



## Los hechos más importantes de la Física Nuclear

*El Profesor D. José Garay, en la entrevista que aparece en el Boletín Materraña de septiembre, afirma que uno de los retos de las matemáticas actuales es desarrollar nuevas teorías que permitan a la Física Subnuclear explicar las componentes últimas de la materia y sus interacciones.*

*Con la intención de plantar una primera semilla en el lector, en este suplemento, presentamos los hechos más fundamentales de la Física Nuclear en opinión del Profesor de Física de la Universidad de California, Eyvind H. Wichmann, que aparecen recogidos en su libro Física Cuántica de la Editorial Reverté. A partir de aquí, ojalá en el futuro tengamos parte del mérito cuando se desvele el mundo subnuclear.*

Los núcleos atómicos están formados por protones y neutrones. Como ambas partículas tienen en común importantes propiedades físicas, habitualmente se consideran estados diferentes de una misma partícula: el nucleón. El protón es el estado que posee carga y el neutrón el que no.

Generalmente se le acredita a Ernest Rutherford el descubrimiento del protón. En 1918 encontró que al disparar partículas alfa (núcleos de Helio formados por dos neutrones y dos protones) contra un gas de nitrógeno, sus detectores mostraban los signos de núcleos de hidrógeno. Rutherford determinó que el único sitio del cual podían provenir estos núcleos era del nitrógeno y que por tanto el nitrógeno debía contener núcleos de hidrógeno. Por estas razones Rutherford sugirió que el núcleo de hidrógeno, que para la época se sabía que su número atómico era 1, debía ser una partícula fundamental.

Ernest Rutherford también propuso por primera vez la existencia del neutrón en 1920, para tratar de explicar que los núcleos no se desintegrasen por la repulsión electromagnética de los protones. A finales de 1932, el físico inglés James Chadwick, realizó una serie de experimentos de los que obtuvo unos resultados que no concordaban con los que predecían las fórmulas físicas. Para explicar tales resultados, era necesario aceptar la existencia de partículas sin carga eléctrica. Tales partículas tenían una masa muy semejante a la del protón, por lo que se pensó que eran el resultado de la unión de un

protón y un electrón. Posteriores experimentos descartaron esta idea y se conoció la naturaleza de los neutrones.

Se llama *número másico*, y se representa por  $A$ , al número de nucleones de un núcleo y  $Z$ , *número de carga*, al de protones. La masa del protón es  $M_p = 1'00727663 u$  y la del neutrón  $M_n = 1'0086654 u$ . Si un núcleo tiene  $A$  nucleones y  $Z$  protones, entonces el número de neutrones es  $A-Z$ . La masa de éstas partículas por separado es:  $Z \cdot M_p + (A-Z) \cdot M_n$ . Representando por  $M(A,Z)$  la masa del núcleo formado por ellas se observa que:

$$(Z \cdot M_p + (A-Z) \cdot M_n) - M(A,Z)$$

es siempre una cantidad positiva, llamada *defecto de masa* y designada por  $\Delta(A,Z)$ . El motivo de que esto ocurra tiene la siguiente explicación basada en el principio de equivalencia entre masa y energía  $E=mc^2$ : la cantidad  $\Delta(A,Z) \cdot c^2$  es la energía del enlace del núcleo. Es decir, es la energía que habría que suministrar para separar los elementos que constituyen el núcleo hasta ser partículas independientes.

Es un hecho experimental que la energía de enlace por nucleón es aproximadamente la misma en todos los núcleos:

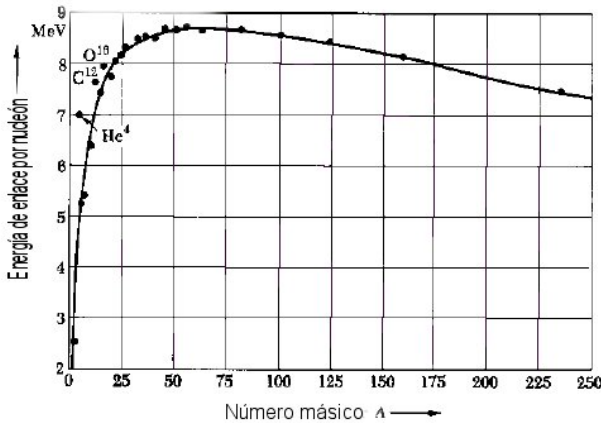
$$\frac{\Delta(A,Z) \cdot c^2}{A} \approx 8 \text{ MeV}$$

El electronvoltio, abreviado como  $eV$ , es una unidad de energía equivalente a la energía cinética que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial en el



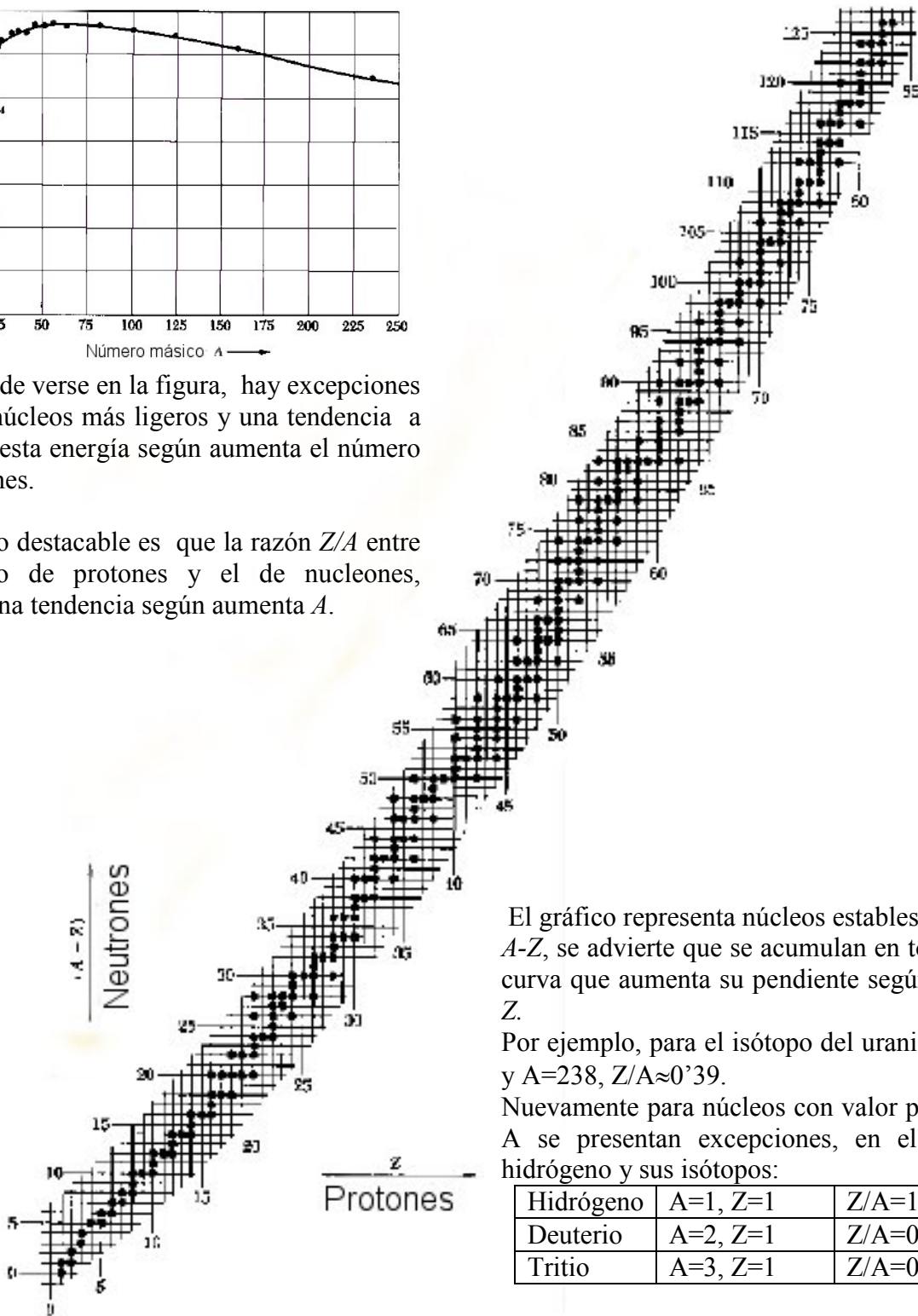
vacío de 1 voltio. Dicho valor, obtenido experimentalmente, es  $1\text{eV} = 1,602176 \times 10^{-19}\text{ J}$ . Sin embargo, en física de altas energías, resulta una unidad muy pequeña por lo que son de uso frecuente múltiplos como el Megaelectronvoltio  $1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV}$ , o el Gigaelectronvoltio  $1\text{ GeV} = 10^9\text{ eV}$ .

Para núcleos no muy pesados,  $A < 50$ , dicha razón está alrededor de 0'5 (esto significa que el número de protones y el de neutrones es similar). Según crece  $A$ , la razón disminuye lentamente (es decir, el número de neutrones supera al de protones).



Como puede verse en la figura, hay excepciones entre los núcleos más ligeros y una tendencia a disminuir esta energía según aumenta el número de nucleones.

Otro hecho destacable es que la razón  $Z/A$  entre el número de protones y el de nucleones, presenta una tendencia según aumenta  $A$ .



El gráfico representa núcleos estables según  $Z$  y  $A-Z$ , se advierte que se acumulan en torno a una curva que aumenta su pendiente según aumenta  $Z$ .

Por ejemplo, para el isótopo del uranio de  $Z=92$  y  $A=238$ ,  $Z/A \approx 0'39$ .

Nuevamente para núcleos con valor pequeño de  $A$  se presentan excepciones, en el caso del hidrógeno y sus isótopos:

Hidrógeno	$A=1, Z=1$	$Z/A=1$
Deuterio	$A=2, Z=1$	$Z/A=0'5$
Tritio	$A=3, Z=1$	$Z/A=0'333\dots$



No todos los núcleos que podamos imaginar son estables. Los inestables suelen emitir partículas o energía, con lo que cambian sus valores de  $A$  y  $Z$ , para convertirse en otros núcleos más estables. Actualmente se conocen unos 900 núcleos, de los que aproximadamente 280 son estables. ¿De qué depende que un núcleo sea estable o no?, por sorprendente que parezca, depende de la paridad del número de protones y neutrones. Los núcleos con un número par de protones y neutrones son los más estables y los impar-impar los más inestables. Obsérvese en el gráfico de la página anterior cómo se manifiestan estas reglas. Para ciertos números de neutrones y para ciertos números de protones aparecen “huecos” correspondientes a la ausencia de núcleos estables. Véase, además, que en núcleos ligeros el número de protones y neutrones es similar y que en los pesados hay más neutrones.

Otro hecho experimental es que el tamaño del núcleo está bien definido, puede considerarse una esfera de radio  $r_0 \cdot A^{1/3}$ , donde  $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = 1,2 \text{ fermi}$ .

El fermi equivale a  $10^{-13} \text{ cm}$  y recibe este nombre en honor al físico romano Enrico Fermi (1901-1954). Esta unidad es empleada muy a menudo como unidad de longitud en la física de partículas elementales.

Como el volumen de una esfera es  $\frac{4}{3} \pi R^3$ , el

volumen del núcleo será  $\frac{4}{3} \pi r_0^3 A$ . Si aceptamos que la masa también es proporcional a  $A$  (lo que ocurre de modo aproximado), entonces la densidad de los núcleos atómicos es, aproximadamente, constante.

Ahora digamos algo sobre la naturaleza de las fuerzas que mantienen unido el núcleo. De todos es sabido que, estando formado por cargas neutras y positivas, la fuerza de Coulomb impediría la unión de los protones del núcleo. Respecto a las fuerzas nucleares, las pruebas experimentales indican que:

- 1) No son de carácter electromagnético.
- 2) Son mucho más intensas que las electromagnéticas.

- 3) Son de corto alcance.
- 4) Las fuerzas nucleares entre dos protones, dos neutrones o un neutrón con un protón, puede decirse que son las mismas (aunque habría que matizar esta afirmación).

Respecto al tercer punto, cabe decir que si dos protones se acercan a menos de  $10^{-12} \text{ cm}$ , es cuando aparecen las fuerzas nucleares, superando a las electromagnéticas, cuyo papel deja de ser predominante.

De la intensidad de las fuerzas nucleares se sabe poco, actualmente se cree que pueden representarse por una función potencial de la forma:

$$U(r) = \frac{C \cdot b}{r} \cdot \exp\left(-\frac{r}{b}\right)$$

siempre que  $r \in (10^{-13}, 10^{-12}) \text{ cm}$ .  $b$  es una constante de valor  $1,4 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ . y  $C$  otra constante que expresa la intensidad de la fuerza. El rasgo fundamental es que el potencial decrece exponencialmente al aumentar la distancia.

Obsérvese la siguiente tabla:

$r$	$U(r)$
$b$	$U(b) = C/e = 0,367C$
$10b$	$U(10b) = 5 \cdot 10^{-6}C$
$100b$	$U(100b) \approx 10^{-45}C$

de ella se concluye que si  $r$  es aproximadamente  $100 \cdot b$ , es decir, del orden de  $10^{-11} \text{ cm}$ , la fuerza nuclear es despreciable. En la actualidad se conoce muy poco de lo que ocurre para distancias  $r < 10^{-13} \text{ cm}$ .

Por medio de experimentos de colisiones entre partículas elementales se ha podido determinar que el protón y el neutrón no son partículas simples (sin partes). Por el contrario, dentro del protón hay partes con sus propiedades individuales que se suman para formar las características “visibles” del protón. Estas partes que forman al protón se llaman quarks.

Los quarks son partículas elementales, que no solamente forman al protón, sino a toda una



serie de familias de otras partículas. Combinaciones de tres quarks forman los bariones (como el protón) y combinaciones de un quark y un anti-quark forman la familia de los mesones. Los quarks sienten la fuerza nuclear fuerte, pero no se encuentran libres en la naturaleza. Siempre están en estados ligados con otros quarks ya sea en un barión o en un mesón.

La teoría de los Quarks fue elaborada en 1963 por los físicos Murray Gell-Mann y Yuval Ne'eman. Fue Gell-Mann quien dió el nombre de 'quarks' a estas partículas. La palabra no tiene significado alguno y salió de una frase de un libro del escritor James Joyce. Poco tiempo después de lanzada la hipótesis de los quarks, experimentos realizados en los laboratorios de Fermilab (en EEUU) y CERN (en Ginebra) comenzaron a dar evidencia experimental sobre su existencia.

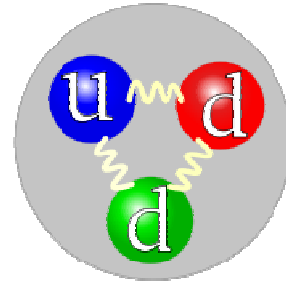
Hay seis tipos distintos de quarks que los físicos de partículas han denominado de la siguiente manera: up (arriba), down (abajo), charm (encantado), strange (extraño), top (cima) y bottom (fondo). Curiosamente se suele decir que hay seis “sabores”

Fueron nombrados arbitrariamente basados en la necesidad de nombrarlos de una manera fácil de recordar y usar, además de los correspondientes antiquarks. Las variedades extraña, encanto, fondo y cima son muy inestables y se desintegraron en una fracción de segundo después del Big Bang, pero los físicos de partículas pueden recrearlos y estudiarlos. Las variedades arriba y abajo sí que se mantienen, y se distinguen entre otras cosas por su carga eléctrica.

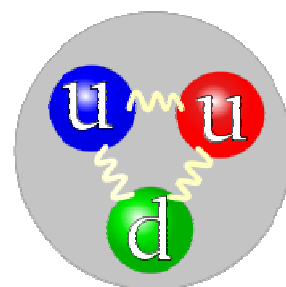
Como se ha dicho, en la naturaleza no se encuentran quarks aislados. Estos siempre se encuentran en grupos, llamados hadrones, de dos o tres quarks, conocidos como mesones y bariones respectivamente. En el año 2003 se encontró evidencia experimental de una nueva asociación de cinco quarks, los pentaquark aunque su existencia aún es controvertida.

La carga eléctrica de los quarks es  $-\frac{1}{3}$  o  $+\frac{2}{3}$  de la carga elemental. Por esto siempre las partículas compuestas (bariones y mesones) tienen una carga entera. Experimentalmente no hay información de cargas fraccionarias de partículas aisladas. La tercera parte de la carga en los hadrones es debido a la presencia de los quarks. Actualmente se desconoce por qué la suma de las cargas de los quarks en un protón se corresponde exactamente a la del electrón.

Aunque si bien se habla de la masa de los quarks en el mismo sentido que la masa de cualquier otra partícula, la noción de masa para un quark es complicada por el hecho que los quarks no pueden encontrarse aislados en la naturaleza. Como resultado, la noción de la masa de un quark es una construcción teórica.



Un neutrón está compuesto por dos quark abajo (d) y un quark arriba (u).



Un protón está compuesto por dos quark arriba (u) y un quark abajo (d).

Si los quarks se presentan en seis *sabores*, cada uno de los cuales puede tener uno de tres *colores*. (lo que caracteriza otra propiedad), de este modo, los quarks serían, en total, 18.