

## QUARKS

*Three quarks for Muster Mark!  
Sure he hasn't got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark.*

---

De ese pasaje de la obra *Finnegan's wake*, escrita por el irlandés James Joyce en 1939, tomó el físico Murray Gell-Mann la palabra *quark* para designar en 1964 unas entidades elementales de las que podrían estar constituidas la mayor parte de las partículas conocidas.

Desde siempre, los físicos han pretendido explicar los fenómenos naturales basándose en unas cuantas interacciones que actúan entre unas cuantas partículas, intentando, para simplificar las explicaciones, que esas interacciones y esas partículas fuesen las menos posibles.

Hace más de dos milenios, los filósofos griegos pensaban ya que la materia no podría ser divisible indefinidamente, sino que en último extremo se alcanzaría un tamaño de partícula indivisible al que Demócrito llamó *átomo* -indivisible-. Esta teoría atómica fue resucitada a principios del siglo XIX por el químico inglés John Dalton, manteniendo el nombre de átomo para designar al componente más elemental de la materia, bastando unos pocos tipos de átomos distintos para explicar la constitución de las sustancias.

La búsqueda de partículas más elementales continuó y a principios del siglo XX escudriñando en el interior del átomo, se dio con unas partículas, los *electrones*, que manifestaban pro-

piedades eléctricas –tenían carga eléctrica negativa–, y cuya masa era casi insignificante comparada con la masa de todo el átomo. Se descubrió poco después la presencia de otras partículas, los *protones*, con carga positiva y masa casi dos mil veces mayor que la del electrón. Unos años más tarde aparecieron los *neutrones*, con una masa similar a la de los protones pero sin carga eléctrica. Con esas tres partículas, electrón, protón y neutrón, consideradas como fundamentales, se tenía un esquema básico de cómo era un átomo. La mayor parte de la masa está concentrada en su zona central, el *núcleo*, con los protones y neutrones, de diámetro unas cien mil veces menor que el del propio átomo, en tanto que los electrones se mueven en la *corteza*, zona externa del átomo, gracias a la interacción electromagnética entre el núcleo y la corteza.

El protón y el neutrón pueden considerarse como hermanos gemelos con la única diferencia de que uno tiene carga eléctrica positiva y el otro es neutro. Son como las dos caras de una misma partícula, el *nucleón*. En un afán de simplificación podría decirse que la materia se compone de nucleones (protones y neutrones) y de electrones.

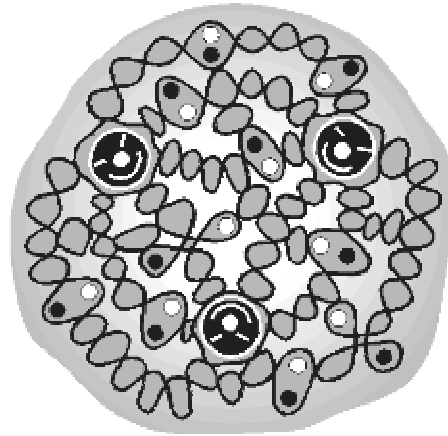
En 1928, el físico inglés Paul Dirac publicó un artículo que describía las propiedades del electrón y en el que

se vaticinaba la necesaria existencia de una especie de imagen en negativo del electrón, un antielectrón, llamado más tarde *positrón*, que sería igual en todo al electrón pero con carga positiva, sería un electrón positivo, una antipartícula del electrón. La predicción de Dirac se confirmó en 1932; el físico americano Carl Anderson descubrió que los rayos cósmicos de gran energía procedentes del espacio exterior, cuando chocan con los núcleos atómicos de la atmósfera, producen algunas partículas que son en realidad positrones.

La idea de Dirac y su posterior confirmación abrió la puerta a la búsqueda de otras partículas, y así, en las décadas de 1940 y 1950, empezaron a encontrarse nuevas partículas elementales, estudiando los rayos cósmicos o haciendo colisionar protones sobre núcleos atómicos con ayuda de “aceleradores de partículas”, máquinas que dotaban de una gran energía incidente a los protones bombardeantes, de modo que pudieran crearse nuevas partículas a partir de esa energía incidente. Algunas de esas partículas resultaron ser parecidas a protones y neutrones, inestables, desintegrándose con una gran rapidez, además respondían al mismo tipo de interacciones.

A finales de los años sesenta se realizaron nuevas experiencias en los aceleradores de partículas, haciendo incidir electrones de muy alta energía sobre protones o núcleos atómicos. Una gran energía de colisión implica un gran poder de penetración, de modo que esos electrones eran capaces de interactuar con componentes internos de protones y

neutrones, proporcionando información sobre su existencia y sus propiedades. Esos experimentos confirmaron que las partículas conocidas estaban en realidad constituidas por entidades más pequeñas que pronto se identificaron con los *quarks*.



El protón y el neutrón, y centenares de partículas más, son sistemas compuestos de únicamente dos tipos de quarks, el *u* y el *d* (iniciales de *up* y *down*, arriba y abajo). El protón, está formado por dos quarks *u* y un quark *d*, mientras que el neutrón lo está por un quark *u* y dos quarks *d*.

Los quarks se mantienen unidos en el interior de dichas partículas, no hay quarks en libertad, se dice que están confinados, gracias a la llamada *interacción nuclear fuerte*, interacción responsable también de la estabilidad nuclear al mantener unidos a los nucleones (protones y neutrones) en el interior del núcleo.

El electrón, por su parte, no parece tener subestructura, es elemental pero de naturaleza distinta a los quarks, al no ser sensible a la interacción nuclear fuerte que mantiene a los quarks ligados en el interior de

protones y neutrones. Ya vimos que los electrones se atraen con el núcleo atómico mediante la *interacción electromagnética*.

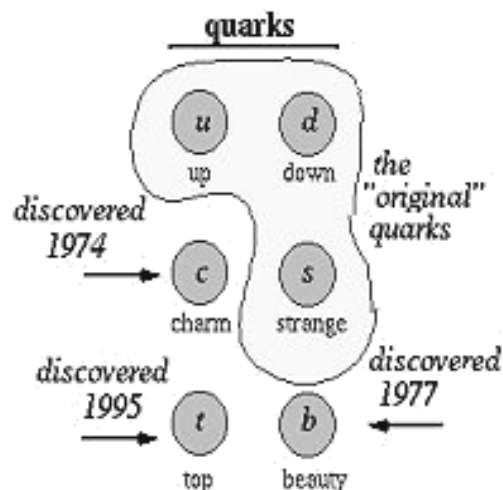
Así por tanto, en ese momento se disponía de tres entidades elementales: quark *u*, quark *d* y electrón, como componentes fundamentales de la materia. Pero a ese trío vino a unirse un cuarto componente, el *neutrino*, bautizado así, pequeño neutro, por el físico italiano Enrico Fermi. Su existencia la postuló en 1930 el físico austriaco Wolfgang Pauli para explicar el fenómeno conocido como radiactividad beta, que consiste en la emisión espontánea de electrones o positrones por parte del núcleo de algunos átomos. Este neutrino electrónico es una partícula sin carga eléctrica y sin masa en reposo; es insensible a la interacción nuclear fuerte y a la interacción electromagnética, y sólo resulta afectado por la llamada *interacción nuclear débil*.

Ello hacía muy difícil su detección, y entre los físicos se desató una auténtica caza del neutrino, hasta que en 1956 los norteamericanos Fred Reines y Clyde Cowan lograron detectarlos en las emisiones radiactivas de un reactor nuclear. De modo natural los neutrinos se generan en los procesos de fusión que ocurren en las estrellas, como en nuestro Sol, procesos que generan la luz y la energía que nosotros recibimos junto a los miles de millones de neutrinos que nos llegan continuamente.

Llegados a este punto y completado el cuarteto de las partículas más elementales, se puede decir que todo lo que existe está hecho de electrones,

neutrinos y quarks. Pero la cosa no queda ahí. Sin entender aún porqué, la Naturaleza triplica ese primer grupo o familia de partículas elementales, y cada una de ellas: electrón *e*, neutrino electrónico  $\nu_e$ , quark *u* y quark *d*, tiene otras dos partículas idénticas en todo salvo en sus masas.

Una segunda familia de componentes más pesados e inestables, está constituido por otros dos quarks: el *charm* *c*, encanto, y el *strange* *s*, extraño; el *muón*  $\mu$ , copia del electrón, y su neutrino, llamado *muónico*  $\nu_\mu$ , copia del neutrino electrónico.



Con posterioridad se descubrió un componente de lo que sería la tercera familia de partículas: la copia, todavía más pesada y más inestable del electrón, llamado *tau*  $\tau$ . De nuevo se requieren dos quarks, con las mismas características del *u* y del *d*. En 1977 se descubrió el quark *bottom* *b*, fondo, también llamado *beauty*, belleza, equivalente al quark *d*, y ya en 1995 se confirmó la existencia del quark *top* *t*, cima, equivalente al quark *u*. En consonancia con la simetría de estos grupos de partículas debe existir también un *neutrino*

tauónico  $\nu_\tau$ , equivalente al neutrino electrónico, pero hasta la fecha no se ha tenido evidencia experimental de su existencia.

Con todo lo visto parece que los físicos han logrado su objetivo de entender la materia. Por un lado conocen unas pocas interacciones: la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil, además de la más conocida de todas, la interacción gravitatoria, y por otro lado, con sólo tres tipos de partículas: electrones, neutrinos y quarks, se forman todas las sustancias. Pero..... ¿es eso todo? ¿no hay más familias de partículas? Parece que no, según lo demuestran los experimentos realizados hasta ahora en el acelerador de partículas LEP (Large Electron Positron collider —gran colisionador de electrones y de positrones—), del Laboratorio Europeo de Física de Partículas, CERN, ubicado en Ginebra.

Sin embargo hay aún otras preguntas por responder. Newton estableció que el peso es proporcional a la masa, pero no supo decir de dónde venía esa masa. Einstein afirmó que la masa es una forma muy concentrada de energía, pero tampoco sabía cómo se generaba. ¿Por qué pesan las cosas? ¿Por qué las partículas elementales adquieren la masa que tienen? ¿Qué es lo que genera esa masa?

Tal vez la respuesta la proporcione una última partícula misteriosa y desconocida, que los físicos buscan con ahínco, la llamada partícula de Higgs, que en teoría dota de masa a las distintas partículas. La esperanza de encontrarla está puesta en los detectores ATLAS y CMS, que rastrearán entre las brutales colisiones de partículas que producirá el potente acelerador LHC (Large Hadronic Collider —gran colisionador de hadrones <nucleones>—), que actualmente se construye en el CERN.

Familia I	Familia II	Familia III
$e$ (electrón)	→ $\mu$ (muón)	→ $\tau$ (tau)
$\nu_e$ (neutrino electrónico)	→ $\nu_\mu$ (neutrino muónico)	→ $\nu_\tau$ (neutrino tauónico)
$u$ (quark up)	→ $c$ (quark charm)	→ $t$ (quark top)
$d$ (quark down)	→ $s$ (quark strange)	→ $b$ (quark bottom)