

QUARK: REALIDAD Y PALABRA

David Jou

Entre los muchos neologismos científicos de este siglo, la palabra “quark” destaca con especial relieve. Confluyen en ella una nueva interpretación de la constitución de la materia, un referente literario específico, y una alegría de juego verbal, de provocación intelectual, de refrescante sorpresa, de festiva combinatoria entre ciencias y humanidades. Esta multiplicidad de resonancias, entre realidades y palabras, es la protagonista de este artículo.

El camino hacia los quarks

6

Durante las décadas de los años 1950 y 1960, la disponibilidad de aceleradores de partículas cada vez más energéticos condujo al descubrimiento y a la producción de un número cada vez mayor de partículas subatómicas. La simplicidad del esquema de la materia elemental en la década de 1930 (protón, neutrón, electrón, fotón), estalló en una diversidad sorprendente y desbordante. Es importante saber que no es que las partículas, al chocar unas contra otras, se rompan en fragmentos más pequeños. El proceso es muy diferente: la energía de las colisiones se convierte parcialmente en la masa de nuevas partículas, tanto mayor cuanto mayor es la energía de la colisión, según la célebre fórmula einsteniana $E = mc^2$.

En una docena de años, los físicos llegaron a conocer más de trescientas partículas, la mayoría de ellas muy inestables. Surgía, pues, el problema de cómo interpretar estos elementos de realidad, perfectamente identificables pero efímeros. ¿Se debe poner en cues-

tión la simplicidad y la permanencia del nivel más profundo del mundo? Ya Anaxágoras, en la antigüedad, había propuesto que los constituyentes elementales del mundo eran muchos y mudables, en contraste con las versiones más clásicas del atomismo, que postulaban unos pocos tipos de átomos inmutables. Durante un tiempo algunos físicos llegaron a proponer el abandono del ideal platónico de la simplicidad del mundo, suponiendo que todas las partículas eran igualmente elementales, en lo que se vino a llamar “democracia nuclear” o, con mayor precisión, “igualitarismo hadrónico”.

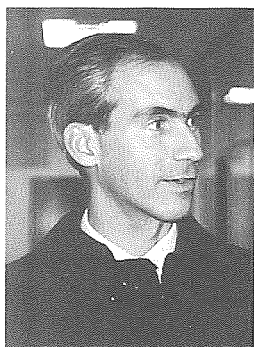
Pero la fe en la simplicidad es una de las grandes fuerzas motrices de la física de partículas elementales. Perseverantemente, se fue procediendo a una clasificación de las partículas, atendiendo a diversas características. Según sus masas, se dividieron en bariones (pesadas como, por ejemplo, el protón y el neutrón), mesones (de masa intermedia) y leptones (ligeras como, por ejemplo, el electrón). Resultó además que éstas últimas son insensibles a la interacción nuclear fuerte, en tanto que bariones y mesones responden a esta interac-

ción. Por ello, estos dos tipos de partículas fueron denominados conjuntamente hadrones (fuertes). Los leptones (electrón, muón, tauón y sus respectivos neutrinos), parecían comportarse como partículas realmente elementales, mientras que los hadrones iban revelando ciertas regularidades en su comportamiento.

En 1959, un físico japonés, S. Sakata, aventuró la idea de que los hadrones estaban compuestos por protones, neutrones y partículas lambda, recientemente descubiertas, y sus respectivas antipartículas. Ello estimuló el interés de diversos científicos en estudiar diferentes posibles agrupaciones de las partículas, con independencia, incluso, de la idea concreta de que éstas fueran compuestas. En 1961, Murray Gell-Mann, en el Caltech (California Institute of Technology) y Yuval Neeman, en el Imperial College de Londres, estudia-

ron los detalles matemáticos de las simetrías de estos agrupamientos de las partículas en grupos de ocho y de diez, según dos números cuánticos determinados (isospín y extrañeza). La estructura matemática resultó corresponder a un grupo de simetrías denominado técnicamente $SU(3)$. Aquel mismo año, Gell-Mann publicó un informe interno del Caltech, con el título "The eightfold way" (La vía óctuple), una versión ampliada del cual sería publicada en 1964, en colaboración con Neeman. Este título tiene una doble resonancia: por un lado, se refiere a los ocho generadores del grupo $SU(3)$ y, por otro, se inspira en la expresión "el noble camino óctuple" del budismo, que indica cómo una persona debe conducirse en la vida para cumplir ocho preceptos básicos del budismo. Efectivamente, relacionar mecánica cuántica y filosofías orientales estaba y si-

David Jou Miravent



Doctor en Ciencias por la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Catedrático de Física de la Materia Condensada en la UAB. Es miembro de la sección de ciencias y tecnología del Institut d'Estudis Catalans y de la Comissió per a l'Estímul de la Cultura Científica que asesora al Departament de Cultura de la Generalitat de Catalunya. Ha publicado un centenar de trabajos de investigación sobre termodinámica de procesos irreversibles y mecánica estadística fuera del equilibrio, en revistas de difusión internacional, y cinco libros sobre estas especialidades. Por su obra científica ha obtenido los premios Eduard Fontserè (1983), Rey Juan Carlos I (1986), medalla Narcís Monturiol (1991) y Ciutat de Barcelona (1993). Como divulgador científico es colaborador habitual del Suplemento de Ciencia de *La Vanguardia*, donde ha publicado más de un centenar de artículos, dos libros y ha obtenido el Premio Divulga (1981) del Museu de la Ciència de Barcelona.

Como poeta ha publicado diez libros de poesía y ha recibido diversos premios literarios. Ha publicado también estudios sobre el escultor Pere Jou (1991).

David Jou
Departament de Física
Edificio C
08193 Bellaterra (Barcelona)
Tel.: 3-5811658
Fax: 3-5812155
e-mail: iftg1@cc.uab.es

que estando de moda, desde las primeras indicaciones en este sentido, de Schrödinger, uno de los fundadores de la mecánica cuántica.

La propuesta $SU(3)$ suscitó un entusiasmo muy escaso, pero se reveló, en su abstracción, superior al modelo de Sakata, ya que predecía el valor correcto del spin de las partículas $\frac{1}{2}$ a diferencia del modelo de Sakata, que predecía $\frac{3}{2}$. La propuesta $SU(3)$ no recibió el espaldarazo hasta 1964. En julio de 1962, Gell-Mann pudo efectuar una predicción concreta del modelo, a saber, la existencia de una nueva partícula (omega menos) de spin $\frac{3}{2}$ y masa bien determinada. El descubrimiento de dicha partícula a principios de 1964 puso el modelo $SU(3)$ en primera línea entre las teorías de hadrones.

Fue en aquel mismo año cuando Gell-Mann y G. Zweig, independientemente el uno del otro, propusieron interpretar la estructura matemática $SU(3)$ como la consecuencia de que los hadrones deberían estar constituidos por agrupaciones diversas de tres partículas de carga eléctrica fraccionaria. Así, después de un interludio de abstracción matemática se volvía de nuevo a una imagen mental de composición de los hadrones, como la que había dado pie a los primeros estudios de $SU(3)$, pero con unas partículas básicas desconocidas. Se había llegado al concepto de quark. Veamos, ahora, el origen de su nombre.

La denominación de los quarks

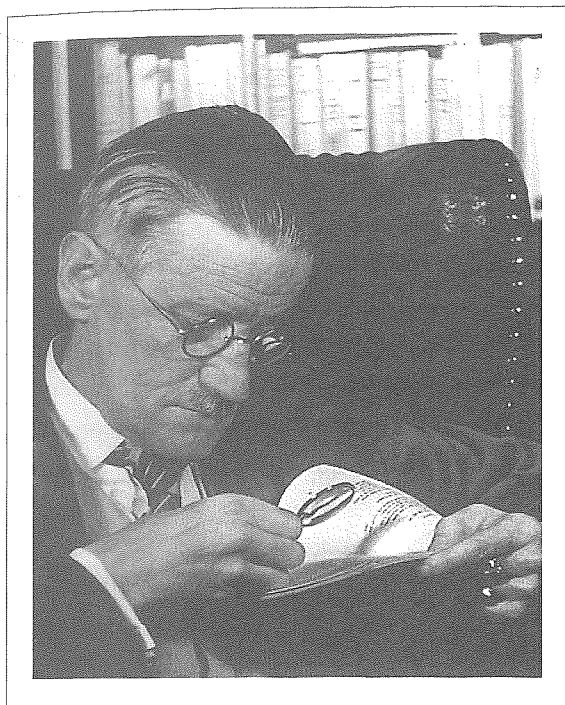
Toda realidad en expansión implica un problema de lenguaje: cómo ir denominando los nuevos elementos que esta realidad pone de manifiesto. En el Génesis, la primera tarea de Adán es, precisamente, dar nombres a los pobladores del paraíso, como si una realidad inominada fuera radicalmente incompleta. En la filosofía clásica, los matices de la vida intelectual y moral y, en la

escolástica medieval, las inaferrables sutilezas de Dios, fueron caudalosas fuentes de lenguaje abstracto. A partir del barroco, la ciencia será el principal motor de tensión verbal: la exploración de América planteó a botánicos y zoólogos muchos problemas léxicos. A finales del siglo pasado, la química requirió un esfuerzo de imaginación para nombrar los nuevos elementos y compuestos que se iban descubriendo. La técnica actual, con su proliferación de novedades, ha cargado el lenguaje de neologismos que ocupan cada vez más lugar en el diccionario, mientras va perdiéndose el léxico riquísimo de viejos oficios caídos en desuso.

Cuando la nueva realidad tiene algo que ver con la conocida anteriormente, se acostumbra a acudir a una combinación de raíces verbales, habitualmente griegas y latinas, cuya yuxtaposición o hibridación adquirirá, con el empuje de la novedad de lo que designan, un vigor propio y una vida fecunda. Pero en ocasiones la palabra debe reflejar la apertura a un enfoque completamente nuevo. Esto fue lo que ocurrió con los quarks.

Conviene saber que Gell-Mann, además de un gran físico de partículas, es un enamorado de las lenguas y de los pájaros, y que sus conocimientos en lingüística y en ornitología son extensísimos. Además, tiene un gusto considerable por el juego mental y las confluencias de sentidos diversos, como ya lo hemos hecho notar al comentar el título de su libro "The eightfold way". Según cuenta el mismo Gell-Mann, le vino a la mente de una manera intuitiva y sorprendente la sonoridad "kwork" para denominar a estas partículas. Como ocurre en poesía, estas asociaciones son misteriosas e inexplicables. Durante algunos días siguió pensando en el problema de cómo denominarlas. Fue entonces cuando releendo la novela "Finnegans Wake" de James Joyce encontró la frase: "Three quarks for muster Mark!" (libro segundo, capítulo cuarto, canción inicial). La combinación del





James Joyce, un innovador del lenguaje

número tres y de una sonoridad análoga a la que buscaba se le impuso luminosamente, arrolladoramente, y no tuvo ya duda en denominar “quarks” a dichas partículas. La frase de Joyce resonaba, se supone, en el fragor de una taberna. También las nuevas partículas resultaban misteriosas y resonaban en el fragor de la multiplicidad de los hadrones. Y así quedó asignado el nombre de “quarks”, que fue escrito por primera vez en un artículo de Gell-Mann en *Physics Letters* a principios de 1964. Zweig, por su parte, había denominado “aces” (ejes) a sus tres partículas hipotéticas.

De hecho, aunque en inglés la palabra quark resulte novedosa y sorprendente, sin la esclavitud de sentidos anteriores, en alemán designa un tipo de requesón o cuajada, y Goethe la había utilizado, en forma algo equívoca, en uno de los versos del Fausto (“Der kleine Gott... in jeden Quark begräbt er seine Nase”, el diosecillo... tiene que meter las narices en todas partes), como designando los rincones más remotos del mundo.

La suerte estaba echada. Un innovador del lenguaje, Joyce, y un innovador de la física, Gell-Mann, confluían en un neologismo que se iría abriendo camino entre los especialistas y entre el público, que se convertiría en un idea básica de la visión contemporánea de la naturaleza y que, como tal, regresaría a la literatura en novelas y poemas, enriquecido con su nuevo significado.

La realidad de los quarks

Hemos visto la génesis de una idea y de una palabra, pero esto no es todavía una realidad. La realidad nombrada por Gell-Mann, era aún hipotética: nadie había observado los quarks. Es más, el hecho de que su carga eléctrica fuera fraccionaria había suscitado rechazos y escepticismo. El mismo Gell-Mann se había sentido tan incómodo con esta idea, que estuvo contemplando durante varios meses esta posibilidad sin atreverse a proponerla en público y, cuando lo hizo, fue con la precaución adicional de un adjetivo, hablando de “quarks matemáticos”. Surgía aquí la cuestión de si se

trataba tan sólo de una regla mnemotécnica eficaz e ingeniosa para recordar con comodidad las propiedades de los hadrones, o de si respondía a una realidad. La misma cuestión se había planteado a finales del siglo pasado acerca de la realidad de los átomos.

En la primera versión del modelo había tres tipos de quarks:

u (up, arriba), *d* (down, abajo) y *s* (strange, extraño), cuyas cargas respectivas, en función de la del protón, son respectivamente $2/3$, $-1/3$ y $-1/3$. Los nombres *up* y *down* se refieren a las posiciones del isospín, uno de los números cuánticos utilizados para clasificar las partículas, y *strange* se refería a la extrañeza, el otro número cuántico que había sido utilizado para agrupar los hadrones en grupos de ocho y de diez. Según la nueva teoría, el protón y el neutrón dejaban de ser considerados partículas elementales para pasar a ser vistos como formados por tres quarks: *uud* el protón y *udd* el neutrón: toda una revolución.

Asimismo, todos los hadrones conocidos hasta la fecha podían interpretarse como combinaciones de tres quarks (los bariones) o de un quark y un antiquark (los mesones).

Pese a un cierto escepticismo, diversos laboratorios empezaron afanosamente la búsqueda de los quarks, es decir, de partículas de carga eléctrica fraccionaria. Los resultados fueron, una y otra vez, negativos. Los primeros resultados experimentales en apoyo de la existencia real de los quarks se obtuvieron en 1969, en el acelerador lineal de Stanford. Se lanzaron electrones muy energéticos contra neutrones y protones, y se estudió la distribución de las direcciones en que aquéllos eran dispersados tras la colisión. Los resultados correspondían a la dispersión producida por tres partículas de carga eléctrica fraccionaria que se movieran libremente en el interior del protón y del neutrón. Quedaba claro que protón y neutrón no son elementales sino compuestos, de acuerdo con la teoría de los quarks.

Las interacciones entre los quarks

La constatación de que los quarks parecieran moverse libremente en el interior de los hadrones aumentaba la perplejidad. Vista la dificultad de romper un hadrón en quarks aislados, parecía normal pensar que los quarks estarían profundamente ligados el uno al otro y, no obstante, ¡parecían coexistir casi libremente! ¿Cómo conciliar esta libertad asintótica a distancias cortas con el confinamiento o dificultad de separación?

¡Qué contraste con la fuerza electromagnética o gravitatoria, cuya intensidad decrece a medida que aumenta la separación entre las partículas! Y, por otro lado, si los quarks interactúan con tanta intensidad cuando están alejados, ¿por qué el protón y el neutrón del núcleo de deuterio, por ejemplo, no se colapsan en una única combinación conjunta de seis quarks?

La solución a estas dificultades vino de otra dificultad. Como los

quarks tienen spin $1/2$, deben satisfacer el principio de exclusión de Pauli, que impide que haya dos partículas idénticas en un mismo estado cuántico. Por ello, ciertas combinaciones de tres quarks deberían estar prohibidas (dos quarks del mismo tipo podrían coexistir si uno tuviera spin hacia arriba y el otro spin hacia abajo). Por ejemplo, la combinación *sss* para dar una partícula de spin $3/2$ debiera estar prohibida y, sin embargo, se halla en la naturaleza. Tras diversas propuestas fallidas, Han y Nambu propusieron en 1965 que los quarks, además de distinguirse por su "sabor" (*u*, *d*, *s*), se distinguían también por otro atributo triple, el "color" (rojo, azul o verde). De hecho, nada tiene que ver este atributo cuántico con el color que percibimos por la visión. Este atributo permitiría que tres quarks idénticos, salvo por el color, pudieran coexistir. Fue posible demostrar que sólo las agrupaciones "incolores" de tres quarks de colores complementarios o de un quark y un antiquark del mismo



color podían darse en la naturaleza, lo que permitía dar una base a la sistematización ad hoc de estas combinaciones especiales.

Por otro lado, se advirtió que era precisamente este nuevo atributo el que actúa como “carga” de la interacción fuerte entre quarks. Esta interacción puede ser descrita, asimismo, según la mecánica cuántica, como un intercambio de partículas intermediarias o “cuantos” de la interacción, que son, en este caso, ocho partículas denominadas “gluones” (“glue” significa pegamento en inglés). En analogía con la electrodinámica cuántica, teoría cuántica de la interacción electromagnética, se denomina “cromodinámica cuántica” a la descripción de esta nueva interacción. A diferencia de los fotones intercambiados en la interacción electromagnética, y que no interactúan entre sí, los gluones sí interaccionan entre ellos, ya que también ellos contienen cargas de color, y ello hace que la intensidad de la fuerza aumente con la distancia, en vez de decrecer. El estudio detallado de estas fuerzas ha conducido a novedades considerables en ciertas ramas de las matemáticas, como por ejemplo la topología. En la actualidad, la interacción nuclear fuerte entre protones y neutrones (o entre hadrones en general), ya no se considera como una interacción fundamental, sino como una consecuencia de la interacción cromodinámica o fuerte entre los quarks que componen los hadrones.

El número de quarks

Una vez nombrada, la realidad se multiplica. Lo mismo ocurre con los quarks. Si bien la teoría original proponía tres quarks, no tardó en plantearse la posibilidad de nuevos quarks; en concreto, se pensó en modelos de cuatro y seis quarks. Al principio, los argumentos eran de tipo estético. En 1970, Glashow

y colaboradores demostraron que un cuarto quark (denominado *c*, *charm* o *encanto*, uno más de los nombres excéntricos utilizados en la física de partículas elementales) podría resolver ciertos problemas relacionados con ciertas corrientes neutras cuyo análisis alargaría excesivamente este artículo. En noviembre de 1974, Richter y Ting, independientemente, descubrían un nuevo mesón J/ψ , que no podía interpretarse en términos de los quarks *u*, *d* y *s*, pero sí como combinación del quark *c* con su anti-quark. La excitación fue tan grande que se

evoca aquel momento como la “revolución de noviembre”. Inmediatamente se pensó en un modelo

de seis quarks, añadiendo los quarks *b* (*bottom: fondo*) y *t* (*top: encima*) a los cuatro observados. En 1977, Lederman descubrió un nuevo mesón, muy pesado, interpretable en términos del quark *b* y su antiquark. Hasta

1994 no se tuvieron evidencias suficientes del quark *t*, largamente

esperado, cuya masa es superior a la de

un núcleo de oro. Conviene subrayar que no

es posible definir los quarks como partículas que constituyen los átomos, ya que en los protones y neutrones sólo se hallan los quarks *u* y *d*, pero no los restantes.

¿Podríamos pensar en seguir incrementando la lista de quarks indefinidamente? La respuesta es negativa. La teoría actual o modelo estándar considera como partículas elementales los quarks y los leptones, y los agrupa en tres generaciones de masa creciente: (*u*, *d*, electrón, neutrino electrónico), (*s*, *c*, muón, neutrino muónico), (*b*, *t*, tauón, neutrino tauónico). ¿Podría haber más generaciones, cada una de ellas más pesada? A finales de 1980 se demostró que si el número de familias fuera superior a cinco, el contenido de helio primordial en el universo hubiera sido incompatible con el observado. Este límite superior al número de generaciones pudo ser reducido a principio de la década de los noventa, en experimentos rea-



lizados en el CERN sobre el ritmo de desintegración de los bosones intermediarios de la interacción electrodébil (interacción que unifica las interacciones electromagnética y nuclear débil). Estos experimentos llevan a excluir la existencia de una cuarta familia (a no ser que el neutrino perteneciente a ésta fuera muy pesado en lugar de tener masa nula).

Más allá de los quarks

Toda realidad nos lleva a pensar en la posibilidad de una realidad más profunda y simple; ésta ha sido una larga y fructífera tradición occidental. La física no se da por satisfecha con el modelo estándar de las partículas: no explica por qué la carga del protón es igual, en valor absoluto, a la carga del electrón; no predice la masa de los quarks; no relaciona con profundidad leptones y quarks; no explica por qué hay tan sólo tres generaciones de partículas;... Por ello, se estudian nuevas teorías que pueden unificar en una sola interacción, la interacción fuerte y la electrodébil. Algunas de las teorías existentes en este sentido son muy elegantes matemáticamente pero hacen predicciones (como la muerte del protón) excluidas por la experimentación.

Por otro lado, se plantea la cuestión de si los quarks y los leptones son realmente fundamentales o son la manifestación de una realidad más profunda y unificada. Las teorías más ambiciosas, como las de supercuerdas, intentan incluir también la gravitación, para unificar así, en una sola interacción, todas las interacciones conocidas. Según estas teorías, en fase de elaboración, los constituyentes básicos de la materia no serían partículas puntuales en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, sino cuerdas en un espacio-tiempo de diez dimensiones. Distintos modos de vibración de esta cuerda elemental darían lugar a las diferentes partículas que hoy consideramos elementales, en lo que podríamos ver, en cierto modo, como una versión modernizada de las armonías pitagóricas. Estamos aún lejos de poder hacer afirmaciones concluyentes en este campo especulativo, plagado de dificultades matemáticas.

En definitiva, el quark ocupa, en la cultura contemporánea, un papel tan importante como el que ocupó el átomo en su día, tanto por la elegancia de su sistematización de las partículas hadrónicas como por la profundidad de las preguntas que nos plantea. El camino recorrido en apenas 30 años, desde el "bautizo" de los quarks hasta el descubrimiento del último quark ha sido enorme. Pero la física de las partículas elementales sigue llena de cuestiones que nos siguen desafiando y estimulando. ¶

Apéndice

Texto de la canción inicial del capítulo 4 del libro segundo de *Finnegans Wake*, de James Joyce:

*"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.
But O, Wrengle Almighty, wouldn't un be a sky
of a lark
To see that old buzzard whooping about for uns
shirt in the dark
And he hunting round for uns speckled trousers
around by Palmerstown Park?
Hohohoho, moulty Mark!
You're the rummest old rooster ever flopped out of a
Noah's ark
And you think you're the cock of the wark.
Fowls, up! Tristy's the sry yprung spark
That'll tread her and wed her and bed her and red
her
Without ever winking the tail of a feather
And that's how that chap's going to make his mo-
ney and mark!"*

El poema, en que abundan nombres de pájaros o sonoridades referentes a estos animales, es una canción de burla contra el rey Mark, que aparece en la leyenda de Tristán.