

FÍSICA NUCLEAR

La **física nuclear** es una rama de la física que estudia las propiedades y el comportamiento de los núcleos atómicos. En un contexto más amplio, se define la **física nuclear y de partículas** como la rama de la física que estudia la estructura fundamental de la materia y las interacciones entre las partículas subatómicas. Asimismo, la física nuclear es conocida mayoritariamente por la sociedad, por el aprovechamiento de la energía nuclear en centrales nucleares y en el desarrollo de armas nucleares, tanto de fisión nuclear como de fusión nuclear.

La radiactividad fue descubierta en las sales de uranio por el físico francés Henri Becquerel en 1896.

En 1898, los científicos Marie y Pierre Curie descubrieron dos elementos radiactivos existentes en la naturaleza, el polonio (${}_{84}\text{Po}$) y el radio (${}_{88}\text{Ra}$).

En 1913 Niels Bohr publicó su modelo de átomo, consistente en un núcleo central compuesto por partículas que concentran la práctica mayoría de la masa del átomo (neutrones y protones), rodeado por varias capas de partículas cargadas casi sin masa (electrones). Mientras que el tamaño del átomo resulta ser del orden del angstrom (10^{-10} m), el núcleo puede medirse en fermis (10^{-15} m), o sea, el núcleo es 100 000 veces menor que el átomo.

Ernest Rutherford en el año 1918 definió la existencia de los núcleos de hidrógeno. Rutherford sugirió que el núcleo de hidrógeno, cuyo número atómico se sabía que era 1, debía ser una partícula fundamental. Se adoptó para esta nueva partícula el nombre de protón sugerido en 1886 por Goldstein para definir ciertas partículas que aparecían en los tubos catódicos.

Durante la década de 1930, Irène y Jean Frédéric Joliot-Curie obtuvieron los primeros nucleidos radiactivos artificiales bombardeando boro (${}_{5}\text{B}$) y aluminio (${}_{13}\text{Al}$) con partículas α para formar isótopos radiactivos de nitrógeno (${}_{7}\text{N}$) y fósforo (${}_{15}\text{P}$). Algunos isótopos de estos elementos presentes en la naturaleza son estables. Los isótopos inestables se encuentran en proporciones muy bajas.

En 1932 James Chadwick realizó una serie de experimentos con una radiactividad especial que definió en términos de corpúsculos, o partículas que formaban esa radiación. Esta nueva radiación no tenía carga eléctrica y poseía una masa casi idéntica a la del protón. Inicialmente se postuló que fuera resultado de la unión de un protón y un electrón formando una especie de dipolo eléctrico. Posteriores experimentos descartaron esta idea llegando a la conclusión de que era una nueva partícula procedente del núcleo a la que se llamó neutrones.

Los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann descubrieron la fisión nuclear en 1938. Cuando se irradia uranio con neutrones, algunos núcleos se dividen en dos núcleos con números atómicos. La fisión libera una cantidad enorme de energía y se utiliza en armas y reactores de fisión nuclear.

La física nuclear incluye también el estudio de las reacciones nucleares: el uso de proyectiles nucleares para convertir un tipo de núcleo en otro. Si, por ejemplo, se bombardea el sodio con neutrones, parte de los núcleos estables Na capturan estos neutrones para formar núcleos radiactivos ^{24}Na .

Estas reacciones se estudian colocando muestras dentro de los reactores nucleares para producir un flujo alto de neutrones (número elevado de neutrones por unidad de área).

Los núcleos también pueden reaccionar entre ellos pero, si están cargados positivamente, se repelen entre sí con gran fuerza. Los núcleos proyectiles deben tener una energía lo bastante alta como para superar la repulsión y reaccionar con los núcleos blanco. Los núcleos de alta energía se obtienen en los ciclotrones, en los generadores de Van de Graaff y en otros aceleradores de partículas.

Una reacción nuclear típica es la que se utilizó para producir artificialmente el elemento siguiente al uranio (^{238}U), que es el elemento más pesado existente en la naturaleza. El neptunio (Np) se obtuvo bombardeando uranio con deuterones (núcleos del isótopo hidrógeno pesado, ^2H).

Los núcleos atómicos consisten en protones, cargados positivamente y neutrones sin carga. El número de protones de un núcleo es su número atómico, que define al elemento químico. Todos los núcleos con 11 protones, por ejemplo, son núcleos de átomos de sodio (Na). Un elemento puede tener varios isótopos, cuyos núcleos tienen un número distinto de neutrones. Por ejemplo, el núcleo de sodio estable contiene 12 neutrones, mientras que los que contienen 13 neutrones son radiactivos. Esos isótopos se anotan como $^{A}_{Z}\text{X}$, donde el subíndice indica el número atómico, y el superíndice representa el número total de nucleones, es decir, de neutrones y protones. A cualquier especie de núcleo designada por un cierto número atómico y de neutrones se le llama nucleido.

Los nucleidos radiactivos son inestables y sufren una transformación espontánea en nucleidos de otros elementos, liberando energía en el proceso.

Esas transformaciones incluyen la desintegración alfa, que supone la emisión de un núcleo de helio (^4_2He), y la desintegración beta (que puede ser β^- o β^+). En la desintegración β^- un neutrón se transforma en un protón con la emisión simultánea de un electrón de alta energía y un antineutrino electrónico. En la desintegración β^+ un protón se convierte en un neutrón emitiendo un positrón.

Por ejemplo, el ^{24}Na sufre una desintegración β^- formando el elemento superior, el magnesio.

La radiación gamma es radiación electromagnética de alta frecuencia (y por tanto energía). Cuando se produce la desintegración α o β , el núcleo resultante permanece a menudo en un estado excitado (de mayor energía), por lo que posteriormente se produce la desexcitación emitiendo rayos gamma.

Al representar la desintegración de un nucleido radiactivo se debe determinar también el periodo de semidesintegración del nucleido. El periodo de semidesintegración del ^{24}Na , es de 15 horas. Es importante determinar el tipo y energía de la radiación emitida por el nucleido.

Los conceptos de fisión y fusión nuclear difieren en las características de formación de cada uno. De esta forma se encuentra que la fisión (utilizada en las bombas y reactores nucleares) consiste en el "bombardeo" de partículas subatómicas al uranio (o a cualquier elemento transuránico, siempre y

cuando sus características lo permitan), trayendo como consecuencia la fisión (de allí su nombre) del átomo y con esto la de los demás átomos adyacentes al bombardeado en reacción en cadena. Mientras que, la fusión es la unión bajo ciertas condiciones (altas presiones, altas temperaturas, altas cargas, etc.) de dos o más átomos y genera mucha más energía que la fisión.

La fusión representa diversos problemas, ya que a nivel atómico las cargas de los átomos se repelen entre sí impidiendo la unión de estos, por esto se recurre generalmente a la utilización de isótopos ligeros, con menor carga eléctrica (como el hidrógeno y sus isótopos deuterio y tritio). En ciertas condiciones, definidas por los criterios de Lawson, se lograría la fusión de dichos átomos. Para ello primero se les debe convertir al estado de plasma, ionizándolos, favoreciendo a la unión. Esto se consigue mediante dos métodos básicos: el confinamiento magnético y el confinamiento inercial. Existen varias posibilidades para producir la fusión a partir de los isótopos del hidrógeno.

La energía de la fusión aún no se ha podido aprovechar con fines prácticos.

Representa algunas ventajas en relación a la fisión nuclear:

1. Produce menos residuos nucleares.
2. En los diseños actuales se necesita un aporte exterior de energía para que la reacción en cadena se mantenga.
3. Produce más energía por reacción.

También posee desventajas:

1. La reacción más energética es deuterio+tritio, y el tritio es un isótopo muy escaso en la Tierra.
2. Las condiciones necesarias son tan extremas que solo se dan en el centro de las estrellas, por lo que son muy difíciles de alcanzar y controlar.

Las técnicas conocidas de alcanzar las condiciones impuestas por los criterios de Lawson son dos:

- El confinamiento magnético, principalmente en tokamaks como el ITER.
- El confinamiento inercial, mediante el uso de láseres o aceleradores de partículas, como por ejemplo en el National Ignition Facility.

Las partículas alfa, que son emitidas normalmente por elementos con números atómicos superiores a 83, tienen la energía discreta característica de los nucleidos emisores. Así, los emisores α pueden ser identificados midiendo la energía de las partículas α . Las muestras a medir deben ser muy delgadas porque estas partículas pierden rápidamente energía al atravesar el material. Los rayos gamma también tienen la energía discreta característica del nucleido que se desintegra, por lo que la energía de estos rayos también puede usarse para identificar nucleidos. Puesto que los rayos gamma pueden atravesar una cantidad considerable de material sin perder energía, la muestra no tiene que ser delgada. Los espectros de energía de las partículas beta (y los positrones) no son útiles para identificar nucleidos porque se extienden sobre todas las energías hasta un máximo para cada emisor β .

Con frecuencia, las técnicas de física nuclear se emplean para analizar materiales rastreando elementos presentes en cantidades muy pequeñas. La técnica utilizada se llama análisis de

activación. Se irradia una muestra con proyectiles nucleares (normalmente neutrones) para convertir nucleidos estables en nucleidos radiactivos, que luego se miden con detectores de radiación nuclear. Por ejemplo, el sodio de una muestra puede ser detectado irradiando la muestra con neutrones, y convirtiendo así parte de los núcleos estables ^{23}Na en núcleos radiactivos ^{24}Na ; a continuación se mide la cantidad de estos últimos contando las partículas β y los rayos γ emitidos.

El análisis de activación puede medir (sin separación química) cantidades tan pequeñas como 1 nanogramo (10^{-9} g) de unos 35 elementos en materiales como el suelo, las rocas, los meteoritos y las muestras lunares. También puede utilizarse para analizar muestras biológicas, como la sangre y el tejido humano; sin embargo, en los materiales biológicos se pueden observar pocos elementos sin separaciones químicas.

Otras aplicaciones importantes de la física nuclear son el desarrollo de métodos para producir especies radiactivas utilizadas para la diagnosis y los tratamientos médicos. También ha desarrollado los isótopos trazadores que se usan para estudiar el comportamiento químico de los elementos, para medir el desgaste de los motores de automóviles y en otros estudios que emplean cantidades mínimas de material.

La **energía nuclear** o **energía atómica** es la energía que se libera espontánea o artificialmente en las reacciones nucleares. Sin embargo, este término engloba otro significado, el aprovechamiento de dicha energía para otros fines, tales como la obtención de energía eléctrica, energía térmica y energía mecánica a partir de reacciones atómicas, y su aplicación, bien sea con fines pacíficos o bélicos.¹ Así, es común referirse a la energía nuclear no solo como el resultado de una reacción sino como un concepto más amplio que incluye los conocimientos y técnicas que permiten la utilización de esta energía por parte del ser humano.

Estas reacciones se dan en los núcleos atómicos de algunos isótopos de ciertos elementos químicos (radioisótopos), siendo la más conocida la fisión del uranio-235 (^{235}U), con la que funcionan los reactores nucleares, y la más habitual en la naturaleza, en el interior de las estrellas, la fusión del par deuterio-tritio (^2H - ^3H). Sin embargo, para producir este tipo de energía aprovechando reacciones nucleares pueden ser utilizados muchos otros isótopos de varios elementos químicos, como el torio-232, el plutonio-239, el estroncio-90 o el polonio-210 (^{232}Th , ^{239}Pu , ^{90}Sr , ^{210}Po ; respectivamente).

Existen varias disciplinas y/o técnicas que usan de base la energía nuclear y van desde la generación de energía eléctrica en las centrales nucleares hasta las técnicas de análisis de datación arqueológica (arqueometría nuclear), la medicina nuclear usada en los hospitales, etc.

Los sistemas más investigados y trabajados para la obtención de energía aprovechable a partir de la energía nuclear de forma masiva son la fisión nuclear y la fusión nuclear. La energía nuclear puede transformarse de forma descontrolada, dando lugar al armamento nuclear; o controlada en reactores nucleares en los que se produce energía eléctrica, energía mecánica o energía térmica. Tanto los materiales usados como el diseño de las instalaciones son completamente diferentes en cada caso.

Otra técnica, empleada principalmente en pilas de mucha duración para sistemas que requieren poco consumo eléctrico, es la utilización de generadores termoeléctricos de radioisótopos (GTR, o RTG

en inglés), en los que se aprovechan los distintos modos de desintegración para generar electricidad en sistemas de termopares a partir del calor transferido por una fuente radiactiva.

La energía desprendida en esos procesos nucleares suele aparecer en forma de partículas subatómicas en movimiento. Esas partículas, al frenarse en la materia que las rodea, producen energía térmica. Esta energía térmica se transforma en energía mecánica utilizando motores de combustión externa, como las turbinas de vapor. Dicha energía mecánica puede ser empleada en el transporte, como por ejemplo en los buques nucleares.

La principal característica de este tipo de energía es la alta calidad de la energía que puede producirse por unidad de masa de material utilizado en comparación con cualquier otro tipo de energía conocida por el ser humano, pero sorprende la poca eficiencia del proceso, ya que se desaprovecha entre un 86 % y 92 % de la energía que se libera.²

En las reacciones nucleares se suele liberar una grandísima cantidad de energía debido en parte a que la masa de partículas involucradas en este proceso, se transforma directamente en energía. Lo anterior se suele explicar basándose en la relación masa-energía propuesta por el físico Albert Einstein.

En 1896 Henri Becquerel descubrió que algunos elementos químicos emitían radiaciones.³ Tanto él como Marie Curie y otros estudiaron sus propiedades, descubriendo que estas radiaciones eran diferentes de los ya conocidos rayos X y que poseían propiedades distintas, denominando a los tres tipos que consiguieron descubrir alfa, beta y gamma.

Pronto se vio que todas ellas provenían del núcleo atómico que describió Ernest Rutherford en 1911.

Con el descubrimiento del neutrino, partícula descrita teóricamente en 1930 por Wolfgang Pauli pero no detectada hasta 1956 por Clyde Cowan y sus colaboradores, se pudo explicar la radiación beta.

En 1932 James Chadwick descubrió la existencia del neutrón que Pauli había predicho en 1930, e inmediatamente después Enrico Fermi descubrió que ciertas radiaciones emitidas en fenómenos no muy comunes de desintegración eran en realidad estos neutrones.

Durante los años 1930, Enrico Fermi y sus colaboradores bombardearon con neutrones más de 60 elementos, entre ellos ^{235}U , produciendo las primeras fisiones nucleares artificiales. En 1938, en Alemania, Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann verificaron los experimentos de Fermi y en 1939 demostraron que parte de los productos que aparecían al llevar a cabo estos experimentos con uranio eran núcleos de bario. Muy pronto llegaron a la conclusión de que eran resultado de la división de los núcleos del uranio. Se había llevado a cabo el descubrimiento de la fisión.

En Francia, Joliot Curie descubrió que además del bario, se emitían neutrones secundarios en esa reacción, haciendo factible la reacción en cadena.

También en 1932 Mark Oliphant teorizó sobre la fusión de núcleos ligeros (de hidrógeno), describiendo poco después Hans Bethe el funcionamiento de las estrellas basándose en este mecanismo.