

EL NÚCLEO ATÓMICO (rc-128)

J. A. Montiel Tosso. IES Séneca (Córdoba)

Este artículo pretende ser el primero de una serie de tres que tratarán de mostrar de una manera sencilla el estado de los conocimientos sobre el núcleo atómico y su constitución, el objeto de estudio de la física de altas energías.

Recordemos que la corteza del átomo concierne al ámbito de la química, pues la configuración electrónica de los mismos es la responsable de sus interacciones para formar los compuestos y, en última instancia, es el tipo de enlace el condicionante clave para justificar las propiedades macroscópicas de las sustancias. Ahora bien, la mecánica cuántica ha establecido el modelo atómico a través del cual interpretamos perfectamente no sólo la estructura atómica, sino cualquier tipo de molécula, por lo que podríamos afirmar que la parte del trabajo que la química ha de aportar al conocimiento de la constitución de la materia ya está hecha. Ahora es el turno de la física nuclear, que ha de ser capaz de explicar tanto la estructura interna del núcleo atómico como la naturaleza de las cuatro fuerzas fundamentales, una tarea muy ambiciosa y difícil, ya que los requerimientos energéticos son tales que nos encontramos en la frontera de los límites de nuestra tecnología.

Este es el reto de la física teórica y experimental del siglo XXI, una empresa ardua que presagia una lucha apasionante para la ciencia a la que asistiremos expectantes.

LOS INICIOS DE LA FÍSICA NUCLEAR

La primera información que se tiene del núcleo atómico aparece con el descubrimiento de la radiactividad en 1896 por el francés Becquerel. Las radiaciones emitidas por ciertos núcleos fueron estudiadas por los físicos durante décadas, envueltas en un halo de misterio. Entre otras, destacan las figuras de Pierre y Marie Curie, premios Nobel de física y de química, quienes descubrieron nuevos elementos radiactivos, además de Ernest Rutherford, que realizó un estudio minucioso de las radiaciones y propuso un nuevo modelo atómico.

Los estudios sobre la radiactividad desembocaron en la fisión del uranio 236, realizada en 1939 por Hahn, Meitner y Strassmann. Tres años después, el grupo dirigido por el premio Nobel Enrico Fermi en la universidad de Chicago construyó el primer reactor nuclear utilizando esta reacción en cadena.

Durante el breve período de tiempo que duró la segunda guerra mundial se produjeron grandes avances en física nuclear. Los mayores físicos del momento, como Böhr, Einstein, Fermi, Gell-Mann, Feynman, entre otros, fueron concentrados

en Los Álamos y dotados con la mayor infraestructura y recursos que jamás ha tenido la investigación científica, en el llamado proyecto Manhattan, para disponer de la bomba atómica antes que Hitler. Este fue el paso definitivo en el desarrollo de dicha disciplina.



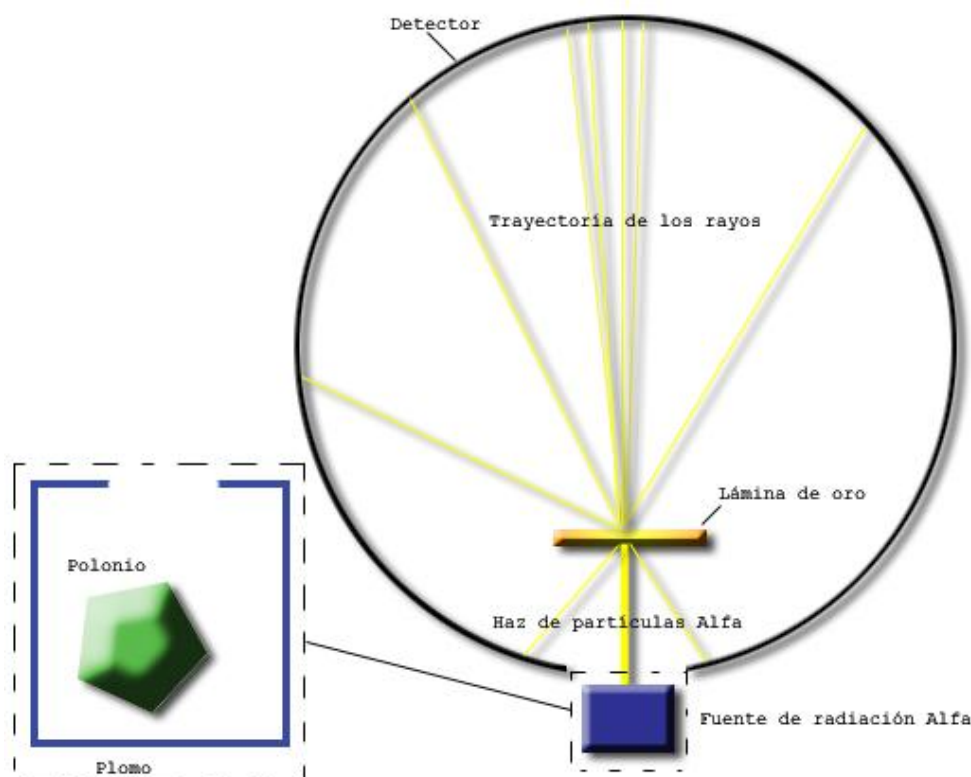
Vista aérea del Laboratorio Nacional de Los Álamos en Nuevo México (EEUU)
(Foto Archivo Wikimedia Commons)

EL NÚCLEO ATÓMICO

La existencia del núcleo atómico fue puesta de manifiesto por primera vez en 1911, por Ernest Rutherford, en su laboratorio de Manchester. Empleó partículas alfa, obtenidas como producto de la desintegración de sustancias radiactivas y posteriormente aceleradas, como proyectiles contra láminas metálicas muy finas. Los resultados del experimento mostraron que la mayoría de las partículas atravesaban la lámina sin desviarse, algunas sufrían determinadas desviaciones y unas pocas incluso retrocedían.

Para justificar esos resultados Rutherford estableció un modelo en el que el átomo consistía esencialmente en espacio vacío. En el centro de ese espacio se encuentra el núcleo, cargado positivamente, que sólo mide aproximadamente una diezmilésima parte del diámetro del átomo, es decir unos 10^{-15} m, donde está concentrada casi toda la masa. También postuló que los electrones viajaban en órbitas alrededor del núcleo, de manera que el número de electrones es igual al de protones, por lo que el estado eléctrico normal del átomo es el neutro.

En 1919, Rutherford expuso gas nitrógeno a una fuente radiactiva que emitía partículas alfa. Algunas de estas partículas colisionaban con los núcleos de los átomos de nitrógeno. Como resultado, estos últimos se transformaban en átomos de oxígeno gracias a la emisión de una partícula positivamente cargada, procedente del núcleo. Se comprobó que esas partículas eran idénticas a los núcleos de átomos de hidrógeno y se las denominó protones. Las investigaciones posteriores demostraron que los protones, que tienen una masa de $1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg, forman parte de los núcleos de todos los elementos.



Experimento de Rutherford (Archivo Wikimedia Commons)

No se conocieron más datos sobre la estructura del núcleo hasta 1932, cuando el físico británico James Chadwick descubrió otra partícula, el neutrón, que tiene casi la misma masa que el protón pero carece de carga eléctrica. Entonces se vio que el núcleo está formado por protones y neutrones, designados conjuntamente por nucleones. Chadwick interpretó correctamente los resultados de los experimentos realizados en aquella época por los físicos franceses Irene y Frédéric Joliot-Curie, entre otros. Ellos habían producido un tipo de radiación anteriormente desconocida mediante la interacción de partículas alfa con núcleos de berilio. Cuando esta radiación se hacía pasar a través de una capa de parafina, las colisiones entre la radiación y los átomos de hidrógeno de la parafina producían protones fácilmente detectables. Chadwick se dio cuenta de que la radiación, hasta entonces desconocida, estaba formada por neutrones. La masa de un neutrón es de $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg,

aproximadamente un 0,125 % mayor que la del protón. Está presente en todos los núcleos, salvo el del hidrógeno ordinario.

En cualquier átomo dado, el número de protones es igual al número de electrones y se denomina número atómico, representado por Z . Por otro lado, a la suma de los protones y neutrones de un átomo se designa como número másico, representado por A . Si llamamos N al número de neutrones, existe una clara relación: $N = A - Z$.

Se utiliza el término núclido o nucleido para designar al conjunto de átomos idénticos entre sí, con el mismo número atómico (Z) y másico (A). Los isótopos son átomos del mismo elemento, lógicamente con el mismo número atómico, pero con diferente número másico, pues tienen diferente número de neutrones. Es decir, son nucleidos de igual Z pero diferente A . En general, los elementos son el resultado de una mezcla de diversos isótopos, siempre en la misma proporción en la naturaleza. Por ejemplo, en el caso del cloro, uno de los isótopos se identifica con el símbolo ^{35}Cl , y su pariente más pesado con ^{37}Cl . Los superíndices identifican el número másico del isótopo. A veces se da el número atómico como subíndice, representándose de esta manera: $^{35}_{17}\text{Cl}$ y $^{37}_{17}\text{Cl}$.

Se conocen unos trescientos núcleos atómicos estables y unos cuatrocientos inestables o radiactivos, de los cuales sólo unos cuarenta se presentan en la naturaleza, de los elementos con número atómico superior a 82. Los restantes se han obtenidos artificialmente a través de reacciones nucleares.

MODELOS NUCLEARES

A pesar de que el estudio del átomo es bastante completo en lo que se refiere a su corteza no podemos decir lo mismo acerca del núcleo, pues aún resulta insuficiente. Existen diversas teorías sobre la estructura interna del núcleo, aunque no se disponen de datos definitivos como para establecer un modelo totalmente satisfactorio.

Desde que fue descubierto el neutrón se desarrolló el primer modelo nuclear por Ivanenko y Heisenberg, de manera independiente, en el que los constituyentes fundamentales eran protones y neutrones. En él se estableció que ambas partículas tienen espín $\frac{1}{2}$ y que el núcleo contiene Z protones y $A-Z$ neutrones. Además, se postuló la existencia de unas fuerzas nucleares lo bastante intensas como para superar la enorme repulsión eléctrica entre los protones, confinados en unas dimensiones del orden de 10^{-15} m. Estas fuerzas debían ser de corto alcance e independientes de la carga y actuar entre protones y neutrones sin distinción. A partir de entonces, se han propuesto distintos modelos nucleares, cada uno de los cuales proporciona una explicación más o menos parcial de ciertos aspectos y fenómenos observables en el núcleo, si bien no existe una teoría global que explique todas las propiedades nucleares.

Hay algo que es evidente: cualquier teoría sobre el comportamiento del núcleo atómico debe explicar el origen y la transmisión de las dos clases de interacciones observadas en la región nuclear del átomo, que denominamos interacción nuclear fuerte e interacción nuclear débil.

La fuerza o interacción nuclear fuerte es la que mantiene unidos los componentes de los núcleos atómicos, y actúa indistintamente entre dos nucleones cualesquiera, protones o neutrones. Su alcance es del orden de las dimensiones nucleares (10^{-15} m), pero es mucho más intensa que la fuerza electromagnética. Actualmente se cree que es debida al intercambio de partículas elementales entre los nucleones, del mismo modo que las fuerzas electromagnéticas se explican mediante el intercambio de fotones entre las partículas cargadas.

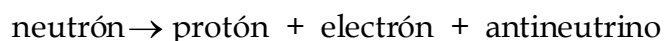
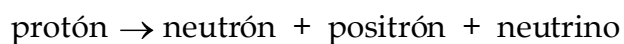
La fuerza o interacción nuclear débil posee una intensidad menor que la fuerza electromagnética, es aproximadamente unas 10^{13} veces inferior a la interacción fuerte y su alcance es aún menor que el de dicha fuerza, o sea, de unos 10^{-18} m. Actúa en procesos nucleares de desintegración espontánea, como la del neutrón cuando se convierte en un protón y un electrón, los cuales se explican hoy día de un modo similar a las interacciones fuertes, mediante el intercambio de partículas virtuales.

Aunque es un campo de estudio todavía ciertamente confuso, podemos establecer, a grandes rasgos, las interpretaciones teóricas más importantes, que ahora resumimos. En cualquier caso, todos los modelos justifican determinados comportamientos del núcleo atómico, pero no satisfacen una teoría general del mismo.

- Teoría protón-protón

Poco después de descubrirse el neutrón se comprobó que el número de estas partículas subatómicas era prácticamente igual al de protones en los átomos ligeros, mientras que en los pesados era claramente mayor. La relación $(A-Z)/Z$ es aproximadamente igual a la unidad en los átomos pequeños, pero se va acercando paulatinamente a 1,6 en los mayores.

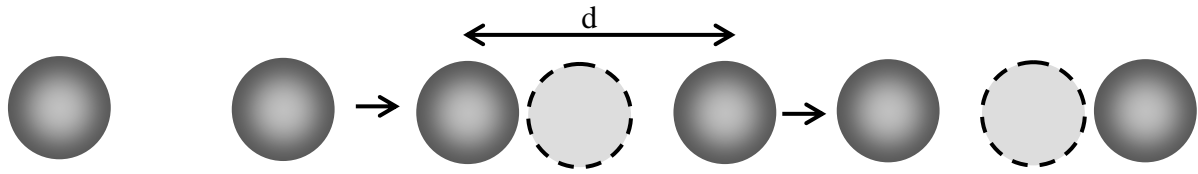
Como resultado de los estudios de Wigner y Goeppert-Mayer entre 1932 y 1940, se confirmó que el núcleo atómico presenta una estructura que contiene sucesivas capas de protones y neutrones unidas por fuerzas complejas. Heisenberg las interpretó como “fuerzas de canje” en procesos de interconversión de un neutrón en un protón más un electrón o bien de un protón en un neutrón más un positrón, con la obligada liberación de energía a cargo de los ya comentados neutrinos, según las reacciones:



donde el positrón es la antipartícula del electrón y el antineutrino lo es del neutrino.

- Teoría mesónica

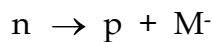
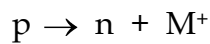
Se debe al japonés Yukawa, que en 1935 interpretó las interacciones fuertes como intercambios de una partícula virtual entre los protones y los neutrones dentro del intervalo tiempo permitido por el principio de incertidumbre para las fluctuaciones cuánticas. De este modo, dichos procesos pueden darse sin que seamos capaces de detectar ninguna violación del principio de conservación de la energía. La condición exigida para la partícula virtual es que posea un tiempo de existencia suficiente para recorrer la distancia d entre los nucleones.



Dos partículas pueden intercambiar una partícula virtual sin violar la conservación de la energía.

Yukawa demostró matemáticamente que si la masa de las partículas virtuales fuese aproximadamente $1/9$ de la masa del protón, el resultado neto del intercambio sería una fuerza lo bastante elevada como para superar la repulsión electromagnética entre dos protones y mantenerlos unidos. Es decir, el intercambio de la partícula virtual produciría la enorme fuerza necesaria para mantener la cohesión del núcleo.

Las reacciones que tienen lugar en el núcleo al formarse neutrones a partir de protones, o viceversa, son:



siendo M^+ y M^- los mesones propuestos por Yukawa, denominados así por requerir una masa intermedia entre la de los nucleones y el electrón.

Posteriormente, los cálculos de Yukawa sobre la masa necesaria fueron confirmados por el descubrimiento de los mesones por Anderson en 1936, en la radiación cósmica secundaria, corroborado algunos años después por Powell y sus colaboradores al detectar en los rayos cósmicos unas partículas de las mismas características que las predichas por Yukawa y que se denominaron mesones pi (o piones). De este modo, ahora se cree que todas las fuerzas son debidas, en última instancia, al intercambio de partículas elementales.

- Modelo de partículas alfa

Está basado en la hipótesis de que las partículas alfa (núcleos de helio, es decir, formadas por dos protones y dos neutrones) constituyen subgrupos o "paquetes" dentro del núcleo, siendo más estables aquellos átomos cuyo número másico sea un múltiplo de cuatro.

- Modelo de la gota líquida

Fue propuesto por Böhrr y Gamow en 1937 para explicar las reacciones nucleares en las que se origina un núcleo compuesto y también para interpretar la fisión nuclear, considerando al núcleo como un objeto hidrodinámico.

Este modelo compara el núcleo atómico con una gota líquida, que posee una tensión superficial definida, en la que los nucleones son retenidos de la misma manera que una gota retiene a las partículas de líquido, conservando una forma esférica, asimilando, de alguna forma, las fuerzas nucleares a las intermoleculares. En este caso, la desintegración nuclear se entiende como un proceso análogo al de la evaporación de moléculas en la superficie de un líquido, comparando el aumento de

temperatura con el aumento en los movimientos de las partículas dentro del núcleo, lo que produce una mayor probabilidad de desintegración.

Los cálculos, basados en la energía debida a la energía volumétrica gracias al contacto entre los nucleones y su apiñamiento, la energía superficial, que es negativa ya que un nucleón situado en la superficie interacciona con menos nucleones que si se halla en el interior, la repulsión coulombiana entre los protones, y otros dos términos como son la energía de asimetría, debida al principio de exclusión de Pauli, y la energía de paridad, que tiene en cuenta la estabilidad adicional cuando hay un número par de nucleones, permiten obtener unos valores de la energía de enlace por nucleón muy ajustados a los experimentales, aunque fallan para ciertos elementos como He, C, O y Ca, entre otros.

- Modelo de capas

Surge al estudiar los valores de los números atómicos y másicos de los núcleos estables, comprobándose que casi todos poseen Z par y A par, encontrándose sólo 8 núcleos con Z y A impares. Estas observaciones sugieren algún tipo de unión por separado entre protones y neutrones que afecta a la estabilidad nuclear. Hay un efecto aún más específico, pues existe un conjunto de núcleos particularmente estables y abundantes en la naturaleza, que poseen los siguientes números “mágicos” de protones y neutrones: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Estos datos cristalizaron en un modelo de capas del núcleo, es decir, un esquema de niveles de energía según el cual los nucleones se hallan distribuidos en orbitales, de modo semejante a como se hallan los electrones en la corteza.

Hay ciertas diferencias con el modelo mecano-cuántico de los electrones. Por ejemplo, los nucleones tendrán un número cuántico adicional, el isospín, cuya proyección nos distinguirá entre protones y neutrones. Además, sólo se consideran la interacción entre dos nucleones, pues la probabilidad de que lo hagan tres es muy baja.

Determinadas propiedades, como el valor de los espines nucleares, la elevada diferencia entre los períodos de semidesintegración de los núcleos emisores de partículas alfa, la emisión de rayos gamma, se pueden justificar adecuadamente por este modelo, aunque otras, como los valores de los momentos magnéticos predichos por la teoría, no se corresponden con los datos experimentales.

- Modelo cuadrupolar

Se preocupa de la distribución de carga y, en cierta manera, de la “forma” del núcleo. Así, un núcleo perfectamente esférico ejerce una fuerza eléctrica sobre sus electrones corticales, que puede calcularse por la ley de Coulomb. No obstante, si los protones no se agrupan de forma esférica se dice que el núcleo posee un momento cuadrupolar eléctrico debido a la asimetría en la distribución de carga y aparecerá además sobre los electrones una fuerza cuadrupolar eléctrica. A pesar de su pequeño efecto, es posible obtener una medida del momento cuadrupolar con la que establecer la forma del núcleo. Se han encontrado varios núcleos con momento cero, que son por tanto esféricos, como H, O, Ca, Ni, Sn y Pb, mientras que los otros presentan una distribución de carga ligeramente alargada. En cualquier caso el

alejamiento de la forma esférica no es nunca extremo, siendo la razón del semieje mayor al semieje menor generalmente inferior a 1,2.

- Modelo estándar

En los últimos años se ha desarrollado el modelo de quarks o modelo estándar que ofrece un planteamiento muy distinto. Actualmente se piensa que los nucleones no son realmente partículas elementales sino que se hallan a su vez constituidos por algunas de las seis partículas realmente elementales, denominadas quarks, de carga eléctrica fraccionaria. El concepto de quark fue propuesto independientemente en 1963 por los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig.

Al principio se pensó que existían tres tipos de quark: up (u, arriba), down (d, abajo) y strange (s, extraño). Se cree, por ejemplo, que el protón está formado por dos quarks up y un quark down y el neutrón por un quark u y dos del tipo d, los cuales se mantienen unidos por otro tipo de partículas elementales llamadas gluones, responsables de la interacción fuerte.

Más tarde, los teóricos postularon la existencia de un cuarto quark, confirmado experimentalmente en 1974 y denominado charm (c, encanto). Posteriormente se planteó la hipótesis de un quinto y un sexto quark, llamados respectivamente bottom (b, fondo) y top (t, cima), por razones teóricas de simetría. En 1977 se obtuvieron pruebas experimentales de la existencia del quark bottom, pero el quark top no fue hallado por los investigadores hasta 1995, cuando los físicos del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), en Estados Unidos, anunciaron que habían encontrado pruebas experimentales de su existencia.

Este modelo propone otro tipo de bosones para transmitir la interacción débil, responsable de la desintegración beta y otros fenómenos similares. Son los bosones W^+ , W^- y Z , el último de los cuales fue detectado en el CERN en 1989.



CERN desde el aire. (Web de flickr)

ENERGÍA DE ENLACE NUCLEAR

Cuando los neutrones y protones se combinan para formar un núcleo existe una liberación de energía, producida por una ligera pérdida de masa. Esta es la que llamamos energía de enlace nuclear. Así pues, el núcleo es más estable, es decir, menos energético, que el conjunto de sus nucleones aislados, ya que al formarse se libera energía.

En efecto, podría pensarse que la masa de un núcleo se obtiene sumando Z veces la masa del protón y N veces la masa del neutrón. Sin embargo, la masa total de un átomo es siempre inferior a la suma de las masas de los constituyentes aislados del mismo. En general, el defecto de masa Δm de un átomo de masa atómica A y número atómico Z y de masa m se calcula mediante la ecuación: $\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n + Z \cdot m_e - m$, siendo m_p , m_n y m_e las masas en reposo del protón, neutrón y electrón, respectivamente.

Para entender el significado de dicho defecto de masa hemos de recordar la equivalencia entre la masa y la energía según la mecánica relativista.

Aplicando el principio de conservación de la cantidad de movimiento, que, como sabes, es una ley inquebrantable de la física, Einstein dedujo que la masa de una partícula en movimiento depende de su velocidad de acuerdo con la expresión:

$$m = m_0 \gamma$$

donde m_0 es la masa de la partícula en reposo y γ es el factor que aparece en las transformaciones de Lorentz y cuyo valor es siempre mayor o igual a 1. Es decir, se acerca a la unidad conforme la velocidad se hace menor. Como puede comprobarse en la expresión de γ . en los objetos macroscópicos, su velocidad es mucho menor que c , quedando $\gamma = 1$, por lo que su masa en movimiento coincide con la masa en reposo, como estamos acostumbrados a observar.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Según la fórmula anterior de m , cuando una partícula gana velocidad, aumenta su masa. Lo que sucede, como puede derivarse de dicha fórmula y de la expresión clásica de la energía cinética, es que el incremento de masa que experimenta la partícula se acumula en forma de energía cinética relativista, cuya expresión es:

$$E_C = \Delta m c^2$$

siendo Δm el aumento de masa debido a la velocidad y c la velocidad de la luz.

Esa fórmula relaciona la masa y la energía cinética de una partícula relativista. Y de ella podemos derivar otra relación similar entre la energía total de dicha partícula y su masa. Es la consecuencia más conocida de la teoría de Einstein, la equivalencia masa-energía.

Si partimos de la fórmula de la energía cinética relativista de una partícula de masa en reposo m_0 y masas en movimiento m , tenemos que:

$$E_C = \Delta m c^2$$

$$E_C = (m - m_0) c^2$$

$$E_C = m c^2 - m_0 c^2$$

El término $m_0 c^2$ es la energía en reposo de la partícula, la que se asocia con su masa en reposo, que designaremos por E_0 .

Por lo tanto, $E_C = m c^2 - E_0$

De donde: $m c^2 = E_C + E_0$.

El término $m c^2$ representa la suma de la energía cinética relativista de una partícula y su energía en reposo, por lo tanto constituirá justamente la energía relativista total que buscamos y que designaremos por E . O sea,

$$E = E_C + E_0 = m c^2 \quad \Rightarrow \quad E = m c^2$$

donde E es la energía total relativista y m es la masa de la partícula en movimiento. Dicha fórmula constituye la famosa ecuación de Einstein tantas veces utilizada en la física de partículas y en las reacciones nucleares, que nos muestra la equivalencia entre la masa y la energía.

En definitiva, el defecto de masa del átomo es equivalente a la energía de enlace nuclear. Según aquella relación de Einstein, la energía de enlace es igual a la pérdida de masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. Por un

sencillo cálculo se obtiene que la energía equivalente a una unidad de masa atómica es de 933 MeV.

La energía de enlace es una forma de energía potencial. Podemos asociarla, por tanto, a un campo conservativo: el campo nuclear fuerte, al cual, como ya hemos señalado, le corresponde una fuerza atractiva muy intensa cuando la distancia entre nucleones es pequeña, del orden de magnitud nuclear. Ello explica la estabilidad del núcleo a pesar de la fuerte repulsión electrostática que existe entre los protones.

Los átomos más estables son los que tienen una mayor energía de enlace promedio por partícula nuclear, calculada al dividir la energía de enlace por el número másico. Si analizamos la dependencia entre la energía media de enlace por nucleón frente al número másico se observa un crecimiento rápido hasta un máximo en el hierro y un decrecimiento gradual hacia los elementos más pesados, tales como el uranio. Los valores experimentales de esta magnitud, exceptuando los isótopos del hidrógeno, varían entre unos 6 y 8 MeV.

Los núcleos con mayor proporción E/A son los más estables. Por ello, si los núcleos pesados, tales como el uranio, se dividen en núcleos ligeros (reacciones de 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 (reacciones de fusión) viene acompañada de liberación de energía. Comparativamente, las energías de enlace químicas son mucho más pequeñas. A igualdad de masa, las reacciones nucleares producen energía del orden de varios millones de veces superior a la producida en las reacciones químicas, y en ello reside el interés de la energía nuclear como fuente de energía muy aprovechable dada la enorme demanda que existe en la sociedad actual.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALONSO, M. y FINN, E. J. Física. Fundamentos cuánticos y estadísticos. Vol. III. Editorial Fondo educativo interamericano.

CARTMELL, E. Y FOWLES G. Valencia y estructura molecular. Editorial Reverté. Barcelona.

DELGADO, R. Y RUIZ, F.A. Historia de la física. Universidad de Cienfuegos. Cuba.

DIAZ PEÑA, M. y ROIG MUNTANER. Química Física. Editorial Alhambra. Madrid.

ENCICLOPEDIA ENCARTA MICROSOFT 2002.

FIDALGO, J. A. y FERNÁNDEZ M. Física General. Editorial Everest. León.

TIPLER, P. A. Física. Editorial Reverté. Barcelona.

WIKIPEDIA.ORG.