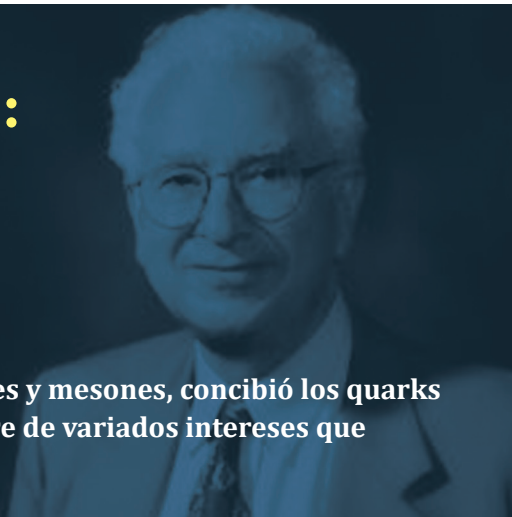


## Murray Gell-Mann: retrato de una época

por J. Adolfo de Azcárraga\*

El gigante de la física que puso orden en el zoo de bariones y mesones, concibió los quarks y abrió el camino al modelo estándar, fue también hombre de variados intereses que incluyeron la complejidad, la arqueología o el lenguaje.



### El camino hacia la física

Murray Gell-Mann (15-IX-1929–24-V-2019) nació en el bajo Manhattan en 1929, hijo de inmigrantes judíos del Imperio Austrohúngaro. Su padre, de la región de Galicia, llegó a los Estados Unidos al comienzo del siglo xx con veinte años; su madre, al poco de nacer. Murray vino al mundo pocas semanas antes del hundimiento de la Bolsa y del comienzo de la Gran Depresión, que afectó seriamente a la familia pues su padre tenía una modesta academia de idiomas. Murray, claramente un niño prodigio, siempre agradeció los cuidados e influencia de su hermano Ben, dos años mayor, por lo mucho que había aprendido con él: “me enseñó casi todo lo que sabía cuando era pequeño”. Ben acabó siendo fotógrafo y, harto de las letras dobles y del guion de su apellido, decidió cambiarlo por Gelman, en lo que Murray no le siguió. Con 14 años se graduó siendo *valedictorian* en la Columbia Grammar School, a la que asistió con beca y donde sus compañeros lo consideraban una enciclopedia andante; de hecho, el joven Murray se saltó dos cursos dada su inteligencia. Cuando llegó el momento de ir a la universidad, en 1944, pensaba en estudiar arqueología o lenguas, ocupaciones que su padre consideraba sin futuro: “te morirás de hambre”, le dijo. Así pues, conocedor de las dotes matemáticas de Murray, le propuso estudiar ingeniería, a lo que éste se negó alegando que cualquier cosa que diseñara se caería a pedazos. Su padre le sugirió entonces, como

compromiso, que estudiara física. Murray la había encontrado aburrida, pero su padre argumentó que cuando estudiara relatividad y mecánica cuántica cambiaría de opinión. Así pues, con quince años Murray obtuvo una beca completa para estudiar física en Yale, donde concluyó su BSc en 1948. Gell-Mann recordaría de esa época las excelentes clases de Henry Margenau sobre filosofía de la física, que tenían mucho más de lo segundo que de lo primero. Después se trasladó al MIT, donde concluyó su Ph.D. (en física nuclear) bajo la supervisión de Victor Weisskopf, ‘Viki’, en 1951: tenía 21 años. Ese mismo año se trasladó al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, cuyo director era Robert Oppenheimer, el antiguo líder científico del Proyecto Manhattan. En el IAS estaba Albert Einstein, entonces dedicado a su infructuosa búsqueda de la teoría unificada de la gravedad y el electromagnetismo; sin embargo, Gell-Mann no estableció contacto con él, algo que lamentaría más tarde. Pero allí trabó amistad con Francis Low, con quien inició una colaboración que después daría lugar a un artículo fundamental para la comprensión de la electrodinámica cuántica (QED).

### Los primeros trabajos y su llegada a Caltech

Durante una estancia en el Departamento de Física y en el Instituto de Estudios Nucleares de la Univ. de Chicago, donde estaba Enrico Fermi, Gell-Mann explicó basándose en un análisis de Abraham Pais las desintegraciones de las ‘nuevas partículas inestables’ como los kaones (bosones) e hiperones (fermio-

nes) [M. G.-M., *Isotopic Spin and New Unstable Particles*, Phys. Rev. **92**, 833-834 (1953)]; tenía 23 años. El problema también fue considerado por un igualmente joven —26 años— K. Nishijima. El nombre del nuevo número cuántico requerido, *extrañeza*, recordaba que las partículas con ese atributo tenían desintegraciones que se habían considerado ‘extrañas’ antes de concluir que esa propiedad debía preservarse en las interacciones fuertes; el nombre se adoptó enseguida, pese al disgusto de Pais y a que Nishijima propuso otro distinto. La estancia de Gell-Mann en Chicago fue breve: en la primavera de 1955 regresó a Princeton. Allí estaba su novia inglesa Margaret Dow, arqueóloga experta en la civilización micénica y con quien se casó en abril; Margaret falleció de cáncer en 1981 (en 1992, Gell-Mann se casó en segundas nupcias con la poeta y profesora de la Univ. de Nuevo Méjico Marcia Southwick, matrimonio que concluyó en divorcio). Ese 1955 Gell-Mann se trasladó al Instituto Tecnológico de California en Pasadena, Caltech, donde fue nombrado *full professor* —el más joven— en 1956.

Fue Richard (‘Dick’) Feynman, once años y medio mayor, quien había pedido que Caltech incorporara a Gell-Mann<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> A finales de los cincuenta, el extraordinario Departamento de Física de Caltech albergaba a C. Anderson, R. Feynman, W. Fowler, M. Gell-Mann, S. Glashow, R. Mössbauer y K. Wilson. Y. Ne’eman y J.J. Sakurai eran visitantes; S. Coleman, R. Dashen y G. Zweig estudiantes. En Caltech estaban también M. Delbrück (el físico que inventó la biología molecular) y L. Pauling. En total, nueve

\* Dpto. de Física Teórica de la Universidad de Valencia e IFIC (CSIC-UV).



Murray y Dick, Rochester Conf. 1957 (Emilio Segre Archives).

quien aceptó encantado ante la perspectiva de colaborar con él, colaboración que efectivamente se dio aunque también generaría una rivalidad ocasionalmente tormentosa. Feynman le comentó que su trabajo con Low, concluido en el verano de 1953 en la Universidad de Illinois poco antes de que Gell-Mann se trasladara a la de Chicago, era el único resultado en la QED que le había sorprendido. En ese artículo [*Quantum Electrodynamics at Small Distances*, *Phys. Rev.* **95**, 1300-12 (1954)], Gell-Mann y Low habían introducido lo que se llamaría ‘grupo de renormalización’ (considerado después por N. N. Bogoliubov y D. V. Shirkov en 1955). En él estudiaron la variación de la constante de acoplamiento de QED con la energía. A bajas energías la constante de estructura fina  $\alpha$  es aproximadamente  $1/137$ , pero a 200 GeV es ya  $1/127$  como confirmarían años después los resultados del LEP en el CERN. Este aumento con la energía de la *running coupling constant* de QED, que es una teoría gauge abeliana, no se da para todas las interacciones, algo muy importante como se verá. En general, el método del grupo de renormalización, anticipado por A. Peterman y E. C. G. Stückelberg en *La normalisation des constantes dans la théorie des quanta* [*Helv. Phys. Acta* **26**, 499-520 (1953)], permite estudiar el comportamiento de un sistema físico a escalas diferentes. Años después Kenneth Wilson, quien se doctoró con Gell-Mann en 1961, aplicó las técnicas del grupo de renormalización a la física de la materia condensada; su teoría de los fenómenos críticos en conexión con las transiciones de fase le valió el Nobel de 1982, no compartido como el de su maestro. Wilson también inició la *lattice gauge theory* [K. G. W., *Confinement of Quarks*, *Phys. Rev.* **D10** 2445-2459 (1974)] adecuada al límite del acoplamiento fuerte, y jugó un papel esencial en la interpretación de las teorías cuánticas de campos como teorías ‘efectivas’, *effective*, palabra que

premios Nobel actuales o futuros; no en vano en esa época Caltech era conocido como el “cuerpo de *marines* de las *graduate schools* estadounidenses”.

hubiera sido mejor traducir como *eficaces* pues eso es lo que son: teorías que describen eficazmente los experimentos a las energías consideradas a la espera de una teoría más general que no tenga esas limitaciones.

### La teoría V-A: colaboración y rivalidad con Feynman

Gell-Mann y Feynman —Dick y Murray, como se conocía en Caltech a la inseparable pareja con despachos casi contiguos— colaboraron en un avance esencial para el futuro modelo estándar de las partículas elementales: la teoría V-A de la interacción débil. La describieron por medio del producto de dos corrientes V-A *i.e.*, formadas por la diferencia entre el bilineal vector  $V$  y el vector axial  $A$ , lo que necesariamente viola la paridad como corresponde a las interacciones débiles, y con una única constante de acoplamiento (universalidad *à la Fermi*). De esta forma descartaban la intervención de los otros bilineales fermiónicos,  $S$ ,  $P$  y  $T$ , *a priori* también posibles. Así, por ejemplo, la desintegración  $\beta$  (la de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino,  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ , o la de un muón (proceso éste puramente leptónico,  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$ ), viene dada por el producto de dos corrientes V-A donde aparecen, respectivamente, los bilineales formados con los campos de las partículas citadas con la misma constante de acoplamiento  $G_F$  de Fermi. Feynman contaría en su libro *Surely you are joking, Mr. Feynman!* (1985) que mientras trabajaba en la V-A tuvo que soportar la inoportuna visita de una bienintencionada vecina, una *old lady* preocupada por su ‘desaparición’: Feynman se había aislado para poder calcular y comprobar su “importante descubrimiento”. Y, efectivamente, eso es lo que era, pues la teoría V-A desvelaba una *ley* de la Naturaleza, nada menos, algo que Feynman anhelaba conseguir por encima de todo tratando de emular a Dirac y su famosa ecuación<sup>2</sup>. Hacia el final de su vida, Feynman comentó al historiador de la física J. Mehra su sentir en esos momentos: *Now I have completed myself!*

Pero, paralelamente, Gell-Mann había llegado también a la misma teoría V-A y no estaba dispuesto a que Feynman se anticipase. Como consecuencia, en el departamento de física de Caltech se había creado una tensión incómoda ante la rivalidad de dos prominentes *full professors* que ya preparaban sendos artículos exponiendo el mismo espectacular avance. Ante esta situación, y para evitar dos trabajos iguales del mismo departamento compitiendo entre sí, su director Robert Bacher conminó a ambos autores a que escribieran un artículo conjunto. Finalmente así lo hicieron [R. P. Feynman y M. Gell-Mann, *Theory*

<sup>2</sup> Sobre Dirac, véase J. A. de A., *P.A.M. Dirac: el ingeniero que imaginó casi todo antes que todos*, *Revista Española de Física* 31, n.º 1 (en-mar), págs. 57-68 (2017), también en <http://www.j.a.de.azcarraga.es>.

E. C. G. Sudarshan en 2009 (Wikimedia Commons).



of the Fermi Interaction, *Phys. Rev.* **109**, 193-198 (1958)]; el artículo lo recibió la revista el 16-sep-1957. Es curioso reseñar que algunos de los resultados experimentales del momento estaban en desacuerdo con la teoría  $V-A$ , pero la confianza en ella de ambos autores les permitió concluir en su artículo que esos experimentos no eran fiables, como así se confirmó más tarde. Sin embargo, días después, Robert Marshak y su estudiante George Sudarshan presentaron la misma teoría en una conferencia en Padua [E. C. G. Sudarshan y R. E. Marshak, *The Nature of the Four-Fermion Interaction, Proc. of the Conference on Mesons and Newly-Discovered Particles, Padua-Venice*, 22-27 Sept. 1957, N. Zanichelli ed., Bologna (1958)] y, seguidamente, publicaron su *Chirality Invariance and the Universal Fermi Interaction* [*Phys. Rev.* **109**, 1860-1862 (1958)] citando ahí a Feynman y Gell-Mann.

Por su parte, Feynman y Gell-Mann habían incluido una nota a pie de página en su artículo original reconociendo el trabajo de Marshak y Sudarshan: “a universal  $V-A$  interaction has also been proposed by E. C. G. Sudarshan and R. E. Marshak (to be published)”. Pero, aunque la  $V-A$  no fue premiada con un Nobel, Sudarshan se llevó un considerable disgusto tras anunciarse el de 1979, que fue concedido a S. Weinberg, S. Glashow y A. Salam “por las contribuciones a la teoría unificada de la interacción débil y electromagnética incluyendo, *inter alia*, la predicción de la corriente neutra”. En 2007 Sudarshan declaró en una entrevista: “Weinberg, Glashow y Salam partieron del trabajo que yo había hecho cuando era un estudiante [de Marshak] de 26 años. Si se da un premio a un edificio, ¿no debería recibirlo quien ha construido el primer piso antes de quienes hicieron el segundo?” El propio Weinberg, de quien el recientemente fallecido Sudarshan fue colega suyo en la Universidad de Austin, en su contribución al 75 cumpleaños de éste [S. Weinberg, *V-A was The Key*, *J. Phys. Conf. Ser.* **196**, 012002 1-6 (2009)] escribió: “la primera afirmación de la teoría  $V-A$  se debió a Marshak y

Sudarshan”. No obstante, como el propio Weinberg me comentó hace poco, lo usual en física es conceder el mismo reconocimiento a quienes han logrado algo de forma independiente y casi al mismo tiempo: “lo importante para mí era que casi siempre se atribuía todo el mérito a Feynman y Gell-Mann, lo que me parecía considerablemente injusto”. Pero, aunque ambas parejas de científicos descubrieron la teoría  $V-A$  de forma independiente y simultánea, como reconocieron citándose mutuamente, el resquemor perduró durante algún tiempo. Incluso la rivalidad entre Gell-Mann y Feynman afloró de nuevo más tarde: cuando Gell-Mann leyó que Feynman afirmaba en el libro citado que “era la primera y única vez en mi carrera<sup>3</sup> que conocía una ley de la naturaleza [la  $V-A$ ] que nadie más sabía” se molestó extraordinariamente. En el caso de Sudarshan, su amargura sobre la prioridad de la teoría  $V-A$  no fue la única que tuvo que sobrellevar: también se sintió postergado cuando Roy Glauber recibió la mitad del Nobel de 2005 “por su contribución a la teoría cuántica de la coherencia óptica”. Como ilustra este caso, las cuestiones de prioridad entre científicos rara vez han sido triviales. Pero, hoy, lo importante es que la teoría  $V-A$  constituyó un hito imprescindible para los cruciales desarrollos que vinieron después: la  $V-A$  fue, realmente, el magnífico final de un prometedor principio... y viceversa.

Aunque su colaboración escrita se redujo a poco más que el artículo  $V-A$  citado, la relación científica entre Gell-Mann y Feynman fue intensa y productiva, aunque no siempre sin diferencias dada la talla y fuerte personalidad de ambos. En 2003, Gell-Mann la describió así: la interacción entre nosotros “era bastante divertida. Pero con el tiempo, la preocupación [de Feynman] por su propia imagen empezó a sacarme de quicio. Era un científico muy bueno, pero invertía demasiado esfuerzo en generar anécdotas sobre sí mismo... [Dick] tenía que ser siempre diferente...; por ejemplo, insistía en que no había que cepillarse los dientes. Además... tampoco podía prescindir de su ego ante una empresa común... Finalmente, ya no me fue posible colaborar con él. Habíamos trabajado juntos cinco o seis años y éramos buenos amigos, pero finalmente no pude continuar”. Y también: “Dick y yo teníamos talentos diferentes. El suyo era encontrar trucos matemáticos extraordinarios para expresar teorías físicas y usarlos después para resolver problemas, lo que siempre implicaba una gran dosis de intuición física. No era tan bueno para hallar nuevas teorías y conseguir que fueran adecuadas, mientras parece

<sup>3</sup> Feynman no ponía sus contribuciones a QED que le valieron el Nobel a la misma altura, pues consideraba que sólo había expresado mejor resultados a los que no había contribuido de forma esencial. Por su parte, el propio Gell-Mann se refería mordazmente a los diagramas de Feynman como ‘diagramas de Stückelberg’.

que yo he tenido talento para encontrar lo que sucedía y adivinar la teoría correcta”. Esa rivalidad entre dos genios científicos de considerable ego, entre el urbano y bien trajeado Gell-Mann y el más solitario, extravagante e informal Feynman, también se manifestó fuera de la física. Feynman cuenta en su *Surely* etc. que, tras una ocasión en la que él había dado una charla sobre cómo descifrar los jeroglíficos mayas, Gell-Mann *contraatacó* pocas semanas después con un cursillo de seis sesiones sobre las relaciones de todas las lenguas del mundo. De igual forma, Gell-Mann quiso escribir un libro popular sobre ciencia que rivalizara con “el libro de chistes de Dick”, como sarcásticamente se refería al *Surely you are joking Mr Feynman!* Finalmente, publicó *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex* (1994). Para entonces ya estaba en Instituto Santa Fe: el quark era ejemplo de lo simple y el jaguar de lo complejo. “El quark y el jaguar son dos aspectos de la naturaleza; el primero subyace en las leyes físicas de la materia y el universo, y el segundo forma parte del mundo que percibimos y del que somos parte”. Pero el libro de Gell-Mann, que pese al preciosismo del autor da la impresión de no estar estructurado de todo, no alcanzó la popularidad del libro de Feynman con el que trató de competir.

### La invención de la simetría unitaria

De forma paralela, y al margen de su interés en la interacción débil, Gell-Mann había expresado su preocupación por poner orden en el zoo de las partículas que interaccionan fuertemente. Así lo mostró en un artículo con E. P. Rosenbaum [*Elementary Particles*, *Sci. American* **197**, 72-86 (julio 1957)]. En esa época, la lista de hadrones se reducía a los bariones  $\Xi$ ,  $\Sigma$ ,  $\Lambda$ ,  $N$  y mesones  $\pi$ ,  $K$  (el término de raíz griega ‘hadrón’ —denso, fuerte— lo introdujo L. Okun en 1962). En ese artículo se decía: “en estos momentos nuestra comprensión se asemeja a la de Mendeleiev, que descubrió que existían algunas regularidades en las propiedades de los elementos. Lo que buscamos es un tipo de entendimiento semejante al alcanzado por Pauli, cuyo principio de exclusión mostró el porqué de esas regularidades, y por los inventores de la mecánica cuántica, que hicieron posible realizar predicciones exactas y detalladas sobre los sistemas atómicos”. El artículo apareció pocos meses antes del lanzamiento del Sputnik el 4-X-1957, acontecimiento que produjo un auténtico *shock* en Estados Unidos y que propició un incremento del apoyo a la ciencia (y la creación de la NASA).

Tras su *Model for Strong Couplings* [*Phys. Rev.* **106**, 1296-1300 (1961)], Gell-Mann escribió su famosísimo report *The Eightfold way: a Theory of Strong Interaction* [Caltech Synchrotron Lab. report CTSL-20 (1961), 46 págs.]. El trabajo nunca fue publicado formalmente en una revista aun-

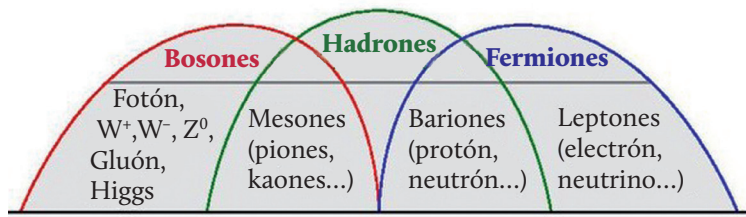


Feynman y sus bongos.

que, después, fue reproducido profusamente. De hecho, no fue la única vez que procedió así: el cauteloso Gell-Mann anunció a lo largo de su vida numerosos avances científicos por medio de *proceedings* de conferencias, menos comprometidos que la publicación formal en una revista. En el *Eightfold Way* (que incluye agradecimientos a Feynman y Sheldon Glashow) Gell-Mann clasificaba y estudiaba las propiedades de los hadrones usando el grupo unitario unimodular en tres dimensiones,  $SU(3)$ , cuya álgebra de Lie  $su(3)$  tiene ocho generadores; para ello Gell-Mann había hablado en Caltech con el matemático Richard Block sobre grupos de Lie. La simetría  $SU(3)$  inició la explosión del uso de la invariancia en la física de partículas, que permitía realizar predicciones pese a desconocerse realmente la teoría que presentaba esa simetría.

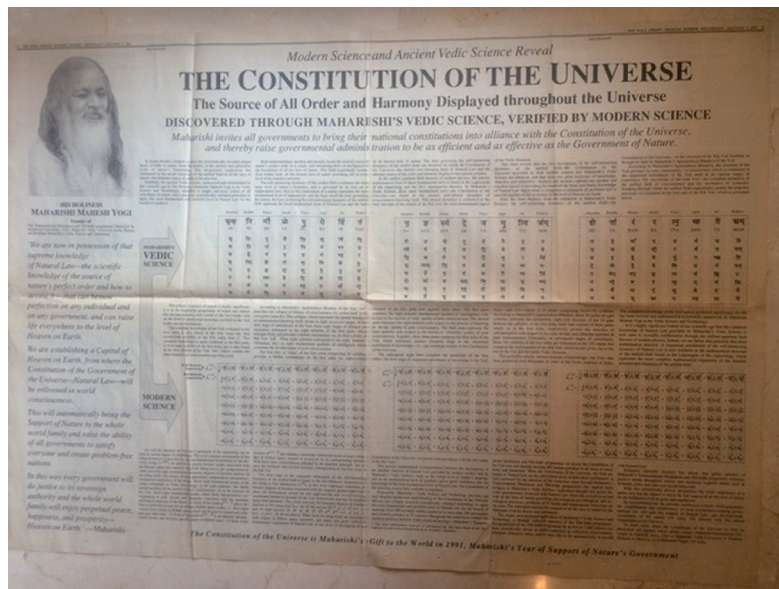


Gell-Mann y Feynman (Caltech archives).



Tipos generales de partículas.

La dimensión ocho de SU(3) justificaba la alusión en el título a los ‘ocho caminos’ hacia la perfección del budismo<sup>4</sup>. Simultánea e independientemente, Yuval Ne’eman, agregado de defensa a la embajada israelí en Londres, empezó a trabajar en el Imperial College bajo la tutela de Abdus Salam, a quien había llevado una carta de presentación... del general israelí Moshe Dayan. Éste, que sería Ministro de Defensa durante la guerra de los seis



The Wall St. Journal, 8-en-1992.

<sup>4</sup> El nombre del *Eightfold Way*, como el propio Gell-Mann comentó repetidamente, era un *joke*. Él siempre ironizó sobre los que llamaba “*silly people*”, cuyos trabajos trataban de relacionar su teoría con el misticismo oriental. Estoy seguro que un libro muy popular hace décadas, *The Tao of Physics: An Exploration of the Parallels Between Modern Physics and Eastern Mysticism* (1975), estaría en esa categoría pese a sus más de cuarenta ediciones, a que se tradujo a más de veinte idiomas y a que su autor, Fritjof Capra, es físico. Esa *moda* siguió durante muchos años: el 8-1-92, poco antes de la ‘segunda revolución de la teoría de cuerdas’, *The Wall Street Journal* publicó un anuncio a doble página del Maharishi Mahesh Yogi, el gurú cuya ‘meditación trascendental’ sugestionó a los Beatles y a la actriz Mia Farrow por algún tiempo. En él aseguraba “estar en posesión de la Ley Natural... que permitiría a todos los gobiernos... crear naciones exentas de problemas... de forma que el mundo gozaría de paz perpetua, felicidad y prosperidad —el Cielo en la Tierra”. Y todo ello poniendo en correspondencia biunívoca la ‘ciencia védica del Maharishi’ con la ‘ciencia moderna’, término a término, a través... ¡del lagrangiano de la cuerda heterótica! Pese a todo, la fe en lo fantástico subsiste: véase J. A. de A. *De terapias ‘cuánticas’ y otras calamidades*, Rev. Esp. de Fís. **30**, 1-3 (oct-sep-2016), también en <http://www.j.a.de.azcarraga.es>.

días en 1967, no era por supuesto un científico, lo que le hizo gracia a Salam. Pero lo aceptó, y ya con permiso de su embajada, Ne’eman comenzó a trabajar en 1960. Tras probar sin éxito con el grupo excepcional  $G_2$ , que le gustaba porque da lugar a un diagrama que es una estrella de David, Ne’eman usó también SU(3) en su *Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance* [Nucl. Phys. **26**, 222-229 (1961)]. Por aquel entonces, T. D. Lee y C. N. Yang estaban considerando  $G_2$ ; S. Okubo, citando a Gell-Mann, escribió enseguida una *Note on Unitary Symmetry in Strong interactions* [Progr. Theor. Phys. (Kyoto) **27**, 949-966 (I) y **28**, 24-32 (II) (1962)].

Con la *simetría unitaria* de SU(3), Gell-Mann y Ne’eman consiguieron llegar con los hadrones más allá de las relaciones de Mendeleiev para los elementos químicos de su tabla periódica, cuyo sesquicentenario celebramos este 2019. El *eightfold way* permitió clasificar en 1961 los hadrones en multipletes de igual espín y paridad intrínseca, estudiando sus interacciones y dando cuenta del mecanismo para la rotura (suave) de la simetría SU(3) para explicar las desigualdades de masas de las partículas de un mismo multiplete, que de otro modo debían ser idénticas; tanto Gell-Mann como Okubo dieron con ese fin ‘fórmulas de masas’ en las referencias citadas. En 1962, un año después de su Caltech *report*, Gell-Mann observó en un breve comentario en una conferencia en Ginebra, que uno de los multipletes de SU(3), el decuplete, *predecía* la existencia de una partícula aún no conocida con espín 3/2, carga -1 y extrañeza -3, a la que llamó  $\Omega^-$ . Poco después, coincidiendo exactamente con la publicación del artículo de Gell-Mann sobre los quarks de 1964, se encontró la  $\Omega^-$  en la cámara de burbujas de Brookhaven con las propiedades previstas, comprobándose de paso el mecanismo de la rotura de la simetría SU(3) que asignaba a  $\Omega^-$  la masa correcta. Tras ese éxito de la simetría unitaria, Gell-Mann recibió íntegro el Nobel de 1969 “por sus contribuciones y descubrimientos sobre la clasificación de las partículas elementales y sus interacciones”; ese mismo año Ne’eman recibió el premio Einstein. Nótese que incluso en 1969 el comité Nobel no mencionaba los quarks.

### La introducción de los quarks

Aunque los éxitos de la simetría unitaria de SU(3) eran indiscutibles, el *eightfold way* no constituía una teoría dinámica ni era completa. De hecho, sus grandes triunfos iniciales parecían sugerir la existencia de alguna subestructura más fundamental aún por descubrir. Y efectivamente, las propiedades matemáticas del grupo SU(3) permitirían considerar los estados de los distintos multipletes hadrónicos de mesones y bariones como formados a partir de los estados de *dos* tripletes básicos, los de las dos representaciones fundamentales de SU(3). Con objeto de reproducir las

características observadas de los hadrones, Gell-Mann definió los tres estados de un triplete como estados de *quarks*, asignando los tres estados del otro —el conjugado— a los correspondientes *anti-quarks*. Así lo hizo en *A Schematic Model of Baryons and Mesons* [Phys. Lett. **8**, 214-215 (1964), recibido el 4 de enero], artículo en el que una de las referencias es al escritor dublinés James Joyce<sup>5</sup>. El artículo comienza afirmando que “si las interacciones fuertes están descritas por el *broken eightfold way*, se tiene la tentación de buscar alguna explicación fundamental de la situación”. El resultado es que los hadrones resultan ser compuestos de quarks y antiquarks, un ejemplo más de cómo *Il libro della natura è scritto in lingua matematica*. Pese a todo, y al margen de la *utilidad* del esquema y quizá a la defensiva, el precavido Gell-Mann concluye con esta frase: “*a search... would help to reassure us of the non-existence of real quarks*” (el subrayado es mío).

Pero esa genial idea no fue exclusiva de Gell-Mann. Pocos días después fue propuesta por George Zweig en el CERN, a donde se había trasladado tras doctorarse (1964) con Feynman en Caltech. Zweig, un físico americano nacido en Moscú en el seno de una familia judía, llamó a sus quarks ‘ases’ (*aces*, aunque ese nombre no prosperó) en un *preprint* del CERN [*An SU(3) model for strong interaction and its breaking*, CERN 8182-TH.401 (fechado el 17-I-1964) y TH412 (v2)]. En sus cerca de 80 páginas, Zweig hizo el primer estudio detallado del modelo, sugiriendo incluso que los ‘ases’ podrían ser reales y buscarse experimentalmente. Es curiosa la trayectoria de ambos trabajos: en una conferencia de Zweig en el Lowe Museum en



M. Gell-Mann recibiendo el Nobel

Coral Gables le oí comentar que Gell-Mann había enviado su artículo a *Physics Letters* porque estaba convencido de que no lo aceptarían en el *Phys. Rev. Lett.*; por su parte, Zweig tuvo tales dificultades para publicar su *CERN-report* que finalmente desistió de intentarlo y acabó abandonando la física para dedicarse a la neurobiología.

Gell-Mann y Zweig estudiaron los hadrones como partículas compuestas. Pero en 1962 el propio Ne’eman y Haim Goldberg (un joven discípulo de Yoel [Giulio] Racah<sup>6</sup>), en *Baryon charge and R-inversion in the octet model* [Il Nuovo Cimento **27**, 1-5 (1963), recibido el 22-feb-1962] habían considerado un operador para el número bariónico con autovalores  $1/3$ , trabajo que pasó inadvertido pues, en particular, la  $\Omega^-$  estaba aún por descubrir. También A. Petermann consideró partículas compuestas (fundamentalmente bosones vectoriales) en *Propriétés de l’étrangeté et une formule de masse pour les mesons vectoriels* [Nucl. Phys. **63**, 349-52 (1965), recibido el 30-XII-63], artículo cuyo retraso en aparecer, como quizá el del anterior, sugiere el *meddling* de algún *referee*. Pero aunque la idea de los quarks podía resultar sorprendente, era lo bastante audaz como para poder ser cierta de acuerdo con el *dictum* atribuido a Pauli y, por ello, debía haber encontrado menos dificultades para su publicación. También hubo precursores más lejanos; en 1949 Fermi y Yang habían especulado sobre la posibilidad de que el pión, descubierto en 1947, fuera un estado ligado nucleón-antinucleón [*Are Mesons Elementary Particles?*, Phys. Rev. **76**, 1739-43 (1949)], una idea que después generalizó S. Sakata [*On a composite model for the new particles*, Progr. Theor. Phys. **16**, 686-688 (1956)] añadiendo la partícula  $\Lambda$  y formando así un precursor trío de *sakatones*. En cualquier caso, las reticencias ante la realidad de los quarks desaparecieron tras los experimentos iniciales de dispersión profundamente inelástica, realizados con electrones de 20 GeV incidiendo sobre protones en el Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) por la colaboración SLAC-MIT a partir de 1968. Y, tras la ‘revolución de noviembre’ de 1974 causada por el

<sup>5</sup> La palabra *quark*, que Gell-Mann extrajo de un verso en una novela cómica de Joyce (*Finnegan’s Wake*, 1939) que leyó con diez años, hizo fortuna enseguida, probablemente por su exotismo (aunque sí existe en alemán, donde significa ‘requesón’). Hay seis quarks diferentes, todos de espín  $1/2$  y paridad positiva, cada uno caracterizado por su correspondiente *flavour* o ‘sabor’ (*aroma* hubiera sido mejor traducción, aunque ambos nombres cumplan el papel). Al triplete inicial de quarks ligeros, caracterizados por las letras *u* (por *up*), *d* (*down*) y *s* (*strange*), con carga eléctrica  $2e/3$ ,  $-e/3$ ,  $-e/3$ , se fueron añadiendo los quarks más pesados *c* (*charm*), *t* (*top*) y *b* (*bottom*) y de cargas  $2e/3$ ,  $2e/3$ ,  $-e/3$  [nota: las cargas que da el *Particle Physics Booklet* de 2018 en su sec. 15, pág. 202, para *d*, *s* y *b* son incorrectas]. Los seis quarks se agrupan en tres dobletes, (*u,d*), (*c,s*) y (*t,b*) de cargas ( $2/3, -1/3$ ) que dan lugar, añadiendo los leptones *e*,  $\mu$ ,  $\tau$  y sus correspondientes neutrinos, a las tres familias (*u, d; e,  $\nu_e$* ), (*c, s;  $\mu, \nu_\mu$* ) y (*t, b;  $\tau, \nu_\tau$* ) del modelo estándar. Quarks y antiquarks tienen números cuánticos de signo contrario; en particular, el número bariónico es  $1/3$  ( $-1/3$ ) para los quarks (antiquarks). Los bosones están formados por parejas quark-antiquark (así tienen número bariónico cero) y los fermiones por tres quarks; muy recientemente se han encontrado algunos hadrones *exóticos* (tetraquark y pentaquark). Los quarks que determinan los números cuánticos de los hadrones se denominan quarks de valencia (*valence quarks*); como se verá, la estructura real de los hadrones es más compleja e incluyen un ‘mar’ virtual de quarks, antiquarks y gluones que no alteran los números cuánticos del hadrón.

<sup>6</sup> Las famosas lecturas de Racah en el IAS en 1951, *Group theory and spectroscopy*, después *yellow report* CERN-61-08, fueron para muchos físicos —incluyendo al que esto escribe— el primer contacto con la teoría de las álgebras de Lie semisimples (Sophus Lie fue un gran matemático noruego del s. XIX).



G. Zweig hablando de ases/quarks en el Museo Lowe, Miami.

descubrimiento simultáneo ese mes de la partícula  $J/\psi$  ('charmonio') en Brookhaven y en SLAC (de ahí el doble símbolo), formada por el quark con encanto y su antiquark ( $\bar{c}$ ) era ya difícil dudar de la existencia de los quarks. Y así, en 1977 —para entonces ya estaba establecida la cromodinámica cuántica (QCD)— el propio Feynman propuso a Gell-Mann y a Zweig para el premio Nobel por los quarks/aces, la única vez que hizo propuesta alguna al comité Nobel. Pero no tuvo éxito: Gell-Mann se quedó con el Nobel ya conseguido y Zweig no llegó a recibir el que merecía, pese a que la introducción de los quarks hubiera requerido, sin duda, un premio Nobel compartido por ambos.

### La controversia sobre la naturaleza de los quarks

Visto con cierta perspectiva, es posible comprender (algunas de) las reticencias iniciales al modelo de quarks. Tras los espectaculares éxitos de la electrodinámica cuántica (QED), las interacciones fuertes habían resultado intratables en el marco de la teoría cuántica de campos (TCC). Como consecuencia, en los años sesenta se consideraron diversas alternativas a la TCC, al mismo tiempo que crecía el rechazo a la idea de que algunas partículas pudieran ser elementales y otras compuestas. Ésta era la filosofía del *bootstrap*, liderada en particular por G. F. Chew y S. C. Frautschi [*Principle of Equivalence for all Strongly Interacting Particles Within the S-Matrix framework*, Phys. Rev. Lett. 7, 394-397 (1961)]. Según Chew, "la asociación de campos con las partículas que interaccionan fuertemente era vacía... la teoría de campos... no estaba destinada morir, sino a desvanecerse". La predicción, por supuesto, no se cumplió; pero incluso Gell-Mann se contaminó de esa visión en un artículo muy popular [G. F. Chew, M. Gell-Mann y A. H. Rosenfeld, *Strongly Interacting particles*, Sci. American 296, 2-20 (feb-1964)] que, pese a la fecha, ni siquiera mencionaba los quarks. Según la hipó-

tesis del *bootstrap*<sup>7</sup>, las partículas hadrónicas son estructuras dinámicas que deben su existencia a las propias fuerzas a través de las que interactúan: los hadrones son, por decirlo así, criaturas de la propia interacción fuerte (por tanto, el fotón y los leptones quedan fuera de ese esquema). Así pues, parecía natural que los quarks no tuvieran fácil cabida dentro del *bootstrap* y la 'democracia nuclear' resultante en la que no hay partículas más elementales que otras o, equivalentemente, en el estudio de las interacciones fuertes a partir esquemas más o menos relacionados como la matriz<sup>8</sup> S analítica y sus propiedades (unitariedad, causalidad, simetría de cruce), los polos de Regge, las amplitudes de Veneziano, etc. Pese a todo, en 1972 Gell-Mann afirmó en la escuela de invierno de Schladming en Austria [*Quarks*, Acta Phys. Austriaca, Suppl. IX, 733-761 (1972)], que "si los quarks son ficticios... los hadrones actúan como si estuvieran compuestos de quarks, pero éstos no existen y, por tanto, no hay razón para distinguir entre el esquema de los quarks y la imagen del *bootstrap*: los dos pueden ser simplemente descripciones diferentes del mismo sistema". Pero lo cierto es que los quarks como constituyentes últimos de la materia hadrónica eran difícilmente compatibles con la idea del *bootstrap*.

Gell-Mann mantuvo durante muchos años una actitud ambigua, incluso confusa, respecto de la auténtica naturaleza de los quarks, que consideraba más como *current quarks* (quarks de corrientes) que como *constituent quarks* (constituyentes). En 1964 Gell-Mann explicó su forma de pensar [*The Symmetry Group of Vector and Axial Vector Currents*, Physics 1, 63-75 (1964), Sec. VI]: "Utilizamos el método de abstracción a partir de un modelo de teoría de campos... Construimos una teoría matemática de las partículas que interaccionan fuertemente, que puede tener algo que ver con la realidad o no, encontramos relaciones algebraicas adecuadas que son ciertas en el modelo, postulamos su validez, y luego descartamos el modelo". Así se podía calcular

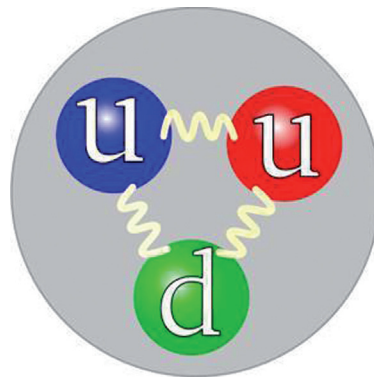
<sup>7</sup> Lazo en la parte de atrás del talón de una bota que ayuda a calzarla. Físicamente, la idea implica autoconsistencia; la idea del *bootstrap* es la de alguien que podría 'to pull himself up by his own bootstraps', 'levantarse tirando de los lazos de sus propias botas'.

<sup>8</sup> La matriz S había sido introducida por Heisenberg en tres artículos (en 1943 y 1944) durante la segunda guerra mundial para describir las amplitudes de dispersión (de *scattering*). Heisenberg tampoco era partidario de los quarks ni creía que se fueran a encontrar; según su visión, incluso si se hallaran, un quark podría considerarse compuesto de dos quarks y un antiquark, y así sucesivamente. No se le puede reprochar esa postura al padre de la matriz S y físico positivista por excelencia. De hecho, Heisenberg no estaba muy lejos de la 'democracia nuclear': "en principio no hay diferencia entre las partículas elementales y los sistemas compuestos. Éste es, probablemente, el resultado experimental más importante de los últimos cincuenta años" [W. Heisenberg, *The Nature of Elementary Particles*, Phys. Today 29(3), 32-39 (marzo 1976)].

el álgebra de corrientes a partir de bilineales construidos con los campos de quarks libres para postular después su validez general: según Gell-Mann, “la naturaleza lee libros de teorías de campos libres”. De hecho, el modelo de quarks resultaba perfecto para estudiar las relaciones de conmutación de las corrientes. Gell-Mann había introducido el álgebra de corrientes en 1962 [*Symmetries of Barions and Mesons*, Phys. Rev. **125**, 1067-1084 (1962)] y en el artículo en la efímera Physics de 1964 antes citado, donde propuso que los operadores de carga físicos de las corrientes vectorial y vector axial a tiempos iguales obedecían las relaciones de conmutación a tiempos iguales del álgebra  $su(3) \times su(3)$  a todos los órdenes en la interacción fuerte<sup>9</sup>. Los trabajos de Gell-Mann crearon un nuevo campo en los sesenta, el *álgebra de corrientes*, en cuyo desarrollo participó después. Por ejemplo, los resultados de los experimentos de SLAC motivaron que en 1971 Harald Fritzsch y Gell-Mann extendieran el esquema original introduciendo el álgebra (bilocal) de corrientes en el cono de luz [*Light Cone Current Algebra*, Proc. Int. Conf. sobre *Duality and Symmetry in Hadron Physics*, G. Gutsman Ed., Weizmann Sci. Press (1971)] para estudiar el fenómeno de *scaling* de Bjorken<sup>10</sup> en ese contexto.

Pero, volviendo a la naturaleza de los quarks, hay que reseñar que Gell-Mann y Zweig no llegaron a ponerse de acuerdo. Para el primero, el modelo de quarks permitía, sobre todo, construir relaciones algebraicas exactas para extraer después consecuencias físicas de ellas prescindiendo de su origen. Para Zweig, por el contrario, los quarks —sus ‘ases’— eran constituyentes, auténticos componentes de la materia hadrónica. Sus discrepancias quedaron patentes en 1971, cuando Gell-Mann y Zweig trataron de escribir juntos un artículo sobre los quarks por encargo de Scientific American: Zweig contó que, tras algunos intentos fallidos, desistieron de concluirlo. En 1994, en *The Quark and the Jaguar* (que no menciona a Zweig), Gell-Mann dio *a posteriori* una última reinterpretación de su postura sobre los quarks: “cuando propuse su existencia, yo creía desde el principio

que estarían confinados de alguna forma. Me referí a ellos como ‘matemáticos’, contrastándolos con los que llamé ‘quarks reales’, que podrían emerger y ser detectados individualmente... La terminología resultó desafortunada. Muchos autores, ignorando mi explicación de los términos ‘matemático’ y ‘real’... ¡han afirmado que yo no creía que los quarks estuvieran allí! Una vez un malentendido acaba establecido... tiende a perpetuarse”. Hoy, el asunto sólo tiene interés histórico pero, ¿fue todo un malentendido? No me lo parece; juzgue el lector. Pero lo importante es que Gell-Mann y Zweig inventaron los quarks y que, después, su existencia se comprobó en el laboratorio.



Quarks y gluones en el protón.

### Realidad de los quarks

Los experimentos de la colaboración SLAC-MIT y otros realizados partir de 1968, acabaron zanjando la cuestión sobre la realidad de los quarks. Los resultados, reminiscentes de los de Rutherford en Manchester en 1911 y que le llevaron a descubrir el protón en 1919, pusieron de manifiesto que los nucleones se comportaban como compuestos de objetos puntuales. La primera explicación de esos resultados vino del modelo de Feynman [R. P. F., *Very High-Energy Collisions of Hadrons*, Phys. Rev. Lett. **23**, 1415-1417 (1969)] de *partones* (por ‘partes’) nombre que aludía a los constituyentes de los nucleones que, a cortas distancias (a altas energías) se movían con libertad, explicando también el *scaling* de Bjorken. Feynman no asignó ningún número cuántico a sus partones, que sólo debían ser consistentes con los resultados de SLAC. Gell-Mann, incómodo porque no se hablara de quarks y sí de partones, se refería a éstos como *put-ons* (apariencias) y escribía “partones” entre comillas. En cualquier caso, pronto se observó que los partones debían tener precisamente los números cuánticos de los quarks. Sin embargo, el uso inicial de esa palabra de ecos grecolatinos no era del todo desacertado, pues la imagen de un nucleón compuesto sólo de quarks resultó ser muy insuficiente. En efecto, lo que muestran los experimentos depende de la energía de la partícula o *sonda* (*probe*) que se usa para observar (¡no para ‘probar’, por favor!) el nucleón:

<sup>9</sup> El estudio de las corrientes tenía ya una extensa bibliografía a la que Gell-Mann había contribuido. En particular, aprovechando una visita al *Collège de France* y a la ENS en París, publicó un importante trabajo [M. Gell-Mann y M. Lévy, *The Axial Vector Current in Beta Decay*, Il Nouvo Cim. **XVI**, 705-725 (1960)] que, además de una breve y elegante deducción de la corriente conservada en el formalismo lagrangiano, incluía ya el futuro ángulo de Cabibbo (1963) e introducía el modelo  $\sigma$ .

<sup>10</sup> El fenómeno alude a que las funciones de estructura que describen los procesos del tipo  $e + N(\text{nucleón}) \rightarrow e + H(\text{adrones})$  a altas energías, en lugar de depender independientemente de la energía y el momento transferido al nucleón, lo hacen de su cociente adimensional (invariancia de escala). Ello indica la presencia de objetos puntuales que, de otro modo, introducirían una escala típica [J. D. Bjorken, *Asymptotic Sum Rules at Infinite Momentum*, Phys. Rev. **179**, 1547-1553 (1969); J. D. B. y E. A. Paschos, *Inelastic Electron-Proton and  $\gamma$ -Proton Scattering and the Structure of the Nucleon*, Phys. Rev. **185**, 1975-1982, (1969)].



la inyección de energía en el nucleón permite la creación de partículas. Por ejemplo, los quarks ‘de valencia’, responsables de los números cuánticos del nucleón, están inmersos en un mar de parejas quark-antiquark y sólo transportan la mitad del momento del protón y un 30% del espín del protón (la que se llamó ‘*spin crisis*’); tampoco bastan para dar cuenta de toda la masa del nucleón. Por otra parte, también hay que tener en cuenta a los gluones que aparecerán seguidamente, que tienen espín 1 y de los que los experimentos de SLAC dieron la primera pista de su existencia. Los quarks radian gluones, que originan parejas quark-antiquark que de nuevo radian gluones, que a su vez pueden también radiar gluones, etc. Los experimentos de dispersión profundamente inelástica fueron tan importantes y reveladores de la realidad de los quarks que los líderes de la colaboración SLAC-MIT, J. I. Friedman, H. W. Kendall y R. E. Taylor, compartieron el Nobel de 1990 “por sus investigaciones pioneras sobre la dispersión profundamente inelástica de electrones por protones y neutrones ligados, que han sido de capital importancia para el desarrollo del modelo de quarks en la física de partículas”.

Así se expresaba el comité Nobel en 1990. Pero inicialmente el modelo de quarks se había enfrentado a una dificultad seria: la descripción de la  $\Omega^-$  en términos de tres quarks ‘extraños’ (*strange*)  $sss$  implicaba que los tres quarks de espín  $1/2$ , con cero momento angular orbital y los espines paralelos para dar cuenta del espín  $3/2$  de  $\Omega^-$ , debían estar en el mismo estado. Esto violaba, por tanto, el sagrado teorema de espín-estadística de Pauli; lo mismo sucedía con los fermiones de las otras dos esquinas del decuplete,  $\Delta^-$  (formado por tres copias  $ddd$  del quark  $d$ ) y  $\Delta^{++}$  (combinación  $uuu$  de tres quarks  $u$ , ver nota 5). Los primeros intentos de abordar el problema se basaron en la introducción de paraestadísticas, yendo más allá de las estadísticas de Bose-Einstein y de Dirac-Pauli que obedecen, respectivamente, bosones y fermiones. Así lo hicieron O. W. Greenberg en *Spin and Unitary-Spin Independence in a Paraquark Model of Baryons and Mesons* [O. W. G., Phys. Rev. Lett. **13**, 598-602 (1965)] y Y. Nambu<sup>11</sup> y M. Y. Han considerando tres tripletes de carga entera [Y. N. y M. Y. H., *Three-Triplet Model with Double SU(3) Symmetry*, Phys. Rev. **139**, 1006-1010 (1965)]. Pero de nuevo Gell-Mann intervino decisivamente en la solución, introduciendo el grupo  $SU(3)_C$  de color (que no tiene nada que ver con el  $SU(3)$  antes mencionado o  $SU(3)_F$  de flavour)

<sup>11</sup> Nambu, influido por ese problema pero al margen de él, introdujo un paréntesis de Poisson ternario [*Generalized Hamiltonian Mechanics*, Phys. Rev. **D7**, 2405-2412 (1973)] que dio lugar a posteriores generalizaciones (véase J. A. de A. y J. M. Izquierdo, *n-ary algebras*, J. Phys. A Math. Theor. **43**, 1-117 (2010)). Nambu recibió el Nobel (1/2, en 2008) “por el descubrimiento del mecanismo de rotura espontánea de simetría en la física subatómica”.

para dar cuenta de la naturaleza de la interacción fuerte [W. A. Bardeen, H. Fritzsch y M. Gell-Mann, *Light-Cone Current algebra,  $\pi^0$  Decay and  $e^+ e^-$  Annihilation*, en *Scale and Conformal Symmetry in Hadron Physics*, Frascati mayo 1972, R. Gatto ed. p. 139-151, J. Wiley (1973); H. Fritzsch, M. Gell-Mann y H. Leutwyler, *Advantages of the Color Octet Picture*, Phys. Lett. **47B**, 365-368 (1973)]. A Feynman no le gustó el nombre de color; más tarde, en 1985, llegó a decir: “los idiotas de los físicos, incapaces de encontrar ya un bello nombre griego, ....utilizaron el desafortunado nombre de ‘color’, que no tiene nada que ver con el color en el sentido habitual”.

### Cromodinámica Cuántica

El número cuántico adicional de color, vinculado a la representación fundamental del  $SU(3)_C$ , distingue entre quarks  $q$  del mismo sabor con color diferente. Cada sabor  $q$  da lugar a un triplete de  $SU(3)_C$ , arbitrariamente indicado  $q^R$ ,  $q^G$  y  $q^B$  por rojo (*red*), verde (*green*) y azul (*blue*); originalmente los tres colores eran rojo, blanco  $-q^W-$  y azul, los de la bandera de Estados Unidos. Los antiquarks poseen anticolor (antirrojo, antiazul, antiverde) y pertenecen al triplete conjugado. La combinación de los tres colores ‘primarios’ (o tres anticolores) carece de color, es ‘blanca’, como lo es la pareja color-anticolor (de ahí que  $q^W$  no resultara conveniente). La carga de color es conservada — $SU(3)_C$  es una simetría *exacta*— y los hadrones son compuestos (de quarks, antiquarks y gluones) que no tienen color y son singletes de  $SU(3)_C$ . La adición del color a los tres quarks  $u$  de la  $\Delta^{++}$ ,  $u^R u^G u^B$  los hace distinguibles por el color y resuelve el problema de la estadística antes mencionado; el requerimiento de que el barión sea un singlete de color da, finalmente,

$$(qqq) \rightarrow (q^R q^G q^B - q^G q^R q^B + q^B q^R q^G - q^R q^B q^G + q^G q^B q^R - q^B q^G q^R).$$

Pero la simetría de *gauge*  $SU(3)_C$  va mucho más allá, pues es la base de la cromodinámica cuántica (QCD) que describe la interacción fuerte. QCD es una teoría cuántica de campos en la que los ocho campos de gauge de  $SU(3)_C$ , los gluones, transmiten la fuerza fuerte que pega (*glue*) los quarks dentro de los hadrones. Las primeras ideas sobre la teoría gauge de la interacción de quarks y gluones la dieron de nuevo Gell-Mann y Fritzsch en *Current algebra: Quarks and what else?* [Proc. of the XVI International Conference on High En. Phys., Chicago 1972, vol. 2 pág. 135, J. D. Jackson *et al.*, eds.] donde introdujeron el nombre de *gluón*. Los gluones, que forman un octete de color obtenido a partir de combinaciones de colores y anticolores, son portadores de una carga de color y de otra de anticolor; aunque son sensibles al color, no lo son al sabor (son *flavour blind*). Los quarks intercambian gluones de forma semejante a como las partículas cargadas eléctricamente intercambian fotones.

Como el fotón, los gluones tienen masa cero pero, al contrario que aquél que carece de carga eléctrica y por tanto no puede interactuar consigo mismo directamente, los gluones son portadores de color y no sólo interactúan con los quarks sino entre ellos mismos. El fotón y los campos mediadores de la interacción débil  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , no poseen color, por lo que no interactúan fuertemente.

El gran éxito de QCD se produjo cuando se observó que, al contrario que la fuerza electrodébil que disminuye al aumentar la distancia (ya se mencionó el comportamiento de la constante de la estructura fina  $\alpha$  en QED), la constante de acoplamiento fuerte  $\alpha_s$  (s por *strong*) de QCD se hace más débil a cortas distancias o altas energías, de acuerdo con los resultados experimentales de SLAC. A la energía del bosón  $Z$  toma el valor  $\alpha_s(m_Z) \approx 0.12$ , mucho mayor que la constante de estructura fina  $\alpha$  pero aún pequeño a esa escala, lo que permite hacer cálculos perturbativos (en ese régimen); la constante de acoplamiento fuerte  $g_s$  y  $\alpha_s$  están relacionadas por  $\alpha_s = g_s^2/4\pi$ . Así pues, en un nucleón los quarks son asintóticamente libres a altas energías (cortas distancias) y están confinados a baja energía (no pueden separarse). Resulta imposible separar un quark, un antiquark o gluón de otros quarks, antiquarks o gluones en el nucleón de la misma forma que cada vez resulta más difícil continuar estirando una goma elástica; cada vez es necesario proporcionar más energía, infinita en el caso de los quarks si su color tuviera que manifestarse libremente. Por eso los quarks no aparecen como partículas libres y los hadrones, que sí lo hacen, no tienen color; son ‘blancos’. Los bariones (antibariones) incluyen los tres colores (anticolores); los mesones parejas color-anticolor.

El confinamiento es consecuencia del comportamiento de la función  $\beta$  del grupo de renormalización para QCD que Gell-Mann y Low introdujeron para QED. Esa función es *negativa* para QCD, que es una teoría gauge *no abeliana* — $SU(3)_C$  no es abeliano— al contrario que QED, que sí lo es porque su grupo de gauge es el grupo conmutativo de las fases  $U(1)$ . El signo de  $\beta$  depende del número de sabores en la teoría, seis en QCD, lo que no supera el límite de 16 dentro del cual  $\beta < 0$ , negatividad que implica que QCD es asintóticamente libre. El descubrimiento de la libertad asintótica de la interacción fuerte<sup>12</sup> les valió a D. Gross, F. Wilczek y D. Politzer el Nobel de 2004. Pero, aunque los quarks no pueden materializarse como partículas libres, su existencia sí podía observarse a través los *jets* (chorros) de

hadrones colimados en direcciones opuestas que aparecen en la aniquilación  $e^- + e^+$ . Ésta procede a través de un fotón virtual que a su vez produce un quark y un antiquark, que dan lugar a sendos chorros de hadrones (‘hadronización’). La aparición de esos *jets* fue observada en SLAC en 1975 y en el *Deutsches Elektronen-Synchrotron* (DESY, Hamburgo) en 1978-79. Así pues, al acabar la década de los setenta, la descripción de los hadrones como compuestos de quarks y antiquarks ligados por gluones estaba establecida; los quarks, finalmente, no sólo eran entes matemáticos sino que tenían existencia real. Con la cromodinámica cuántica basada en el grupo gauge de color  $SU(3)_C$ , regresó triunfante la teoría cuántica de campos y  $SU(3)_C \times SU(2) \times U(1)$  quedó consagrado como el grupo de gauge del modelo estándar que describe las interacciones fuerte, electromagnética y débil. El calificativo de estándar es apropiado: aunque se busca ‘nueva física’ y quedan muchas preguntas por responder, medio siglo después la teoría estándar sigue en pie [véase A. Pich, *Cincuenta años del modelo estándar*, Rev. Española de Física **33**, n.º 2, 1-5 (abr-jun 2019)]. Por supuesto, es probable que se trate sólo de una teoría ‘efectiva’, aproximación a otra más fundamental con ingredientes aún desconocidos que requiera aceleradores mucho más potentes para revelar su existencia y su estructura. Pero en el desarrollo del actual modelo estándar, Gell-Mann desempeñó un papel esencial abriendo —rotura espontánea de simetría y bosón de Higgs aparte— el camino que permitió llegar hasta él.

### Los últimos años de Gell-Mann: el Instituto Santa Fe, lo simple y lo complejo

En los últimos decenios Gell-Mann perdió paulatinamente el interés por la física de partículas y su fenomenología, donde sus contribuciones habían dominado durante más de dos décadas y establecido el programa para una generación de físicos. Quizá sus últimos intereses en ese campo estuvieron en la (por ahora fallida) gran unificación y en el mecanismo *seesaw* (balancín) para explicar la magnitud relativa de las diminutas masas de los neutrinos, que resultaron tenerla más allá del modelo estándar [M. Gell-Mann, P. Ramond y R. Slansky, *Complex Spinors and Unified Theories*, en *Supergravity*, D. Z. Freedman *et al.* ed., p. 315-321 (1979)]. Después, sus intereses estuvieron más próximos a los fundamentos de la mecánica cuántica, la cosmología y la teoría de supercuerdas; aunque no trabajó en esta última, la juzgaba prometedora ya que incorporaba la gravitación Einsteiniana. En relación con la supersimetría, Gell-Mann consideraba que la búsqueda de las parejas supersimétricas (hasta hoy sin éxito) era la razón más importante para construir nuevos aceleradores. Gell-Mann criticó a los físicos contrarios a la teoría de cuerdas porque, aunque la energía necesaria la hiciera difícilmente accesible, eso no invalidaba la teoría ya que otras consecuencias podrían ser observadas.

<sup>12</sup> D. J. Gross y F. Wilczek, *Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories*, Phys. Review Lett. **30**, 1343-1346 (1973); H. D. Politzer, *Reliable perturbative results for strong interactions*, Phys. Rev. Lett. **30**, 1346-1349 (1973). Fue anticipada en 1972 por ‘t Hooft en una conferencia en Marsella [véase G. ‘t Hooft, *When was asymptotic freedom discovered? or the rehabilitation of quantum field theory*, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **74**, 413-425 (1999)].



Gell-Mann en el Instituto Santa Fe (Nuevo México).

Más tarde comentó que, “como conservacionista, había establecido en Caltech una *reserva natural* para teóricos de supercuerdas, por lo que mucho trabajo entre 1972 y 1984 se hizo allí” (se refería a John Schwarz y Pierre Ramond entre otros).

En 1984, quince años tras recibir el Nobel, Gell-Mann se estableció en el Instituto Santa Fe (SFI), situado en esa ciudad de Nuevo Méjico y del que fue uno de sus fundadores. El SFI es un centro independiente y multidisciplinario de investigación, dedicado a explorar las fronteras de la ciencia y donde la mayor parte de su personal es externo. Por ejemplo, el físico español Juan Pérez Mercader, fundador y antiguo director del Centro de Astrobiología y hoy en Harvard trabajando en la aplicación de la física al origen de la vida, es Profesor Externo del SFI donde colaboraba con Gell-Mann. La misión del SFI es “la búsqueda del orden dentro de la complejidad de mundos en evolución”, algo que Stephen Wolfram, inventor de *Mathematica* y experto en la emergencia de la complejidad, había sugerido en una reunión fundacional previa. El Instituto pretende, muy en la línea del polifacético Gell-Mann, comprender y unificar los patrones subyacentes que comparten los aspectos complejos del mundo físico, biológico, social, cul-

Con Pérez Mercader en el Instituto Santa Fe.



tural, tecnológico e incluso astrobiológico. Según Gell-Mann, “los avances de la ciencia de la complejidad son cada vez más útiles para comprender problemas que no encajan dentro de las fronteras tradicionales de los distintos campos de la ciencia como, por ejemplo, la sostenibilidad urbana, la propagación de enfermedades como el SIDA o los riesgos financieros”. Para él, la mejor forma de establecer modelos tanto para los sistemas naturales como para los de origen humano es hacerlo tratándolos como sistemas adaptativos complejos, que son mucho más que la suma de sus partes.

¿Cómo funciona un sistema adaptativo complejo? Esos sistemas son capaces de extraer datos sobre el mundo, ellos mismos incluidos, de identificar regularidades en esos datos y de comprimirlos en un mensaje muy breve, que Gell-Mann llama ‘esquema’ (*schema*) y que es susceptible de cambiar y de mutar en otro distinto. El esquema puede usarse, en combinación con otros datos del mundo, para describir las características de ese mundo o el comportamiento de sus componentes, o para prescribir el comportamiento del propio sistema adaptativo complejo. Este comportamiento puede conducir al éxito del sistema o a su fracaso, desaparición incluida. Por tanto, “la evolución biológica es un sistema adaptativo complejo, como lo es el comportamiento de cualquier organismo resultante de esa evolución”; el jaguar es un ejemplo. De igual forma, “la evolución cultural humana es un sistema adaptativo complejo, y las organizaciones humanas, como las firmas de negocios, evolucionan como esos sistemas”. También la empresa científica, cuyos esquemas son las teorías; en la evolución cultural, los esquemas se basan en los memes de Richard Dawkins. La extensión —el tamaño— del esquema es una medida de la complejidad: la de una lengua se corresponde con el grosor del libro de su gramática, la de una bacteria con la longitud de su genoma.

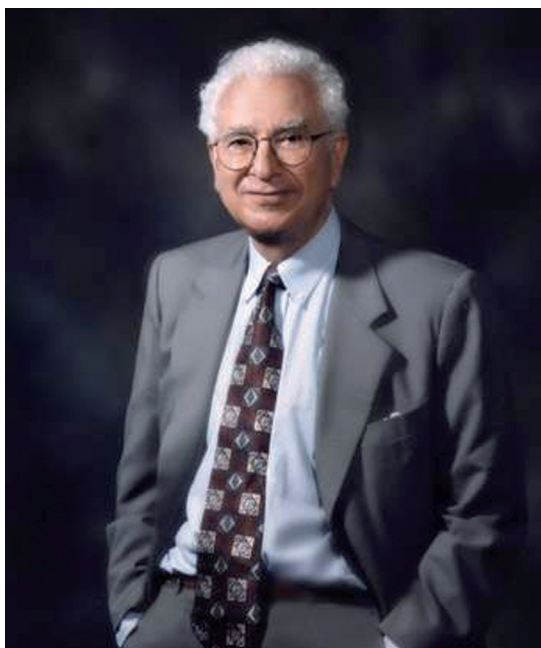
En el SFI Gell-Mann investigó también los fundamentos de la mecánica cuántica; le preocupaba como podía funcionar en el *Big Bang*, donde no hay observadores y donde lo grande y lo pequeño se confunden. Gell-Mann desarrolló con su discípulo James Hartle (también colaborador de S. Hawking) la teoría cuántica de las historias decoherentes que, según ambos, incluye la formulación de Copenhague [M. Gell-Mann y J. B. Hartle, *Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology in Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, W. Zurek, ed. Addison Wesley (1990); *Adaptive coarse graining, environment, strong decoherence, and quasiclassical realms*, *Phys. Rev.* **A89**, 052125 (2014)]. Gell-Mann se refería a su visión de la mecánica cuántica como “la interpretación moderna”.

En el ISF lideró el programa sobre la evolución de los lenguajes humanos. La afición de Gell-Mann a las lenguas era antigua, siendo un consumado políglota. Yo le oí expresarse brevemente en catalán en S. Feliu de Guíxols con motivo de su participación

en el muy interesante *First International Meeting on the History of Scientific Ideas* que organizó allí M. García Doncel en 1983; Gell-Mann me dijo que había empezado a estudiarlo muy poco antes. Gell-Mann era preciosista, y muy exigente, a la hora de escoger palabras y términos exactos; debía tener en mente que, como se decía en una película italiana, *chi parla male pensa male. Bisogna trovare le parole giuste: le parole sono importanti!* En una ocasión, en un restaurante húngaro, amonestó a un camarero porque el nombre de un plato no estaba deletreado correctamente; en otra, cuando le habían servido una botella de cava Freixenet, comentó que la palabra catalana significaba *grove of ash trees*, fresneda. No puede sorprender que quien de niño fuera considerado una enciclopedia andante acabara siendo miembro del Consejo Editorial de la Enciclopedia Británica<sup>13</sup>. Como cabía esperar, Gell-Mann se deleitaba pronunciando las palabras extranjeras de forma impecable. Tanto que a veces, hablando con Feynman en Caltech, éste aseguraba no entenderle mientras a su vez forzaba su acento del Queens neoyorkino hasta hacerlo incomprensible.

Como los problemas físicos a los que se enfrentó, el de la evolución de las lenguas no es sencillo, pero el origen del lenguaje y su desarrollo pertenecen a un tipo distinto de complejidad. Gell-Mann buscó una explicación evolutiva a la aparición de los distintos idiomas, estudiando la existencia de un ‘árbol genealógico’ de lenguajes y la posible realidad de un único ‘protolenguaje’, algo que es compatible con las ideas de Noam Chomsky del lenguaje como instinto. Según Gell-Mann hay indicaciones que sugieren que, si no todas, una fracción muy importante de las lenguas actuales proceden de una que se hablaba no muy atrás, hace 15.000-20.000 años (aproximadamente la antigüedad de las pinturas de Altamira y Lascaux). Por supuesto, eso no implica que antes no existieran otros lenguajes, sino que la existencia de ese protolenguaje más tardío indicaría un posible efecto de ‘cuello de botella’ previo. Para concluir con la actividad científica de Gell-Mann mencionaré que en 2016 consideró con el economista Ole Peters un problema fundamental en la teoría de juegos: cuándo hacer, o no, una apuesta, evaluando los juegos de acuerdo con el promedio del crecimiento de la riqueza [M. G-M. y O. P., *Evaluating gambles using dynamics* en *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* **26**, 023103 (2016)]. Ese artículo fue el más leído del año de la revista *Chaos*.

<sup>13</sup> Por eso me atreveré a aventurar que, de tropezarse con ello, no traduciría ‘quantity’ al español llamando ‘cantidad’ -por ejemplo- a una fuerza, que es una *magnitud*. El error está tan extendido que no puedo evitar referirme a él y a la autoridad del María Moliner (1980) o a la cuarta acepción del DRAE. Y tampoco hablaría de ondas ‘gravitacionales’, anglicismo inapropiado que se extiende cada vez más, sino de ondas *gravitatorias* (las *gravity waves* en fluidos son *ondas de gravedad*), ni de ‘titulaciones’ cuando se debe decir *títulos* (pido excusas por este desahogo lingüístico y por otros en el texto principal).

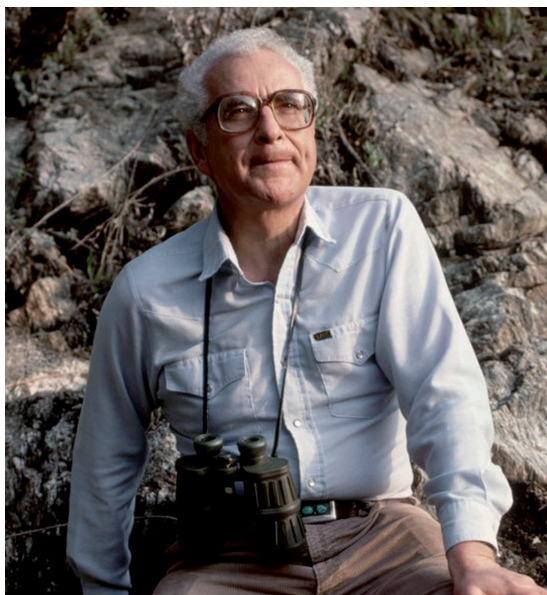


### Consideraciones finales. La Ciencia según Gell-Mann

Como buen científico, Gell-Mann fue hombre de insaciable curiosidad; casi nada escapó a su interés y a su capacidad de observación. Ya de niño, por ejemplo, acostumbraba a observar aves con su hermano Ben (que falleció dos años antes que él), afición que mantuvo durante su vida, y a coleccionar monedas. Su pasión por la arqueología le llevó a reunir también cerámica antigua e, incluso, a tener algún problema al tratar de exportar cerámica precolombina de algún país iberoamericano; en su casa tenía una buena colección de cerámica de los indios americanos Pueblo. Como se ha visto, Gell-Mann poseía una capacidad y rigor extraordinarios a la hora de aplicar conceptos y utilizar métodos matemáticos a los problemas más variados: desde la aplicación de la mecánica cuántica al Universo hasta el origen y evolución de las lenguas. Y, como muchas personas, padecía el *writer's block*, el temor a empezar a escribir, la parálisis ante la hoja inicial en blanco; quizá por eso utilizaba lápiz, papel y goma de borrar.

A lo largo de su vida, Gell-Mann mantuvo una considerable actividad pública. Fue asesor científico de los presidentes Nixon y Clinton y, más recientemente, manifestó su apoyo al Presidente Obama. Fue radicalmente antifascista y en su juventud se declaraba de izquierdas, llegando a estar moralmente preocupado por el patrocinio que financiaba su beca en Yale. A comienzos de los sesenta, junto con otros muy ilustres físicos, creó la división *Jason* del *Institute for Defense Analysis* que asesora al Ejército de los Estados Unidos; el comité *Jason* —nada sospechoso de izquierdismo— siempre ha incluido premios Nobel. Pero Gell-Mann se manifestó contrario al ‘escudo antimisiles’ (ABM, *anti-ballistic missile system*) por considerar que en realidad incrementaba el riesgo de guerra nuclear,

conclusión que presentó en la conferencia de Puget Sound de 1964. Como persona preocupada por el medio ambiente, Gell-Mann fue incluido en 1969 —el año de su Nobel— en el *Roll of Honor for Environmental Achievement* del correspondiente programa de las Naciones Unidas; después fue miembro del Consejo de la *Wildlife Conservation Society* (1994-2006). Igualmente recibió, compartido, el premio *Ettore Majorana Science for Peace* de 1989, así como el *E. O. Lawrence Memorial Award* de la Comisión de Energía Atómica, la medalla Einstein (2005) y muchos otros galardones. Y, como es natural, perteneció a un buen número de *learned societies* y recibió los doctorados *honoris causa* que cabe imaginar.



Observando aves.

Concluiré con unas palabras sobre la visión de Gell-Mann sobre la investigación científica. Su modo de actuar lo reflejó muy bien él mismo: “de vez en cuando es necesario cuestionar alguna idea ampliamente aceptada, como la prohibición de pensar en un determinado sentido, que resulta carecer de justificación y que impide el avance del conocimiento. Es importante identificar esos obstáculos para superarlos. En segundo lugar, es necesario separar las ideas que son relevantes para los problemas actuales de otras que pertenecen a problemas más profundos del futuro; tratar de incorporar éstas últimas a los problemas presentes puede causar dificultades. Finalmente, las dudas y el desorden parecen ser inevitables en el trabajo teórico (y a veces en el experimental)... Por eso es mejor aceptar esa situación... publicando ideas alternativas contradictorias junto con sus consecuencias, dejando la elección entre ellas para más adelante”. De igual modo, Gell-Mann comentó: “sabemos que la mayoría de los ataques a la ortodoxia científica son incorrectos y algunos absurdos. De vez en cuando, sin embargo, la única

forma de avanzar consiste en desafiar alguna de esas prohibiciones que han sido aceptadas sin que haya una buena razón para ello”, lo que ilustraba con ejemplos como la deriva de los continentes<sup>14</sup>. Por eso, fiel a sus principios y formulando cuestiones audaces y profundas, Gell-Mann dio con la simetría unitaria y los quarks haciendo honor a la definición del húngaro-americano Albert Szent-Györgyi, Nobel (1937) de Fisiología o Medicina por la vitamina C: “investigar es ver lo que todo el mundo ve e imaginar lo que nadie más ha pensado”.

Como decían sus amigos, en primera aproximación Gell-Mann lo sabía todo y era capaz de integrar casi todo. No sólo fue un físico extraordinario: también fue un gran humanista —comentario destinado a quienes aún consideran que el conocimiento científico no es humanismo— y persona pública, implicada en la política de su país y preocupada por el medio ambiente. Fue un hombre cordial aunque, al mismo tiempo, su nivel de exigencia podía resultar difícil; David Gross consideraba que, a la vez, “era intimidante y una fuente de inspiración”. También sardónico: para Gell-Mann, la *solid-state physics* era la ‘*squalid-state physics*’. Yo mismo puedo aportar aquí una curiosa anécdota. En una visita a Cambridge, Gell-Mann asistió a un seminario en el Cavendish Lab. en el que el conferenciante aludió a unos resultados de N. N. usando polos de Regge que supuestamente apoyaban su tesis. Gell-Mann le interrumpió con este comentario: “¿N. N.? N. N. no reconocería un polo de Regge aunque se cruzara con uno por la calle”.

Concluyo. Gell-Mann fue un perfeccionista, capaz de hacerse preguntas esenciales en medio de la confusión y de encontrar orden en medio del caos. Sin sus fundamentales contribuciones a la teoría V-A, al modelo de quarks y a QCD, el modelo estándar de las interacciones electromagnética, débil y fuerte hubiera tardado más tiempo en aparecer. Y es que sus descubrimientos fueron extraordinarios: Gell-Mann dejó la física de altas energías en un estado radicalmente distinto al que tenía antes de llegar él. Por ello será recordado como uno de los físicos de partículas más influyentes en la segunda mitad del s. XX: un Nobel perteneciente a una clase especial (que en ese campo también incluiría a R. P. Feynman, C. N. Yang y a S. Weinberg), entre otros muchos Nobeles de menor rango.

J. Adolfo de Azcárraga

20-VII-2019, quincuagésimo aniversario  
de la llegada del hombre a la Luna.

<sup>14</sup> Alfred Wegener se enfrentó al corporativismo de muchos geólogos (él era meteorólogo de profesión) defensores de una Tierra estática y contrarios a su *deriva de continentes* (1912). Ese rechazo de los geólogos ortodoxos se mantuvo medio siglo, hasta que la *tectónica de placas* fue final y formalmente aceptada en la reunión de 1966 de la American Geophysical Union.