

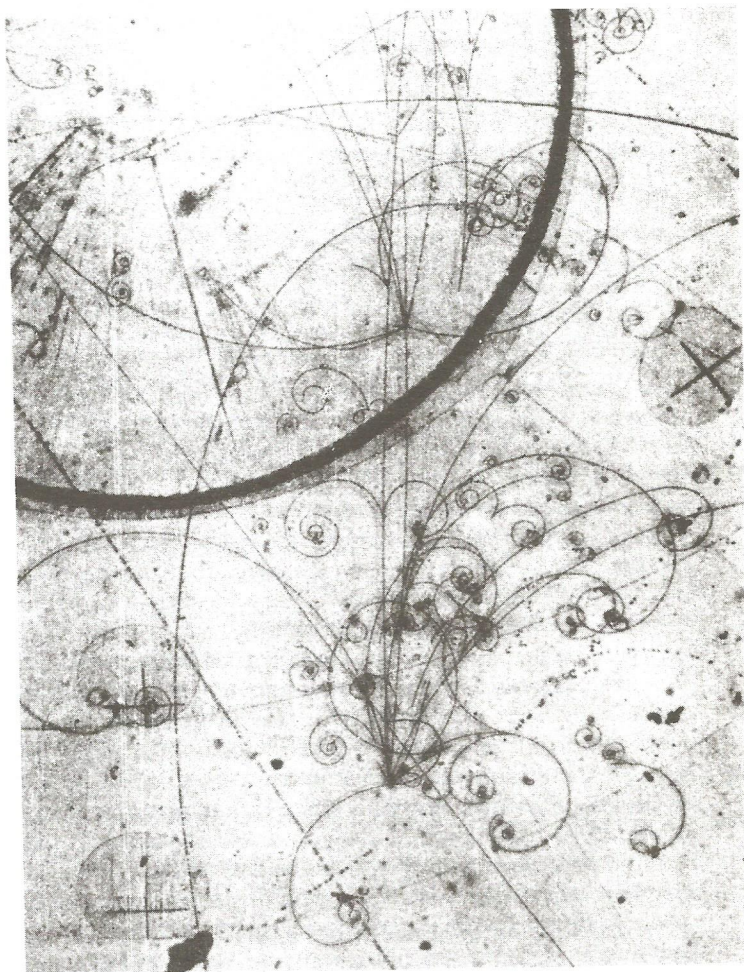
# El principio y el fin del Universo

## Tercera parte. Cosmología y partículas elementales

por Miguel Angel Herrera y Christine Allen

**E**n el artículo anterior presentamos la visión moderna de los primeros instantes de la evolución del Universo, visión a la que se ha dado en llamar *modelo estándar*. Este modelo del Universo se obtiene, esencialmente, de la aplicación de las leyes fundamentales de la física (termodinámica, gravitación, física nuclear, etcétera) a un gas en expansión. De acuerdo con él, el Universo "nació" hace unos 15 mil millones de años en una gran explosión, que ocurrió simultáneamente en todos sus puntos; desde entonces hasta nuestros días, ha continuado expandiéndose y enfriándose. En otras palabras, el modelo estándar sostiene que a medida que nos remontemos a tiempos cada vez más lejanos en el pasado, veremos un Universo cada vez más caliente y más pequeño, en el cual las distancias entre los cúmulos de galaxias son cada vez menores. Como consecuencia del aumento de la temperatura, las estructuras que en él pueden existir son cada vez más simples; las estructuras complejas que conocemos (seres vivos, células, planetas, estrellas y galaxias) no pueden subsistir en las primeras etapas del Universo. De hecho, cuando éste tenía poco más de 500 000 años (esto es, 500 000 años después de la Gran Explosión), sólo había en él átomos. Según vimos en el bimestre pasado, en esta fase hay 10 átomos de hidrógeno por cada átomo de helio, con pequeñas trazas de deuterio y de elementos más pesados.

Si nos remontamos a fases aún más tempranas, los átomos comienzan a fragmentarse en núcleos y electrones, debido a los violentos choques que ocurren entre ellos; de esta manera, sólo habrá núcleos y electrones cuando lleguemos a unos 200 segundos después de la Gran Explosión. A partir de este momento, la temperatura es tan alta — y, en consecuencia, los choques son tan violentos — que los mismos núcleos comienzan a fragmentarse en neutrones y protones. Para entonces, además, dos "gases" que hoy "permean" el Universo — la radiación electromagnética y los neutrinos — tienen ya energía más que suficiente para interactuar entre sí y crear continuamente pares electrón-positrón y neutrino-antineu-



Los neutrinos con más energía producidos en los laboratorios terrestres desatan una avalancha de reacciones entre partículas, como se aprecia en esta foto de la cámara de burbujas de 5 metros, en el Fermilab

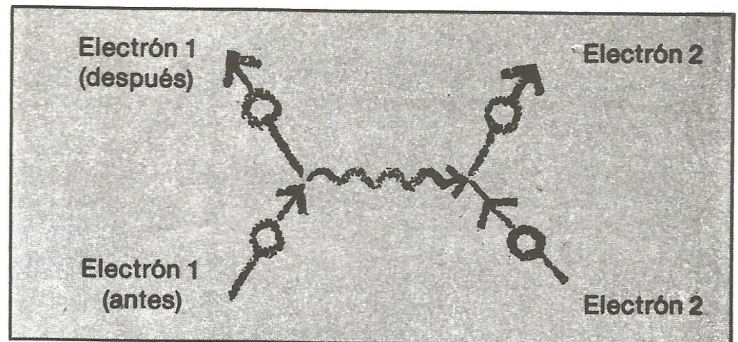
trino (y, desde luego, también para interactuar con las demás partículas presentes). Así pues, el Universo temprano, cuando apenas había transcurrido entre un diezmilésimo y un milésimo de segundo desde la Gran Explosión, era una especie de "sopa" homogénea de electrones, positrones, protones, neutrones, fotones y otras partículas elementales, todas en equilibrio termodinámico y a una temperatura increíblemente elevada (del orden de diez billones de grados).

Esto es, en resumen, el modelo estándar de la evolución del Universo (para mayores detalles, véase el número anterior de *Ciencia y Desarrollo*).

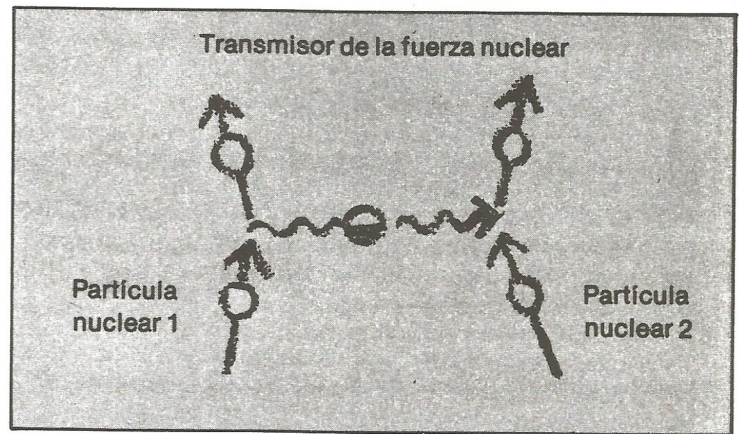
### Algunos problemas en el modelo estándar

Las dos virtudes fundamentales del modelo estándar, que lo han hecho atractivo durante muchos años son, por un lado, su sencillez, y por el otro, su capacidad para predecir algunos fenómenos que pueden ser —y han sido— observados (entre ellos se cuentan la expansión del Universo; las abundancias químicas "primordiales" de hidrógeno, helio y deuterio, y la radiación de fondo de 3 grados Kelvin). El modelo tiene, sin embargo, algunos defectos, tanto de fondo como de principio. Un defecto de fondo, que está estrechamente relacionado con su misma sencillez, es su incapacidad de describir etapas del Universo previas a la primera diezmilésima de segundo. Esto se debe a que la física común y corriente no es adecuada para representar el comportamiento del Universo a las presiones y temperaturas extremas que debieron existir en esos momentos; es necesario recurrir a las más modernas teorías de partículas elementales para tener una idea aproximada de lo que sucede en estos instantes. Si bien puede parecer de escasa importancia conocer lo que sucedió durante la primera diezmilésima de segundo después de la Gran Explosión, en realidad no es así, puesto que muchas de las características del Universo quedan determinadas precisamente en esos instantes. Por otra parte, un problema de principio que presenta el modelo estándar es que no puede dar respuesta a la pregunta de por qué existe mucha más materia que antimateria en el Universo; de hecho, el modelo estándar se ve obligado a postular un exceso "primigenio" de materia sobre antimateria, esto es, a introducir una asimetría en las "condiciones iniciales" de la evolución del Universo, la cual es poco grata a los ojos de los científicos. En efecto, sería mucho más natural suponer que el Universo nació en condiciones totalmente simétricas, con la misma cantidad de materia y de antimateria.

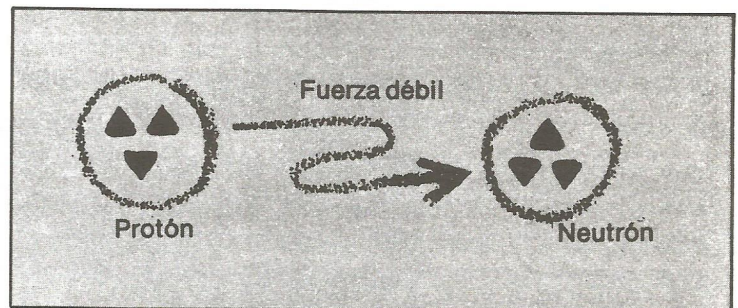
A pesar de estos defectos, el modelo estándar explica satisfactoriamente tantos y tan importantes hechos observacionales, que sería absurdo desecharlo y lanzarnos a la tarea de construir uno totalmente distinto y nuevo (mientras podamos evitarlo). En otras palabras, sería muy deseable poder complementar el modelo estándar con otro modelo que, partiendo de una situación completamente simétrica en lo que se refiere a la abundancia de materia y antimateria, llegara a la primera diezmilésima de segundo de vida con una fuerte preponderancia de materia, y en el que este exceso fuera una consecuencia de las leyes naturales de la física. Así resolveríamos dos problemas al mismo tiempo; mataría-



De acuerdo con la visión actual, la repulsión eléctrica entre dos electrones se debe a que intercambian uno o más fotones (representados con una línea sinuosa)



La fuerza entre dos nucleones (dos protones, dos neutrones o un protón y un neutrón) se debe, como las demás fuerzas, al intercambio de partículas



A través de la fuerza débil, un protón puede convertirse en un neutrón (o viceversa), con la intervención de otras partículas que no aparecen en el diagrama

mos, por así decirlo, dos pájaros de un tiro: conoceríamos la evolución del Universo antes de la primera diezmilésima de segundo, y resolveríamos el problema del exceso de materia sobre antimateria. Ciertamente un modelo así tendría que estar basado en las leyes que rigen el comportamiento de las partículas elementales y las interacciones entre ellas y lo más maravilloso es que explicaría las propiedades del Universo en su conjunto como consecuencia de las propiedades de sus componentes más pequeñas. En otras palabras, lo más grande que conocemos quedaría explicado en términos de



Las interacciones entre partículas se han deducido estudiando las trazas que dejan, cuando tienen carga eléctrica, en una cámara de burbujas

lo más pequeño! La unidad subyacente en la naturaleza se manifestaría en todo su esplendor; el ciclo se habría cerrado y el sueño de Pitágoras se habría cumplido...

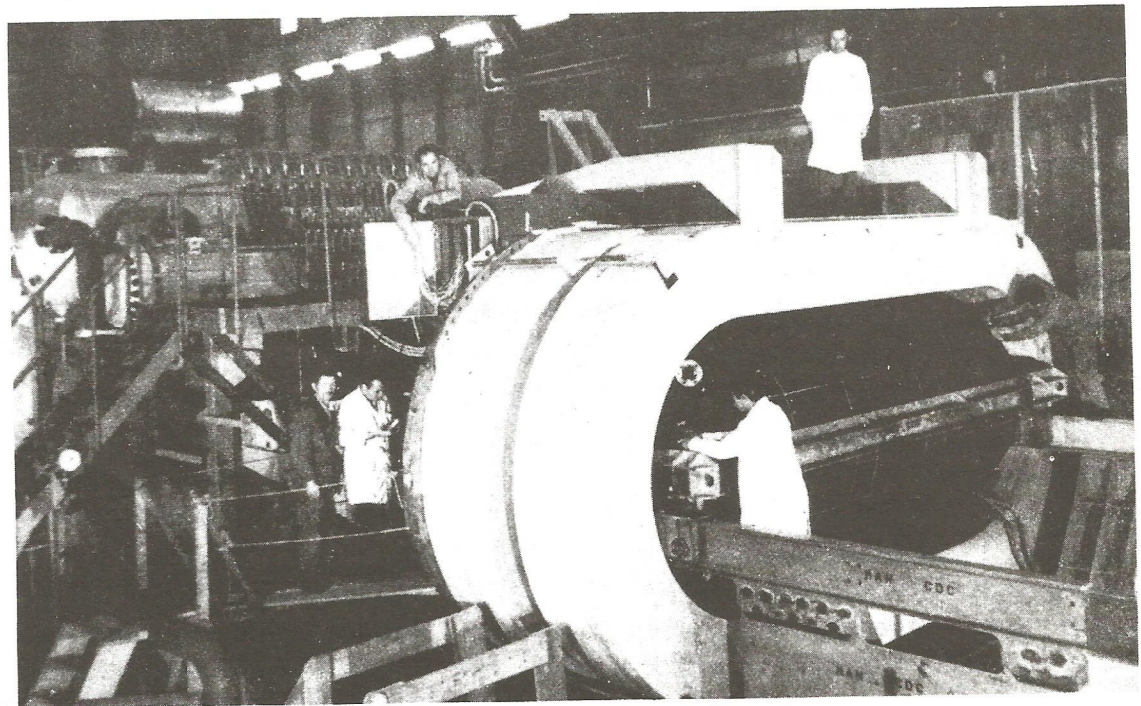
Aunque parezca increíble, la ciencia moderna ha sido capaz de avanzar notablemente en la construcción de un esquema para la evolución de un Universo como el que se ha descrito, según veremos con detalle en el siguiente número

de *Ciencia y Desarrollo*. Si bien el modelo actual es incapaz aún de llegar al instante mismo de la creación, se ha logrado acortar en varios órdenes de magnitud el intervalo de tiempo posterior a la Gran Explosión para el cual se desconoce lo que ocurre, intervalo que en el modelo estándar era de una diezmilésima de segundo. Ahora bien, para comprender cabalmente el nuevo modelo es necesario, primero, repasar ciertos conceptos de la moderna teoría de las partículas elementales. A ello dedicaremos el resto de este artículo. Cabe mencionar, sin embargo, que nuestra exposición no podrá ser completa ni detallada; nos limitaremos a presentar un breve resumen de las ideas y los conceptos de actualidad en la teoría de las partículas elementales que utilizaremos posteriormente.

### Fuerzas, partículas y leyes de conservación

Los físicos distinguen cuatro tipos de *fuerzas o interacciones* fundamentales en la naturaleza; éstas son la interacción gravitatoria, la electromagnética, la débil y la fuerte. Las dos primeras son bien conocidas, pues se ponen de manifiesto en fenómenos observables en nuestra vida diaria; nos percatamos de la interacción gravitatoria, por ejemplo, en la caída de los cuerpos o en el movimiento de planetas y satélites, y de la electromagnética en todos los fenómenos relacionados con la electricidad y con el magnetismo. Las otras dos interacciones no son tan conocidas, pues sólo se manifiestan en el mundo subatómico: la débil es la responsable del decaimiento radiactivo, y a la fuerte se le atribuye el hecho de que los protones se mantengan unidos en los núcleos atómicos a pesar de repelerse eléctricamente.

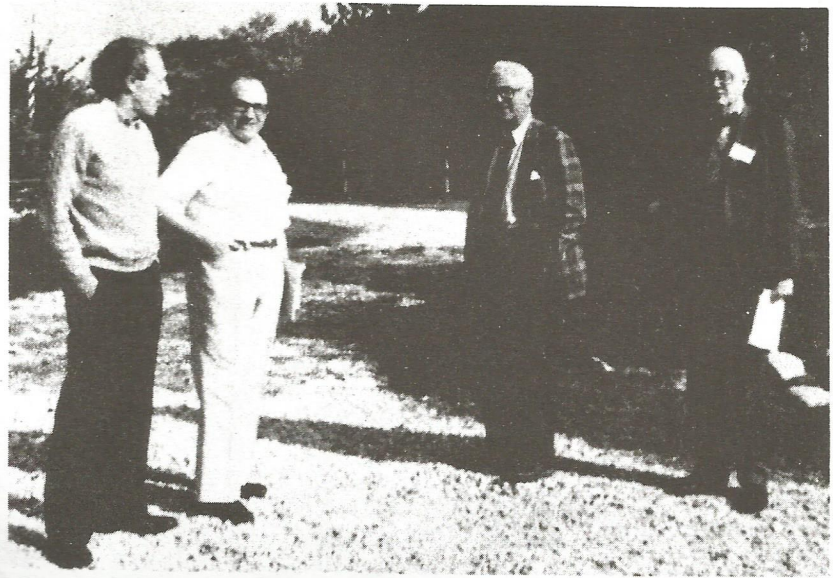
Nótese, de paso, que lo anterior nos indica de inmediato que la interacción fuerte es más intensa que la electro-



Cámara de burbujas denominada "Gargamelle", en el CERN



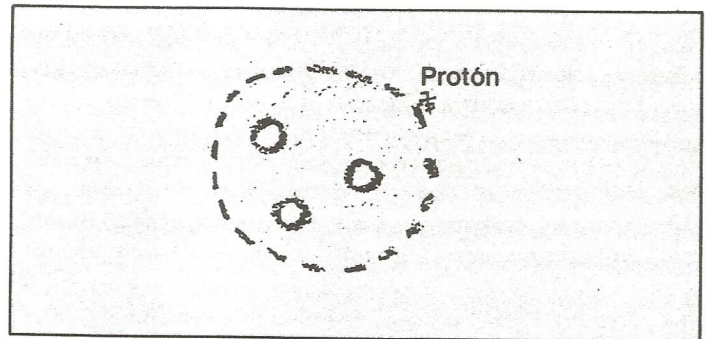
Murray Gell-Mann recibió el premio Nobel en física en 1969 por sus contribuciones en el campo de las partículas elementales



Yuval Ne'eman (segundo de izquierda a derecha) propuso que los protones están constituidos por partículas más "elementales", al mismo tiempo que Gell-Mann, aunque de manera independiente. En la foto, Gell-Mann es el tercero de izquierda a derecha

magnética. De hecho, la interacción fuerte es la más intensa o fuerte de las cuatro —de ahí su nombre—; le siguen, en orden descendente, la electromagnética (cuya intensidad es 137 veces menor que la de la fuerte), la débil (cien mil veces menos intensa) y, por último, la gravitatoria (diez mil millones de millones de millones de millones de millones de veces menos intensa). En vista de que los físicos aborrecen la idea de una *acción a distancia* entre objetos alejados uno del otro (esto es, la idea de que dos objetos puedan interactuar sin que medie nada entre ellos), las interacciones se han explicado en términos de un intercambio de partículas. En otras palabras, se piensa que cuando dos objetos interactúan entre sí lo que ocurre en realidad es que intercambian ciertas partículas, y que el efecto de este intercambio es lo que percibimos como una fuerza.

Ahora bien, toda interacción o fuerza tiene dos características: su intensidad y su alcance. La primera se refiere a qué tan "fuerte" es la fuerza, y la segunda, a qué tan "lejos" es capaz de hacerse sentir. Para describir la intensidad se le asocia a cada uno de los objetos interactuantes una *carga* (que en el caso electromagnético es la carga eléctrica común y corriente y en el caso de la gravedad es la masa), y a la interacción en sí se le asocia una *constante de acoplamiento* (que en el caso de la gravedad es la célebre constante de gravitación universal  $G$ ). Para describir el alcance de la interacción se les asocia a las partículas que se intercambian una cierta masa, que es *mayor* cuanto *menor* sea el alcance de la fuerza. Así, la fuerza gravitatoria y la fuerza electromagnética, cuyo alcance es infinito (esto es, que se "sienten" a cualquier distancia), serían atribuibles, según este esquema, al intercambio de partículas sin masa (de masa cero), las cuales se han denominado *gravitón* y *fotón*, respectivamente. Por otro lado, la fuerza débil y la fuerte se deberían al intercambio de partículas de masa relativamente grande, pues ambas tienen un alcance muy pequeño (sólo se "sienten"

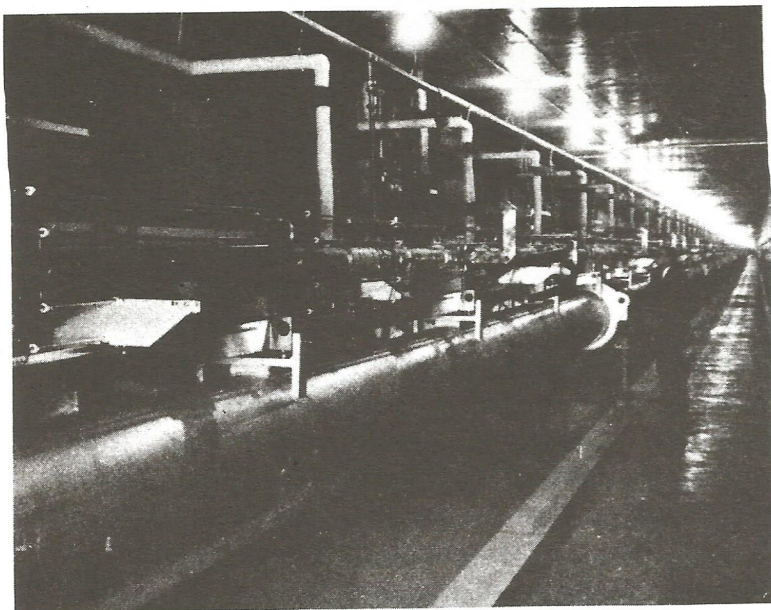


El protón está formado por tres quarks, uno "verde", uno "rojo" y uno "azul"

dentro del núcleo, esto es, a distancias muy cortas, del orden de un diezbillonésimo de centímetro).

Al igual que existen objetos sin carga eléctrica, existen también objetos que carecen de uno o más de los otros tipos de *carga*; los electrones, por ejemplo, no tienen *carga fuerte*, esto es, no "sienten" la interacción fuerte; los neutrones, en cambio, carecen de carga eléctrica y no "sienten" la fuerza electromagnética. Las partículas que no interactúan fuertemente, esto es, que no "sienten" la fuerza fuerte se denominan *leptones* y las que sí la sienten se llaman *hadrones*. Ejemplos bien conocidos de leptones son el electrón y el neutrino, y de hadrones, el protón y el neutrón.

Otra propiedad que poseen las partículas, además de su *carga*, es el llamado *espín*, el cual puede visualizarse como una medida de la rotación que tienen sobre su propio eje (el espín es, de hecho, el momento angular intrínseco de la partícula). Medido en las unidades que usan los físicos nucleares, el espín sólo puede tener valores enteros (0, 1, 2) o semienteros (1/2, 3/2). Las partículas que tienen espín entero se llaman *bosones* y las que lo tienen semientero se lla-



En el acelerador lineal de Stanford (SLAC) se producen electrones con energías muy elevadas, acelerándolos a lo largo de trayectorias rectilíneas dentro de estos tubos de vacío

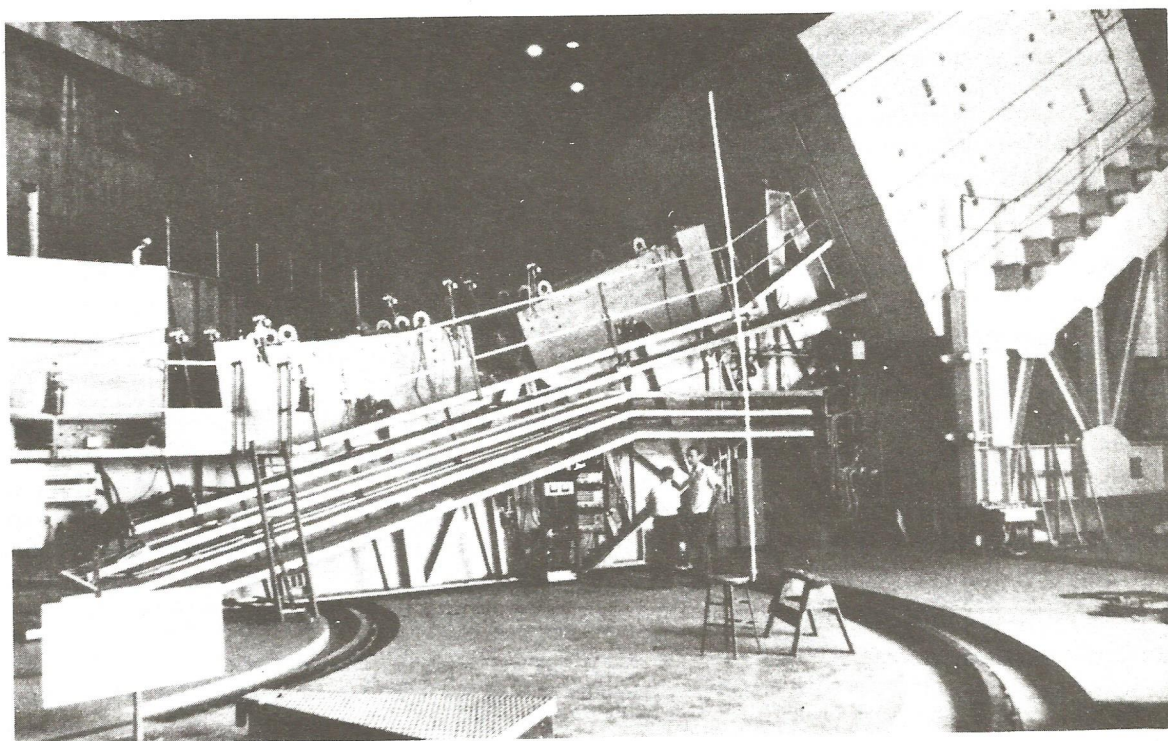
man *fermiones*, en honor de los físicos que describieron sus propiedades estadísticas (Bose y Einstein, en un caso, y Fermi y Dirac, en el otro). Finalmente, y para concluir con la clasificación de fuerzas y partículas, hay que mencionar que no todas las partículas son estables. Por ejemplo, un neutrón aislado “decae”, es decir, se convierte en un protón, un electrón y un antineutrino en el transcurso de unos 15 minutos. Los hadrones que al decaer nos proporcionan protones

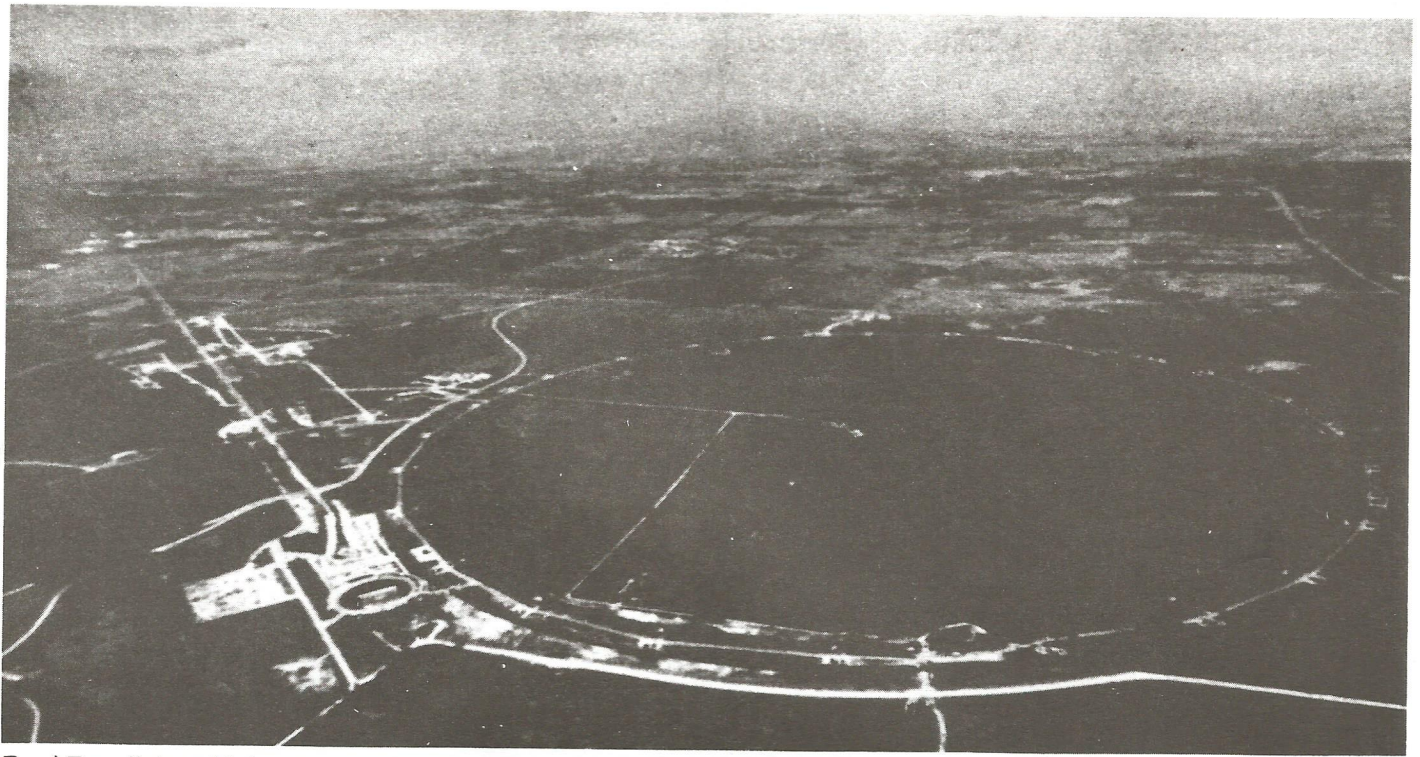
se llaman *bariones*; aquellos que decaen sin generar protones se conocen como *mesones*.

Después de realizar miles de experimentos, los físicos descubrieron que las interacciones entre las partículas no ocurren al azar, sino de acuerdo con una serie de reglas que se suelen llamar *leyes de conservación*. Las leyes de conservación no son sino expresión científica de hechos observados experimentalmente. El ejemplo más conocido es la ley de la conservación de la energía, que se expresa diciendo que en todo proceso la energía total es la misma antes y después del mismo (la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma). En realidad, no se conoce ninguna razón para que esto ocurra, simplemente se ha constatado que *ocurre* en todos los experimentos que se han hecho; los científicos expresan este resultado postulando la existencia de una ley universal. Desde luego, bastaría con que una sola vez no se cumpliera la ley para invalidarla como tal. De manera análoga, cuando los físicos descubren experimentalmente que algunos procesos ocurren en la naturaleza, mientras que otros procesos —que, en principio, también deberían ocurrir— nunca suceden, atribuyen este hecho a la existencia de una *ley de conservación*. Así, por ejemplo, para explicar el hecho de que siempre que en alguna interacción se produce una carga positiva, aparece también una carga negativa de la misma magnitud, se postuló la *ley de conservación de la carga eléctrica*. Esta ley prohíbe por ejemplo, que un neutrón decaiga en un protón y un neutrino (se crearía de la nada una carga positiva: la del protón).

Hacia fines de la década de los años cincuenta, se tenían leyes de conservación del espín, del número bariónico (o número de bariones), del número leptónico (o número de leptones) y de atributos más complicados, como la *extrañeza*, el *encanto* y la *paridad*. Con el paso del tiempo, y como resultado de nuevos experimentos se demostraría que algunas

En este detector, ubicado en el SLAC, se registran los resultados de los choques de electrones acelerados con hidrógeno líquido (protones). Mediante este tipo de experimentos se descubrió que el protón no es realmente “elemental”, sino que tiene estructura interna





En el Fermilab se hicieron experimentos que corroboraron la existencia de una estructura interna del protón. En este inmenso anillo, de 6.4 km de circunferencia, se aceleran los protones a energías de 400 mil millones de electrón-volts

de estas leyes eran más generales que otras. También se descubrirían "violaciones" a algunas leyes de conservación, de las cuales habrían de surgir las teorías que más nos interesarán.

### Estructura de la materia

Hacia 1935 se pensaba que toda la materia estaba constituida por diversas combinaciones de unas cuantas partículas que, en razón de ello, se nombraban "elementales". Se conocían el protón, el electrón, el neutrón y el neutrino, junto con sus correspondientes antipartículas. Sin embargo, con el paso del tiempo fueron descubriéndose más y más partículas "elementales", y hacia principios de la década de los años sesenta ya se conocían más de cien de ellas. Ante semejante proliferación, los científicos comenzaron a sospechar que las supuestas partículas "elementales" no lo eran tanto, y que deberían existir unas cuantas *subpartículas* —ésta sí realmente elementales— cuyas combinaciones daban lugar a las partículas observadas. La razón de esta sospecha es la hipotética simplicidad básica de la naturaleza, que siempre se ha dado por hecho.

Guiados por estas ideas, y por ciertas regularidades en las características de las partículas que permitían agruparlas en *familias*, Murray Gell-Mann y Yuval Ne'eman propusieron independientemente en 1961 que todos los hadrones están formados por partículas más fundamentales, a las que Gell-Mann bautizó en 1964 como *quarks* (palabra tomada del libro *Finnegans Wake* de James Joyce). En el esquema de Gell-Mann, los quarks podían presentarse en tres *sabores* distintos: u, de "up", d, de "down", y s, de "strange"; mediante combinaciones adecuadas de estos quarks y de sus antiquarks, podían obtenerse todos los hadrones conocidos.

El protón, por ejemplo, estaría constituido por tres quarks, de sabores uud, y el neutrón por otros tres, en este caso de sabores ddu. Los experimentos que fueron realizados con los grandes aceleradores entre 1970 y 1975 (principalmente en el acelerador lineal de Stanford SLAC, en el CERN y en el Fermilab) confirmaron y reforzaron este modelo.

Aún restaban por explicar las fuerzas entre los quarks, responsables, por ejemplo, de que tres quarks se mantengan fuertemente ligados formando un protón o neutrón. Para ello, fue necesario postular la existencia de tres *cargas* (en vez de dos, como en el caso del electromagnetismo, o una, como en la gravedad), las cuales recibieron el nombre de *cargas de color* pues, a falta de otro nombre, se bautizó como *color* a esta propiedad. Así, por ejemplo, un quark "u" podía ser "rojo", "azul" o "verde"; esto, desde luego, no significaba que ése fuera realmente su color, sino que servía sólo para describir sus interacciones con los demás quarks. Las partículas que, al ser intercambiadas, producen la fuerza que liga a un quark con otro se conocen como *gluones* (palabra que procede de "glue", pegamento en inglés). Según este esquema, los gluones serían, de hecho, los transmisores de la interacción fuerte, que es la que aparece entre dos quarks. Las fuerzas entre protones, o entre protones y neutrones, serían sólo "residuos" de las fuerzas "internas" de cada partícula, de la misma manera que las fuerzas entre las moléculas de un líquido son sólo residuos de las fuerzas eléctricas internas de cada molécula.

De la manera que lo hemos esbozado, se piensa en nuestros días que las únicas partículas realmente elementales son los quarks, los leptones y los gluones. En el siguiente número de *Ciencia y Desarrollo* veremos la manera como la cosmología moderna integra esta visión sobre las partículas elementales (lo más pequeño que se conoce) con la evolución del Universo en su conjunto