

**CURSO DE QUIMICA NUCLEAR**  
**AGOSTO 2003**  
**CATEDRA DE RADIOQUIMICA, FACULTAD DE QUIMICA**

**NÚCLEO ATÓMICO**

**DRA ANA M REY**

El núcleo es la parte del átomo que contiene toda su carga positiva y la mayor parte de su masa. Ocupa una región muy pequeña dentro del mismo, ya que su radio es de aproximadamente  $10^{-15}$  m, varios órdenes de magnitud inferior al radio atómico (aprox.  $10^{-10}$  m).

El átomo es la porción más pequeña de un elemento químico que retiene sus propiedades, y su nombre, proveniente del griego, significa “indivisible”. Sin embargo, los experimentos realizados bombardeando finas hojas de metal con partículas positivamente cargadas (partículas  $\alpha$ ) y midiendo su desviación (Rutherford, 1911) demostraron que dentro del átomo existe una zona positivamente cargada y sumamente densa, el núcleo. La carga negativa necesaria para que el átomo sea neutro es aportada por los electrones (Thomson, 1897), los que se distribuyen en la periferia en distintos niveles de energía.

El núcleo está compuesto por dos tipos de partículas, protones y neutrones, colectivamente denominados nucleones. Los protones (Rutherford, 1919) son partículas positivamente cargadas mientras que los neutrones (Chadwick, 1932) carecen de carga eléctrica. La carga del protón es igual en magnitud a la del electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$  C) pero su masa es aprox. 1836 veces mayor ( $1.6726 \times 10^{-27}$  Kg.). La cantidad de protones es igual al número atómico (Z) del elemento. El neutrón tiene una masa similar a la del protón ( $1.675 \times 10^{-27}$  Kg.) y su cantidad (N) puede variar aun en átomos del mismo elemento. La suma de neutrones y protones (A) es el número de nucleones, anteriormente denominado número másico.

La distribución de los nucleones en el núcleo determina su estado energético. Existe un estado fundamental (de mínima energía) y otros alternativos de mayor energía (estados excitados). El pasaje de un núcleo excitado al estado fundamental (desexcitación) está acompañado por la emisión de un fotón (radiación  $\gamma$ ).

El número de protones del núcleo (Z) identifica al elemento químico. Todos los átomos con igual Z tienen iguales propiedades químicas. Sin embargo, no todos los núcleos con igual Z tienen las mismas propiedades. Por este motivo es necesario definir una nueva unidad, el NUCLEIDO.

Un nucleido es un tipo de átomo cuyo núcleo tiene un número determinado de protones y de neutrones y un estado energético definido. El número de elementos conocidos hasta el momento es cercano a los 120. Los nucleidos, en cambio, son muchos más, alrededor de 2000. Esto significa que átomos del mismo elemento pueden corresponder a nucleidos diferentes. Es el caso de los ISÓTOPOS, átomos con igual Z, que tienen diferente cantidad de neutrones en su núcleo, y por lo tanto difieren en N y en A. Los isótopos tienen iguales propiedades químicas pero diferentes propiedades nucleares. Todos los elementos conocidos tienen varios isótopos. Por ejemplo, existen 3 isótopos del elemento Hidrógeno  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  y al menos 14 para el Calcio, desde el  $^{37}\text{Ca}$  al  $^{50}\text{Ca}$ . Otras categorías de nucleidos son los isóbaros, isótonos e isómeros. Los ISÓBAROS son nucleidos con el mismo número de nucleones (A constante) pero

diferente cantidad de protones y por ende de neutrones, por ejemplo  $^{90}_{39}\text{Y}$  ( $Z = 39$ ,  $N = 51$ ) y  $^{90}_{38}\text{Sr}$  ( $Z = 38$ ,  $N = 52$ ). Pertenecen a elementos diferentes. Los ISÓTONOS, en cambio, tienen el mismo número de neutrones y diferente cantidad de protones. Tienen, por lo tanto, distinto  $A$ . También pertenecen a elementos diferentes. Por ejemplo,  $^{90}_{39}\text{Y}$  y  $^{89}_{38}\text{Sr}$  tienen ambos 51 neutrones y son, por lo tanto, isótonos. Los ISÓMEROS son nucleidos con los mismos  $A$  y  $Z$  pero diferente estado energético. Es el caso de  $^{46\text{m}}\text{Sc}$  y  $^{46\text{g}}\text{Sc}$  ( $^{46\text{g}}\text{Sc}$ ). La "m" identifica al isómero metaestable, mientras que el estado fundamental se señala con una "g" (ground) o más comúnmente sólo con el  $A$ . Por convención los isómeros metaestables son aquellos nucleidos, cuyo período de semidesintegración ( $t_{1/2}$ ) es mayor a 1 microsegundo, mientras que los de  $t_{1/2}$  menor se denominan "estados excitados".

## PROPIEDADES NUCLEARES:

### *RADIO NUCLEAR*

Al pensar en el núcleo atómico generalmente nos imaginamos que el mismo es una esfera dentro de la cual se ubican los nucleones. El radio nuclear sería, entonces, la distancia entre el centro y la superficie de dicha esfera.

Sin embargo, en el ámbito subatómico rigen las leyes de la mecánica cuántica, en particular el principio de incertidumbre, el que indica que no es posible saber exactamente donde se encuentra cada nucleón en un momento dado. Sólo podemos conocer la probabilidad de que un nucleón se encuentre en determinada posición en un cierto instante. Dicha probabilidad no cae a cero bruscamente sino que disminuye gradualmente al alejarnos del centro de la esfera. Por lo tanto el núcleo no tiene un borde definido sino una superficie difusa y el término "radio nuclear" adquiere un significado distinto al habitual.

La figura 1 muestra una representación esquemática del núcleo, formado por protones y neutrones densamente empaquetados. Esa densidad de empaquetamiento es máxima en el centro y disminuye hacia los bordes.

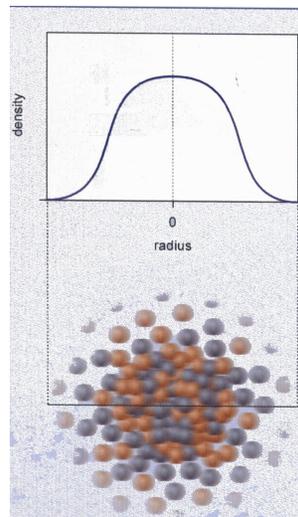


Figura 1

La gráfica densidad versus distancia (Figura 2) tiene una forma característica y, en consecuencia, se define convencionalmente el radio nuclear como la distancia al centro para la cual la densidad disminuye a la mitad (radio medio).

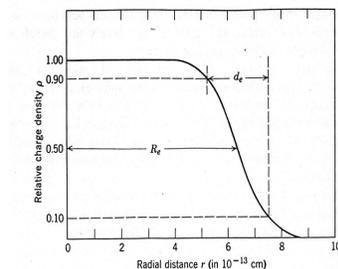


Figura 2

Si estudiamos la variación del radio nuclear al aumentar el número de nucleones, observamos que se cumple la siguiente ecuación general:

$$r = r_0 (A)^{1/3} \text{ (ecuación 1)}$$

donde  $r_0$  es una constante independiente de  $A$ . Su magnitud varía entre  $1.1$  a  $1.6 \times 10^{-15}$  m, dependiendo del método empleado en la medida del radio nuclear.

De la ecuación 1 podemos extraer varias conclusiones. La primera es que la densidad de todos los núcleos es aproximadamente constante. Si consideramos al núcleo como una esfera, su volumen será proporcional al radio elevado al cubo, o sea proporcional al número de nucleones ( $V \propto A$ ). La masa de un núcleo también es aproximadamente proporcional al número de nucleones (ya que la masa de protón y neutrón son casi iguales) y por lo tanto la densidad ( $D = m/V$ ) es una constante independiente de  $A$ . Este hecho indica que los nucleones se encuentran densamente empaquetados en el núcleo ocupando un volumen igual a la suma de sus volúmenes individuales.

La densidad nuclear calculada es de  $1,2 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>. Si comparamos esta cifra con la del elemento más denso conocido, el osmio, cuya densidad es  $22,6$  g / cm<sup>3</sup>, deducimos que los núcleos son  $10^{13}$  veces más densos que los átomos de los que forman parte, debido a que los electrones representan una mínima porción de la masa distribuida en la mayor parte del volumen atómico. La alta densidad nuclear tiene como consecuencia que en todos los núcleos con  $Z > 1$  exista una elevada repulsión electrostática entre los protones, ya que el núcleo concentra una elevada carga positiva en un muy pequeño espacio. Esta repulsión constituye un factor de inestabilidad intrínseca del núcleo atómico. Por lo tanto, para que el mismo pueda existir y ser estable es necesario que exista una intensa fuerza atractiva entre los nucleones que contrarreste dicha repulsión. Esta fuerza se denomina FUERZA NUCLEAR y sus propiedades serán discutidas más adelante.

Ya se mencionó que el valor de  $r_0$  depende del método empleado en la determinación del radio nuclear. Es obvio que un valor tan pequeño no puede medirse en forma directa y que es necesario diseñar experimentos que permitan calcularlo indirectamente. La forma más sencilla de hacerlo es bombardear el núcleo con

partículas que interaccionen con él. La magnitud de dicha interacción y su variación con la distancia permiten calcular el radio nuclear. Si la partícula seleccionada es el electrón la interacción será de tipo Coulómbico debido a la carga eléctrica del electrón y del núcleo. El resultado obtenido refleja la distribución de los protones dentro del núcleo, es decir la densidad de cargas positiva. Cuando utilizamos, en cambio, el neutrón como partícula de prueba no existe ninguna interacción de tipo electrostático pero el neutrón experimenta la fuerza atractiva ejercida sobre él por los nucleones. Esta fuerza es la fuerza nuclear ya mencionada. El radio calculado de esta forma refleja el rango de acción de estas fuerzas y es ligeramente mayor que el radio de distribución de cargas.

Los experimentos de bombardeo del núcleo con partículas sensibles a la acción de las fuerzas nucleares, protones y neutrones, permiten estudiar la variación de la energía potencial en el núcleo atómico. Si la partícula incidente es un protón, su energía cinética disminuirá al acercarse debido a la repulsión generada por su carga positiva. La energía potencial aumentará concomitantemente. Al llegar a una distancia de aproximadamente  $10^{-15}$  m la fuerza nuclear atraerá fuertemente al protón hacia el núcleo. La energía cinética aumenta bruscamente y la potencial disminuye en proporción (Figura 3).

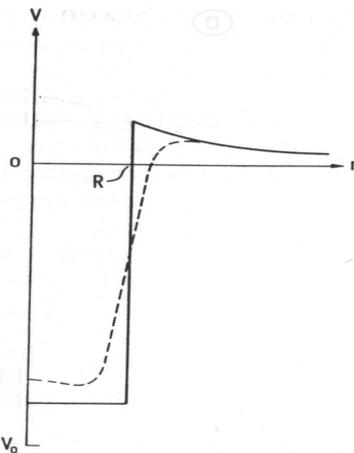


Figura 3

Por este motivo, el núcleo puede considerarse como un pozo de potencial en el que se encuentran ubicados los nucleones, ocupando diferentes niveles de energía. Existe una barrera que debe superarse para que el protón ingrese o salga del núcleo. Lo mismo ocurrirá para otras partículas positivamente cargadas. Esta barrera se denomina BARRERA DE POTENCIAL. Su altura está determinada por la magnitud de la repulsión Coulombiana entre los protones nucleares y la partícula incidente, siendo directamente proporcional a la carga de ambos e inversamente proporcional al "radio de contacto" núcleo-partícula. No existe barrera de potencial para el ingreso o la salida de neutrones, ya que éstos carecen de carga eléctrica.

### *ESTABILIDAD NUCLEAR*

El núcleo atómico es, por la naturaleza de las partículas que lo constituyen, intrínsecamente inestable. Sin embargo, existen al menos 275 nucleidos estables y los que son inestables experimentan transformaciones tendientes a aumentar esta

estabilidad, sin que ello implique la destrucción de su núcleo. La razón de esta aparente contradicción es la existencia de la fuerza nuclear.

Se trata de una fuerza atractiva, sumamente intensa (su magnitud es 100 veces superior a la de las fuerzas electrostáticas y  $10^{35}$  veces la de las gravitacionales). Es independiente de la carga eléctrica, o sea que la fuerza protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son iguales. A diferencia de la repulsión electrostática que disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia entre las partículas pero sin llegar nunca a anularse completamente, la fuerza nuclear es aproximadamente constante hasta una distancia del orden de  $10^{-15}$  m, cayendo bruscamente a 0 a distancias mayores. Este corto rango de acción determina que el núcleo sea tan pequeño con relación al radio atómico.

La fuerza nuclear es una de las 4 interacciones fundamentales de la naturaleza (gravitacionales, electromagnéticas, fuertes y débiles) y actualmente se acepta que resultan del intercambio de las partículas virtuales que se han denominado gluones (glue, significa pegamento en inglés), por actuar éstas como "cemento" de los quarks, que componen los nucleones, como se verá más adelante. Las partículas virtuales no existen en todo momento dentro del núcleo sino que aparecen y desaparecen en períodos cortos sin violar el principio de conservación de la energía, ya que cumplen con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Como vemos, el núcleo es mucho más complejo que un simple aglomerado de protones y neutrones.

Cuando la fuerza nuclear supera la repulsión electrostática el núcleo es estable. Este balance entre atracción y repulsión depende fundamentalmente de la cantidad de protones y de neutrones que posea el núcleo. La Figura 4 muestra una gráfica Z versus N para todos los nucleidos estables. No se trata de una línea sino de una banda denominada CINTURÓN DE ESTABILIDAD, ya que casi todos los elementos poseen varios isótopos estables.

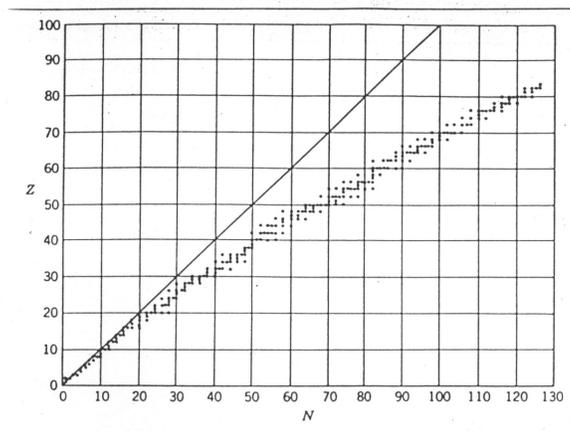


Figura 4

Para los elementos livianos ( $Z \leq 20$ ) basta una cantidad igual de neutrones y protones para que los núcleos resulten estables, es decir  $N / Z$  cercana a 1. Por lo tanto, los nucleidos estables que corresponden a los elementos más livianos se disponen aproximadamente sobre la recta  $N = Z$ . Ejemplos característicos son el carbono ( $Z=6$ ), cuyos isótopos estables son el  $^{12}\text{C}$  ( $N/Z=1$ ) y el  $^{13}\text{C}$  ( $N/Z=1.167$ ) o el oxígeno ( $Z=8$ ) en cuyo caso el  $^{16}\text{O}$  ( $N/Z=1$ ), el  $^{17}\text{O}$  ( $N/Z=1.125$ ) y el  $^{18}\text{O}$  ( $N/Z=1.25$ ) son estables.

Cuando estudiamos los átomos con  $Z$  comprendido entre 20 y 83 observamos que el número de neutrones necesario para alcanzar la estabilidad nuclear aumenta. Al aumentar  $Z$  y por tanto el número de protones, se incrementa notoriamente la repulsión. Los neutrones contribuyen a contrarrestar esa creciente repulsión pues aportan fuerza atractiva sin aportar repulsión. Además separan a los protones contribuyendo así a disminuir la repulsión por aumento de la distancia. La relación  $N/Z$  óptima varía entre 1 y 1.5 aproximadamente. Como ejemplos podemos citar el caso del Arsénico ( $Z = 33$ ) cuyo isótopo estable, el  $^{75}\text{As}$  tiene 42 neutrones ( $N/Z = 1.27$ ) o el Cesio ( $Z = 55$ ) que alcanza la estabilidad con una relación  $N/Z$  de 1.42 ( $^{133}\text{Cs}$ ).

El efecto de la repulsión creciente se hace cada vez más notable al tomar  $Z$  valores crecientes, por lo que no es posible neutralizar la repulsión que generan 84 o más protones por agregado de más neutrones. La presencia de suficientes neutrones para contrarrestar la repulsión resultaría en un núcleo demasiado grande y esto es inviable debido al corto rango de acción de las fuerzas nucleares. Por este motivo todos los isótopos de todos los elementos cuyo  $Z$  es mayor a 83 (bismuto) son radiactivos. Además todos los isótopos del Tecnecio ( $Z = 43$ ) y del Prometio ( $Z = 61$ ) son también radiactivos. Por lo tanto de los 117 elementos conocidos hasta hoy, solamente 81 poseen isótopos estables.

Si se analiza el número de protones ( $Z$ ) y el número de neutrones ( $N$ ) que posee cada uno de los nucleidos estables, se observa que más de la mitad (162) tienen  $N$  y  $Z$  par y solamente 5 tienen  $Z$  y  $N$  impar. A su vez 55 tienen  $Z$  par y  $N$  impar y 49  $Z$  impar y  $N$  par. Esta distribución de frecuencias no corresponde a un comportamiento estadístico al azar. Por el contrario, indica que la combinación de número de protones pares con número de neutrones pares es particularmente estable, mientras que la combinación de  $Z$  y  $N$  impares debe ser especialmente inestable. Por otra parte los núcleos que tienen 2, 8, 20, 50, 82 o 126 protones o neutrones, son por lo general más estables que los que presentan otros valores de  $Z$  o  $N$ . A esas cifras de nucleones se les denomina NUMEROS MAGICOS. Por ejemplo el estaño ( $Z = 50$ ) tiene 10 isótopos estables, mientras que el antimonio ( $Z = 51$ ) sólo tiene 2. Se ha visto que los nucleidos que presentan números mágicos de protones y de neutrones son especialmente estables y abundantes en la Tierra. Por ejemplo  $^4\text{He}$  ( $Z = 2$ )  $^{16}\text{O}$  ( $Z = 8$ )  $^{40}\text{Ca}$  ( $Z = 20$ )  $^{208}\text{Pb}$  ( $Z = 82$ ). Estas evidencias sirven en parte de base al modelo nuclear de capas, que asume que los nucleones se distribuirían dentro del núcleo ocupando niveles de energías independientes para protones y neutrones, análogamente a la distribución de los electrones periféricos en el modelo atómico de Bohr.

Todos los nucleidos que caen fuera del cinturón de estabilidad sufren transformaciones que tienden a aumentar la estabilidad de sus núcleos. Estas transformaciones dan lugar al fenómeno de la radiactividad. Sin embargo, en ningún caso el núcleo inestable se separa liberando los nucleones que lo constituyen.

En la naturaleza existe una tendencia a alcanzar el estado de menor energía posible. Por lo tanto, la unión de los protones y neutrones para formar el núcleo debe ser más favorable desde el punto de vista energético que su existencia por separado. Esta suposición se ve confirmada por la constatación de que la masa atómica de cualquier nucleido (estable o no) es menor que la suma de las masas de los protones, neutrones y electrones que lo constituyen. La diferencia, denominada DEFECTO DE MASA ( $\Delta m$ ), no se perdió sino que se transformó en energía en el proceso de formación del átomo a partir de sus partículas constituyentes. Esa energía es la que mantiene los nucleones unidos dentro del núcleo y por eso se le denomina ENERGIA DE LIGADURA ( $E_L$ ). También puede interpretarse como la energía que debería aportarse al sistema (átomo)

para convertirlo en partículas aisladas, es decir que un valor alto de  $E_L$  indica un nucleido más estable que otro cuyo valor de  $E_L$  es menor.

La conversión de masa en energía o de energía en masa es un fenómeno corriente a escala atómica y nuclear. La masa es, en realidad, una forma de energía y el principio clásico de conservación de la energía debe extenderse para abarcar al par masa-energía. La conocida ecuación de Einstein  $E = m c^2$  ( $c$  es la velocidad de la luz en el vacío  $2,998 \times 10^8$  m/s), permite cuantificar esta interconversión. Debemos, por lo tanto, tener presente que cada vez que se produzca un proceso que libere energía la masa del sistema disminuirá en una cantidad equivalente. Si suministramos, en cambio, energía al sistema su masa aumentará. Este fenómeno no es exclusivo de la Química Nuclear. En las reacciones químicas también se produce transformación de masa en energía y viceversa pero los valores de energía usuales son tan bajos que los cambios de masa resultan indetectables.

En Química Nuclear se utiliza una unidad de Energía diferente a las habituales (Joule, Kcal) debido a que los intercambios energéticos son cientos de miles a millones de veces mayores a los involucrados en las reacciones químicas. La unidad empleada es el electrón-Voltio (eV) o sus múltiplos,  $\text{KeV} = 10^3 \text{ eV}$  y  $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$ . Un eV es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado en campo eléctrico cuya diferencia de potencial es 1 Volt. Además, en las reacciones nucleares el intercambio energético es tan grande que se expresa como Energía /átomo o molécula, en lugar de referirse a moles como ocurre en las reacciones químicas.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} / \text{átomo} = 23,045 \text{ kcal} / \text{mol} = 96,485 \text{ kJ} / \text{mol}$$

La unidad de masa más habitual es la uma, definida tomando como convención que la masa de 1 átomo de  $^{12}\text{C}$  es 12.000 umas ( $1 \text{ uma} = 1,66053 \times 10^{-24} \text{ g}$ ). Utilizando la ecuación de Einstein podemos calcular el equivalente energético de 1 uma. Sabiendo que  $1 \text{ uma} = 1,66053 \times 10^{-24} \text{ g}$  y que  $1 \text{ erg} = 6,242 \times 10^{11} \text{ eV}$  se deduce que  $1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV}$ . Esta equivalencia masa-energía es muy importante e implica que siempre que "desaparezca" en una reacción nuclear 1 uma, necesariamente "aparecerá" 931,5 MeV de energía o a la inversa, para crear una partícula cuya masa sea de 1 uma se deberá consumir dicha cantidad de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Energía de Ligadura puede calcularse como  $E_L (\text{MeV}) = \Delta m \times 931,5$  (con  $\Delta m$  en uma)

Para el ejemplo de  $^{12}\text{C}$

$$E_L = \Delta m \times 931,5 = (6 m_e + 6 m_p + 6 m_n - m_{^{12}\text{C}_6}) \times 931,5 = (6 \times 0,0005486 + 6 \times 1,0072766 + 6 \times 1,008665 - 12,000) \times 931,5 = 92,166 \text{ MeV}$$

Para comparar la estabilidad de diferentes nucleidos entre sí, no sería válido usar la  $E_L$  global, ya que si en un caso dicha energía estuviera almacenada para mantener unidos a unos pocos nucleones y en otro nucleido para ligar muchas partículas, ambos nucleidos aunque tuvieran el mismo valor de  $E_L$ , serían, sin duda, de muy diferente estabilidad. Por eso para comparar nucleidos se utiliza el valor de  $E_L/A$  que se denomina ENERGIA DE LIGADURA POR NUCLEON, que se obtiene dividiendo  $E_L$  entre el número de nucleones ( $A$ ). Si se grafica  $E_L / A$  vs  $A$  se obtienen curvas como las que se observan en las Figuras 5 y 6.

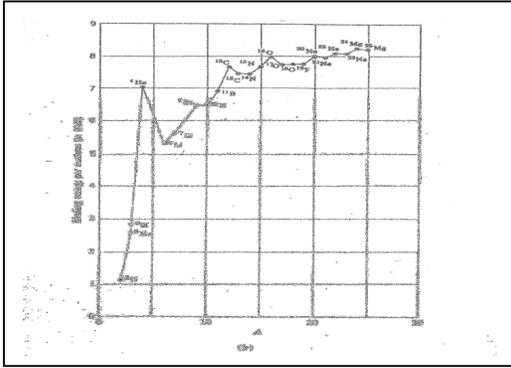


Figura 5

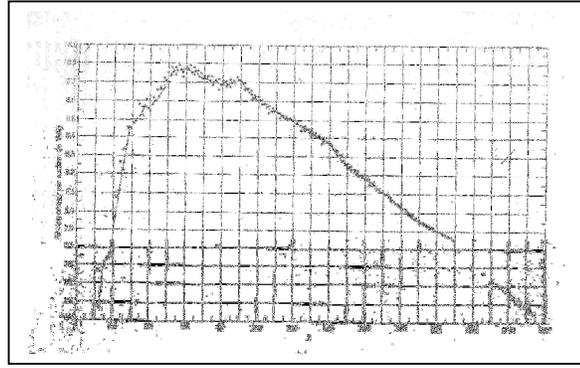


Figura 6

De las gráficas se puede concluir que:

- 1) a partir de  $A = 11$  todos los valores de  $E_L/A$  están en el rango 7,4-8,8 MeV / nucleón
- 2) los máximos valores se encuentran en la zona de  $A=60$  y corresponden a elementos especialmente abundantes en la corteza terrestre (Fe, Ni)
- 3) como todos los procesos que ocurren espontáneamente son aquéllos que parten de un estado más inestable y conducen a un estado de mayor estabilidad, serán posibles los procesos nucleares que conduzcan a productos de mayor  $E_L/A$  que sus reactivos. La existencia de una región máxima en el centro de la curva explica por qué pueden ser espontáneos tanto la fusión como la fisión nucleares a pesar de ser procesos esencialmente opuestos, ya que ambos implican un aumento de dicha magnitud.

En la FISIÓN NUCLEAR a partir de un núcleo pesado, por ejemplo de  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  u otro de la misma zona de  $A$ , se generan 2 núcleos medianos cuyos  $A$  están en la zona de 140 y 90 que corresponden a  $E_L/A$  mayores que la del núcleo pesado original. En una reacción de FUSIÓN NUCLEAR típica, dos núcleos de deuterio ( $^2\text{H}$ ) se unen para generar un núcleo de  $^3\text{He}$ , que tiene  $E_L/A$  mayor a la del Deuterio.

Como consecuencia de todo lo anterior podemos deducir que el núcleo atómico es un sistema sumamente complejo, resultante de la interacción de un gran número de partículas, algunas de las cuales sólo existen por períodos muy breves. Sus propiedades no pueden ser determinadas directamente, sino que es necesario diseñar experimentos para medir algunas de ellas en forma indirecta, mientras que otras son inferidas a través de la observación del comportamiento de la materia a escala macroscópica. Por este motivo la estructura nuclear es descrita en base a modelos. Existen varios, pero ninguno de ellos por sí sólo explica satisfactoriamente todas las propiedades nucleares. No deben considerarse excluyentes sino complementarios.

El más antiguo es el "MODELO DE LA GOTA LIQUIDA", que asimila el comportamiento del núcleo al de una gota de líquido incompresible. La densidad aproximadamente constante de todos los núcleos justifica en parte esta homología. Los nucleones asumen el papel de las moléculas que constituyen una gota de líquido. Cada nucleón sólo interacciona con sus vecinos más cercanos. Las fuerzas nucleares se comportan en forma similar a las fuerzas que mantienen la cohesión en la gota (tensión superficial). Este modelo permite obtener buenas predicciones de la  $E_L$  de los nucleidos y explica el fenómeno de fisión como la división de una gota que ha crecido demasiado.

Sin embargo, no explica la excepcional estabilidad de los núcleos con números mágicos de nucleones.

Este fenómeno es mejor descrito por el MODELO DE CAPAS. Se trata de un modelo similar al propuesto por Bohr para los electrones periféricos y se basa, al igual que aquel, en la especial estabilidad que adquieren los núcleos que poseen capas completas de nucleones. Los nucleones al igual que los electrones obedecen las leyes de la mecánica cuántica, ubicándose dentro del pozo de potencial nuclear en diferentes niveles de energía. Existen capas separadas para protones y neutrones. El núcleo se encuentra en su estado fundamental cuando todos los nucleones ocupan el nivel energético mas bajo posible. También pueden existir estados excitados nucleares. La principal diferencia con el modelo para electrones es que la diferencia de energía entre las capas de nucleones es mucho mayor. Datos adicionales que avalan el modelo son el hecho de que los nucleidos con número mágico de neutrones poseen muy baja probabilidad de capturar un nuevo neutrón mientras que los nucleidos a los cuales les falta un neutrón para completar la capa, poseen muy alta probabilidad de capturarlo. También este modelo explica satisfactoriamente otras propiedades nucleares tales como momento angular total, momento dipolar magnético y el momento cuadripolar eléctrico. Sin embargo no da cuenta de otras propiedades tales como la inestabilidad de los núcleos pesados hacia la fisión.

Para superar esas limitaciones se desarrolló el MODELO COLECTIVO que combina aspectos de los dos anteriores. Considera al núcleo como un todo. Del modelo de capas recoge la idea de la distribución de los nucleones, pero mientras que aquel supone una estructura más bien rígida, el modelo colectivo establece que la parte exterior del núcleo cuyas capas están incompletas puede experimentar movimientos o deformaciones colectivas que llevan a su inestabilidad.

Hasta ahora habíamos considerado a los núcleos básicamente como esferas. Esto es cierto para algunos núcleos, en particular para aquellos más estables que tienen sus capas llenas, como por ejemplo el  $^{16}\text{O}$  o el  $^{208}\text{Pb}$ . Los núcleos mas alejados de los números mágicos, en cambio adoptan otras formas alejadas de la simetría esférica tales como elipsoidal, oblato, prolato, etc. (Figura 7). Estos núcleos deformados tienen un exceso de energía potencial y tenderán a transformarse en otros más cercanos a la simetría esférica a través del fenómeno de la RADIATIVIDAD.

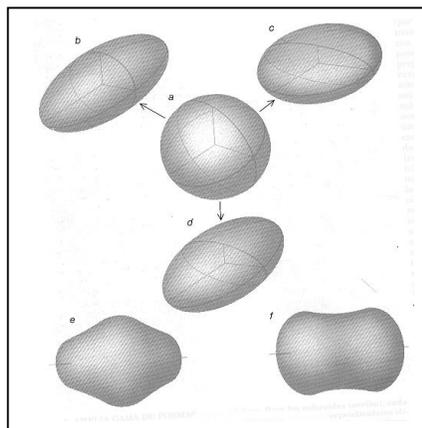


Figura 7

## PARTICULAS SUBATÓMICAS

El hombre desde tiempos ancestrales sintió la necesidad de descubrir la estructura fundamental de la materia. Los antiguos griegos llamaron "átomo" a la parte de la materia más pequeña que podía existir y consideraron que unos pocos tipos de átomos" combinados de distintas maneras formaban el universo. A lo largo de los siglos, el tamaño y la naturaleza del átomo fueron objeto de especulaciones pero su conocimiento desde el punto de vista científico avanzó muy lentamente. Los átomos continuaron considerándose inmutables, ya que participan de las reacciones químicas sin perder su identidad.

El descubrimiento de la radiactividad (Becquerel, 1898) echó por tierra esa teoría y fue el comienzo de una serie de descubrimientos que demostraron que los átomos no eran realmente partículas elementales sino que tenían una estructura.

La evolución de la Ciencia Nuclear llevó al descubrimiento de un gran número de partículas subatómicas, algunas de las cuales forman efectivamente parte de la materia, otras en cambio se han obtenido artificialmente. Algunas son relativamente estables, mientras que otras se crean y se destruyen en períodos muy breves

Cada partícula se caracteriza por su masa, carga, spin y momento magnético así como el tipo de interacción o fuerza en la que participa. Además de las partículas existen también las correspondientes antipartículas, aquellas que tienen igual masa pero cuya carga o momento magnético es igual pero de signo opuesto. Partícula y antipartícula pueden ser estables en el vacío pero si se encuentran experimentan un fenómeno denominado "aniquilación" que consiste en la transformación de la totalidad de sus masas en radiación de partículas de distinta naturaleza de las originales. Un ejemplo típico es el par electrón-positrón. El positrón, antipartícula del electrón, fue descubierto en 1932 y tiene igual masa y carga eléctrica que el electrón pero de signo positivo. La aniquilación del par da lugar a la transformación de masa en energía bajo la forma de radiación electromagnética (2 rayos  $\gamma$  de 0.51 MeV cada uno). El protón también tiene su antipartícula, el antiprotón (1955) y la aniquilación de ambos da lugar a la formación de otro tipo de partículas, los mesones. El antineutrón, antipartícula del neutrón carece, al igual que aquel, de carga eléctrica y se diferencia exclusivamente por el signo del momento magnético.

Existen 4 tipos de interacciones o fuerzas que pueden experimentar las partículas subatómicas: gravitacionales, electromagnéticas, fuertes y débiles. Todas ellas se consideran en la actualidad generadas por el intercambio de partículas virtuales, las llamadas partículas portadoras. Sus características se muestran en el Cuadro 1.

### **CUADRO 1.-**

#### FUERZAS FUNDAMENTALES

<b>Fuerza</b>	<b>Rango</b>	<b>Intensidad</b> <b>a <math>10^{-15}</math> m</b>	<b>Carrier</b>
Gravedad	Infinito	$10^{-35}$	Gravitón
Electromagnetismo	Infinito	$10^{-2}$	Fotón
Fuerza débil	$< 10^{-15}$ m	$10^{-13}$	Bosones
Fuerza fuerte	$< 10^{-15}$ m	1	Gluones

Las INTERACCIONES GRAVITACIONALES son las más familiares, pero carecen de importancia en eventos de partículas de poca masa, por ser extremadamente

débiles (las interacciones fuertes son alrededor de  $10^{35}$  veces más potentes). Su partícula portadora, el gravitón, aun no ha podido ser identificada experimentalmente.

Las FUERZAS ELECTROMÁGNÉTICAS son las responsables de atraer los electrones a los núcleos para formar átomos neutros. A su vez los átomos se combinan en moléculas o cristales a través de efectos electromagnéticos debidos a su subestructura cargada. Estas fuerzas hacen que los átomos y electrones de un material se resistan a desplazarse de su posición de equilibrio, provocando fenómenos tan cotidianos como la fricción. La partícula portadora es el fotón.

Tanto la INTERACCIÓN FUERTE, como la INTERACCIÓN DÉBIL son despreciables a distancias mucho mayores que el núcleo atómico, por lo que en ambos casos no se aprecian en la vida diaria. No obstante, todo depende de ellas, ya que la interacción fuerte es la que mantiene unidos los bloques fundamentales con los que el universo está formado y la débil hace posible los procesos de transformación que experimentan ciertos tipos de materia inestable. La interacción fuerte solamente actúa a distancias inferiores al diámetro de un protón, es decir  $10^{-15}$  m. La partícula portadora se llamó por esto gluón (glue en inglés significa cemento). La interacción débil es  $10^{-13}$  veces menos potente que la interacción fuerte. Las partículas portadoras de este tipo de interacción son los Bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y Z, también llamados debilones.

Volviendo al tema de las partículas subatómicas diremos que algunas de ellas son verdaderamente elementales mientras que otras se forman por combinación de las primeras. Las PARTÍCULAS ELEMENTALES son de 3 tipos: quarks, leptones y bosones.

A medida que aumentaba el número de partículas descubiertas, se comenzó a sospechar que tanta diversidad podría ser el resultado de diferentes combinaciones de unas pocas partículas más pequeñas. En 1964 Murray Gell-Mann y George Zweig propusieron independientemente la idea de que los protones y neutrones, además de otras partículas subatómicas recientemente descubiertas eran en realidad partículas compuestas formadas por la unión de varias partículas menores, a las que se denominaron "QUARKS". Inicialmente se propuso 3 tipos de quarks (u, d y s). Luego se extendió la idea a 6 clases de quarks a los que se denominó arriba (up), abajo (down), extraño (strange), encanto (charm), cima (top, antes truth) y base (bottom, antes beauty) Todas ellas tienen carga fraccionaria ( $+2/3$  y  $-1/3$ ). Sus propiedades se muestran en el Cuadro 2.

## **CUADRO N° 2**

### CLASIFICACION DE LOS QUARKS

<i>Nombre</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Masa en reposo (MeV/c<sup>2</sup>)</i>	<i>Carga</i>
Up	u	310	2/3
Down	d	310	-1/3
Charm	c	1500	2/3
Strange	s	505	-1/3
Top/Truth	t	> 22500	2/3
Botton/beauty	b	5000	-1/3

Los quarks nunca se han observado aislados, sino solamente formando parte de las partículas compuestas denominadas HADRONES. Los quarks se mantienen unidos a través de la interacción fuerte.

Existen 2 clases de hadrones:

- 1) Los BARIONES que contienen 3 quarks. Por ejemplo el protón está integrado por 2 quarks up y 1 quark down, es decir que su estructura es (u,u,d). El neutrón consta de 2 quarks down y 1 quark up, (u,d,d). Como ya dijimos, los quarks que forman al protón y al neutrón se mantienen unidos entre sí por la interacción fuerte mediada por los gluones. A su vez la atracción entre protones y neutrones en el núcleo atómico es debida a la atracción residual entre quarks.
- 2) Los MESONES están integrados por 1 quark y 1 antiquark. El Pión (mesón pi) está formado por un quark up y un antiquark antidown. Por ejemplo la combinación del quark bottom con su antiquark denominada upsilon fue observada en 1977 en el Laboratorio Fermi. El cuarto quark fue descubierto en 1974 en 2 laboratorios simultáneamente en la combinación quark/antiquark charm-anticharm denominada psi y "J" en cada uno de los laboratorios.

En contraste con los quarks que sólo se hallan agrupados, los LEPTONES pueden encontrarse aislados. Existen 6 leptones, 3 cargados negativamente y 3 sin carga. De los leptones con carga el más conocido es el electrón. Los otros dos son el muon (mesón mu) ( $\mu$ ) y la partícula tau,  $\tau$  descubierta en 1975, ambas muy semejantes al electrón pero de mayor masa. Los leptones sin carga son los neutrinos de los cuales se conocen 3 tipos, cada uno de ellos asociado a uno de los leptones cargados. Es decir que existen, el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tauónico. Los leptones experimentan la interacción débil. Estas interacciones permiten que un leptón puede transformarse en otro leptón y también que un quark puede convertirse en otro tipo de quark.

Los bosones son las partículas portadoras de fuerzas. Engloban al fotón (portador de la interacción electromagnética), al gluón (interacción fuerte), a los debilones (bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z$ ) y a los gravitones (aun sin descubrir). Se trata de partículas virtuales, o sea de vida muy corta. El principio de incertidumbre de Heisenberg aplicado a la energía establece que es posible disponer de una cierta cantidad de energía durante un período muy breve sin que se viole el principio de conservación de la energía ( $\Delta E \times \Delta t < h/2\pi$ ), justificando la existencia de las partículas virtuales.

Aunque como ya se dijo las partículas subatómicas conocidas hasta el momento son más de 100, los verdaderos bloques fundamentales con los que está formada la materia son muchos menos. El MODELO STANDARD de la materia explica su existencia en base solamente a los 6 quarks, los 6 leptones y las partículas portadoras de fuerzas. Además, la materia estable que nos rodea es aun más simple, pues está integrada sólo por los 2 quarks más livianos (u y d) y por electrones.

De acuerdo a éste, existen 3 generaciones de partículas elementales, cada una de ellas está formada por 2 quarks y 2 leptones. Cada generación posterior contiene partículas más pesadas que la previa, por lo que la primera generación es la que forma toda la materia estable de nuestro universo y está integrada por los quarks u y d, el electrón,  $e^-$  y el neutrino asociado al electrón,  $\nu_e$ . La segunda generación está formada por los quarks c y s, el muón,  $\mu$  y su neutrino asociado  $\nu_\mu$  y la tercera por los quarks t y b la partícula Tau,  $\tau$  y su neutrino  $\nu_\tau$ . Las partículas de las generaciones 2 y 3 son inestables y decaen hacia partículas de la primera, que son hasta lo que hoy sabemos, las PARTICULAS ELEMENTALES constituyentes de todo nuestro universo.