

# Physica

## Conceptos fundamentales de Física en 2º de Bachillerato

I.E.S. Aguilar y Cano

El núcleo atómico

J.M.L.C.

### Introducción

La evidencia experimental de la existencia del núcleo se inició con el descubrimiento por **Becquerel** en 1896 de la *radiactividad* de los compuestos de uranio. Dos años después los esposos **Curie** descubrían el radio y el polonio, elementos radiactivos de mayor actividad que el uranio. Con ello se inicia el desarrollo de una nueva ciencia, la física nuclear, cuyos avances son espectaculares a lo largo del siglo XX. Fue **Rutherford** en 1911 el primero que expresó la idea de que los átomos poseen un núcleo cargado (rodeado de electrones) en el que reside la mayor parte de la masa y cuyo volumen es insignificante frente al volumen atómico total. Pero hay que esperar hasta 1932, en que **J. Chadwick** descubre el neutrón, para conocer la composición del núcleo.

A pesar de su pequeñísimo tamaño ( $\sim 10^{-14}$  m) y su situación blindada dentro de los átomos, los núcleos han sido el objeto de una investigación extensa que aún continúa. Estos estudios han proporcionado una amplia información respecto al comportamiento de la materia y han abierto la puerta de los enormes recursos de la energía nuclear. El núcleo es mucho más complejo de lo que Rutherford, Chadwick y otros investigadores de la primera mitad del siglo XX pudieron imaginar.

### Constitución del núcleo

Desde el descubrimiento del neutrón en 1932 por J. Chadwick, se sabe que el núcleo atómico está formado por *neutrones* y *protones*. Ambos tipos de partículas se llaman *nucleones* y poseen prácticamente la misma masa, pero difieren en su carga. El protón posee una carga +e y el neutrón no posee carga alguna. En un átomo neutro el número de electrones en las capas externas

al núcleo coincide con el número de protones del núcleo. Este número, Z, constituye el *número atómico* y caracteriza a un elemento químico de la clasificación periódica de **Mendeleiev**.

Dos o más átomos pueden tener igual número atómico Z, es decir, igual número de protones y electrones y, sin embargo, diferir en el número de neutrones. Estos átomos se denominan *isótopos*. Para distinguir los isótopos de un elemento X, además del número atómico Z, se especifica su *número másico* A, que indica la suma del número de protones y neutrones que contiene,  ${}^A_ZX$ . Así, los isótopos del hidrógeno son  ${}^1_1H$  (protio),  ${}^2_1H$  (deuterio) y  ${}^3_1H$  (tritio), y los de oxígeno,  ${}^{15}_8O$ ,  ${}^{16}_8O$ ,  ${}^{17}_8O$ ,  ${}^{18}_8O$  (por extensión es frecuente designar el protón  ${}^1_1p$ , el neutrón  ${}^1_0n$  y el electrón  ${}^0_{-1}e$ ).

La proporción en la que se encuentran en la naturaleza los isótopos es siempre la misma y recibe el nombre de *abundancia* del isótopo. El núcleo de cualquiera de estos isótopos con un número atómico Z y un número másico A constituye un *nucleido* o *núclido*. El número de neutrones es, por tanto,

$$N = A - Z$$

Las dimensiones del núcleo atómico dependen del número másico A, según la ecuación:

$$r = r_0 A^{1/3}$$

donde r es el radio del núcleo y  $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$  m = 1,2 fermis (1 fermi =  $10^{-15}$  m). En estas dimensiones tan reducidas se encuentra concentrada prácticamente toda

la masa del átomo.

Las masas atómicas y nucleares se miden tomando como unidad  $\frac{1}{12} m({}^{12}_6C)$

que recibe el nombre de unidad de masa

atómica (u). En esta escala  ${}^{12}_6C = 12 u$

y las masas del protón, neutrón y electrón resultan ser, respectivamente:

$$m_p = 1,007277 u$$

$$m_n = 1,008665 u$$

$$m_e = 0,000549 u$$

Así resulta que la masa atómica del H es próxima a 1 u, la del He próxima a 4 u, la del O próxima a 16 u, etc.

### Energía de enlace nuclear

Podría pensarse que la masa M de un núcleo se obtiene sumando Z veces la masa del protón y N veces la masa del neutrón. Sin embargo, la masa total M de un átomo es *siempre* inferior a la suma de las masas de los constituyentes aislados del núcleo.

Consideremos, por ejemplo, el átomo de carbono  ${}^{12}_6C$ . Su núcleo contiene 6 protones y 6 neutrones, y existen 6 electrones orbitales. La masa total de las partículas constituyentes será, por tanto,

$$6 m_p = 6 \times 1,007277 = 6,043662$$

$$6 m_n = 6 \times 1,008665 = 6,051990$$

$$6 m_e = 6 \times 0,000549 = 0,003294$$

$$Total = 12,098946$$

Como la masa  $M_a$  del átomo de  ${}^{12}_6C$  es

#### Contenido

Introducción.....	1
Constitución del núcleo.....	1
Energía de enlace nuclear.....	1
Energía de enlace por nucleón.....	2
Interacción fuerte.....	2
Estabilidad nuclear.....	2

12,000000  $u$ , existe una diferencia de 0,098946  $u$  que se denomina *defecto de masa* del átomo. En general, el defecto de masa  $m$  de un átomo de número másico  $A$ , número atómico  $Z$  y masa atómica  $M_a$  es:

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n + Z m_e - M_a$$

Para ver el significado de este defecto de masa recordemos la equivalencia entre la masa y la energía, según la famosa fórmula de Einstein:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

en donde  $c$  es la velocidad de la luz, de valor  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Esto significa que la pérdida o desintegración de la masa  $m$  se traduce en un desprendimiento de energía  $E$ : 1 kg de materia conduciría así a la producción de  $(3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$ . Del mismo modo se puede demostrar fácilmente que una unidad de masa atómica ( $u$ ) equivale a 931 MeV de energía. Por tanto, el defecto de masa del átomo de carbono es equivalente a 92,12 MeV, llamada *energía de enlace*  $E_e$  del átomo de  $^{12}\text{C}$ . Representa la cantidad de energía que debe suministrarse al átomo para que éste se divida en sus partículas constituyentes. De igual modo, si el átomo se construye a partir de sus componentes, se libera la energía de enlace.

Igualmente, si se prescinde de los electrones orbitales, el *defecto de masa nuclear* se define por la expresión:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_e}{c^2} = Z m_p + (A - Z) m_n - M_N$$

siendo  $M_N$  la masa del núcleo y  $E_e$  la correspondiente energía de enlace nuclear.

## Energía de enlace por nucleón

A veces es útil considerar la energía de enlace por nucleón, es decir,  $\mathcal{A}$ . Para el ejemplo del átomo de  $^{12}\text{C}$ , su valor es:

$$\frac{\Delta E_e}{A} = \frac{92,17}{12} = 7,62 \text{ MeV}$$

pues la diferencia entre el defecto de masa

atómico y el defecto de masa nuclear es despreciable.

Un gráfico del cociente  $\mathcal{A}$  de los elementos en función de  $A$  muestra un máximo en las proximidades del hierro (8,790 MeV/nucleón) y un decrecimiento gradual hacia los elementos más pesados, tales como el uranio (7,591 MeV/nucleón). Los núcleos con la mayor proporción  $\mathcal{A}$  son los más estables. De esta curva se deduce que si los núcleos pesados, tales como el uranio, se dividen en núcleos más ligeros (*fisión*), se libera energía en el proceso. Del mismo modo, la combinación de núcleos ligeros como el hidrógeno y el litio para formar núcleos más pesados ( *fusión*) viene también acompañada de liberación de energía.

Las energías de enlace químicas son mucho más pequeñas. Por ejemplo, la energía del enlace H-H es 4,18 eV; la del C-H en los hidrocarburos es 5,08 eV; la del O-O, 9,76 eV; etc. Estas diferencias de orden de magnitud se encuentran también en las energías desprendidas en las reacciones. Así, la fisión de un núcleo de uranio produce 200 MeV ( $2 \cdot 10^8 \text{ eV}$ ), mientras que una de las explosiones químicas más violentas, el trinitrotolueno (TNT) produce menos de 10 eV por molécula. En resumen, a igualdad de masa, las reacciones nucleares producen energía en un orden superior en varios millones de veces a la producida en las reacciones químicas. Esto es así porque en los procesos químicos normales el núcleo no interviene activamente, ni se modifica. La rotura y formación de enlaces está gobernada por simples fuerzas electromagnéticas; estas interacciones son responsables de todos los fenómenos químicos, incluyendo los procesos biológicos. El alcance es infinito, aunque disminuye la intensidad con el cuadrado de la distancia.

## Interacción fuerte

La fuerza de atracción que actúa entre los nucleones en el núcleo recibe el nombre de *interacción fuerte*. La estabilidad de los núcleos certifica que la interacción fuerte es

de *atracción*, incluso hasta cierta distancia entre los nucleones. La atracción nuclear es mucho más fuerte que la repulsión electrostática de los protones y condiciona la *gran energía de enlace* del núcleo y su estabilidad.

La interacción fuerte es de *corto alcance*. Para distancias entre nucleones de 2,2 fermi la interacción nuclear es ya despreciablemente pequeña. La longitud de 2,2 fermi se denomina *radio de acción de la interacción fuerte*.

La interacción fuerte es *independiente de la carga*: actúa por igual entre protones o entre neutrones que entre protones y neutrones.

La interacción fuerte *no es una fuerza central*. Además de la distancia entre los nucleones, depende de la orientación de sus espines, es decir, si son paralelos o antiparalelos.

Para la interacción fuerte es característica la *saturación*. Ésta se manifiesta en que un nucleón interactúa no con todos los restantes nucleones del núcleo, sino con sólo algunos de sus vecinos más cercanos.

## Estabilidad nuclear

La presencia de neutrones en el núcleo está relacionada con su estabilidad. Excepto el núcleo del hidrógeno  $^1_1\text{H}$ , todos los núcleos poseen al menos un neutrón. El deuterón,  $^2_1\text{H}$ , formado por un protón y un neutrón, es particularmente estable.

Sin embargo, al añadir un neutrón extra se obtiene el  $^3_1\text{H}$  o tritón, núcleo inestable que se desintegra en  $^3_2\text{He}$ . El  $^4_2\text{He}$ , formado por dos protones y dos neutrones, es una de las combinaciones más estables. Este apareamiento de protones y neutrones contribuye evidentemente a la estabilidad. Los núcleos ligeros contienen protones y neutrones en número aproximadamente igual. En cambio, en los núcleos pesados el número de neutrones es siempre superior al de protones. Así, por ejemplo, mientras el núcleo de oxígeno-16 posee 8 protones y 8 neutrones, el núcleo de uranio-238 posee 92 protones y 146 neutrones.

Ver gráfica de estabilidad nuclear.