

## EL QUARK CUMPLE 50 AÑOS

MANUEL AGUILAR BENÍTEZ DE LUGO

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde, 22. 28004 Madrid

En 1964 los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig propusieron de forma independiente la idea de los *quarks* como constituyentes fundamentales de las partículas elementales denominadas hadrones. Esta atrevida propuesta permitía fundamentar el esquema propuesto en 1961 por el propio Gell-Mann y por Yuval Ne'eman (el llamado "*Eightfold Way*") para clasificar las numerosas partículas descubiertas desde la irrupción de los aceleradores y las cámaras de burbujas a mediados de los años 50.

En este trabajo se presentan los hitos más destacados del proceso de "*invención*" y descubrimiento de los *quarks*, uno de los pilares de la construcción del Modelo Estándar de Partículas e Interacciones.

Desde la antigüedad griega, filósofos, científicos y pensadores de índole diversa se han interrogado acerca del origen del universo, el origen de la vida y el origen de la consciencia. Como escribía Aristóteles (384 aC-322 aC), con generosa dosis de optimismo, "Todos los hombres, por naturaleza, ansían conocer".

En relación con el universo, podría concretarse algo más este interés formulando algunas preguntas básicas: ¿de qué está hecho?, ¿cómo está hecho?, ¿cómo se ha creado? y ¿cómo ha evolucionado? Con respecto a la primera cuestión, es tal vez apropiado recordar que, hace cerca de 2.500 años, Demócrito (400 aC-370 aC) propuso una primera teoría, denominada Teoría Atómica del Universo, acerca de la estructura íntima de la materia que lo formaba. El átomo, nombre de origen griego que quiere decir "sin porciones, indivisible",

era el constituyente fundamental último e indivisible a partir del cual se construía todo lo conocido.

Desde esa época y en particular desde el descubrimiento del electrón en 1897 por J.J. Thomson (1856-1940) se ha progresado mucho en la comprensión de algunas de estas cuestiones. En los albores del siglo XXI puede afirmarse que, en los últimos 120 años, se ha avanzado de manera extraordinaria en la comprensión de lo infinitamente pequeño y de lo infinitamente grande, desde el microcosmos hasta el cosmos. Afortunadamente, queda mucho por conocer para rellenar los huecos en el conocimiento de lo "*ordinario*" y de lo "*extraordinario*", palabras sobre cuyo significado volveremos más adelante. En [1]-[8] se dan algunas referencias relacionadas con este trabajo, que resumen el discurrir del proceso de acopio de conocimiento en la disciplina científica que se ocupa de estas cuestiones: la Física de Partículas Elementales o Física de Altas Energías.

Probablemente, lo más relevante que se ha aprendido a lo largo de este largo intervalo de tiempo es cualificar el significado de qué debemos entender por estructura atómica de la materia. Básicamente, quiere decir que la materia no llena todo el espacio que ocupa. Desde 1911, gracias a los experimentos realizados por E. Rutherford (1871-1937), sabemos que el átomo está formado por un núcleo denso a cuyo alrededor orbitan los electrones descubiertos por Thomson. En 1913, el propio Rutherford obtuvo una primera indicación experimental acerca de la existencia del protón, el núcleo del átomo de hidrógeno, con un valor de

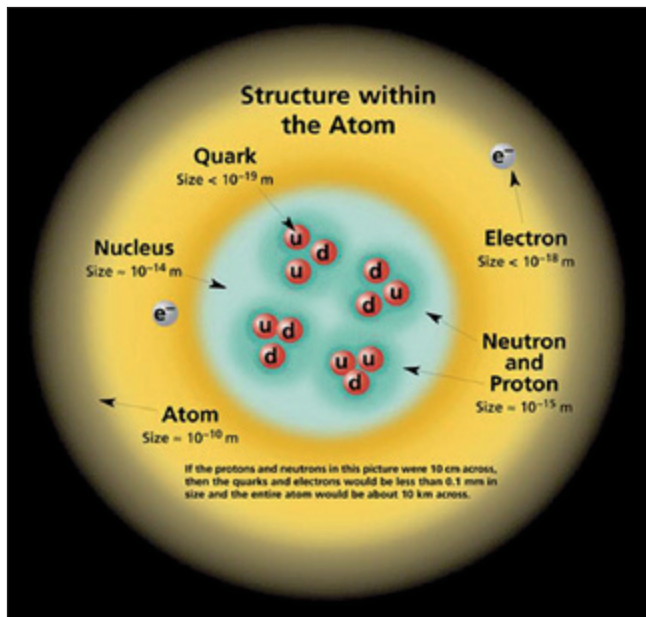


Figura 1. Esquema dimensional del átomo.

su masa aproximadamente 2.000 veces mayor que la masa del electrón.

Ese mismo año, N. Bohr (1885-1962) formuló la teoría cuántica de los espectros atómicos, basada en el modelo de Rutherford de la estructura atómica. Casi 20 años más tarde, en 1932, J. Chadwick (1891-1974) obtendría la primera evidencia experimental de la existencia de una partícula neutra, con masa ligeramente superior a la masa del protón, el neutrón, en el interior de los núcleos atómicos. Trabajos posteriores concluyeron que todos los núcleos de los átomos de la tabla periódica propuesta en 1869 por D.I. Mendeleiev (1834-1907) están contruidos por protones y neutrones, partículas denominadas genéricamente como nucleones.

Medidas más recientes han precisado el tamaño de los átomos, del orden de  $10^{-10}$  m, de los núcleos,  $10^{-14}$  m, y de los nucleones,  $10^{-15}$  m, Figura 1. Es hasta cierto punto paradójico que, a día de hoy, no tengamos una medida del tamaño del electrón, solo un límite superior,  $10^{-18}$  m. Estas dimensiones cuantifican empíricamente la idea de que los átomos están esencialmente vacíos.

Conceptualmente, los experimentos realizados por Rutherford, Chadwick y colaboradores eran relativamente simples y estudiaban las características de los

procesos en los que haces de partículas (radiación  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ) producidas por sustancias radioactivas (radio, polonio, etc.) interaccionaban con blancos de materia (berilio, oro, plata, platino, hierro, cobre, aluminio, etc.). La medida del ángulo de dispersión de las partículas incidentes resultó ser determinante para desentrañar la estructura interna de los constituyentes fundamentales de la materia (los átomos). Esta metodología es en esencia la que se sigue utilizando en los modernos aceleradores de partículas.

Como suele ocurrir con frecuencia en la investigación científica, una observación inesperada, el descubrimiento de las denominadas partículas extrañas en la década de los cuarenta, tendría a la postre unas consecuencias extraordinarias en la comprensión del complejo universo microscópico.

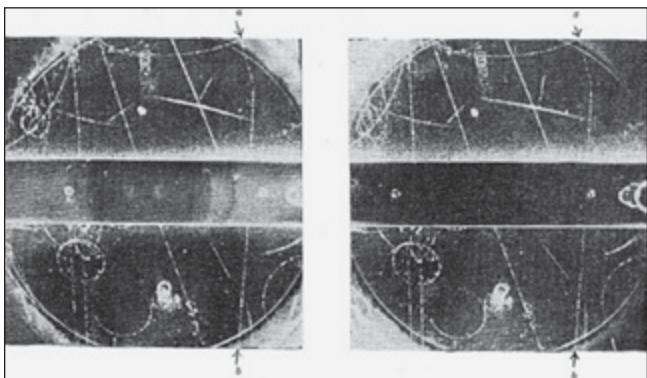
En 1912, V.F. Hess (1883-1964) presentó evidencia experimental concluyente de la existencia de los rayos cósmicos. Utilizando instrumentación avanzada a bordo de globos sonda, Hess trataba de identificar los agentes responsables de generar la ionización espontánea del aire, un fenómeno conocido gracias a las observaciones de C.A. Coulomb (1736-1806) en la segunda mitad del siglo XVIII. Las medidas precisas en función de la altitud demostraron que el agente en cuestión era una radiación eléctricamente cargada procedente del espacio exterior atmosférico y que R.A. Millikan (1868-1953) bautizó con el nombre de rayos cósmicos.

El descubrimiento de los rayos cósmicos generó durante la primera mitad del siglo XX una frenética actividad investigadora con el objetivo de determinar sus propiedades, en particular su composición, flujo y energía [9]-[10]. Numerosos grupos experimentales desarrollaron instrumentación avanzada para su estudio a bordo de globos sonda, en laboratorios convencionales y en observatorios astronómicos. Las cámaras de niebla o cámaras de Wilson y las emulsiones nucleares fotográficas serían protagonistas de excepción de importantes hitos científicos, el primero de ellos el descubrimiento del positrón o antielectrón en 1932 por C.D. Anderson (1905-1991). El positrón fue el primer ejemplar de partículas de antimateria descubierto; su existencia fue predicha en 1926 por P.A.M. Dirac (1902-1984) como una consecuencia ineludible de su teoría cuántica del electrón.



**Figura 2.** Laboratorio de rayos cósmicos en l'Aiguille du Midi, Chamonix, Francia.

La cronología del descubrimiento de las partículas extrañas en experimentos de rayos cósmicos es, hasta cierto punto, confusa. En 1943 un equipo de investigadores de la Escuela Politécnica de París, dirigido por L. Leprince-Ringuet (1901-2000), trabajando en el laboratorio instalado en l'Aiguille du Midi (Chamonix, Alpes Franceses), Figura 2, observó, durante el escrutinio de 10.000 clichés fotográficos registrados en una cámara de niebla situada en el interior de un campo magnético, un partícula incidente con carga eléctrica positiva, Figura 3. El valor medido de la masa resultó ser  $506 \pm 61$  MeV, muy próximo al actual valor de la masa del mesón  $K^+$  ( $493,677 \pm 0,016$  MeV). Por razones no documentadas, esta observación no se publicó hasta 1946. Un año después, en 1947, se publicó la



**Figura 3.** Primera partícula extraña descubierta en una cámara de Wilson expuesta a la radiación cósmica.



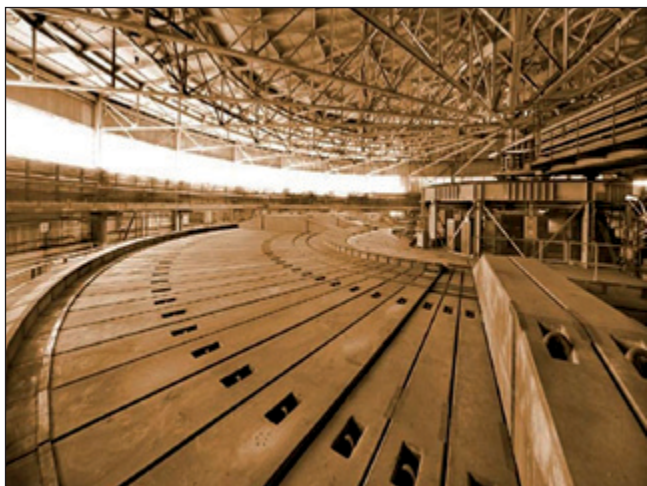
**Figura 4.** Primera observación de la desintegración del pion en una emulsión nuclear expuesta a la radiación cósmica.

primera evidencia experimental de la existencia del pion, Figura 4, obtenida por el grupo de rayos cósmicos de la Universidad de Bristol dirigido por C.F. Powell (1903-1969).

Casi simultáneamente, el grupo de la Universidad de Manchester, dirigido por G.D. Rochester y C.C. Butler, publicó evidencia experimental de una nueva partícula neutra (denominada  $V^0$ ) y otra cargada (denominada  $V^\pm$ ) con vidas medias en el intervalo  $10^{-10}$ - $10^{-8}$  s. Investigaciones posteriores realizadas por el grupo del Instituto Tecnológico de California (CALTECH), dirigido por C.D. Anderson, R.B. Leighton y E.W. Cowan, añadieron evidencia experimental significativa de la existencia de nuevas partículas neutras y cargadas, que exhibían distintos patrones de desintegración. Con los datos registrados no fue posible distinguir si las topologías observadas correspondían a una misma partícula o a partículas diferentes. Esta aparente dificultad está probablemente en el origen de la denominación asignada a estas nuevas partículas (extrañas).

Aunque es innegable que los experimentos con rayos cósmicos contribuyeron decisivamente a poner de manifiesto un rico espectro de partículas inestables (resonancias) y están en el origen de la física de partículas elementales, desde principios de la década de los 50, el estudio detallado de las misteriosas propiedades de esta pléyade de nuevas partículas se llevó a cabo con una nueva estrategia experimental. Los aceleradores de partículas, Figura 5, inventados en 1929 por E.O.





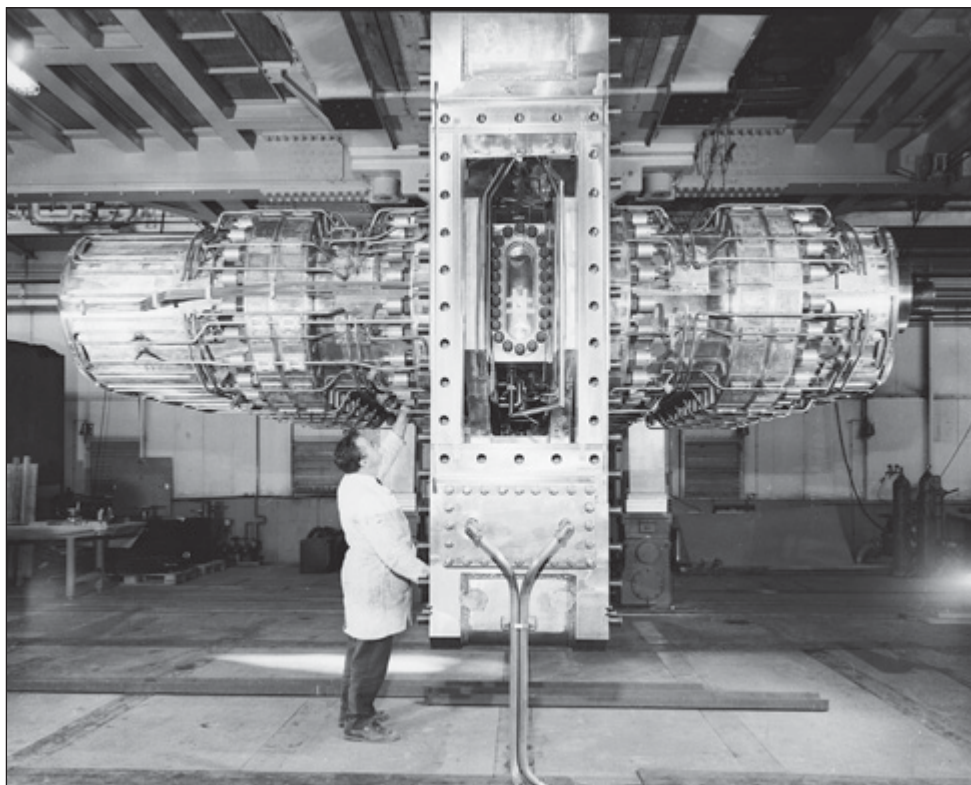
**Figura 5.** El acelerador Bevatrón del Laboratorio Lawrence Berkeley (LBL).



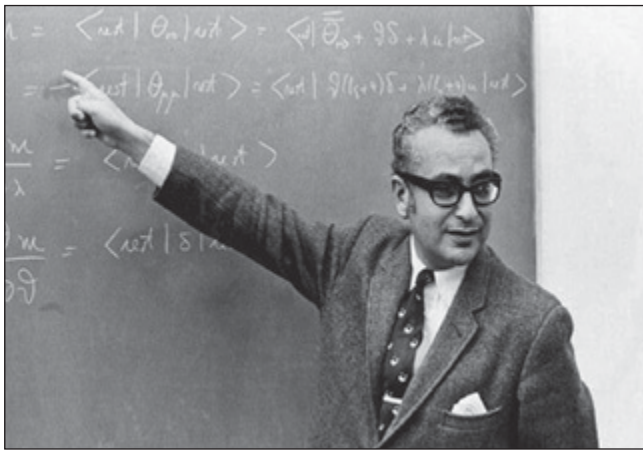
**Figura 7.** Registro de una interacción en la cámara de burbujas de 2m del CERN.

Lawrence (1901-1958) y desarrollados posteriormente en Berkeley bajo su dirección, y las cámaras de burbujas, Figuras 6 y 7, inventadas en 1952 por D.A. Glaser (1926-2013), tomaron el relevo de los rayos cósmicos, las cámaras de Wilson y las emulsiones nucleares.

A principios de la década de los cincuenta entraron en funcionamiento el Ciclotrón de la Universidad de Chicago, que en 1952 permitió acelerar protones hasta una energía de 450 MeV, el Cosmotrón del Laboratorio Nacional de Brookhaven (BNL), que en 1953 permitió



**Figura 6.** La cámara de burbujas de hidrógeno líquido de 2m del CERN.



**Figura 8.** M. Gell–Mann (1929), Premio Nobel de Física en 1969.

acelerar protones hasta una energía de 3,3 GeV, y el Betatrón del Laboratorio Lawrence Berkeley (LBL), que a partir de 1954 permitió acelerar protones hasta una energía de 6,2 GeV. En estos tres aceleradores podían producirse haces secundarios de piones cargados y en el caso de BNL y LBL también se podían producir haces de partículas extrañas cargadas (mesones  $V^\pm$ ;  $K^\pm$  en la nomenclatura posterior).

De hecho, en la instalación de la Universidad de Chicago, cuya construcción dirigió E. Fermi (1901-1954), se descubrió el primer ejemplar de resonancia bariónica, el  $\Delta(1232)$ , estudiando los procesos de colisión pion-protón. En Brookhaven y Berkeley se registraron, en las primeras cámaras de burbujas de grandes dimensiones, muestras estadísticamente importantes de partículas extrañas ( $K^0$ ,  $K^\pm$ ,  $\Lambda^0$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^\pm$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ ) y de sus estados excitados. Estos datos permitieron estudiar con cierto detalle las características de los procesos de producción y las secuencias de desintegración de estas novedosas partículas. En particular, se puso de manifiesto la producción asociada de partículas extrañas en colisiones pion-protón y la existencia de dos modos de desintegración del kaón neutro  $K^0$  ( $K_S^0$ ,  $K_L^0$ ) con vidas medias muy distintas ( $10^{-10}$  s,  $10^{-8}$  s). Estas observaciones confirmaron las hipótesis avanzadas en 1952 por A. Pais (1918-2000), que condujeron a la introducción por M.Gell-Mann (1929), Figura 8, y K. Nishijima (1926-2009) de un número cuántico, denominado extrañeza, que se conservaba en los procesos mediados por la interacción fuerte y se violaba en los procesos de desintegración mediados por la interacción débil.

En 1953, el propio M. Gell-Mann extendió la idea de los multipletes de espín isotópico, introducida por W. Heisenberg (1901-1976), a estas nuevas partículas. Así, por ejemplo, los tres estados de carga del pion ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ) forman un triplete de isospín con espín isotópico  $I=1$  y tercera componente  $I_3 = +1, 0, -1$ ; la pareja  $K^+$  y  $K^0$  forma un doblete de isospín con espín isotópico  $I = 1/2$  y tercera componente  $I_3 = +1/2, -1/2$ ; y, finalmente, la pareja  $\bar{K}^0$  y  $K^-$  forma un doblete de isospín con espín isotópico  $I = 1/2$  y tercera componente  $I_3 = +1/2, -1/2$ .

La propuesta de Gell-Mann fue sin duda un primer paso hacia la elaboración de una metodología para la clasificación de las numerosas nuevas partículas y resonancias que los experimentos en aceleradores ponían de manifiesto de forma continua, Figura 9. En 1961, M. Gell-Mann y Y. Ne’eman (1925-2006), Figura 10, propusieron de forma independiente, [11]-[13], que las distintas representaciones irreducibles del grupo de simetría unitario en tres dimensiones  $SU(3)$  (singlete, octete, nonete, decuplete, etc.) permitían clasificar los hadrones (mesones y bariones) conocidos, con valores del espín  $J$  y la paridad  $P$  definidos, en función de los valores asignados a los números cuánticos espín isotópico  $I$  y extrañeza  $S$  o hipercarga  $Y$ , definida como  $Y = B + S$ , siendo  $B$  el número bariónico, Figura 11. La carga eléctrica  $Q$  está relacionada con la tercera componente  $I_3$  del spin isotópico  $I$  y con la hipercarga  $Y$  por la relación  $Q = I_3 + 1/2 Y$ , Figura 11.

Parks and Rosenfeld UCRL-8030 Table I

Masses and mean lives of elementary particles: November, 1957  
(The antiparticles are assumed to have the same spins, masses, and mean lives as the particles listed)

Particle	Spin	Mass (Errors represent standard deviation) (MeV)	Mass difference (MeV)	Mean life (sec)	Decay rate (number per second)
Photon	1	0		stable	0
Leptons	$\nu$	0		stable	0
	$e^\pm$	0.510976 (a)		stable	0
	$\mu^\pm$	105.70 $\pm$ 0.06 (a)		(2.22 $\pm$ 0.02) $\times 10^{-6}$	0.45 $\times 10^6$
Mesons	$\pi^\pm$	139.63 $\pm$ 0.06 (a)	4.6 (a)	82.56 $\pm$ 0.05 $\times 10^{-8}$ (a)	0.39 $\times 10^8$
	$\pi^0$	135.04 $\pm$ 0.16 (a)		< 4 $\times 10^{-16}$ (d)	> 2.3 $\times 10^{15}$
	$K^\pm$	494.0 $\pm$ 0.2 (g)	0.4 $\pm$ 1.8	(1.224 $\pm$ 0.013) $\times 10^{-8}$ (h)	0.815 $\times 10^8$
	$K^0$	494.4 $\pm$ 1.8 (i)		$K_1$ : (0.95 $\pm$ 0.08) $\times 10^{-10}$ (e) $K_2$ : (4 $\times$ $\tau$ $\leq$ 13) $\times 10^{-8}$ (c)	1.05 $\times 10^{10}$ (0.07 $\times$ $\tau$ $\leq$ 0.25) $\times 10^8$
Baryons	$p$	938.273 $\pm$ 0.01 (a)	7.1 $\pm$ 0.4	stable	0.0
	$n$	939.565 $\pm$ 0.01 (a)		(1.04 $\pm$ 0.13) $\times 10^{-13}$ (a)	0.96 $\times 10^{-3}$
	$\Lambda$	1115.2 $\pm$ 0.14 (j)		(2.77 $\pm$ 0.15) $\times 10^{-10}$ (k)	0.36 $\times 10^{10}$
	$\Sigma^\pm$	1189.4 $\pm$ 0.25 (l)	6.0 $\pm$ 0.9	(0.83 $\pm$ 0.05) $\times 10^{-10}$ (m)	1.21 $\times 10^{10}$
	$\Sigma^-$	1196.5 $\pm$ 0.5 (n)		(1.67 $\pm$ 0.17) $\times 10^{-10}$ (o)	0.60 $\times 10^{10}$
	$\Sigma^0$	1190.5 $\pm$ 0.9 (p)		< 0.1 $\times 10^{-10}$ (b)	> 10 $\times 10^{10}$
	$\Xi^0$	1320.4 $\pm$ 2.2 (q)		theoretically $\sim 10^{-19}$	theoretically $\sim 10^{19}$
$\Xi^-$	?	?	(4.6 $\times$ $\tau$ $\leq$ 200) $\times 10^{-10}$ (f)	> 0.005, $\leq$ 0.2 $\times 10^{10}$	
$\Xi^0$	?	?	?	?	

**Figura 9.** Página resumen de la edición del *Particle Physics Booklet del Particle Data Group* de 1957.





Figura 10. Y. Ne'eman (1925-2006).

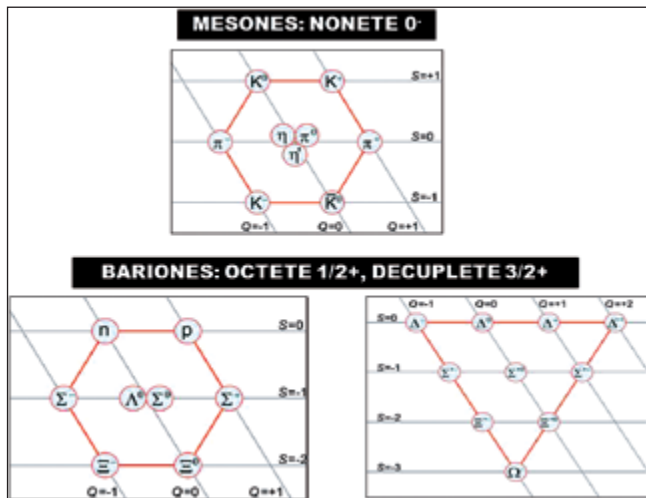


Figura 11. Multipletes de  $SU(3)$  correspondientes al nonete de mesones pseudoescalares ( $J^P=0^-$ ) y al octete y decuplete de bariones con  $J^P=1/2^+$  y  $J^P=3/2^+$ .

M. Gell-Mann bautizó el esquema de clasificación  $SU(3)$  como “*The Eightfold Way*”, en referencia a un aforismo budista que explicita las ocho condiciones para el cese del dolor. Para Gell-Mann, la simetría

unitaria era la generalización más simple de la idea de independencia de la carga eléctrica, que para dos dimensiones da lugar al grupo unitario  $SU(2)$  utilizado por Heisenberg.

La propuesta de Gell-Mann y Ne'eman predecía la existencia de partículas o resonancias aun no descubiertas, en particular un barión con extrañeza  $S=-3$ , para el que Gell-Mann propuso en nombre de  $\Omega^-$ , y que sería descubierto en 1964 en Brookhaven por un equipo de investigadores dirigido por N.P. Samios (1932), Figura 12. También establecía relaciones entre las masas de los distintos multipletes de espín isotópico dentro de las diversas de representaciones del grupo  $SU(3)$ , que progresivamente fueron confirmadas por las medidas experimentales.

En definitiva, el descubrimiento de las partículas extrañas condujo a la extensión del grupo de simetría  $SU(2)$ , basado en la idea de espín isotópico, a una simetría de orden superior,  $SU(3)$ , que, a principios de la década de los setenta, jugaría un papel determinante

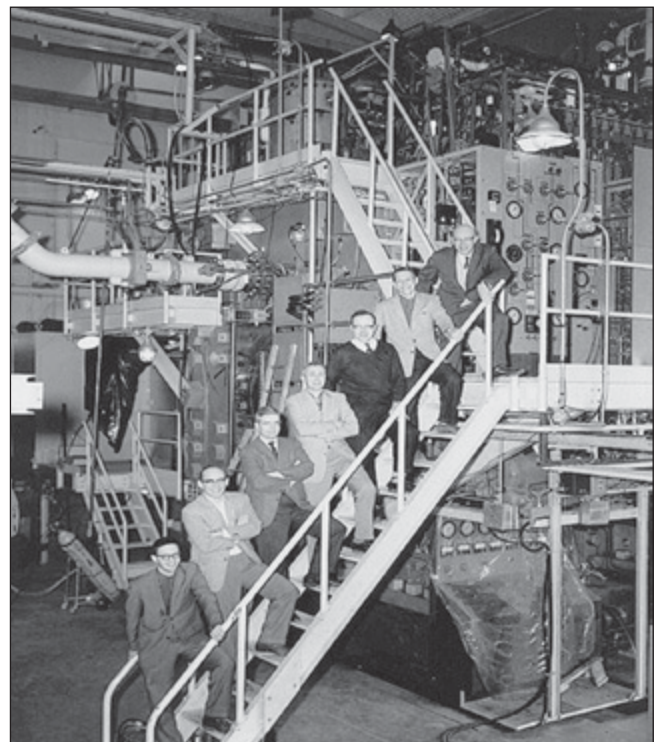


Figura 12. El grupo del Laboratorio Nacional de Brookhaven (BNL) que descubrió el  $\Omega^-$ . El primero por la izquierda es N.P. Samios (1932).

en el desarrollo de la teoría que describe los procesos mediados por la interacción fuerte, la Cromodinámica Cuántica.

A pesar del espectacular éxito fenomenológico del esquema propuesto por Gell-Mann y Ne'eman, quedaba por encontrar una explicación a un hecho diferencial relevante entre los esquemas de simetría  $SU(2)$  y  $SU(3)$ . Mientras que en el caso de  $SU(2)$ , existían estados físicos (protón y neutrón) para la representación fundamental (doblete), en el caso de  $SU(3)$  no parecían existir candidatos físicos que asociar a los generadores de la representación fundamental (triplete). Tampoco podía explicarse por qué los mesones se agrupaban solamente en nonetes y los bariones solamente en octetes y decupletes.

En 1964, de forma también independiente, M. Gell-Mann y G. Zweig (1937), Figura 13, propusieron una solución a esta, hasta cierto punto, incómoda situación, sugiriendo que el triplete fundamental sí existe y está constituido por entidades verdaderamente fundamentales, que Gell-Mann bautizó con el nombre de *quarks* y Zweig con el nombre de *aces*, [14]-[16]. Los números cuánticos (espín isotópico  $I$  e  $I_3$  y extrañeza  $S$ ) de los estados físicos en las distintas representaciones podían construirse a partir de los números cuánticos asignados a los *quarks* en la representación fundamental. Se proponía la existencia de tres tipos o variedades (o sabores) de *quarks*: el *quark*  $u$  (*up*), el *quark*  $d$  (*down*) y el *quark*  $s$  (*strange*). Los mesones serían estructuras



Figura 13. G. Zweig (1937).

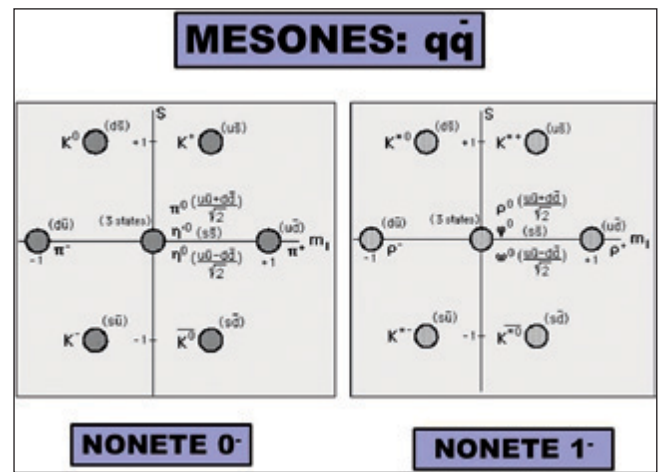


Figura 14. Contenido *quark* de los mesones del nonete pseudoescalar ( $J^P=0^-$ ) y del nonete vectorial ( $J^P=1^-$ ).

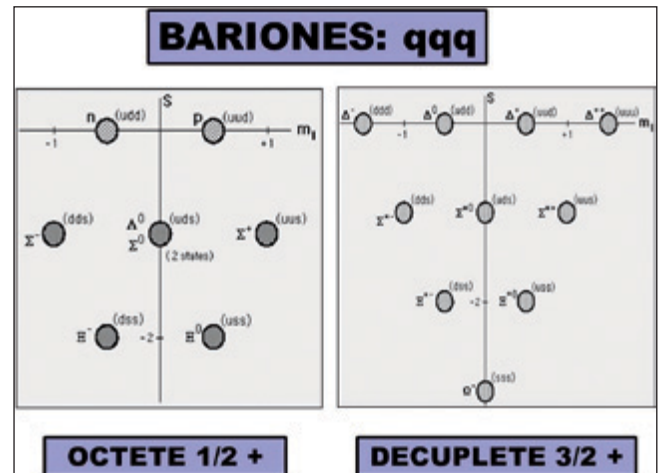


Figura 15. Contenido *quark* de los bariones del octete con  $J^P=1/2^+$  y del decuplete con  $J^P=3/2^+$ .

formadas por una pareja *quark-antiquark* y los bariones por un trío de *quarks*. En las Figuras 14 y 15 se presentan, para algunos multipletes de mesones y bariones, el contenido en *quarks* de los estados físicos experimentalmente observados.

Los caminos seguidos por Gell-Mann y Zweig para hacer una propuesta de constituyentes fundamentales tan revolucionaria (*quarks* y *aces* respectivamente) fueron muy distintos. En el caso de Gell-Mann tuvo su origen en argumentos relacionados con las álgebras de corrientes, mientras que en el caso de Zweig su motivación tuvo un origen más empírico, la observación

de la supresión de ciertos modos de desintegración de mesones vectoriales a priori favorecidos por consideraciones cinemáticas.

Estas dos visiones tal vez explican las reacciones de uno de ellos, que veremos más adelante, cuando las búsquedas experimentales de *quarks* libres resultaron negativas.

Conviene señalar que es, hasta cierto punto inexacto, conceder la primicia de la idea de los *quarks* a Gell-Mann y Zweig [17]. Con anterioridad a las fechas de recepción de los trabajos de Gell-Mann (4 de enero de 1964) y Zweig (17 de enero de 1964) para su publicación, respectivamente en *Physics Letters* y como *CERN Yellow Report*, el físico francés A. Petermann envió el 30 de diciembre de 1963 a la revista *Nuclear Physics B* un trabajo en el que proponía la posibilidad de que los mesones estuviesen formados por pares espinor/anti-espinor y los bariones por un trío de espinores. El hecho de que estos espinores fundamentales debían tener cargas eléctricas fraccionarias (sin duda, una delicada e incómoda consecuencia) probablemente justifica su reacción poco beligerante en esta cuestión. También, como reconocía el propio Gell-Mann, R. Serber del Instituto Tecnológico de Massachusetts, inspirado por una conferencia del propio Gell-Mann sobre el *Eight-fold Way*, había sugerido en 1963 la posible existencia de entidades fundamentales conceptualmente similares a los *quarks*.

En 1969, M. Gell-Mann recibió el Premio Nobel de Física por sus contribuciones y descubrimientos relacionados con la clasificación de las partículas elementales y sus interacciones.

La peculiar composición (parejas y tríos de *quarks*) de los hadrones exigía que los *quarks* tuviesen cargas eléctricas fraccionarias ( $+2/3 e$  en el caso del *quark*  $u$ ,  $-1/3 e$  en el caso de los *quarks*  $d$  y  $s$ ). De esta manera, el protón formado por el trío  $uud$  tendría carga eléctrica  $+e$  y el neutrón formado por el trío  $udd$  tendría carga eléctrica  $0$ .

No es de extrañar que esta atrevida propuesta generase una frenética actividad experimental con el objetivo de encontrar partículas con cargas eléctricas fraccionarias. Desgraciadamente, o no, las búsquedas en experimentos de rayos cósmicos y aceleradores no

produjeron evidencias de la existencia de partículas con cargas eléctricas fraccionarias. Estos resultados negativos generaron considerable polémica acerca de la verdadera naturaleza de los *quarks*. Científicos prestigiosos dudaron de su existencia y argumentaron que no se trataba de entidades físicas reales, si no más bien de un conjunto útil de artilugios nemotécnicos. El propio Gell-Mann escribió en 1964 “*Such particles (quarks) presumably are not real but we may use them in our field theory anyway*” y en 1967 “*Now what is going on? What are these quarks? It is possible that real quarks exist, but if so they have a high threshold for copious production*”, “*The probability that a meson consists of a real quark pair rather than two mesons or a baryon and antibaryon must be quite small*” [4].

Fracasados los esfuerzos iniciales diseñados para la detección directa de *quarks* libres, parecía apropiado insistir en la exitosa estrategia emprendida por el equipo de investigación de la Universidad de Berkeley, liderado por R. Hofstadter (1915-1990), Figura 16, que desde principios de la década de los 50 realizaba experimentos de precisión para caracterizar las colisiones de haces de electrones de alta energía con blancos de materia fijos. En el acelerador lineal Mark III del Laboratorio Hansen de Física Experimental (HEPL) del campus de la Universidad de Stanford, Hofstadter y colaboradores estudiaron las colisiones elásticas de un haz de electrones de 188 MeV de energía con blancos gaseosos de protones y núcleos de helio. En las Figuras 17 y 18 se presentan los diagramas que describen los distintos modos de dispersión (elástica, excitación de



**Figura 16.** R. Hofstadter (1915-1990), Premio Nobel de Física en 1961.



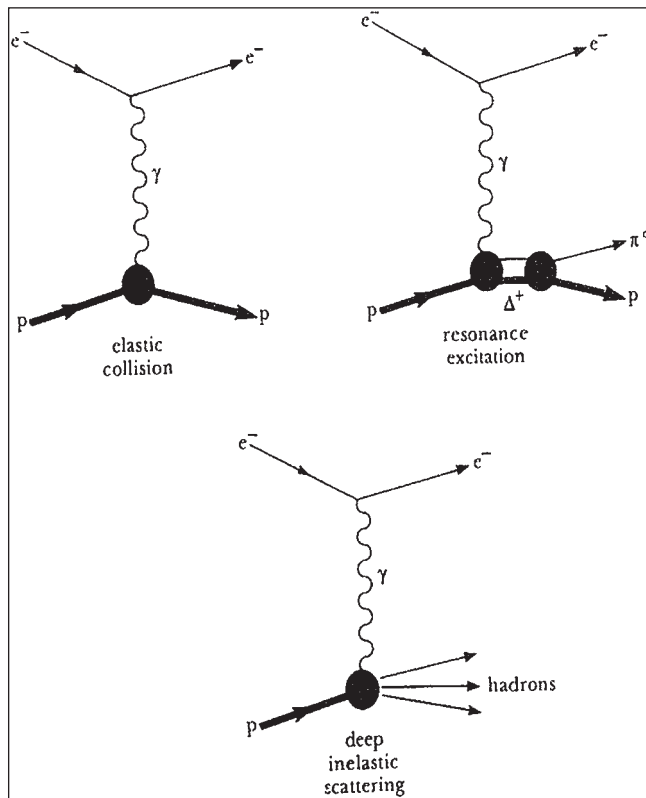


Figura 17. Diagramas de los procesos de dispersión elástica, excitación de resonancias y profundamente inelástica.

resonancias y profundamente inelástica), así como la cinemática y la expresión de la sección eficaz diferencial para la dispersión elástica en términos de los factores de forma eléctrico  $G_E(Q^2)$  y magnético  $G_M(Q^2)$ , siendo  $Q^2$  el cuadrado de la transferencia de momento entre el electrón incidente y el electrón producido en el proceso de dispersión.

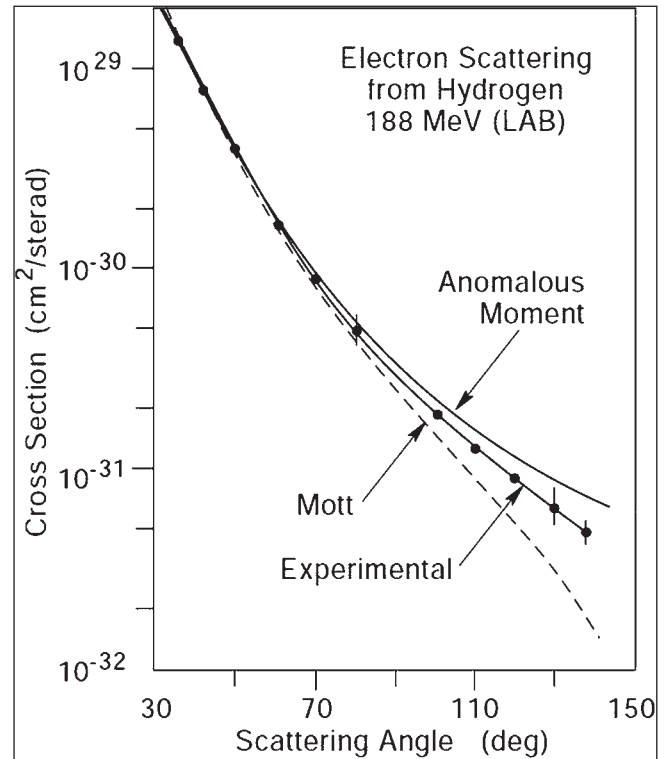


Figura 19. Sección eficaz diferencial elástica medida en el acelerador Mark III de SLAC.

La sección eficaz diferencial medida, Figura 19, resultó ser incompatible con la predicción teórica explicitada en la fórmula de Rosenbluth, extensión de la fórmula de Mott para un protón puntual que incluye los factores de forma de Dirac (que describe la carga eléctrica del protón y el momento magnético asociado) y de Pauli (que describe el momento magnético anómalo). Las medidas de los factores de forma pusieron

**KINEMATICS:**

$$E' = \frac{E_0}{1 + \frac{2E_0}{M} \sin^2\theta/2}$$

$$Q^2 = 4 E_0 E' \sin^2\theta/2 \quad \tau = Q^2/4M^2$$

**ROSENBLUTH FORMULA:**

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 \cos^2\theta/2 E'}{4E_0^2 \sin^4\theta/2 E_0} \left[ \frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{1 + \tau} + 2\tau G_M^2 \tan^2\theta/2 \right]$$

**FORM FACTORS:**

$G = G(Q^2)$   
 $G_E(0) = 1$   
 $G_M(0) = \mu_p$

Figura 18. Cinemática y sección eficaz diferencial para la dispersión elástica.

de manifiesto, por primera vez, que la carga eléctrica en los núcleos que forman los blancos, así como sus momentos magnéticos, tienen una distribución extendida, esto es no puntual. De hecho, Hofstadter obtuvo la primera determinación del radio efectivo del protón  $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 0,74 \pm 0,24$  fm ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ), [18]-[19]. En experimentos posteriores se utilizaron haces de electrones más energéticos, llegando en 1960 hasta 1000 MeV.

En realidad, el grupo de Hofstadter había continuado el camino conceptual iniciado por Rutherford en su laboratorio de la Universidad de Manchester en la segunda década del siglo XIX, donde estudió la dispersión elástica de un haz de núcleos de helio de 7 MeV de energía en un blanco de nitrógeno, llegando a establecer que el radio nuclear era  $\sim 105$  veces más pequeño que el radio atómico.

Entre las diversas iniciativas puestas en marcha en Estados Unidos en el inicio de la segunda mitad del siglo XX, es obligado destacar la decisión tomada en 1962 por el Departamento de Energía de construir una gran instalación en el campus de la Universidad de Stanford, el acelerador lineal de electrones del Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), Figura 20, emblemático laboratorio dirigido por W.K.H. Panofsky (1919-2007) desde sus inicios hasta 1984.

Durante su mandato, SLAC protagonizó tres hitos científicos de enorme relevancia: el descubrimiento de



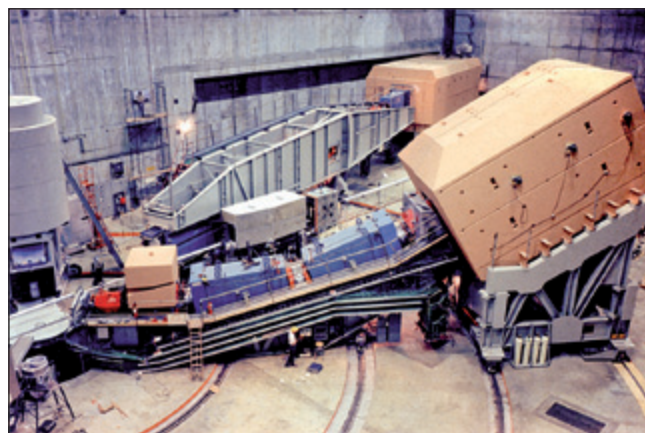
**Figura 20.** Vista aérea de SLAC.

la estructura del nucleón en 1969, el co-descubrimiento del *quark* c en 1974 y el descubrimiento del leptón *tau* en 1975. Estos logros fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1990, 1976 y 1995 respectivamente.

El acelerador lineal, de una longitud de  $\sim 3,2$  km, permitía acelerar electrones y positrones hasta una energía cercana a 20 GeV y estudiar con precisión la dispersión elástica, así como la dispersión inelástica a altos valores del cuadrado de la transferencia de momento  $Q^2$  (posteriormente conocida como dispersión profundamente inelástica).

En 1964 se aprobó el diseño conceptual y la ingeniería de las instalaciones experimentales en la denominada *End Station 2 (ES2)*. En la versión definitiva, el sistema de detección consistía en tres espectrómetros magnéticos, diseñados para medir con precisión el ángulo del electrón dispersado y su energía. Los espectrómetros seleccionaban electrones con energía de 20 GeV en la región angular  $1,5^\circ$ - $25^\circ$ , de 8 GeV en la región angular  $12^\circ$ - $90^\circ$  y de 1,6 GeV en la región angular  $50^\circ$ - $150^\circ$ .

La construcción del dispositivo experimental de un tamaño y complejidad inusual para la época, Figura 21, fue llevada a buen término por una colaboración de grupos de CALTECH, MIT y SLAC. R.E. Taylor (1929) de SLAC, H.W. Kendall (1926-1999) y J.I. Friedman (1930) del MIT, Figura 22, fueron los inves-



**Figura 21.** Vista del experimento instalado en la *End Station 2* de SLAC.

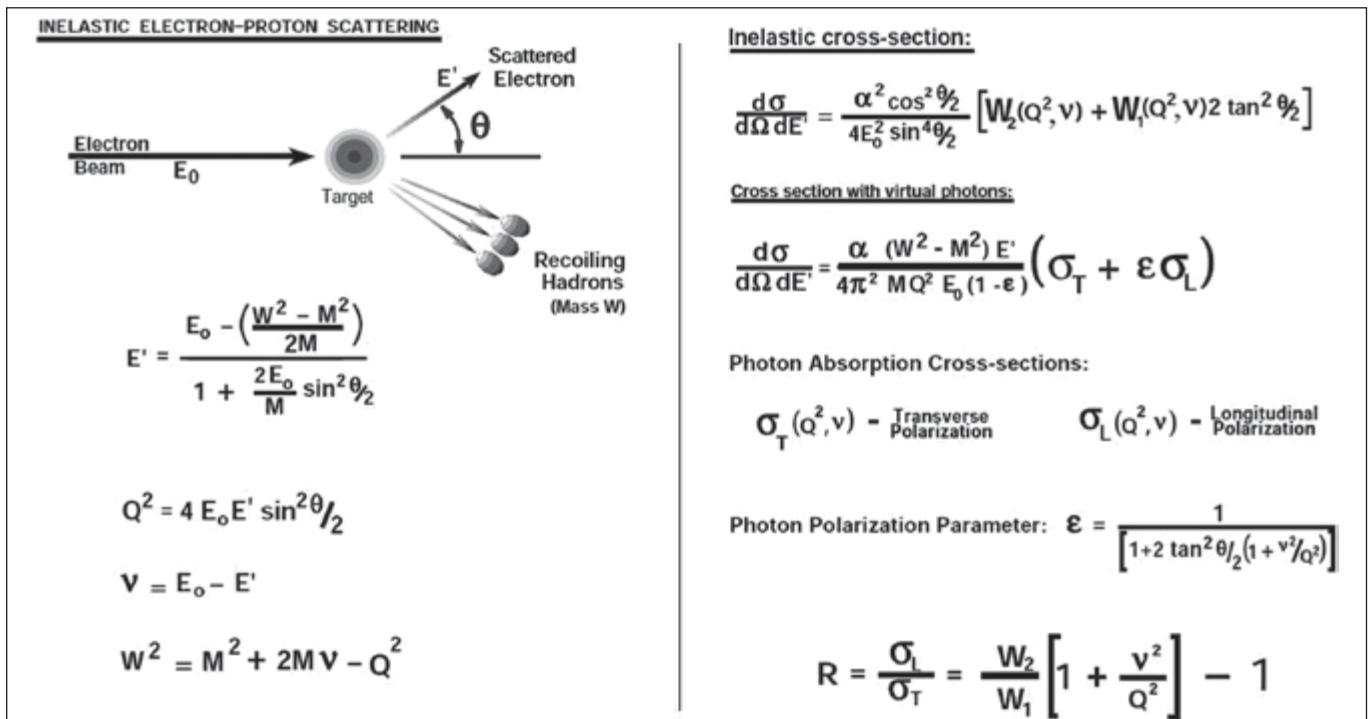


**Figura 22.** Equipo investigador MIT-SLAC del experimento instalado en la *End Section 2* de SLAC. En primera fila, de izquierda a derecha, R.E. Taylor, J.I. Friedman y H.W. Kendall, Premios Nobel de Física en 1990. A su izquierda, W.K.H. Panofsky.

Los investigadores encargados de dirigir la construcción y liderar el análisis e interpretación de los datos experimentales [20]-[24]. En 1990, los tres investigadores recibieron el Premio Nobel de Física.

En la fase inicial del experimento, el objetivo prioritario fue la medida de la dispersión elástica electrón-protón con el espectrómetro de 8 GeV. Posteriormente se procedería a la medida de la dispersión inelástica con el de 20 GeV y finalmente se llevaría a cabo una comparación de las secciones eficaces de la dispersión inducida por electrones y positrones con el espectrómetro de 8 GeV. El espectrómetro de 1,6 GeV se dedicó fundamentalmente a tareas de calibración. En la Figura 23 se resume la cinemática y se da la expresión de la sección eficaz diferencial inelástica en función de las funciones de estructura o de las secciones eficaces de intercambio de fotones con polarización transversa y longitudinal.

En 1965, un par de años antes de la entrada en funcionamiento del dispositivo en *ES2*, el grupo de Hofstadter había presentado una actualización de sus medidas de la dependencia con el momento transferido  $Q^2$  de los factores de forma eléctrico y magnético ( $G_E$  y  $G_M$ ) del protón y neutrón. Por otra parte, los programas experimentales del sincrotrón de electrones de la Universidad de Cornell, del Laboratorio del Acelerador Lineal de Orsay (LAL), del acelerador de electrones en el campus de la Universidad de Harvard en Cam-



**Figura 23.** Cinemática y sección eficaz diferencial para la dispersión inelástica.

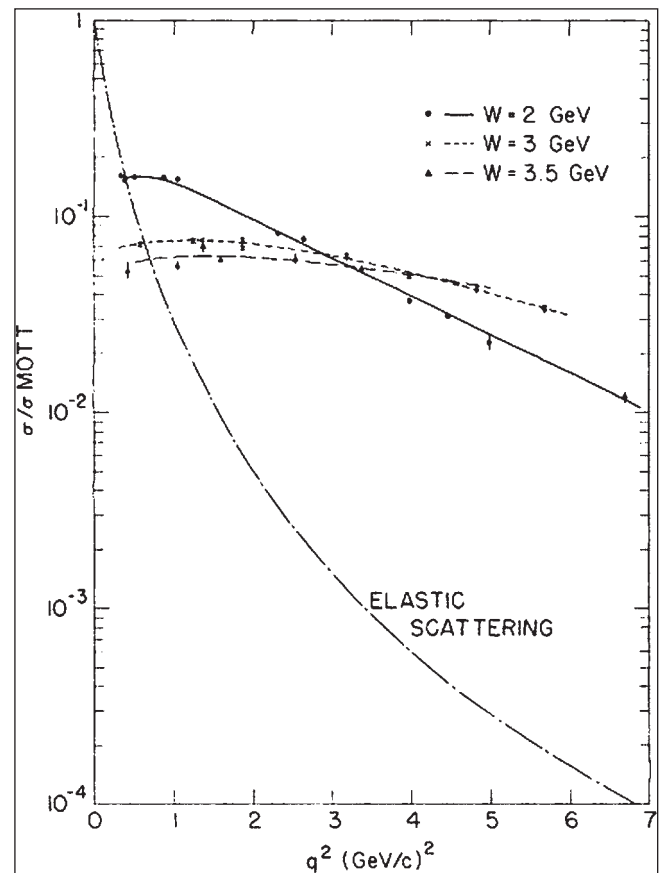


bridge (CEA) y del sincrotrón de electrones de DESY en Hamburgo, extendieron las medidas a valores más altos de  $Q^2$ , obteniendo resultados en buen acuerdo con las extrapolaciones de medidas realizadas a más bajas energías utilizando el modelo dipolar del factor de forma  $G_M$ . Como consecuencia de estas medidas, la idea del protón como un ente compuesto, formado por un núcleo central (*core*), “el protón real”, rodeado de una nube de mesones perdía soporte experimental. En palabras del físico R. Wilson, “*The peach has no pit*”.

Los primeros resultados del experimento realizado en SLAC se presentaron en la conferencia internacional *Lepton Photon Interactions at High Energy* celebrada en SLAC en agosto de 1967. Las secciones eficaces elásticas, que extendían el valor de  $Q^2$  medido hasta  $25 \text{ GeV}^2$ , tenían un comportamiento muy similar a las medidas realizadas en experimentos previos llevados a cabo en CEA y DESY a energías más pequeñas. La sección eficaz elástica disminuía con el momento transferido  $Q^2$ , en razonable acuerdo con el modelo dipolar. Los nuevos datos no aportaban ninguna evidencia acerca de la existencia de un posible núcleo central en el interior del protón.

En septiembre de 1967, el experimento de MIT-SLAC en *ES2*, ya sin la participación de CALTECH, inició el estudio de la dispersión inelástica con el objetivo prioritario de mejorar las medidas de las propiedades de las resonancias bariónicas de alta masa descubiertas en los experimentos llevados a cabo en CEA y LAL. La excitación inelástica de estados no-resonantes se consideró un fondo para esos estudios, estimándose a priori muy pequeña su magnitud. Las primeras medidas, con electrones incidentes de energía  $E_0=10 \text{ GeV}$  y para un ángulo de dispersión de  $6^\circ$ , pusieron de manifiesto que, para energías del electrón dispersado  $E'$  por encima de  $6,5 \text{ GeV}$  (lo que implica un sistema de retroceso con masa efectiva  $W$  superior a  $3,0 \text{ GeV}$ ), la sección eficaz diferencial no presentaba evidencia de la existencia de estructuras que tienen su origen en la excitación de estados resonantes. Por el contrario, mostraba una débil dependencia con la energía  $E'$  y era mucho mayor que la sección eficaz diferencial elástica, Figura 24, [25]-[26].

La observación del distinto comportamiento de la sección eficaz inelástica en la región no resonante, en comparación con la sección eficaz elástica, para simi-



**Figura 24.** Secciones eficaces en función de  $Q^2$  normalizadas a la sección eficaz de Mott para la dispersión elástica e inelástica, para distintos valores de la masa efectiva  $W$ .

lares valores del momento transferido  $Q^2$ , era un hecho totalmente inesperado y novedoso, y que ha tenido extraordinarias consecuencias para la comprensión de la estructura de la materia a la escala más fundamental.

Con anterioridad a la obtención de estos resultados, J.D. Bjorken (1934), Figura 25, físico teórico de SLAC, había anticipado, utilizando técnicas de álgebras de corrientes, una herramienta muy relevante en las argumentaciones que condujeron a Gell-Mann a proponer los *quarks* como constituyentes de los nucleones, que las secciones eficaces inelásticas deberían ser del mismo orden que las calculadas con la fórmula de Mott.

Bjorken también había sugerido que las secciones eficaces inelásticas, que en principio dependen de las variables  $Q^2$  y  $\nu=E_0-E'$ , solo dependían del cociente  $\nu/Q^2$ . Esta dependencia con  $\nu/Q^2$  se conoce con el nombre de escalamiento (“*scaling*”) [27]. La medida



Figura 25. J.D. Bjorken (1934).

de la dependencia del factor de forma  $W_2$  con  $\nu$  para distintos valores de  $Q^2$  o, equivalentemente, la medida de la dependencia con  $\nu/Q^2$  de la función de estructura  $F_2(\omega)=\nu W_2$ , siendo  $\omega=2 M\nu/Q^2$  y  $M$  la masa del nucleón, mostraron evidencia en favor de la hipótesis de escalamiento, Figuras 26 y 27.

Estas medidas experimentales atrajeron de inmediato la atención de R.P. Feynman (1918-1988), Figura 28, que en 1968 propuso el modelo de *partones*, un modelo que asumía que los electrones eran dispersados por bits puntuales de carga eléctrica en el interior de

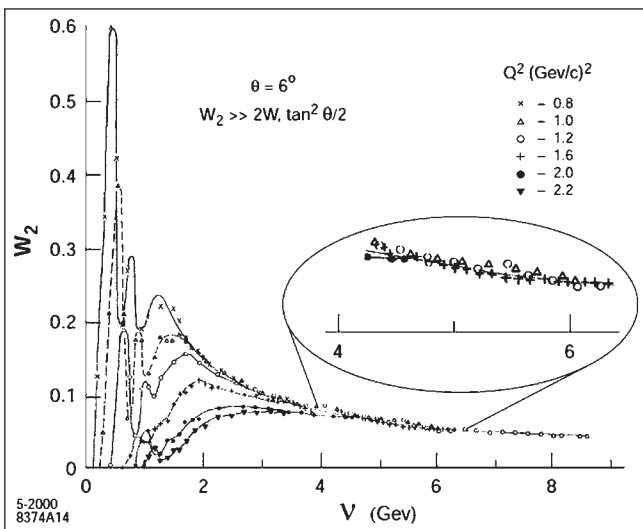


Figura 26. Medida del factor de forma  $W_2$  en función de  $\nu$  para distintos valores de  $Q^2$ .

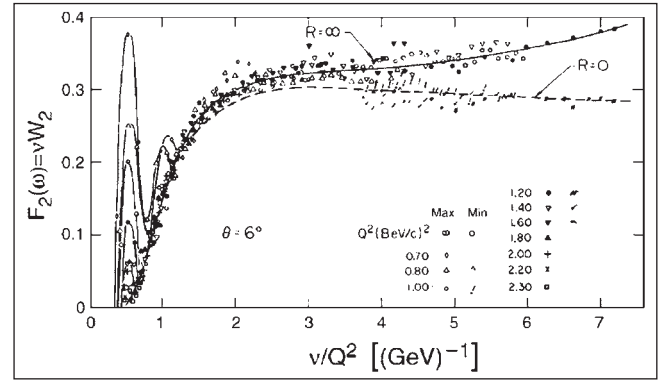


Figura 27. Medida de la función de estructura  $F_2(\omega)$  en función de  $\nu/Q^2$ .

los protones, Figura 29. El modelo ofrecía una imagen física del efecto de escalamiento y una interpretación física de la variable  $x=1/\omega$  como la fracción del momento del protón que lleva el *parton* golpeado por el electrón incidente [28].

Aunque, con anterioridad a la entrada en escena de Feynman, Bjorken ya era consciente de que la dis-



Figura 28. R.P. Feynman (1918-1988), Premio Nobel de Física en 1965.

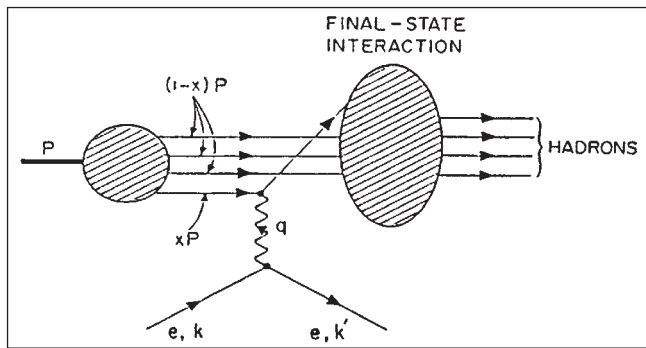


Figura 29. El modelo de partones.

persión en objetos puntuales en el interior del protón generaba escalamiento, hay que reconocer que el entusiasmo de Feynman por la fenomenología de la dispersión profundamente inelástica fue muy positivo para que la comunidad científica adoptase la idea de *partones* y el nuevo paradigma acerca de la estructura puntual de la materia.

Estos datos, presentados en la *International Conference on High Energy Physics* celebrada en Viena en 1968, constituyen un primer hito en el complejo proceso de validación de la hipótesis de los *quarks* como constituyentes fundamentales de la materia. Las medidas realizadas por el experimento de MIT-SLAC en los años siguientes con blancos de neutrones pusieron de manifiesto diferencias significativa entre las secciones eficaces en protones y neutrones, apoyando sugerencias acerca de la existencia de un mar de parejas *quark-antiquark* en el interior de los nucleones, además de los originales *quarks* “de valencia” que establecen los números cuánticos de los hadrones.

Si bien es cierto que, a principios de la década de los 70, se había acumulado importante evidencia experimental en favor de una nueva subestructura fundamental en el interior de los nucleones, es también innegable que aún quedaban numerosas cuestiones por resolver. La primera de ellas relacionada con la carga eléctrica de los *partones*. La segunda con la ausencia de una explicación rigurosa acerca de la imposibilidad de detectar *quarks* libres. Como no suele ser infrecuente en física básica, la respuesta a estas cuestiones iba a exigir conjuntos complementarios de medidas experimentales y desarrollos teóricos profundos.

La respuesta a la primera cuestión tiene su origen en las medidas de las funciones de estructura de los nucleones en procesos de dispersión profundamente inelástica inducidos por neutrinos y anti-neutrinos de alta energía, a las que más adelante seguirían medidas con haces de muones. Por un lado, las medidas de la dependencia con la energía de las secciones eficaces totales con neutrinos y anti-neutrinos, inicialmente realizadas en el CERN con la gigantesca cámara de burbujas de freón líquido *Gargamelle* construida en el LAL de Orsay, mostraban un incremento lineal con la energía y un valor del cociente de las secciones eficaces próximo a 3, tal y como predecían los modelos de *quarks*, Figura 30, [29]. Por otra parte, el valor de la función de estructura  $F_2(x)$  medida con neutrinos era 5/18 del valor obtenido a partir de electrones, en excelente acuerdo con los cálculos teóricos, Figura 31, [30]-[31]. Finalmente, en *Gargamelle* se hizo una primera medida del valor promedio del cuadrado de la carga de los *partones* constituyentes de los nucleones, confirmando su carácter fraccionario, Figura 32, [30]-[31].

La respuesta a la segunda cuestión la proporciona la Cromodinámica Cuántica, la teoría de las interacciones

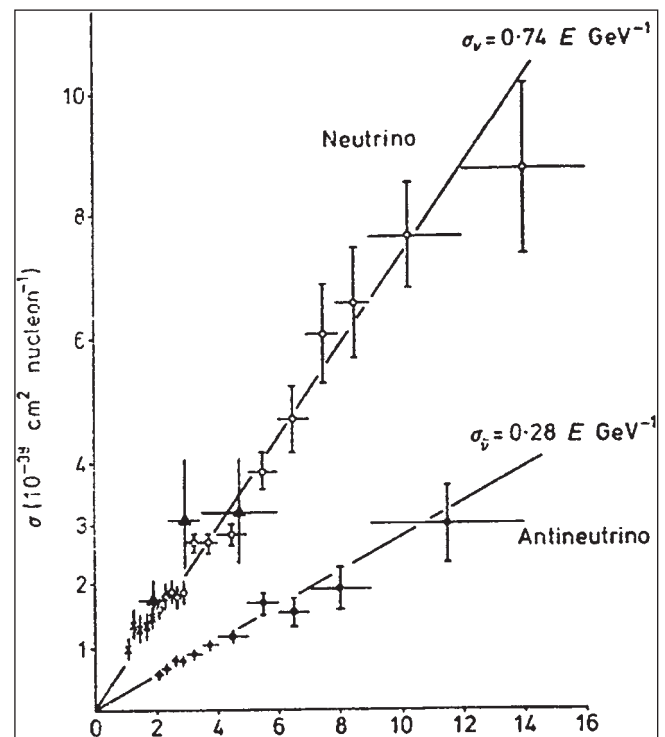
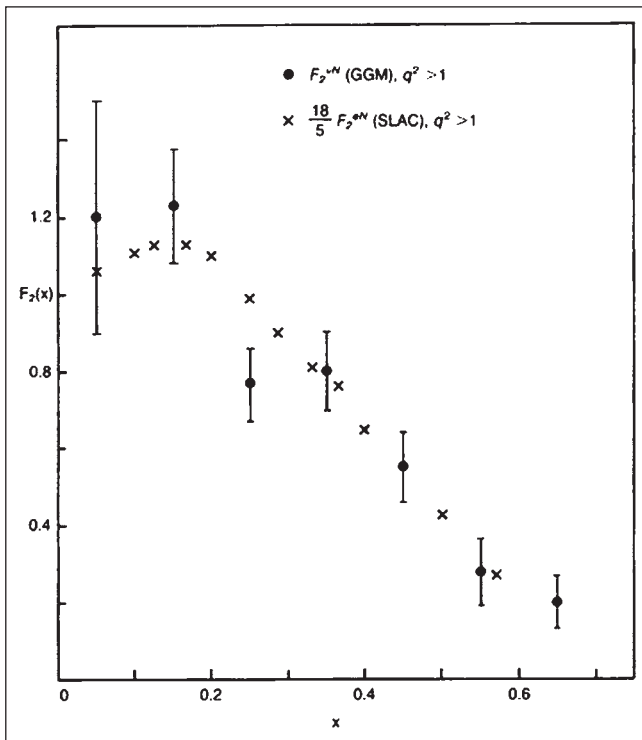


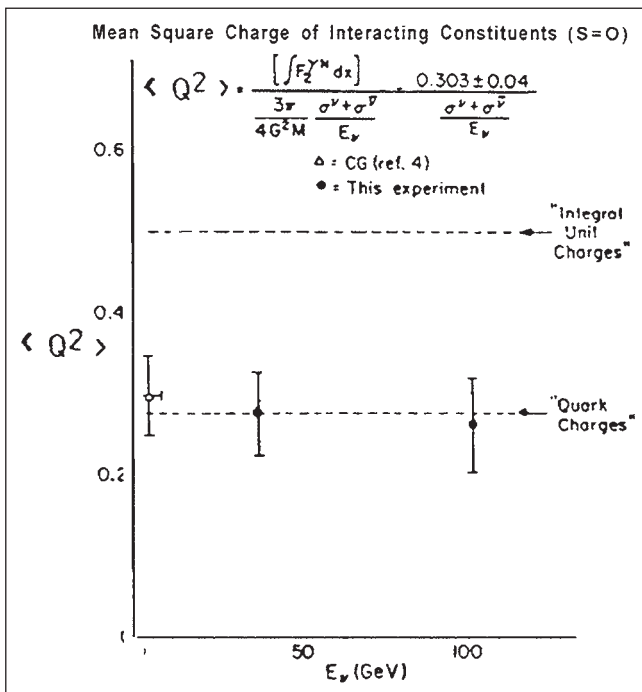
Figura 30. Secciones eficaces totales de neutrinos y anti-neutrinos en función de la energía.





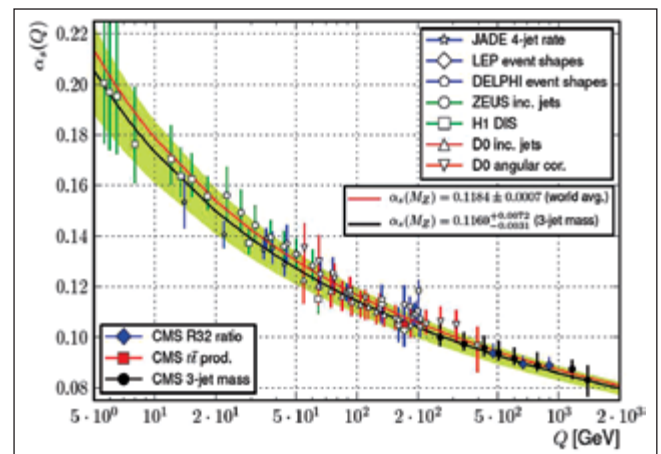
**Figura 31.** Comparación de las funciones de estructura  $F_2$  para la dispersión de neutrinos y electrones.

fuerzas, desarrollada a principios de la década de los 70. Al igual que la teoría unificada electrodébil, formulada por S.L. Glashow (1932), A. Salam (1926-1996) y S. Weinberg (1933) en la década de los 60 y renormalizada por G. 't Hooft (1946) y M. Veltman (1931) en 1972, se trata de una teoría cuántica de campos no-abeliana con simetría *gauge*, en este caso de carga de color  $SU(3)$ . Describe las interacciones fuertes de los *quarks* con color y gluones, partículas vectoriales de ocho tipos diferentes y masa nula que intermedian la interacción fuerte, y tiene la propiedad denominada libertad asintótica, que es la responsable de que las interacciones de *quarks* se hagan progresivamente más débiles a distancias más pequeñas (o, lo que es equivalente, a escalas de energía más grandes). En 1973, D. Gross (1941), D. Politzer (1949) y D. Wilczek (1951) demostraron que la función  $\beta$ , que describe en Cromodinámica Cuántica la variación con el cuadrado de la transferencia de momento  $Q^2$  de la constante de acoplamiento de la teoría,  $\alpha_s(Q^2)$ , bajo el grupo de renormalización, tiene un valor negativo si el número de *quarks* es inferior a 16. El valor negativo de la función  $\beta$  implica que la constante de acoplamiento de la teoría tiende a 0 a pequeñas distancias (libertad asintótica) y crece con la separación entre *quarks* (confinamiento).



**Figura 32.** Valor medio del cuadrado de la carga de los constituyentes que interactúan.

Esta predicción ha sido confirmada por múltiples medidas realizadas en experimentos en colisionadores electrón-positrón, antiprotón-protón, protón-protón, electrón-protón, así como en experimentos con haces de neutrinos, electrones y muones y blancos fijos, Figura 33, [32].



**Figura 33.** Dependencia de la constante de acoplamiento de la interacción fuerte  $\alpha_s(Q)$  con la transferencia de momento  $Q$ .

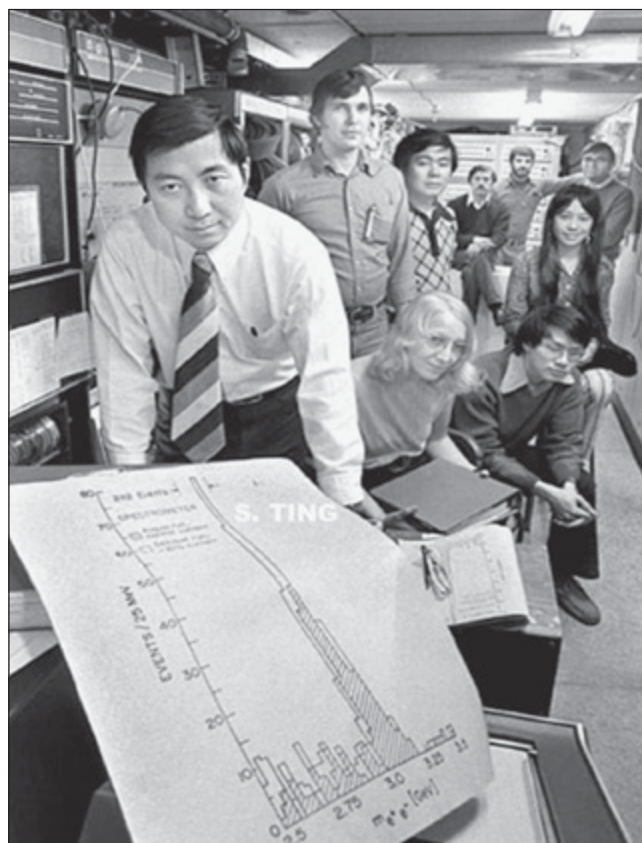
La libertad asintótica de la Cromodinámica Cuántica proporciona riguroso soporte a la interpretación teórica, propuesta por Bjorken y Feynman, de los resultados obtenidos en los experimentos de dispersión profundamente inelástica, que ponían de manifiesto un hecho en apariencia sorprendente: en el interior del protón los *quarks* se comportan como partículas libres, pero que no pueden escapar atravesando la frontera definida por el protón y ser observados experimentalmente.

Aunque con la Cromodinámica Cuántica se despejaban muchas dudas sobre la naturaleza de los *quarks*, estableciéndose sin ambigüedad que se trataba de entidades reales, también quedaba claro que el estudio de sus propiedades sería tarea ardua, toda vez que la detección de los *quarks* en procesos en los que intervienen partículas elementales es siempre indirecta. Esto también se aplica a los agentes que intermedian la interacción fuerte, los gluones.

Por razones bien entendidas en Cromodinámica Cuántica, los *quarks* y gluones, una vez creados, se materializan (fragmentan) en sistemas colimados de hadrones denominados *jets* (chorros). A partir de las propiedades topológicas y de las distribuciones de energía de los constituyentes hadrónicos y leptónicos de estos *jets* se determinan las propiedades de los *quarks* y gluones primarios.

El proceso que desembocó en la validación definitiva de la idea de los *quarks* como entidades físicas reales se inició en noviembre de 1974, cuando los equipos liderados por S.S.C. Ting (1936) en BNL Figura 34, [33] y B. Richter (1931) en SLAC, Figura 35, [34], descubrieron una resonancia muy masiva ( $\sim 3,1$  GeV), pero con una anchura de desintegración –inversamente proporcional a la vida media– extraordinariamente pequeña ( $\sim 93$  keV), el mesón  $J/\psi(1S)$  con números cuánticos  $J^{PC}=1^{-}$ , Figura 36.

En el experimento realizado en Brookhaven, se estudiaban las propiedades, en particular la masa efectiva o invariante, de los pares electrón-positrón que se producen en las colisiones de un haz de protones de alta energía del AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*) con un blanco fijo de berilio. En el caso de SLAC, se estudiaban los procesos de aniquilación electrón-positrón en función de la energía total en el sistema centro



**Figura 34.** S.S.C. Ting (1936), Premio Nobel de Física en 1976.



**Figura 35.** B. Richter (1931), Premio Nobel de Física en 1976.

de masas en el espectrómetro Mark I del colisionador SPEAR (*Stanford Positron Electron Asymmetric Ring*), un complejo detector-acelerador que abrió un camino

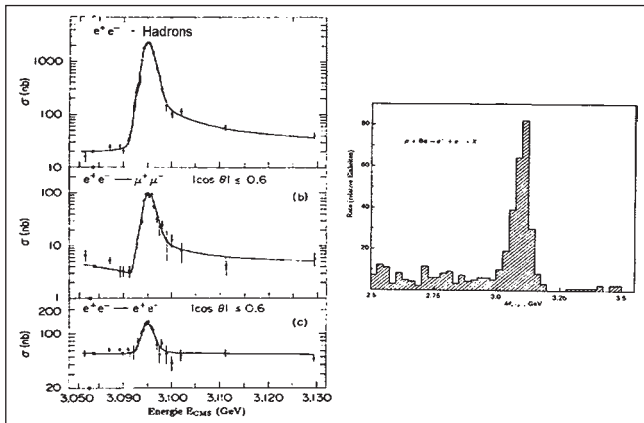


Figura 36. La partícula  $J/\psi(1S)$  descubierta en BNL y SLAC.

nuevo y extraordinariamente exitoso en la experimentación en física de altas energías.

Casi inmediatamente después del descubrimiento del  $J/\psi(1S)$ , en SLAC se descubrió una pléyade de estados excitados del  $J/\psi(1S)$  (por ejemplo, el  $\psi(2S)$ ) y de estados que, en su desintegración radiativa, producían el  $J/\psi(1S)$  (por ejemplo, los estados  $\chi_c(1P)$ ).

El espectro resultante de estados  $J/\psi(1S)$ ,  $\psi(2S)$ ,...,  $\chi_{c1}(1P)$ , etc., posteriormente denominado *charmonium*, se interpretó como una secuencia de estados resonantes formados a partir de un nuevo *quark*, el *quark c* (denominado *charm* o encanto), y su correspondiente *antiquark*  $\bar{c}$ , Figura 37. De esta interpretación se deduce que el  $J/\psi(1S)$ , tiene *charm* o encanto neto 0 (*hidden charm* –o encanto escondido– en el lenguaje de la época).

Algo más tarde, se puso de manifiesto la existencia de un amplio espectro de mesones con modos de desintegración ricos en partículas extrañas (por ejemplo, el  $D^\pm$ , el  $D^0$ , el  $\bar{D}^0$ ) que fueron interpretados como estados con *charm* o encanto neto distinto de 0 (*open charm* –o encanto visible–). Casi al mismo tiempo se observó en la cámara de burbujas 7-ft de Brookhaven un suceso compatible con la producción de un barión encantado, el  $\Sigma^{*++}(2455)$ , que en su desintegración daba lugar a un segundo barión encantado, el  $\Lambda^+(2286)$ .

Gracias a todas estas medidas experimentales y a una intensa actividad teórica y fenomenológica, puede afirmarse que a finales de la década de los 70 la reali-

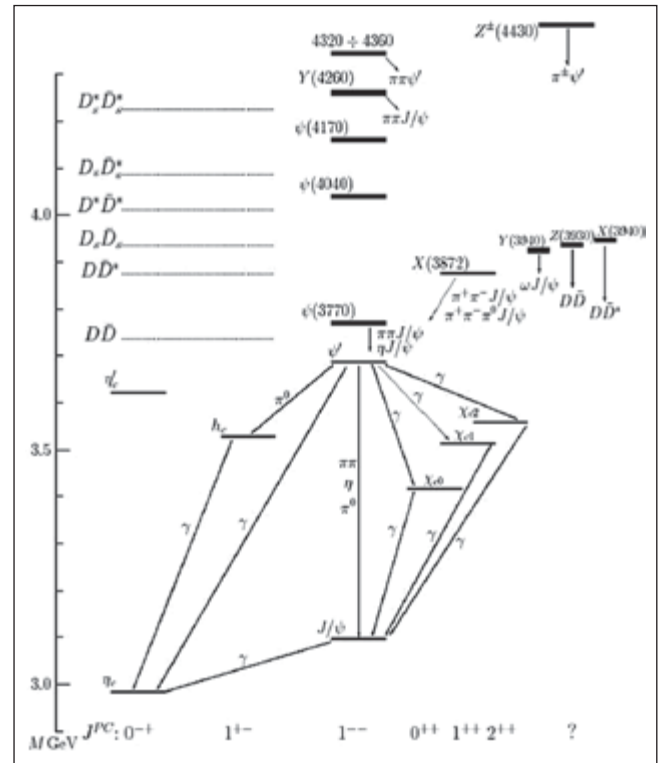


Figura 37. Diagrama de mesones quark c-antiquark  $\bar{c}$ .

dad de los *quarks* estaba unánimemente aceptada por la comunidad científica.

Es apropiado señalar que la posible existencia de un cuarto *quark* fue anticipada por S.L. Glashow, J. Iliopoulos y L. Maiani en 1970, cuando propusieron un modelo para las interacciones débiles con simetría leptón-hadrón (el conocido como mecanismo GIM). De hecho, fue Glashow quien bautizó a este posible nuevo *quark* como *charm quark*.

El descubrimiento en 1975 de un tercer leptón cargado muy masivo, el *tau* ( $\tau$ ) en SLAC, sugirió la posible existencia de nuevos *quarks*, el *quark b* descubierto en 1977 y el *quark t* descubierto en 1995, ambos en FERMILAB.

En el caso del *quark b*, la técnica experimental aplicada fue hasta cierto punto similar a la utilizada en el experimento realizado en BNL, que descubrió la partícula  $J/\psi(1S)$ . En este caso se detectaron, en los estados finales producidos en la colisión de un haz intenso de protones con un blanco fijo de berilio, nuevas partículas



muy masivas que se desintegraban en pares de muones,  $\mu^+\mu^-$ , que se bautizaron como  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$ ,..., y que se interpretaron como resonancias mesónicas formadas por un nuevo *quark*, el *quark*  $b$  y su correspondiente *antiquark*  $\bar{b}$ .

A diferencia de lo ocurrido con el descubrimiento de los *quarks*  $c$  y  $b$ , el descubrimiento del *quark*  $t$  fue directo. En este caso se estudiaron los estados finales producidos en el proceso de aniquilación protón-anti-protón a muy alta energía. Guiados por consideraciones fenomenológicas y por estimaciones obtenidas en el colisionador de electrones y positrones LEP del CERN, que había acotado el intervalo de masas donde debería materializarse el *quark*  $t$ , se procedió a medir la masa efectiva de sus posibles estados finales de desintegración, observándose que, en la región favorecida por las predicciones, exhibía comportamiento resonante, lo que permitió hacer una determinación directa del valor de su masa.

El carácter muy masivo del *quark*  $t$ , del orden de 173 GeV, y el alto valor de su anchura de desintegración, del orden de 2 GeV, implican que ésta tiene lugar con una pequeñísima vida media. En definitiva, el *quark*  $t$  se desintegra antes de poder formar estados constituidos por él mismo y por su correspondiente *antiquark*  $\bar{t}$  u otro tipo de *antiquarks*.

En las décadas posteriores al descubrimiento de los *quarks* pesados (*quarks*  $c$  y  $b$ ), el estudio de las propiedades de los hadrones con al menos uno de estos *quarks* en su constitución, ha sido un elemento muy importante en los programas experimentales de los grandes laboratorios con aceleradores (BNL, SLAC, Cornell, FERMILAB, DESY, LAL, CERN, KEK) y ha generado una rica fenomenología. Igual suerte ha corrido el *quark*  $t$ ; el estudio de sus propiedades estáticas y modos de desintegración ha tenido notable relevancia.

Las múltiples y diversificadas medidas de alta precisión han permitido profundizar en la comprensión de una gran variedad de fenómenos, entre ellos la detección de las oscilaciones  $B^0-\bar{B}^0$  y la evidencia de la violación de la simetría CP en el sector del *quark*  $b$  y la observación de la mezcla de *quarks* y su cuantificación en el marco de la matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa.

Más recientemente, las medidas electrodébiles de las desintegraciones del bosón  $Z$  en la pareja de *quarks*  $b-\bar{b}$ , así como la medida de la masa del *quark*  $t$ , todas ellas de alta precisión, ha tenido enorme importancia a la hora de establecer restringidos intervalos de masa para la materialización del bosón de Higgs. Es evidente que, en el futuro, la física de los *quarks* pesados ( $c$ ,  $b$ ,  $t$ ) seguirá jugando un papel destacado en el programa del acelerador LHC (*Large Hadron Collider*) del CERN.

La idea de los *quarks* como constituyentes últimos de los nucleones, y por extensión de los núcleos atómicos, es uno de los pilares sobre los que se ha construido el Modelo Estándar de Partículas e Interacciones, una teoría basada en principios de simetría, con gran poder predictivo, que explica la práctica totalidad de las medidas realizadas en procesos donde intervienen partículas elementales. Los otros pilares son la descripción unificada de las interacciones electromagnéticas y débiles, la identificación de la libertad asintótica como propiedad distintiva de la interacción fuerte y el mecanismo desarrollado por R. Brout (1928-2011), F. Englert (1932) y P.W. Higgs (1929) para la rotura espontánea de la simetría electrodébil.

El descubrimiento de la estructura puntual (los *quarks*) de la materia ha tenido un impacto extraordinario en la manera de entender la física a su escala más fundamental. Como resumía Bjorken hace más de 30 años, durante la primera mitad de la década de los 60, el lenguaje teórico hacía permanente referencia a relaciones de dispersión, polos de Regge, *bootstrap*, democracia nuclear, álgebras de corrientes, argumentos asintóticos, tests de Electrodinámica Cuántica, simetrías, etc.

Tras el frenesí del periodo 1967-1977, que llevó a Feynman a sentenciar “*The age in which we live is the age in which we are discovering the fundamental laws of nature and this age will never come again*”, el lenguaje cambió drásticamente y esta transformación ha hecho que, desde hace 40 años, la discusión se haya focalizado en colisiones duras, distribuciones de *partones*, principios *gauge*, teorías de gran unificación, modelos de *quarks*, teoría electrodébil, libertad asintótica, tests de Cromodinámica Cuántica, simetrías, etc. En cierta forma, se ha pasado de discutir características exclusivas de procesos a discutir propiedades de naturaleza inclusiva.

El descubrimiento en el acelerador LHC del CERN, anunciado en julio de 2012, de la partícula predicha por el mecanismo de Brout-Englert-Higgs, formulado en 1964, para subsanar determinadas flaquezas de las teorías basadas en el principio de simetría *gauge* (que impone que las partículas de materia –*quarks* y leptones– y las partículas de fuerza –los bosones vectoriales *gauge* Z y  $W^\pm$  propagadores de la fuerza débil– tienen que tener masa nula) completa el Modelo Estándar, pero deja sin respuesta al menos dos embarazosas cuestiones básicas.

La primera de ellas está relacionada con la naturaleza de los neutrinos, Dirac o Majorana, y la segunda está relacionada con la proliferación, aparentemente innecesaria, de constituyentes fundamentales (6 tipos de *quarks*, cada uno en tres colores cuánticos, tres tipos de leptones cargados y tres tipos de leptones neutros o neutrinos).

Es bien conocido que todos los núcleos de los átomos de nuestro sistema solar, que aparecen en la tabla periódica de Mendeleiev, están formados por protones y neutrones, en definitiva por *quarks* u y d. A día de hoy, no disponemos de un argumento convincente y definitivo que justifique la existencia de tres y solo tres réplicas del cuarteto de constituyentes básico formado por el *quark* u, el *quark* d, el electrón y el neutrino asociado. La necesidad de disponer de al menos tres familias de *quarks*, para acomodar en el marco del Modelo Estándar el fenómeno de la violación de la simetría CP descubierto en 1964, fue formulada por M. Kobayashi (1944) y T. Maskawa (1940) en 1973, esto es con anterioridad al descubrimiento de los *quarks* c, b y t, pero todavía no hay una explicación profunda de por qué solo hay tres.

Por otra parte, medidas astronómicas y astrofísicas recientes (las anisotropías de la radiación del fondo cósmico de microondas, la luminosidad de las supernovas lejanas, la evolución de la morfología de los cúmulos galácticos) han permitido, cuando se analizan en el contexto de la teoría general de la relatividad, precisar la naturaleza del contenido de materia-energía del universo.

El resultado más sorprendente de este ambicioso ejercicio ha sido cuantificar que la fracción de materia construida a partir de los nucleones ordinarios, representa solo un modesto 5% del total. Otro 27%

corresponde a un tipo de materia cuya existencia inferimos por sus efectos gravitatorios, pero que no emite ni absorbe radiación electromagnética de forma significativa (y de ahí que se denomine materia oscura) y por lo tanto no puede construirse a partir de los *quarks* de Modelo Estándar. El resto, un 68%, corresponde a un tipo de energía repulsiva, denominada energía oscura, que parece ser el agente responsable de la expansión acelerada del universo descubierta al analizar la luminosidad de las supernovas lejanas y que algunos escenarios teóricos identifican con la constante cosmológica introducida por Einstein.

El Modelo Estándar explica, con las limitaciones esbozadas, el 5% reseñado en el párrafo anterior, y puede decirse que rellena el hueco en el conocimiento de lo que podría llamarse “ordinario”. El desentrañar la naturaleza de la materia y energía oscuras es el futuro gran desafío pendiente, cuya solución nos permitirá rellenar, al menos en parte, el hueco en el conocimiento de lo realmente “extraordinario”.

El Modelo Estándar tampoco ofrece un mecanismo eficiente para explicar la aparente desaparición de la antimateria cósmica primaria, que debió ser muy abundante en el universo primordial, inmediatamente después del *Big Bang*. La magnitud de los fenómenos de violación de la simetría CP, uno de los ingredientes de la propuesta de A.D. Sakharov (1921-1989) para su explicación en términos de las leyes de la microfísica, medidos hasta la fecha no parece suficiente para explicar la evolución asimétrica del universo en lo que respecta a su contenido materia-antimateria.

En definitiva, quedan numerosas y fascinantes cuestiones por resolver, toda vez que nuestro conocimiento preciso del mundo microscópico solo nos permite explicar las propiedades (y no todas) de un 5% del total de la materia-energía del universo.

Para enfrentarse a estos imponentes desafíos, la comunidad científica ha diseñado y puesto en práctica una ambiciosa hoja de ruta, con agresivos programas experimentales en numerosos centros de investigación en Europa, Estados Unidos, Japón, China, etc. En particular, el acelerador LHC del CERN inicia a mediados de 2015 la segunda fase de operación con prestaciones (energía de los haces de protones y luminosidad) significativamente superiores. Como ya hemos mencionado,

el estudio, entre otros temas, de las propiedades de los hadrones B (con un *quark* constituyente de sabor b) y del *quark* t figuran entre los objetivos prioritarios. La búsqueda de nuevas generaciones o familias de *quarks* y de réplicas supersimétricas de las 6 variedades de *quarks* identificadas hasta la fecha son, igualmente, objetivos científicos de fascinante interés.

Cincuenta años después de que Gell-Mann y Zweig propusieran la revolucionaria idea de los *quarks*, que implicaba la existencia de una nueva escala básica dimensional de la materia, el estudio de las propiedades de los *quarks* mantiene su interés y actualidad. Hasta la escala de distancias ya explorada,  $10^{-19}$  m, estos nuevos constituyentes fundamentales, los *quarks*, no parecen exhibir subestructura.

No obstante, conviene tener presente que durante más de medio siglo, desde 1913 hasta 1969, estuvimos persuadidos de la naturaleza verdaderamente elemental del protón. Es por lo tanto lógico y legítimo preguntarse, ¿hasta cuándo durará nuestra convicción de que los *quarks* son realmente elementales?

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi reconocimiento a la Dra. María Isabel Josa Mutuberría por la minuciosa revisión del documento y las numerosas sugerencias y correcciones y a Carlos Díaz por su ayuda en cuestiones técnicas.

## REFERENCIAS

- [1] “*The Experimental Foundations of Particle Physics*”, Robert Cahn and Gerson Goldhaber, Cambridge University Press (2009).
- [2] “*Introduction to Elementary Particle Physics*”, Alessandro Bettini, Cambridge University Press (2008).
- [3] “*The Discovery of Subatomic Particles*”, Steven Weinberg, Cambridge University Press (2003).
- [4] “*Inward Bound*”, Albraham Pais, Oxford University Press (1994).
- [5] “*The Hunting of the Quark*”, Michael Riordan, Simon and Schuster/Touchstone Books (1987).
- [6] “*Particle Physics. One Hundred Years of Discoveries*”, AIPP Press, American Institute of Physics (1996).
- [7] “*Partículas e Interacciones*”, Manuel Aguilar, Discurso de Ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (2002).
- [8] “*De Hess a Higgs. De la ionización espontánea del aire a la rotura espontánea de la simetría en Física Subatómica*”, Manuel Aguilar, Lección Inaugural del Año Académico 2013-2014, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- [9] “*L'enigma dei raggi cosmici. Le più grandi energie dell'universo*”, Alessandro De Angelis, Springer-Verlag, Italia (2012)
- [10] M. Aguilar, Rev. R. Aca. Cien. Exact. Fis. Nat, Vol 105, Nº 1-2 (2013).
- [11] M. Gell-Mann, CTSL-20 (1961).
- [12] M. Gell-Mann, Phys. Rev. 125 (1962) 1067.
- [13] Y. Ne'eman, Nucl. Phys. 26 (1961) 222.
- [14] M. Gell-Mann, Phys. Lett. 8 (1964) 214.
- [15] G. Zweig, CERN-8182-401 (1964).
- [16] G. Zweig, CERN-8419-412 (1964).
- [17] “*Who invented quarks?*”, Álvaro de Rújula, CERN Courier, 30 abril 2014.
- [18] R.W. McAllister and R. Hofstadter, Phys. Rev. 102 (1956) 851.
- [19] R. Hofstadter, “*The electron-scattering method and its application to the structure of nuclei and nucleons*”, Nobel Lecture, 11 diciembre 1961.
- [20] R.E.Taylor, “*Deep Inelastic Scattering: The Early Years*”, Nobel Lecture, 8 diciembre 1990.
- [21] H.W. Kendall, “*Deep Inelastic Scattering: Experiments on the proton of nuclei and the observation of scaling*”, Nobel Lecture, 8 diciembre 1990.
- [22] J.I. Friedman, “*Deep Inelastic Scattering: Comparisons with the Quark Model*”, Nobel Lecture, 8 diciembre 1990.
- [23] J.I. Friedman and J.D. Bjorken, “*The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*”, Cambridge University Press (1997).
- [24] R.E.Taylor, “*The Discovery of the Point-Like Structure of Matter*”, SLAC-PUB-8640, septiembre 2000.
- [25] E.D. Bloom et al., Phys. Rev.Lett.,23 (1969) 930.
- [26] M. Breidenbach et al, Phys. Rev. Lett., 23 (1969) 935.
- [27] J.D. Bjorken, Phys. Rev. 179 (1969) 1547.
- [28] R.P. Feynman, Phys. Rev. Lett. 23 (1969) 1415.
- [29] T. Eichten et al., Phys. Lett. 46B (1973) 274.
- [30] *Proceedings of the XVI International Conference on High Energy Physics*, Chicago (1972).
- [31] *Proceedings of the XVII International Conference on High Energy Physics*, Londres (1974).
- [32] *Review of Particle Physics*, Chinese Physics C, Volume 38, Number 9 (2014).
- [33] J.J. Aubert et al., Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1404.
- [34] J.E. Augustin et al., Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1406.