

CARLOS PAJARES VALES

*De lo más pequeño a lo más grande
del universo*

17 DE MARZO DE 2003

CARLOS PAJARES VALES

NACIÓ EN MADRID EN 1945, DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS CON PREMIO EXTRAORDINARIO POR LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE SU CIUDAD NATAL. PRIMER DECANO DE LA FACULTAD DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA CONTRIBUYÓ DE FORMA NOTABLE A SU CREACIÓN Y CONSOLIDACIÓN. RECTOR DE ESTA UNIVERSIDAD DURANTE EL PERIODO 1984-1990, EN DONDE DIO UN GRAN IMPULSO CIENTÍFICO, CREÁNDOSE DURANTE SU MANDATO LAS UNIVERSIDADES DE CORUÑA Y VIGO.

ESPECIALISTA EN FÍSICA TEÓRICA DE PARTÍCULAS ELEMENTALES, PUBLICÓ CIENTOS DE ARTÍCULOS EN REVISTAS ESPECIALIZADAS. FUE INVESTIGADOR INVITADO EN VARIOS LABORATORIOS DE GRAN BRETAÑA, PORTUGAL, USA, RUSIA Y CHINA ENTRE OTROS.

FUE AUTOR DE UN CAPÍTULO DE HISTORIA DE LA CIENCIA ASÍ COMO DE VARIOS LIBROS, DESTACANDO «INTRODUCCIÓN A LAS INTERACCIONES FUERTES». PRONUNCIÓ GRAN NÚMERO DE CONFERENCIAS Y ES COLABORADOR DE VARIOS DIARIOS: LA VOZ DE GALICIA, EL CORREO GALLEGO, EL PAÍS, ABC, ETC.

ENTRE OTRAS DISTINCIONES Y CONDECORACIONES TIENE EL PREMIO XUNTA DE GALICIA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y ES CABALLERO DE LA ORDEN DE LAS PALMAS ACADÉMICAS DE FRANCIA.



U nos instantes después del big-bang, el Universo estaba formado por electrones, fotones, neutrinos, quarks y gluones a una gran temperatura. Al expandirse y enfriarse el Universo, quarks y gluones se condensaron formando protones y neutrones que posteriormente formarían los núcleos atómicos. La obtención de ese gas de quarks y gluones es un objetivo que se está persiguiendo por experimentos realizados en el Centro Europeo de Partículas Elementales (CERN) de Ginebra y en el colisionador relativista de iones pesados (RHIC) de Brookhaven en Estados Unidos. Su obtención, además de explorar los fascinantes primeros instantes del Universo, nos puede ayudar a comprender cómo son las fuerzas que originan la mayor parte de las partículas y por qué es imposible obtener quarks y gluones libres, es decir, no confinados dentro de las partículas, a temperaturas ordinarias. El mundo de lo más pequeño y el mundo de lo más grande están íntimamente unidos, existe una globalidad total.

¿DE QUÉ ESTÁN HECHAS LAS COSAS?

Desde los tiempos más remotos y en las civilizaciones más antiguas, de la misma manera que el hombre se maravillaba y se preguntaba por el sentido y el origen de los astros y el Universo, también se ha preguntado por el interior de las cosas, hurgando dentro de ellas e intentando conocer qué es lo que les da consistencia y si existe algo subyacente y común a todas ellas a pesar de su infinita variedad.

Hace más de 2.500 años, en Grecia, Tales constató que cualquier sustancia podía clasificarse como sólida, líquida o gaseosa dado que el agua existía en las tres formas, ¿no podría darse el caso que el agua fuese el constituyente de toda la materia? En la misma línea de pensamiento, Aristóteles y sus seguidores postulaban que la materia estaba formada por tierra, fuego, aire y agua. Su maestro Platón elaboró la idea de la existencia de estructuras

formales básicas, como las figuras geométricas fundamentales, a partir de las cuales se «formaban» todas las cosas. Platón suponía que estas estructuras básicas eran triángulos. Anteriormente Leucipo y su discípulo Demócrito (585 a.C.) sugirieron la posibilidad de que la materia estuviese constituida por pequeñas partículas indivisibles, los átomos.

La construcción de todas las cosas a partir de otras piezas elementales no es, desde luego, una verdad necesaria que tarde o temprano tenga que establecerse. Así, en diversas culturas orientales y también dentro de la Física de Partículas en la década de los sesenta se pensó que existía una globalidad, de tal manera que todo está compuesto de todo, así que cualquier parte influye en mayor o menor medida en cualquier otra parte y recíprocamente. En este esquema no sería cierto que unos pocos elementos construyesen todas las cosas; sólo podría serlo en el sentido de una aproximación a la realidad, válida en determinados casos y satisfaciendo condiciones específicas para que se pudiese despreciar la influencia de la mayor parte de los elementos.

El siglo XIX comenzó con el establecimiento de la moderna teoría atómica de la materia. Se sabía que una gran variedad de sustancias se podían obtener combinando diferentes cantidades de unos pocos elementos. Dalton, en 1808, propuso que estas combinaciones se entenderían si cada elemento estuviese constituido por átomos. La combinación de átomos de distintos elementos producía las moléculas de las sustancias elementales. En 1869, Dimitri Mendeleev descubrió que al ordenar los elementos atómicos del más ligero (hidrógeno) al más pesado, sus propiedades se repetían a intervalos regulares, estableciendo el sistema periódico de los elementos. La regularidad señalada apuntaba a que los átomos no son elementos sino sistemas «complejos» compuestos de otros «elementos». Las diferentes combinaciones de estos elementos darían lugar a los distintos átomos, lo que explicaría las regularidades.

El siglo XIX acaba con el descubrimiento de los electrones por J.J. Thompson en 1897 y de la radioactividad en 1896 por Becquerel, Pierre y Marie Curie, descubriéndose que algunos átomos podían desintegrarse espontáneamente produciendo otros átomos. Con todo esto se empieza a sospechar que los átomos tienen estructura interna y que ésta debería diferir muy poco de unos átomos a otros próximos en el sistema periódico.

En los años 1909-1913 Rutherford conjuntamente con sus colaboradores Marsden y Geiger realizaron diversos experimentos con los que demostraron que efectivamente los átomos tenían una estructura interna: el núcleo. Los experimentos consistían en bombardear una lámina delgada de oro con partículas α que provenían de una fuente de radio. Si la distribución de materia dentro del átomo fuese homogénea, se esperaría que la mayor parte de partículas a saliesen hacia delante y muy pocas a grandes ángulos. Sin embargo, salen muchas más de las esperadas a grandes ángulos e incluso algunas rebotan hacia atrás. Según Rutherford «Fue como si dispararas una bola de 4 cm contra un trozo de papel de seda y rebotara hacia atrás golpeándote». Dentro de los átomos había concentración de materia. El átomo está compuesto de electrones distribuidos en capas, en el exterior de un núcleo central que tiene una carga positiva igual al número de electrones exteriores. El núcleo tiene unas dimensiones de unos cuantos fermis, $1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$.

Como las dimensiones de los átomos son del orden de amstrongs, $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$, los núcleos son cien mil veces más pequeños que los átomos. Esto no quiere decir que los átomos estén prácticamente vacíos. Los electrones están ligados a los núcleos mediante la fuerza atractiva (por tener las cargas opuestas) coulombiana. Esta fuerza eléctrica entre cargas es debida a la existencia de un campo eléctrico que dota de consistencia al espacio entre los electrones y el núcleo. Otra manera de expresar lo mismo, es decir que entre los electrones y el núcleo se intercambian fotones, que son los «cuantos» del campo electromagnético existente. Estos fotones que ligan los electrones al núcleo dan consistencia y «llenan» el espacio entre los electrones y el núcleo.

El experimento de Rutherford es típico de toda una serie de ellos que se sucedieron a lo largo del siglo XX para tratar de explorar objetos cada vez más pequeños. Simplificadamente, los experimentos constan de un haz de partículas aceleradas para dotarlas de una energía E y un momento p suficientemente alto, que inciden sobre un blanco, siendo recogidas las partículas resultantes de la colisión mediante detectores. Las ondas asociadas a las partículas del haz tienen una longitud λ , relacionada con el momento de la partícula $p=h/\lambda$, de tal manera que si se quiere explorar un blanco cuyo tamaño esté caracterizado por el radio R se debe satisfacer $\lambda < R$, con una longitud mayor, las ondas son insensibles al blanco, no se enteran de su existencia. Cuanto más pequeño es el blanco, menor es la longitud de onda, más grande debe ser p y, por lo tanto, mayor la energía de la partícula lanzada como sonda. Por eso, en la medida que se quiere explorar tamaños más pequeños necesitamos aceleradores más potentes.

Una vez detectados los núcleos, se comprobó que estaban constituidos por protones y neutrones. Un núcleo de masa A veces la masa del protón tiene Z protones y $A-Z$ neutrones. La forma de un núcleo es aproximadamente esférica con un radio $R=R_0 A^{1/3}$, $R_0 = 1.1 \text{ fm}$.

Como el tamaño de un protón o un neutrón es del orden de 1 fm , los protones y neutrones en el núcleo están muy juntos. Los protones del núcleo al tener carga eléctrica positiva experimentan la repulsión coulombiana. El hecho de permanecer unidos implica la existencia de una fuerza muy poderosa capaz de vencer la repulsión electromagnética. Debido a su intensidad se llama fuerza fuerte y es experimentada por los protones y neutrones y por todo un conjunto de partículas llamadas hadrones y no por los electrones y todo un conjunto de partículas llamadas leptones. La fuerza fuerte es de corto alcance, unos pocos fermis, en contraste con las fuerzas electromagnética o gravitatoria que tienen alcance infinito.

El estudio de interacciones fuertes mediante experimentos de aceleradores llevó al descubrimiento de toda una serie de partículas. A principios de la década de los sesenta el número superaba las cien. ¿Cómo se podría poner orden en toda esa variedad de partículas? Una situación similar se había producido cien años antes con los diversos elementos químicos puestos en orden por el sistema periódico. Ese orden se estableció al descubrir que las interacciones fuertes tenían una simetría aproximada (Pajares, 1997) y que de acuerdo con ella todos los diferentes hadrones se podrían describir a partir de tres entida-

des básicas llamadas quarks, qqq, o bien a partir de un quark y de otra entidad básica llamada antiquark, porque tenía las mismas propiedades que los quarks excepto las llamadas cargas (no solamente la eléctrica) que eran opuestas qq. (M. Gell-Mann, introductor de los quarks, tomó, la palabra de la obra de Joyce, *Finegan's Wake*, y no tiene ningún significado específico).

Estas entidades básicas, ¿son realmente partículas reales, detectables o son simplemente objetos definidos matemáticamente pero sin soporte real, a la manera de Platón? La respuesta a dicha pregunta vino dada por los resultados de los experimentos realizados en el acelerador lineal Stanford, al final de la década de los sesenta, en el que se hicieron colisiones profundamente inelásticas de electrones contra protones, en que el electrón incidente sufría una gran desviación angular. En la interacción electrón-protón se intercambia un fotón de gran momento, y por tanto pequeña longitud de onda que nos permite «ver» el interior del protón. El resultado del experimento, constataba que efectivamente el protón tenía «partes» con las propiedades de los quarks. Estos quarks tenían carga fraccionaria y pueden ser de 6 clases, d, u, s, c, t, b. A partir del experimento de Stanford, que probaba la existencia de los quarks dentro de los hadrones, se buscó obtenerlos libres (Pajares, 2000). Enseguida se sospechó que esto no iba a ser posible y que las fuerzas entre los quarks eran tales que a muy pequeñas distancias eran muy pequeñas, de tal manera que los quarks se comportaban como libres dentro del protón (libertad asintótica) y, sin embargo, cuando queríamos separar a un quark para liberarle, aumentando la distancia a los otros, la fuerza aumentaba (esclavitud infrarroja). En 1973 se propuso la cromodinámica cuántica, teoría que explica la interacción entre los quarks mediante el intercambio de otras partículas y los gluones, por tanto, ésta es la explicación de la interacción fuerte (Yndurain, 1999). Los gluones juegan en la interacción fuerte el mismo papel que los fotones en la interacción electromagnética. Son la argamasa, el cemento mientras que los quarks son los ladrillos. La cromodinámica cuántica es una teoría con muchas bondades y que ha dado lugar a múltiples explicaciones físicas, sin embargo todavía, no ha sido probado que los quarks y los gluones en dicha teoría estén confinados, es decir, sea imposible obtenerlos libres, aunque existen serias indicaciones de que efectivamente es así.

Cuando hablamos de imposibilidad de obtener quarks y gluones libres, nos referimos a condiciones normales de presión y temperatura. Otra cosa diferente son las altas temperaturas y/o presiones. Sabemos que en tiempos remotos en el Universo esos quarks y gluones existieron libres y tenemos la sospecha de que podemos obtenerlos en laboratorio.

EL ORIGEN DEL UNIVERSO. EL BIG BANG

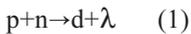
La teoría del big-bang (gran-traca) parte de un Universo concentrado a muy alta densidad que explotó produciendo la expansión del espacio de tal manera que todos los objetos del Universo están separándose unos de otros. No existe un centro sino que el mismo espacio-

tiempo del T Universo se forma en la expansión. El Universo es como la superficie de un globo que se estuviese hinchando. Cualquier par de puntos que se señalen se separan al hincharse. (La analogía del globo no debe extenderse a considerar el Universo como una superficie cerrada). Dicha expansión, desde un origen hace alrededor de 14.000 millones de años, es comprobada todos los días por nuestros telescopios, y verificada por primera vez a finales de la década de los 20 por Hubble.

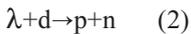
Al principio la temperatura era muy elevada del orden 10^{32k} , y la materia existente no estaba diversificada. En la medida que se expande el Universo éste se enfría produciéndose procesos de diferenciación, apareciendo diversas clases de materia y distinguiéndose entre la fuerza electromagnética y la fuerte.

A partir de ese momento, el Universo estaría formado esencialmente por leptones (electrones, positrones, neutrinos,...) fotones, quarks y gluones moviéndose a muy altas velocidades correspondiendo a las altas temperaturas existentes. Al bajar la temperatura y alcanzar $10^{12}K$ los quarks y gluones se condensan formando hadrones. Es una transición de fase, similar a la que experimenta el agua que pasa por sus fases gaseosa (vapor), líquida (agua), sólida (hielo) al enfriar. Se calcula que la condensación del gas de quarks y gluones se realiza alrededor de 10^{-6} - 10^{-5} segundos después del big-bang.

Una vez formados los hadrones y en particular los protones y los neutrones, éstos chocarán entre sí y producirán núcleos de deuterio, expulsando la energía sobrante en forma de fotones.



Por otra parte, los fotones existentes por su parte chocan con los deuterones formados, rompiéndolos de acuerdo a la reacción



De esta manera, se producen tantos deuterones como se destruyen. Sin embargo, al enfriarse el Universo se llegará a una temperatura tal que los fotones no tienen una energía suficiente para romper el deuterón, primando la reacción (1), dado que el deuterón tiene menos masa que la suma del protón y neutrón y por tanto se puede formar incluso cuando aquéllos apenas tengan energía (Steinberger, 1993). A continuación los choques deuterón-neutrón formarán tritio y de manera similar se irán formando diversos núcleos atómicos (núcleos ligeros). Es la llamada nucleosíntesis. Los cálculos detallados muestran un gran acuerdo con los datos experimentales sobre la proporción en el Universo de todos los núcleos ligeros, suponiendo una verificación adicional importante de la teoría del big-bang.

Los electrones al formarse los núcleos y estar éstos cargados positivamente, pueden ser capturados debido a la fuerza coulombiana, formando átomos y desprendiendo la energía sobrante en forma de fotones. Igualmente los fotones existentes chocan con los

átomos formados, rompiéndoles, de tal manera que el número de átomos formados y destruidos se iguala. Sin embargo, más adelante, en la evolución del Universo aproximadamente 300.000 años después del origen, el Universo se habría enfriado alcanzando 10^4 K- 10^3 K. A esas temperaturas los fotones no tendrían energía suficiente para romper los átomos y por tanto empezarían a sobrevivir de manera estable átomos. Desde entonces, los fotones existentes ya no tienen energía suficiente para romper nada, y por ello permanecen desacoplados de la materia. Esos fotones, desacoplados de la materia, desde esa etapa inicial del Universo deben encontrarse en todo el Universo a una temperatura inferior (alrededor de 3K) debido al enfriamiento del Universo desde entonces y con una distribución de frecuencias correspondiente a la ley de Planck a dicha temperatura. La existencia de esta radiación de fondo (el murmullo del Universo) fue realizada por A. Penzias y R. Wilson en 1965 constituyendo la verificación de una de las predicciones más espectaculares del big-bang (Weinberg 1981).

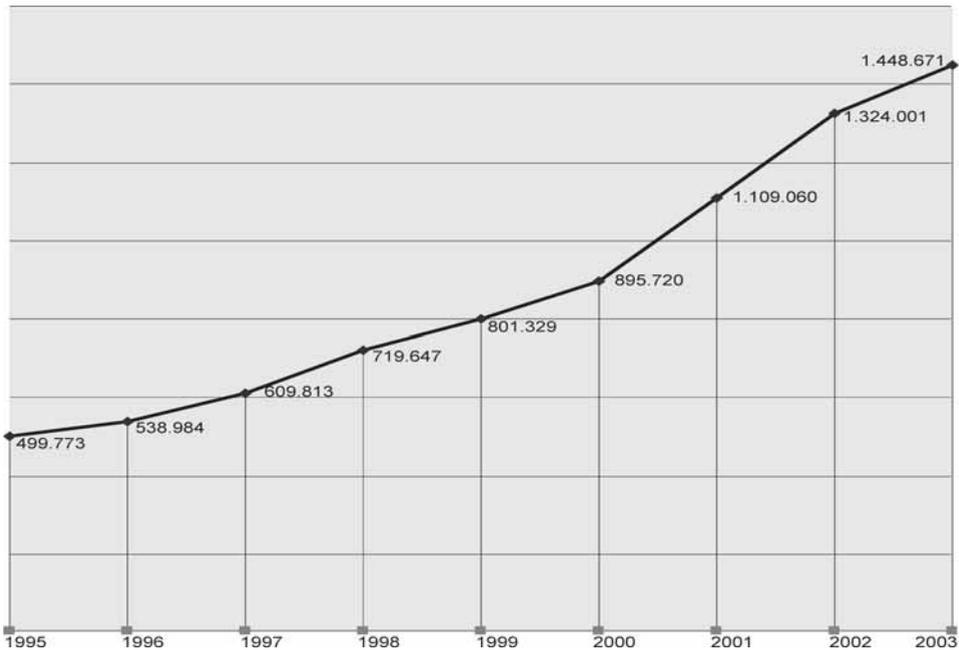
El hecho de que la teoría del big-bang haya dado lugar a predicciones espectaculares como son la expansión Hubble (desplazamiento hacia el rojo de los espectros atómicos), la nucleosíntesis y la radiación de fondo, experimentalmente comprobadas, no quiere decir que comprendamos enteramente dicha evolución. Recientemente se ha observado que el Universo está acelerándose y que la mayor parte de la energía-materia del Universo corresponde a una energía desconocida (73%), que proviene de la llamada constante cosmológica y que tendría que ver con la energía del vacío. ¡El vacío, tiene estructura, está lleno! El resto, sólo un 4% estaría en la forma de materia ordinaria, es decir, de protones y neutrones. El resto, el 23% del total, sería materia oscura y cuya naturaleza tampoco se conoce, aunque se especula que tenga que ver con partículas que aparecen en las llamadas teorías de gran unificación y que todavía no han sido detectadas. Para tener un conocimiento mejor de la evolución del Universo sería bienvenido determinar mejor las diversas etapas y, en particular, conocer mejor la transición de fase en la que se condensan los quarks y gluones en hadrones.

En el primer apartado al dar respuesta a la pregunta de qué están hechas las cosas describimos la cadena: cosas→moléculas→núcleos→partículas elementales→quarks y gluones. En esta cadena vamos cada vez a energías más altas y tamaños más pequeños. La evolución del Universo es como una pota en la que están los leptones, fotones, quarks y gluones y en la medida que se expande la pota se enfrían y se condensan (cocinan) primero los hadrones, luego los núcleos ligeros, luego los átomos. A partir de éstos, posteriormente las estrellas, galaxias. Las dos cosas, buscar de qué están hechas las cosas y buscar el origen del Universo, están íntimamente entrelazadas. Por eso investigar cómo se pueden obtener quarks y gluones libres desde hadrones, puede ser tan importante para conocer mejor la evolución del Universo como para enterarnos de cómo están hechas muchas partículas elementales.

RECREANDO EL UNIVERSO

Desde la década de los ochenta se ha perseguido obtener quarks y gluones libres, el llamado plasma de quarks y gluones, recreando así una de las primeras etapas del Universo. Para ello, se han realizado diversos experimentos de colisiones de núcleos pesados (Wong 1994): primero en el súper sincrotrón de protones (SPS) del CERN a energías de 20 GeV por nucleón en el centro de masa; a partir del año 2000 en el colisionador relativista de iones pesados (RHIC) de Brookhaven en Estados Unidos a energías de 200 GeV por nucleón; y se está construyendo en el CERN el gran colisionador de hadrones que permitirá hacer experimentos a energías de 5500 GeV por nucleón en el centro de masas. Los proyectiles y blancos más frecuentemente usados son los núcleos de oro (Au) y Plomo (Pb).

En la figura se puede ver una foto aérea de las instalaciones del RHIC, donde también aparece indicado esquemáticamente el camino que siguen los iones desde que son generados; incluyendo el antiguo acelerador AGS (Alternating Gradient Synchrotron) que es usado para acelerar inicialmente los iones, previamente a su inyección en RHIC. En RHIC operan cuatro complejos detectores: STAR, PHOBOS, PHENIX y BRAHMS destinados al análisis experimental de distintas propiedades y señales relativas a la posible obtención del plasma de quarks y gluones.



En el CERN de Ginebra se está adaptando el gran acelerador de electrones y positrones LEP de 27 Km de perímetro para acelerar hadrones (protones y núcleos) y convertirlo en el llamado LHC (gran colisionador de hadrones) cuyo presupuesto es de 1500 millones de euros. En este proyecto participan la mayor parte de los países europeos, así como otros países como Estados Unidos, India y Rusia. Para la detección de distintas propiedades y señales relacionadas con la obtención del plasma de quarks y gluones se está construyendo un complejo detector ALICE, compuesto de diversos detectores. En esta colaboración participan más de 1.000 físicos pertenecientes a más de 80 instituciones de todo el mundo. En la colaboración hay físicos españoles pero desgraciadamente no hay ninguna institución española. Otro complejo detector, CMS, también se utilizará para análisis relacionados con la Física del plasma de quarks y gluones.

La idea subyacente en todos los experimentos es muy simple. En una colisión entre partículas, por ejemplo entre 2 protones se producen otras partículas siendo el número de éstas mayor a la medida que aumenta la energía, cada una de estas partículas tiene un tamaño caracterizado por un radio alrededor de 1 fm. En una colisión entre dos núcleos pesados, cada uno con alrededor de 200 protones y neutrones, se producen muchas colisiones entre los protones y neutrones del proyectil y del blanco dando lugar a la producción de muchas partículas (A la energía de los experimentos de RHIC se producen más de 8.000 partículas en colisiones Au-Au). Ahora bien, para que se pueda hablar de la producción de partículas, cada una de ellas debe disponer de un volumen V_1 correspondiente a un radio de $R=1$ fm, $V_1 = 4/3 4\pi R^3$; sin embargo, en una colisión entre núcleos pesados, el volumen disponible durante un cierto tiempo es menor que el número de partículas producidas multiplicado por V_1 . Por tanto, durante un cierto tiempo se espera que en lugar de producir esas partículas, obtengamos en el volumen disponible un conjunto de quarks y gluones, sus constituyentes.

Para concretar más esta idea general, consideramos dos núcleos pesados que colisionan frontalmente (parámetro de impacto cero). Debido a la contracción Lorentz relativista en la dirección del movimiento los núcleos son como dos discos delgados con una superficie πR_A^2 . Cada colisión entre los protones y neutrones de cada núcleo se realizará a un determinado parámetro de impacto dentro de dicha superficie y se puede considerar como una interacción entre los quarks de los protones o neutrones que colisionan.

Cada interacción se puede representar por un círculo πr^2 dentro de la superficie πR_A^2 centrado en el lugar donde se efectúa la colisión. A medida que se produzcan más y más colisiones habrá más solapamiento de los círculos πr^2 , hasta el momento en que se forma un «cluster» de círculos que se propaga a lo largo de toda la superficie. Dentro de ese cluster lo que tenemos es un conjunto de quarks y gluones, y en la medida que el cluster tiene un tamaño del mismo orden que la superficie total tenemos un conjunto de quarks y gluones a esa escala. ¿Cuándo se obtiene ese cluster a lo largo de toda la superficie?

La respuesta es bien conocida dentro de la teoría de la percolación. La misma pregunta se ha realizado en el contexto de otros problemas de Física y también en otros

problemas alejados de la Física. ¿Cuántas gotas de agua deben caer en una determinada superficie para que se forme un charco? ¿A cuántas personas les tengo que contar un chisme para que se propague por toda la ciudad?

¿Cuántas personas de un corro bursátil deben creer una información sobre un valor empresarial para que este se vea afectado? (Stanffer et alii. 1994) Hay una densidad crítica de gotas, o una densidad crítica de personas por encima de la cual se forma el charco o se propaga el rumor. Igualmente hay una densidad crítica de interacciones por encima de la cual se formara un cluster de dimensiones nucleares en cuyo interior tenemos quarks y gluones libres. (Armesto et alii 1996).

Ese cluster de 4 quarks y gluones, al cabo del tiempo se fragmenta dando lugar a partículas, de la misma manera que en la etapa inicial del Universo, el gas de quarks y gluones al expandirse y enfriarse se condensa en partículas elementales.

¿Cómo sabemos que efectivamente se han formado quarks y gluones en superficies del orden de 100 fm^2 si al final sólo observamos partículas elementales?

Hay diversas señales propuestas para discernir la formación del plasma de quarks y gluones. Tres de la más espectaculares son: la supresión de partículas J/ψ , el llamado «jet quenching» y la modificación de la masa de algunas partículas elementales.

La partícula J/ψ tiene una masa de $3.1 \text{ GeV}/c^2$ siendo un estado ligado del quark c y del antiquark \bar{c} .

Si existiese un plasma de quarks y gluones libres, el quark c y el quark \bar{c} no se ligarían dado que la fuerza es muy pequeña a pequeñas distancias. Cuando los quarks y gluones forman hadrones, la probabilidad de que un quark c y un antiquark \bar{c} estén próximos para formar la J/ψ es muy pequeña debido a que el quark c y el quark \bar{c} son mucho menos frecuentes que los quarks u , d , s y los correspondientes antiquarks \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} , pues tienen mucha mayor masa. Por tanto, se espera que si se obtiene un gas de quarks y gluones en colisiones nucleares, el número de partículas J/ψ estaría suprimido respecto al número de partículas J/ψ producidas en el caso de que no se produjera.

El fenómeno de «jet-quenching» es similar a un conocido efecto producido en Electrodinámica Cuántica, el efecto «Landau-Pomeranchuk» que lleva el nombre de dos ilustres físicos rusos. Una partícula cargada emite fotones que pueden llevar alto momento transversal. Esa emisión de fotones está fuertemente suprimida si la partícula cargada atraviesa un medio muy denso. Igualmente, un quark o un gluón puede emitir gluones con alto momento transversal que posteriormente forman hadrones, en este caso con un momento transversal alto y similar; es decir, emiten un chorro o jet de partículas. Si el quark atraviesa un medio como el plasma de quarks y gluones la emisión de gluones con alto momento transversal está suprimida y por tanto habrá una reducción de jets con un momento transversal dado, es el «jet-quenching».

La masa y anchura de determinadas partículas elementales son afectadas si se produce un plasma de quarks y gluones a escala nuclear, pues cambian las posibilidades de ligarse los quarks.

Los datos obtenidos en el SPS del CERN revelaron que efectivamente la producción de la J/ψ estaba suprimida en colisiones entre iones pesados, empezando dicha supresión anómala a partir de una densidad crítica de colisiones, lo cual apuntaba la formación del plasma de quarks y gluones. Sin embargo, también es posible explicar dicha supresión por Física más convencional. En este punto, hay un vivo debate en la comunidad científica. Los datos preliminares del RHIC no encuentran supresión. Esto no excluye la posible formación del plasma de quarks y gluones porque a la energía del RHIC podrían funcionar otros mecanismos de producción de la J/ψ que compensasen la supresión.

Por otra parte, algunos datos de SPS sobre la producción de pares electrón-positrón en colisiones de iones pesados se explican si algunas partículas hubiesen modificado su masa y anchura. De nuevo la situación no es totalmente conclusiva dado que hay explicaciones alternativas, sin necesariamente requerir la existencia del plasma de quarks y gluones.

Por último, los datos de RHIC, de una manera clara muestran una gran supresión de partículas con alto momento transversal compatible con el «jet quenching». Hay explicaciones alternativas al «jet quenching» pero en ellas, en este caso, también se debe suponer la existencia de quarks y gluones libres a escala nuclear. Nuevos datos de RHIC, así como los que a partir del año 2007 provengan del detector ALICE del LHC podrán arrojar más luz. En cualquier caso con la información actual ya podemos asegurar que una Física no convencional es necesaria para explicar los datos experimentales y que, probablemente, ya se ha obtenido el plasma de quarks y gluones.

REFERENCIAS

- ARMESTO, N.; BRAUN, M.A.; FERREIRO, E.G.; PAJARES, C. (1996): «Percolation approach to Quark Gluon Plasma supresión». *Physical Review Letters*, 77: 3736-3739.
- PAJARES, C. (1997): «¿De que están feitas as cousas?» Partículas Elementais. *Revista Galega do Ensino*, 16: 31-48, (2000): «Núcleos e Partículas». *Revista Galega do Ensino*, 28: 85-108.
- STAIJFFER, D. Y AHARONY, A. (1994): *Introduction to Percolation Theory*. Ed. Taylor and Francis, London.
- STEINBERGER, J. (1993): *Estructuras del Universo*. Ed Univ de Santiago, Santiago de Compostela.
- WEINBERG, S. (1981): *Los tres primeros minutos del universo*. Alianza-Editorial, Madrid.
- WONG, C.Y. (1994): *Introduction to high energy heavy ion collisions*. World Scientific, Singapore.
- YNDURAIN, F.J. (1999): *The theory of quark*.