para cada elemento el número de protones del núcleo de sus átomos.

**Números mágicos.** El término se aplica en física nuclear a aquellas cantidades de protones o neutrones que completan las capas en que se ubican en el núcleo atómico. Los más comunes son 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126. Se cree que la denominación se debe al físico estadounidense nacido en Hungría Eugene Wigner (1902-1995), premio Nobel en 1963.

**Partículas alfa.** Dos protones y dos neutrones aglutinados formando una partícula idéntica a un núcleo de helio.

**Partículas beta.** Electrones o antielectrones (positrones) emitidos con alta energía en la degradación radiactiva de núcleos atómicos.

**Protones.** Partículas con carga eléctrica positiva que se encuentran en el núcleo de todos los átomos y tienen una masa levemente menor que los neutrones. El número de protones de cada elemento químico es su número atómico.

**Quarks.** Partículas elementales que son constituyentes fundamentales de la materia. Se combinan para formar partículas compuestas (llamadas hadrones), como los protones y los neutrones, que forman los núcleos atómicos.

## LECTURAS SUGERIDAS

**DEBU P,** 2017, *Noyaux et radioactivité*, Presses des Mines, París.

**FERNÁNDEZ B,** 2006, *De l'atome au noyau*, Ellipses, París.

**STILL B,** 2017, *La Vie secrète des atomes*, Dunod, París.