

# La búsqueda del plasma de quarks y gluones

J. Rubén Morones Ibarra

Facultad de Ciencias Físico - Matemáticas, UANL  
rmorones@fcfm.uanl.mx

## RESUMEN

*El plasma de quarks y gluones (PQG) es un estado de la materia que se supone existió en los primeros microsegundos del universo. Para entender lo que ocurrió en esos primeros instantes después del Big-Bang se realiza actualmente una intensa actividad de investigación teórica y experimental. En el aspecto teórico, estudios efectuados en Cromodinámica Cuántica, que es la teoría que estudia las interacciones fuertes, llevan a la conclusión de que este estado se presenta cuando la materia nuclear alcanza una temperatura del orden de  $10^{12}$  K. Para someter esta predicción a la prueba del experimento se han construido el Large Hadron Collider (LHC) y el Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) que son actualmente los más poderosos aceleradores de partículas del mundo. En ellos se aceleran núcleos atómicos pesados que alcanzan velocidades cercanas a la de la luz y se provocan colisiones entre ellos. En ellas se generan condiciones similares a las que existieron en los primeros instantes del universo. En este artículo se describen las condiciones que deben satisfacerse para que se produzca el estado de PQG, en el interior de los núcleos en colisión.*

## PALABRAS CLAVE

Plasma de quarks y gluones, colisiones ultra-relativistas de iones pesados, Cromodinámica cuántica.

## ABSTRACT

*The quark gluon plasma is a state of matter that it is assumed was present in the early universe. Currently, an intense activity of research is being carried out, in both, the theoretical and experimental fields, to understand what happened in those first instants after the Big- Bang. In the theoretical aspects, studies in Quantum Chromodynamics leads to the conclusion that at about  $10^{12}$  Kelvin of temperature, the quark gluon plasma is formed in nuclear matter. To test this prediction, some experiments are in progress in the Large Hadron Collider (LHC) and in the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC). In these machines heavy ions are accelerated up to reach speeds close to that of light producing collisions between them. They will produce similar conditions to that of the early universe. The conditions under which the quark gluon plasma state can be formed are described in this paper.*

## KEYWORDS

Quark gluon plasma, ultra-relativistic collisions of heavy ions, quantum Chromodynamics.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente hay bastante evidencia de que el universo inició con una “Bola de Fuego” que explotó. La teoría que sustenta esta idea se denomina Cosmología del Big Bang. En los primeros instantes la densidad y la temperatura de esta “bola de fuego” eran muy elevadas. En esas condiciones se supone que la materia consistía de un plasma de quark y gluones (PQG), cuyo significado describiremos más adelante. Hasta donde conocemos ahora, el estado inicial del universo consistió de un PQG, por lo tanto, el PQG constituye la forma primordial de la materia.

A medida que el universo se expandió éste se fue enfriando y se produjo la formación de hadrones (un tipo general de partículas entre las que se encuentran los protones y neutrones), a partir de los quarks y los gluones. Conocer los procesos que ocurrieron en la transición de PQG al estado hadrónico, es uno de los grandes retos de la física moderna.

El PQG lo podemos encontrar actualmente en el núcleo de las estrellas compactas, como las estrellas de neutrones y en las colisiones de iones pesados a muy altas energías, donde las partículas que chocan alcanzan velocidades cercanas a la de la luz.

Para estudiar el PQG es necesario producirlo en el laboratorio. Con este propósito se han diseñado experimentos de colisiones de iones pesados donde el PQG puede formarse. Entre los problemas que se presentan en estas investigaciones están el de determinar las cantidades físicas que indican que ha ocurrido la transición al PQG y por otro lado, que la dinámica del proceso de transición es hasta ahora desconocida. Todos estos problemas convierten a este campo de estudio en un tema fascinante que atrae a físicos teóricos y experimentales.

## IMPORTANCIA DE ESTUDIAR EL PQG

El interés por conocer lo que ocurre a las propiedades de la materia en condiciones extremas de temperatura y/o densidad es un tema de gran trascendencia en la física teórica y experimental. Está contemplada la posibilidad de que en estas condiciones se observen nuevos estados de la materia hasta ahora no imaginados.<sup>1</sup>

Simulaciones en computadora de sistemas de partículas cuya interacción está gobernada por la

Cromodinámica Cuántica (CDC), que es la teoría de las interacciones fuertes, han llevado a la conclusión de que la materia nuclear sometida a elevadas temperaturas sufre una transición de fase pasando a un estado de PQG. Estudios con otros modelos efectivos de la CDC revelan también que para altas densidades de materia hadrónica se realiza la transición de fase hacia el PQG.<sup>2</sup>

El estudio del PQG es importante en la física, la cosmología y la astrofísica. En la física teórica es fundamental ya que está directamente relacionado con la naturaleza del vacío de la CDC. En la cosmología su importancia proviene de la hipótesis de que el PQG fue el estado inicial en el que se encontraba el universo en sus primeros microsegundos. Así que, con el conocimiento de las propiedades del PQG podemos determinar las condiciones iniciales y establecer hipótesis sobre la evolución posterior del universo. El interés en la astrofísica deriva de los procesos que ocurren en las estrellas compactas, como las estrellas de neutrones, las cuales se supone que tienen un núcleo en estado de PQG.<sup>3</sup>

Aristóteles afirmaba que los extremos se tocan. Nada más cierto que esto para el caso del análisis de los fenómenos astrofísicos y del estudio del cosmos, pues solo podremos entender lo que ocurre en el macromundo, en las estrellas y en el cosmos, si entendemos lo que sucede en los procesos del micromundo, en las partículas elementales, en sus interacciones, en su estructura y los fenómenos entre ellas. Recíprocamente, puesto que los núcleos atómicos complejos se formaron en procesos que ocurren en las estrellas, resulta fundamental saber lo que ocurre en las estrellas para comprender el origen de estos núcleos atómicos. En el núcleo de las estrellas de neutrones, por ejemplo, debido a su alta densidad, puede presentarse el PQG ocurriendo fenómenos interesantes como la superfluidez y otros. Los procesos que ocurren en ellas pueden ser explicados mediante las interacciones entre las partículas fundamentales.<sup>4</sup>

Con el desarrollo de aceleradores de partículas más potentes y de una nueva generación de detectores, la física nuclear amplió su campo de estudio para abarcar la materia nuclear en condiciones extremas de densidad y temperatura. La posibilidad de producir el PQG en el laboratorio trajo nuevos retos que obligan a estudiar el comportamiento físico de este nuevo



Vista de una sección del túnel del LHC por donde circulan las partículas que chocarán.

estado de la materia. La meta es producir este estado, estudiarlo y determinar sus propiedades. Por el solo hecho de existir, este sistema se vuelve interesante ya que pueden presentarse en él fenómenos nuevos. Como ocurrió con el estudio de la materia a muy bajas temperaturas que condujo al descubrimiento de la superconductividad y la superfluidez, se espera que a temperaturas muy elevadas, no observadas en ninguna parte del universo, se presente el PQG y con él se manifiesten fenómenos hasta ahora desconocidos.

Preguntas como ¿Qué tipo de señales debemos observar para asegurar que se ha presentado el PQG?, ¿Qué grupo de partículas esperamos que se formen al enfriarse el PQG?, ¿Qué clase de procesos ocurren antes y después de la formación del PQG? o ¿Qué fenómenos son los dominantes?, hacen interesante este estudio. Es pertinente remarcar aquí que los científicos no andan en busca de conocimientos que sean útiles, sino que su interés es conocer y entender lo que ocurre en la naturaleza. Esta es su más fuerte motivación.

Actualmente están en proceso varios experimentos en el LHC en el CERN y en RHIC, en Brookhaven, para producir, mediante choques de iones pesados a muy altas energías, el estado PQG. Ahí se estudiarán los fenómenos del PQG.

## LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Toda la materia que conocemos aquí en la Tierra en forma macroscópica, está formada por moléculas, las cuales son los constituyentes fundamentales de todas las sustancias. Las moléculas se forman de

átomos, los cuales son las estructuras básicas de los elementos químicos. Los átomos a su vez se componen de un núcleo y los electrones orbitándolos. Los electrones, hasta donde se conoce en el presente, no tienen ninguna estructura y son en este sentido partículas elementales. Los núcleos están formados por protones y neutrones.

Los protones y neutrones están formados por partículas llamadas quarks. Hasta el momento, no se ha encontrado que los quarks tengan subestructuras. Por lo tanto consideraremos a los quarks como partículas elementales.

Llegado a este punto en la estructura de la materia, es conveniente introducir la manera moderna como se clasifican las partículas subnucleares. Para establecer la clasificación de las partículas es necesario introducir unos comentarios sobre las fuerzas fundamentales de la naturaleza. En la naturaleza se observan cuatro tipos diferentes de fuerzas o interacciones fundamentales: Las interacciones gravitacional, electromagnética, fuerte y débil. Todas las fuerzas o interacciones entre las partículas o entre los cuerpos macroscópicos pueden explicarse, en principio, en términos de estas cuatro interacciones fundamentales.

La fuerza de gravedad es para nosotros la más familiar de todas ellas; es la fuerza que nos mantiene unidos a la Tierra, manteniendo a la vez a la Tierra y a los planetas de nuestro sistema solar unidos al Sol. La fuerza electromagnética nos es también familiar: está presente en los motores y máquinas eléctricas que usamos diariamente; es también la responsable de la estructura atómica y de la unión química. Tenemos entonces que la interacción electromagnética es la responsable de la formación de los átomos y de las combinaciones entre ellos. Esta fuerza es, por lo tanto, la que ocasiona la gran diversidad de materiales, plantas, animales y seres vivos en general, que pueblan la Tierra.

La fuerza débil es la responsable del decaimiento radiactivo beta, así como también del decaimiento de un neutrón libre en un protón, un electrón y un antineutrino. En general, todos los procesos de interacción entre partículas subatómicas en los que intervienen neutrinos o antineutrinos, son debidos a la fuerza débil. Por último, la fuerza fuerte es la que permite la unión entre protones y neutrones en los núcleos atómicos.

Las dos primeras fuerzas, se conocen desde hace mucho tiempo mientras que las fuerzas débil y fuerte fueron descubiertas en el primer tercio del siglo XIX. Estas cuatro fuerzas son suficientes para explicar todos los procesos físicos conocidos hasta ahora, tanto aquellos que ocurren a escala atómica como los que suceden en las estrellas y galaxias, con excepción de algunos descubrimientos recientes como son la materia y la energía oscuras, para las cuales no se tiene hasta el momento ningún modelo que las explique.

## LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

Las partículas fundamentales de la naturaleza se clasifican de acuerdo con sus interacciones. Lo que en la actualidad se conoce como partículas fundamentales son los Leptones y los Quarks. Los leptones son partículas que no sienten la fuerza fuerte mientras que los quarks sí son sensibles a la fuerza fuerte. Las partículas que interactúan mediante la fuerza fuerte, se llaman hadrones. Así que la primera gran clasificación de las partículas divide a estas en leptones y hadrones. Ejemplos de hadrones son el protón y el neutrón, mientras que el electrón y el neutrino son ejemplos de leptones.

Todos los hadrones están formados por quarks. En particular, dentro de cualquier núcleo atómico tenemos como estructuras elementales a los quarks. Hasta el presente, los quarks se encuentran confinados dentro de los hadrones. Nunca se han observado quarks libres, es decir, fuera de los hadrones. Un atributo que poseen los quarks y que se introdujo por razones de consistencia de esta teoría con la teoría cuántica, es el color. Esta propiedad de los quarks nada tiene que ver con el concepto óptico de color y solo es un número cuántico que permite explicar los fenómenos que ocurren mediante la fuerza fuerte. El color en la CDC es equivalente a la carga eléctrica en la teoría electromagnética. Con esta idea en mente se habla de carga de color como el atributo asociado a la interacción fuerte. De aquí se deriva el nombre de la teoría que describe estas interacciones: Cromodinámica Cuántica.

A diferencia de las cargas eléctricas que pueden ser observadas libres, en el electrón o el protón, por ejemplo, las cargas de color nunca se han detectado en forma libre. Siempre permanecen confinadas

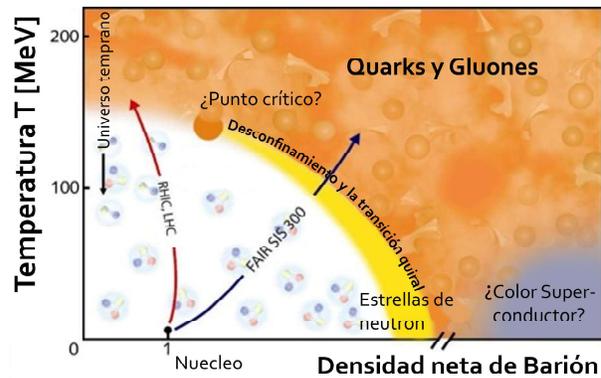


Diagrama de fases para la materia nuclear.

dentro de los hadrones. Uno de los propósitos en el diseño de nuevos experimentos en la física de partículas elementales es el de liberar las cargas de color y producir regiones dentro de la estructura de los núcleos atómicos donde las cargas de color se encuentren libres. A este estado se le conoce como PQG.

Según la teoría moderna de las interacciones, estas se efectúan a través del intercambio de partículas entre las partículas que interactúan. A estas partículas portadoras de la fuerza se les llama bosones de norma. Por lo tanto nos falta incluir estos bosones de norma en el conjunto de partículas que necesitamos para estructurar este artículo. Para evitar complicaciones en la presentación de estas ideas solo mencionaremos los bosones de norma para la fuerza electromagnética y para la fuerza fuerte. Los transmisores de estas fuerzas son: el fotón para la fuerza electromagnética y el gluón para la fuerza fuerte. En realidad, para el caso de la fuerza fuerte, se tienen un conjunto de ocho gluones, por razones que no explicaremos aquí. Tendremos así que cuando los quarks interactúan entre ellos, lo hacen intercambiando gluones; de estos hay ocho tipos distintos.

## LA INTERACCIÓN FUERTE

La teoría que describe las interacciones fuertes es la CDC. Entre las principales características de esta teoría está la propiedad de confinamiento del color. La razón por la cual se introduce la propiedad de confinamiento en la CDC es que experimentalmente no se han visto nunca a los quarks libres ni tampoco a los gluones. Este hecho fenomenológico debe

entonces incorporarse en la teoría, lo cual está representado en la hipótesis del confinamiento del color. Con esto establecemos que los quarks y los gluones, que tienen carga de color, deben estar confinados dentro de los hadrones.

Debido a las características de la CDC y a la dificultad para resolver las ecuaciones fundamentales de movimiento que lleva asociadas, no ha sido posible hasta ahora entender y explicar a partir de conceptos básicos, el fenómeno y mecanismo de confinamiento. La hipótesis de trabajo para manejar fenomenológicamente este hecho es que los quarks y los gluones interactúan tan intensamente que al intentar separar los quarks de un hadron, la energía que se requiere es tan grande que con ella se puede generar un par quarks-antiquark dando lugar a un nuevo hadron. Usando una analogía, podríamos decir que el fenómeno es equivalente a tratar de ionizar un átomo quitándole un electrón, y lo que ocurriría es que se forma un átomo nuevo a partir de la energía de ionización. El proceso involucra la ecuación de Einstein  $E=mc^2$  que relaciona la masa y la energía.

Por su naturaleza, por la gran dificultad que representa el problema, el estudio de las interacciones fuertes se realiza separando los fenómenos en dos regiones energéticas: una corresponde a los fenómenos que ocurren en el interior de los hadrones y la otra a aquellos que ocurren en el exterior de ellos. La energía determina la región donde se debe trabajar. Para muy altas energías, penetramos al interior de los hadrones y ahí, aunque parezca extraño, el tratamiento es más sencillo, ya que se pueden utilizar las mismas técnicas, ya conocidas, que se emplean en la teoría cuántica del electromagnetismo, la cual es una teoría muy bien establecida. Sin embargo, a bajas energías, en la región fuera de los hadrones, las cosas se complican notablemente. Para poder estudiar los fenómenos de interacciones fuertes a bajas energías, se necesita introducir un tipo de metodología que lleva el nombre general de teorías no-perturbativas. En estas teorías se respetan los aspectos fundamentales de la CDC pero es necesario considerar hipótesis adicionales.

Todas estas teorías no-perturbativas predicen que un sistema de hadrones interactuando fuertemente sufrirá una transición de fase de materia hadrónica a materia de quarks y gluones cuando se somete a elevadas temperaturas y/o elevadas densidades.

Este fenómeno, conocido como des-confinamiento del color, conduce a la aparición de la fase de Plasma de Quarks y Gluones. El problema que nos interesa tratar en este artículo es el de establecer bajo qué condiciones de temperatura se consigue el desconfinamiento del color, es decir, la transición de fase al PQG.

## LA MATERIA EN CONDICIONES EXTREMAS DE TEMPERATURA

Como ya se mencionó, las sustancias aquí en la Tierra están formadas por átomos y moléculas. Estas partículas, que constituyen todos los materiales, están en un estado de agitación caótica permanente, conocido como agitación térmica.

La temperatura de un cuerpo es una manifestación de la energía cinética de los átomos y moléculas y está asociada al valor promedio de esta energía. Cuanto mayor es la energía cinética promedio de las partículas que forman el sistema, mayor es su temperatura.

Como sabemos, al aumentar la temperatura de un cuerpo sólido este se convierte en líquido y si seguimos incrementando la temperatura se transforma en gas. Si la temperatura del gas aumenta la energía cinética adquirida por las moléculas conduce a que en las colisiones entre ellas se produzca la disociación molecular, dando lugar a la formación de un gas atómico.

Si la temperatura de este gas se sigue incrementando continúa la disociación en componentes más simples. Empiezan por desprenderse algunos electrones, formándose un gas de iones y electrones, el cual se conoce como plasma. El plasma común, llamado cuarto estado de la materia, es por definición un gas ionizado con carga eléctrica neta total igual a cero.

Existen plasmas de varios tipos, dependiendo de la temperatura del gas ionizado. La ionización de un átomo puede ser parcial o total y tendremos así un plasma de iones positivos y electrones, cuando la ionización atómica es parcial. Un estado de ionización muy leve se presenta en una flama, durante la combustión de carbón, gas butano o alcohol. Estados también de ionización parcial, pero más intensa, se presenta en la corona solar. Cuando la ionización es total, como en el núcleo de las estrellas, tendremos un plasma de núcleos atómicos

y electrones. En estados de temperatura más elevada los núcleos se pueden disociar dando lugar a un plasma de protones, neutrones y electrones.

El estado de la materia que sería la última frontera en los procesos de disociación es la formación del plasma de quarks y gluones, donde los protones y neutrones se han disociado en sus componentes que son los quarks como las estructuras materiales, y los gluones como los mediadores de la fuerza entre los quarks.<sup>5</sup>

Resumiendo estas ideas establecemos que a temperaturas por encima de los diez mil Kelvin todas las sustancias son gaseosas y existen solo en forma atómica ya que las moléculas se han disociado. A muy altas temperaturas el plasma consiste en núcleos, electrones libres y los fotones que aparecen en la interacción y que no son otra cosa que el campo electromagnético causante de las interacciones. A temperaturas aún mayores, que solo se pueden lograr a energías ultrarelativistas se forma el PQG. Aquí se usa la expresión ultra-relativista para referirse al caso de partículas con energías mucho más grandes que sus energías en reposo. En este caso, la expresión relativista para la energía dada por:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4},$$

puede reemplazarse por

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \rightarrow p$$

## EL PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

Para estudiar el PQG consideraremos como sistema inicial un núcleo atómico pesado, como por ejemplo, el núcleo de oro cuyo número atómico es 79. A este sistema le llamaremos materia nuclear. La materia nuclear, también llamada materia bariónica debido a que los nucleones que la constituyen son bariones, es el laboratorio donde se realizan las investigaciones sobre la formación del PQG. Para estudiar tanto la materia nuclear como el PQG estableceremos relaciones termodinámicas en un gas de fermiones (que corresponderá al gas de nucleones o al gas de quarks), y relaciones semejantes para el caso del gas de gluones. En la siguiente sección construiremos una ecuación que relaciona la presión y la densidad de energía para cada uno de estos gases. Con estos resultados podremos establecer las condiciones que se requieren para la transición de

fase de la materia bariónica a la fase de PQG.

Dos desarrollos tecnológicos recientes nos permiten estudiar a la materia en condiciones extremas de temperatura y/o densidad. El primero de ellos es la construcción de aceleradores de partículas a energías tan elevadas que las partículas alcanzan velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz. El segundo de estos avances tecnológicos es el desarrollo de nuevos detectores de partículas, de dimensiones enormes y capaces de detectar partículas muy masivas y de elevadas energías. Estos modernos equipos han permitido a los físicos nucleares y físicos de partículas abrir nuevas áreas de investigación, entre ellas la del estudio de la materia nuclear sujeta a condiciones extremas de temperatura y/o densidad.

Para lograr la formación del estado de PQG y estudiar el comportamiento de este estado de la materia hay actualmente dos grandes proyectos. En el laboratorio de Brookhaven, N.Y. en EUA, se construyó el RHIC, el cual acelera iones pesados, como oro o plomo a las energías más elevadas logradas hasta ahora. Al entrar estas partículas en colisión, se espera que se reproduzcan las condiciones que imperaron en los primeros microsegundos del nacimiento del universo y observemos el estado de PQG en pequeños fragmentos en el interior de la materia nuclear. Otro gran proyecto que se terminó en el año 2008 es el de la construcción del acelerador LHC. En él se han logrado energías muy superiores a las del RHIC y se podrán reproducir también las condiciones iniciales del universo. Entre los grandes logros de este proyecto tenemos ya el descubrimiento del bosón de Higgs, el cual fue otro de los propósitos del proyecto del LHC.

La CDC predice que cuando la materia hadrónica es sometida a altas densidades y temperaturas, esta puede sufrir una transición de fase hacia un nuevo estado en donde los gluones y los quarks interactúan débilmente en un estado de plasma de quarks y gluones que puede presentarse en un volumen macroscópico por tiempos suficientemente largos como para ser estudiada. Lograr observar este estado de PQG es de interés ya que proporciona información importante sobre el mecanismo de confinamiento, lo cual mejorará notablemente nuestra comprensión de la CDC, y se podrá comprender mejor la evolución y la estructura actual del universo, pues se supone que

el estado PQG se presentó en los primeros instantes del Big Bang.

## EL FORMALISMO DE LA CROMODINÁMICA CUÁNTICA

La cromodinámica cuántica es una teoría cuántica relativista de campos, renormalizable, con una simetría de norma local SU(3). La densidad Lagrangiana  $L$  de la CDC está dada por

$$L = \bar{\Psi}(x)(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi(x) - \frac{1}{2} \text{tr}[F_{\mu\nu}(x)F^{\mu\nu}(x)] \quad (1)$$

donde  $\bar{\Psi}(x)$  y  $\Psi(x)$  describen el campo de los quarks (campo de Dirac),

$$D_\mu = \partial_\mu + igA_\mu(x)$$

es la derivada covariante,

$$A_\mu(x) = \frac{1}{2} \lambda^a A_\mu^a(x)$$

representan el campo de los gluones, ( $a=1, 2, 3, \dots, 8$ ), los cuales corresponden a los bosones de norma. Las  $\lambda^a$  son las matrices de Gell-Mann del grupo SU(3), y finalmente,

$$F_{\mu\nu}(x) = \frac{1}{2} \lambda^a F_{\mu\nu}^a(x) = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - gf_{abc}A_\mu^b A_\nu^c$$

es el tensor de campo de norma y las constantes de estructura del grupo, las cuales son antisimétricas ante el intercambio de cualquier par de índices. <sup>6</sup>

Las características fundamentales de la CDC, son: a) la libertad asintótica y b) el confinamiento. La libertad asintótica de los quarks dentro de los hadrones es un hecho experimental que revela que los quarks se comportan dentro de los hadrones como si no interaccionaran entre ellos, es decir como si estuvieran en estado libre. Por otra parte, el confinamiento significa que los quarks están atrapados dentro de los hadrones sin posibilidad de escapar. Este hecho llevó a los físicos a proponer un modelo conocido como el modelo de bolsa, para explicar el confinamiento de los quarks y los gluones dentro de los hadrones.

Para entender la diferencia entre el comportamiento de la fuerza fuerte o fuerza de color, que es la que mantiene unidos a los quarks en el interior de los hadrones, es conveniente recurrir primero a la bien conocida fuerza electromagnética. Partiendo de la relación relativista de Einstein entre la masa y la energía  $E=MC^2$ , encontramos que la energía de ionización de los átomos, por ejemplo, el caso del hidrógeno, donde la energía necesaria para separar el electrón del átomo, es igual al producto de la diferencia de masa entre la masa del electrón más la masa del protón cuando están aislados y la masa del átomo de hidrógeno, multiplicada por  $C^2$ . A esta energía de ionización, también se le llama energía de enlace o energía de amarre entre el protón y el electrón. Simbólicamente escribimos  $E_B=(\Delta M)C^2$  donde  $E_B$  es la energía de enlace electrón protón en el átomo de hidrógeno, y  $\Delta M=[(m_p + m_e) - M_H]C^2$ , donde  $m_p$  es la masa del protón,  $m_e$  es la masa del electrón y  $M_H$  es la masa del átomo de hidrógeno. La energía de enlace o de ionización, es la energía que debemos proporcionar al átomo para separarlo en sus componentes: electrón más protón.

De una manera similar, en los núcleos atómicos, la energía de enlace es la que debemos proporcionar al núcleo para descomponerlo en protones y neutrones. Esta energía se calcula mediante la relación de Einstein anterior dando valores que corresponden a los valores obtenidos experimentalmente. En este caso  $\Delta M$  corresponde a la diferencia de masa entre la suma de las masas de los constituyentes individuales de los núcleos y la masa total del núcleo ya formado.

Uno de los resultados sorprendentes de la cromodinámica cuántica o teoría de la interacción entre los quarks, es que un cálculo similar a los anteriores para calcular la masa de un protón, por ejemplo, no corresponde la masa de la suma de sus constituyentes (los quarks). Las masas individuales de los quarks que formen el protón se han estimado en  $10 \text{ MeV}/c^2$  cada una. Con esto la masa del protón sería del orden de  $30 \text{ MeV}/c^2$ , que ni remotamente se aproxima al valor de  $940 \text{ MeV}/c^2$ , que es la masa del protón.

Para explicar el resultado anterior se introduce un concepto relacionado con el vacío de la CDC, el cual actúa de una manera muy diferente al vacío de la electrodinámica cuántica (la teoría cuántica

de la interacción electromagnética). Debido a que las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los quarks, son altamente no lineales, ocurre que los portadores de la fuerza de color interactúan entre sí. Esto provoca que el vacío de la QCD, es decir, el estado de más baja energía, el cual se tiene cuando no hay cargas de color, resulta ser un estado con una configuración de campos de color muy complejo.

Los quarks se encuentran formando los hadrones y para observarlos se requiere penetrar dentro de los hadrones. Para lograr esto se bombardean hadrones con otras partículas de muy alta energía, como electrones, por ejemplo. La libertad asintótica establece que solo a grandes energías se puede observar a los quarks y cuando se logra esto, los quarks aparecen dentro de los hadrones como si fueran partículas libres.<sup>7</sup> El confinamiento es otra de las características de la QCD. Este se refiere a que los quarks no pueden presentarse en estado libre, fuera de los hadrones, ya que solo se les ha observado combinados formando hadrones.

Las ecuaciones de movimiento que se derivan de la densidad Lagrangiana dada en la ec. (1), son ecuaciones no lineales y no pueden resolverse analíticamente. En el régimen de libertad asintótica, a elevadas energías, es posible aplicar métodos perturbativos.

Entre los métodos no perturbativos están el de teoría de norma de *lattice*. Este método pretende resolver las ecuaciones de la QCD en una forma aproximada, reduciendo el número de grados de libertad del campo y reemplazando el continuo espacio tiempo por puntos discretos tomados en pequeñas celdas con el fin de hacer los cálculos. Este método de cálculo de teoría de norma de celdas es apropiado para calcular las condiciones bajo las cuales se puede efectuar la transición de materia nuclear o hadrónica al estado de plasma de quarks y gluones.

Con el propósito de ilustrar las ideas planteadas en el estudio de los hadrones sometidos a condiciones extremas de presión, densidad y temperatura, realizaremos un cálculo usando un modelo de gas libre de quarks y gluones para el estado de plasma de quarks y gluones.

## MODELO DE GAS LIBRE PARA EL DESCONFINAMIENTO DE HADRONES

La mecánica cuántica es la teoría que describe el comportamiento de los sistemas físicos a la escala atómica ( $10^{-10}$  m). Al final del siglo XIX, cuando el desarrollo de la tecnología permitió estudiar la materia a niveles de baja densidad, bajas temperaturas y cortas distancias, se presentaron ciertas dificultades para expresar los hechos que se observaban. Durante algunos años de esa época se acumularon muchas observaciones experimentales que la física de Newton no podía explicar. Entre los más relevantes encontramos los espectros de emisión que se producían en gases enrarecidos al someterlos a la exposición de intensos campos eléctricos. Los gases emitían luz con características muy particulares construyendo esto un reto para los físicos, que no podían explicar el fenómeno. El intento por explicar estos fenómenos, llevó a una revolución en la física que produjo la teoría que hoy conocemos como mecánica cuántica.

La mecánica cuántica, una estructura matemática con una gran abstracción, logró explicar de una manera bellísima y precisa una inmensa variedad de fenómenos. Hoy en día esta estructura matemática teórica ha permitido entender los procesos químicos y los fenómenos que ocurren al nivel molecular, atómico, nuclear y sub-nuclear, constituyéndose en una teoría fundamental de la física moderna. El notable éxito de la teoría cuántica la han convertido en una teoría confiable a pesar de sus incomprensibles y misteriosas predicciones.

## CONDICIONES PARA PRODUCIR PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

En esta sección realizaremos un cálculo simplificado de las condiciones de temperatura bajo las cuales se puede obtener el estado de PQG.

Consideremos el problema de una partícula en una caja cúbica de arista  $a$  y volumen  $V$ . Resolviendo la ecuación de Schrödinger para este problema obtenemos que el número de estados con momentum entre  $\vec{k}$  y  $\vec{k} + d\vec{k}$  está dado por la expresión

$$dN_{\text{estados}} = \frac{a^3}{(2\pi)^3} d^3\vec{k}$$

$$dN_{estados} = \frac{V}{(2\pi)^3} d^3 \vec{k} \quad (2)$$

donde  $V$  es el volumen de la caja.

Usando coordenadas esféricas y considerando que el sistema que vamos a describir tiene simetría esférica, tenemos que

$$d^3 \vec{k} = 4\pi k^2 dk$$

Es conveniente definir la cantidad como la densidad de estados por intervalo de momentum

$$g(k) = \frac{dN}{dk} \quad (3)$$

la cual también se conoce como la degeneración del estado de momentum con valor  $k$ .

Para el caso de la materia nuclear, compuesta de protones y neutrones, existen dos estados de isospín (protón y neutrón) y dos estados de espín, lo cual da un factor de cuatro para el número de partículas que podemos colocar en cada estado de momentum  $\vec{k}$  de partícula independiente. Tendremos así que el número total de nucleones  $N_p$  que podemos colocar en el estado fundamental de la materia nuclear, está dado por

$$N_B = 4 \int dN_{estados} = 4 \left( \frac{V}{(2\pi)^3} \right) \int d^3 \vec{k}$$

$$N_B = \frac{4V}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} 4\pi k^2 dk$$

donde  $k_F$  es el momentum de Fermi.

La integral es directa dando como resultado

$$N_B = \frac{2V}{3\pi^3} k_F^3$$

La densidad de nucleones, o densidad bariónica,

$$\rho_B = \frac{N_B}{V}$$

está dada por

$$\rho_B = \frac{2}{3\pi^2} k_F^3 \quad (4)$$

Por otra parte, la densidad normal o de saturación  $\rho_0$  de la materia nuclear es  $\rho_0 = 0.14 \text{ fm}^{-3}$ , donde hemos

usado un tipo de unidades comúnmente usadas en la teoría nuclear llamadas unidades naturales. Sustituyendo esta expresión en la ec. (4), obtenemos que el momentum de Fermi para la materia nuclear a densidad normal, es  $k_F = 1.3 \text{ fm}^{-1}$ .

Calculemos ahora la energía total de un sistema de fermiones en el estado fundamental; usando la ec. (3), y la relación  $p = \hbar k$ , obtenemos:

$$dN_{particulas} = g \frac{V}{(2\pi\hbar)^3} 4\pi p^2 dp \quad (5)$$

donde  $g$  es el número de partículas que podemos colocar en cada estado de momentum  $p$ .

El número total de partículas se obtiene integrando la ec. (5)

$$N_{particulas} = g \frac{V}{(2\pi\hbar)^3} 4\pi \int_0^{p_F} p^2 dp \quad (6)$$

$$N_{particulas} = g \frac{V}{6\pi^2 \hbar^3} p_F^3$$

Con el propósito de estudiar la transformación de fase de materia hadrónica a plasma de quarks y gluones, consideraremos solo materia no extraña, es decir, aquella donde no interviene el quark extraño  $s$ , y que está formada solo por quarks  $u$  y  $d$ . En este caso la degeneración  $g$  está dada por  $g = N_{color} X N_{spin} X N_{sabor} = 3 X 2 X 2 = 12$ . La energía total puede ser calculada de la ec. (5), usando la identidad

$$\frac{dN_Q}{dE} = \frac{dN_Q}{dp} \frac{dp}{dE}$$

que para el caso ultrarelativista, que es el que consideraremos aquí,

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \rightarrow p$$

entonces

$$E_Q = \int_0^{E_F} E \frac{dN_Q}{dE} dE$$

$$E_Q = g \frac{V}{2\pi^2 (\hbar c)^3} \int_0^{E_F} E^3 dE \quad (7)$$

$$E_Q = g \frac{V}{8\pi^2 (\hbar c)^3} E_F^4$$

Por otra parte, la relación entre la presión de los fermiones  $P_Q$ , y la densidad de energía para un gas

de fermiones ultrarelativista,

$$\rho_Q = \frac{E}{V}$$

está dada por,<sup>8</sup>

$$P_Q = \frac{1}{3} \rho_Q,$$

sustituyendo esta última relación en la ec. (7), obtenemos

$$P_Q = g \frac{1}{24\pi^2 (\hbar c)^3} E_F^4 \quad (8)$$

La ec. (8) determina la presión  $P_Q$  que los quarks ejercen sobre la superficie que limita al volumen  $V$ . Por otra parte, en el modelo de bolsa para los hadrones,<sup>9</sup> el vacío de la cromodinámica cuántica, ejerce una presión  $B$ , hacia adentro de la bolsa que modela el hadrón y que es el requisito para el confinamiento de los hadrones. La suposición fundamental de este cálculo es que la condición para que se efectúe la transición del estado de hadrones al estado de plasma de quarks y gluones, es que ambas presiones sean iguales o que domine la presión de los quarks y se liberen del confinamiento. Tendremos entonces que Igualando  $B$  con  $P_Q$  en la ec. (8), obtenemos

$$E_{F,c} = \left[ \frac{24\pi^2 (\hbar c)^3}{g} B \right]^{\frac{1}{4}}$$

Siendo  $E_{F,c}$  la energía crítica para que ocurra la transición de fase.

Introducimos ahora la densidad de partículas

$$n_{particulas} = \frac{N_{particulas}}{V}.$$

La densidad crítica para los bariones es

$$n_B = \frac{1}{3} n_Q,$$

puesto que cada barión está formado por tres quarks. Sustituyendo esto en la ec. (9), obtenemos

$$\begin{aligned} n_{B,c} &= \frac{1}{3} \frac{g}{6\pi^2 (\hbar c)^3} E_{F,c}^3 \\ n_{B,c} &= \frac{4}{3} \left( \frac{g}{24\pi^2} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{B}{\hbar c} \right)^{\frac{3}{4}} \end{aligned} \quad (9)$$

Cuando la densidad de los bariones alcanza este valor, ocurre la transición de nucleones a plasma de

quarks y gluones debido a que la presión externa  $B$  sobre la bolsa, ha sido igualada por la presión interna del sistema de quarks.

Para hacer una estimación de la densidad bariónica que se requiere en la ec. (9), consideremos que la energía de un barión puede identificarse con la energía de su masa en reposo que tomaremos como de  $1 \text{ GeV}$ . De la relación relativista

$$P_Q = \frac{1}{3} \frac{E_Q}{V}$$

entre la presión y la densidad de energía, obtenemos que

$$E = 3VP_Q = 3 \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) P_Q$$

e igualando la energía  $E$  a

un  $\text{GeV}$  y el radio  $R$  del barión a  $1 \text{ fm}$ , obtenemos que la presión  $P_Q$  de los quarks tiene el valor

$$P_Q^{\frac{1}{4}} = 150 \text{ MeV} \quad (10)$$

tomando  $P_Q = B$ , en la ec. (10) y sustituyendo el resultado en la ec. (9) obtenemos que la densidad bariónica para que se produzca la transición al PQG, es  $n_{B,c} = 0.7 \text{ fm}^{-3}$  lo cual corresponde a cinco veces la densidad nuclear normal: es  $n_{B,c} = 5\rho_0$ . Esta densidad es muy grande y sólo apareció en los primeros instantes del universo, una fracción de segundo después del big bang. Esta densidad puede también presentarse actualmente en los núcleos de algunas estrellas como las estrellas de neutrones.

En los laboratorios RHIC y el LHC se tiene la posibilidad de reproducir esas condiciones mediante el choque de núcleos pesados, aunque solo sea por breves instantes, pero suficientes para realizar estudios sobre el estado de PQG.

## SEÑALES QUE INDICAN QUE SE PRODUJO EL PQG EN UN EXPERIMENTO

Los grandes problemas actuales de esta línea de investigación están relacionados con el cálculo de la cantidad de energía cinética de los núcleos que puede ser transformada en energía térmica y el porcentaje de energía potencial que se convertirá en energía de interacción entre los nucleones. Existen también dudas sobre cuáles serán los rasgos característicos que indiquen que se ha llegado a formar o presentar el

estado de PQG. Además hay todavía una pregunta sin respuesta y es la de cómo ocurrirá la hadronización (formación de hadrones) después de haberse alcanzado el estado de plasma de quarks y gluones, y luego el enfriamiento de éste.

Calculemos ahora las condiciones de temperatura requeridas para que se logre la transición a PQG. Con el fin de simplificar los cálculos, consideremos un plasma formado por quarks, antiquarks y gluones, lo cual puede ser obtenido en el “derretimiento” de mesones, los cuales están formados por pares de quark-antiquark. Consideraremos solamente el caso de mesones formados por quarks  $u$  y  $d$ .

En los diferentes modelos de bolsa para los hadrones se supone que los quarks se mueven libremente en el interior de la bolsa ejerciendo una presión sobre las paredes de esta. Dado que los quarks son fermiones, los consideraremos como un gas de Fermi. Para tener una bolsa estable, que no se expanda debido a la presión de los fermiones (quarks), necesitamos una hipótesis adicional: incluir una presión externa sobre la bolsa que permita equilibrar la presión de los quarks. Esta presión, introducida para mantener la estabilidad de la bolsa se conoce como presión de bolsa, y se supone que es ejercida por el vacío de la cromodinámica cuántica sobre la bolsa. Designaremos esta presión como  $B$ .

El modelo de bolsa explica algunas características importantes de los hadrones y lo usaremos aquí para realizar algunos cálculos, los cuales se simplifican bastante usando este modelo, y obtener un resultado teórico cuantitativo para estimar las condiciones experimentales que permitan observar el fenómeno de transición al estado PQG.

Se supone que a altas densidades o elevadas temperaturas los hadrones, representados por las bolsas, se traslapan y se fusionan ocasionando que se produzcan regiones relativamente grandes donde los quarks y gluones se mueven casi libremente; este es el estado de PQG.

La manera de incluir la temperatura en los cálculos es a través de las distribuciones estadísticas que satisfacen los quarks y los gluones. Calculemos primeramente el número total de quarks y gluones usando la estadística de Fermi-Dirac y de Bose-Einstein, respectivamente.

Para el caso de los quarks  $dn_Q$ , el número de partículas con energías entre  $E$  y  $E + dt$  está dado por<sup>6</sup>

$$dn_Q(E) = g_Q \frac{g(E)dE}{e^{\beta(E-\mu)} + 1} \quad (11)$$

donde  $g(E)$  es la degeneración del nivel de energía  $E$ ,  $g_Q = N_{color} \times N_{espin} \times N_{sabor} = 3 \times 2 \times 2 = 12$  es la degeneración para los quarks,

$$\beta = \frac{1}{kT}$$

y  $\mu$  es el potencial químico, que en nuestro caso será tomado igual a cero ya que el plasma que vamos a considerar tiene el mismo número de quarks que de antiquarks.

Similarmente, para el caso de los gluones, los cuales obedecen la estadística de Bose-Einstein, el número de partículas con energías entre  $E$  y  $E + dE$  está dado por<sup>10</sup>

$$dn_G(E) = g_G \frac{g(E)dE}{e^{\beta(E-\mu)} - 1} \quad (12)$$

con el mismo significado de las variables que el dado en la ec. (11), y  $g_G = N_{espin} \times N_{gluones} = 2 \times 8 = 16$ , es la degeneración para los gluones. En el caso de los gluones, también ocurre que  $\mu = 0$ .

Debido a la relación

$$\frac{dN(E)}{dE} = \frac{dN(p)}{dp} \frac{dp}{dE} = g(E)$$

Tenemos que

$$g(E)dE = g(p)dp \quad (13)$$

Entonces, sustituyendo (13) en la ec. (3), y considerando el caso ultrarelativista, donde  $E = pc$ , obtenemos que el número de quarks con momentos entre  $p$  y  $p + dp$  está dado por

$$dN_Q = g_Q \frac{4\pi V}{(2\pi\hbar)^3} \frac{p^2 dp}{e^{\beta pc} + 1}$$

La energía total  $E_Q$  del sistema de quarks, se calcula con la relación

$$E_Q = \int_0^\infty E \frac{dN_Q}{dE} dE = g_Q \frac{4\pi V}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^\infty pc \frac{p^2 dp}{e^{\beta pc} + 1} \quad (14)$$

$$E_Q = g_Q \frac{4\pi Vc}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^\infty \frac{p^3 dp}{e^{\beta pc} + 1}$$

Un cálculo similar conduce a una energía total para los gluones dada por

$$E_G = g_G \frac{4\pi Vc}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^\infty \frac{p^3 dp}{e^{\beta pc} - 1} \quad (15)$$

Definiendo

$$I_1 = \int_0^\infty \frac{p^3 dp}{e^{\beta pc} + 1}, \quad I_2 = \int_0^\infty \frac{p^3 dp}{e^{\beta pc} - 1}$$

Las integrales en (14) y (15) adoptan formas más sencillas si hacemos el cambio de variable  $x = \beta pc$ , obteniendo

$$I_1 = \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x + 1}$$

$$I_2 = \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$$

La evaluación de estas integrales se realiza de manera casi directa desarrollando las fracciones

$$\frac{1}{e^x + 1} = e^{-x} \sum_{n=0}^\infty (-1)^n e^{-nx}$$

$$\frac{1}{e^x - 1} = e^{-x} \sum_{n=0}^\infty e^{-nx}$$

los valores de las integrales son

$$I_{1,2} = \begin{cases} \sum_{n=0}^\infty (-1)^n \frac{1}{(n+1)^4} \Gamma(4) \\ \sum_{n=0}^\infty \frac{1}{(n+1)^4} \Gamma(4) \end{cases}$$

correspondiendo  $I_1$  a la expresión superior e  $I_2$  a la inferior.

La expresión

$$\sum_{n=0}^\infty \frac{1}{(n+1)^4} = \sum_{k=1}^\infty \frac{1}{k^4} = \zeta(4)$$

se conoce como función Zeta de Riemann<sup>11</sup> y está tabulada con un valor de 1.08, similarmente,

$$\sum_{n=0}^\infty (-1)^n \frac{1}{(n+1)^4} = \sum_{k=1}^\infty (-1)^{k-1} \frac{1}{k^4} = \eta(4)$$

Con

$$\eta(4) = \left(1 - \frac{1}{2^3}\right) \zeta(4) = 0.95$$

Usando unidades naturales, donde  $\hbar = c = 1$ , el resultado final es:

$$E_Q = g_Q \frac{V}{\pi^2 \beta^4} \quad (2.85) \quad (16)$$

$$E_G = g_G \frac{V}{2\pi^2 \beta^4} \quad (6.48) \quad (17)$$

El cálculo de la energía para los antiquarks conduce al mismo resultado que el obtenido para  $E_Q$ . Tenemos entonces que la energía total del sistema de quarks y gluones es

$$E = E_Q + E_{\bar{Q}} + E_G = 2E_Q + E_G$$

Sustituyendo aquí las ecuaciones (16) y (17), obtenemos para la energía total,

$$E = \frac{120.24V}{\pi^2 \beta^4} \quad (18)$$

Por otra parte, en el caso ultrarelativista, la presión total  $P$  que ejerce el gas de quarks y gluones sobre la bolsa que modela los hadrones,

$$P = P_Q + P_{\bar{Q}} + P_G,$$

está relacionada con la energía total dada por la ec. (18) mediante la expresión (19)

$$P = \frac{E}{3V} \quad (19)$$

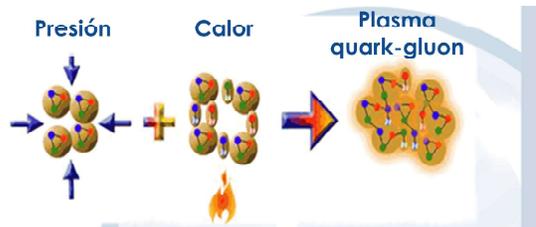
Suponemos que la condición para la transición del estado de hadrones al estado de PQG es que ambas presiones, la de los quarks sobre la bolsa  $P$ , y la presión de la bolsa, dada por  $B$ , sean iguales. Tendremos entonces que, de (18), (19) y la condición  $P = B$ , obtenemos que la presión del vacío sobre la bolsa es

$$B = \frac{40.08}{\pi^2} T_c^4 \quad (20)$$

donde se han usado unidades naturales  $k=1$ , y  $T_c$  para la temperatura crítica de transición.

Estimando el valor de  $B$  por el valor de  $P$ , obtenido en la ec. (10),

$$B^{\frac{1}{4}} = 150 \text{ MeV}$$



Representación de la colisión de dos iones y la formación del PQG.

obtenemos para la temperatura crítica dada por (20), es  $T_c = 1.31 \times 10^{12}$  K.

Esta temperatura se dió en los primeros microsegundos después del Big Bang. De acuerdo con la relación entre la temperatura y la edad del universo,<sup>12</sup> se establece la ley de enfriamiento siguiente

$$T(\text{MeV}) \approx \frac{0.50}{[t(\text{seg})]^{1/2}}$$

tenemos que para el valor obtenido arriba de  $T_c$ , la edad del universo en el momento que tenía esta temperatura, era de  $10^{-5}$  segundos.

## PROBLEMAS EXPERIMENTALES PARA LA DETECCIÓN DEL ESTADO DE PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

La suposición de que en los primeros instantes del universo se presentó el estado de PQG, permanece hasta ahora solo como una hipótesis mientras no se confirme experimentalmente la existencia de este estado. Los experimentos de colisiones de iones pesados relativistas tienen el propósito de reproducir, a escala microscópica y por intervalos pequeños de tiempo, las condiciones que prevalecieron durante el inicio del universo.

Existe un consenso general de que se logrará la transición al estado de PQG durante la colisión relativista de iones pesados. Uno de los problemas actuales es determinar cuál será la señal o el rasgo característico que permita ser detectado y que nos indique que el estado PQG se ha presentado.<sup>13</sup> Lograr esto permitirá entender mejor la evolución y la estructura presente del universo.



Vista aérea del LHC

Una de las características de las colisiones entre iones pesados relativistas es que se desprende de ellas una gran cantidad de hiperones.<sup>13</sup> La temperatura de la materia altamente comprimida, producto de la colisión de iones relativistas, puede ser estimada del tipo y número de estas partículas creadas o desprendidas en la colisión.<sup>14</sup>

Las señales que se espera obtener en las colisiones de iones pesados relativistas y que indican que se presentó el estado de plasma de quarks y gluones, es un flujo de mesones y bariones que contienen quarks extraños y cuya intensidad es mayor por un factor de dos cuando aparece el estado PQG que cuando esto no ocurre. La presencia de este flujo extra de mesones y bariones extraños será un indicador importante de que se presentó el estado de PQG.

La presencia de partículas extrañas en las colisiones de muy alta energía se debe a la creación de pares extraños quark-antiquark. Dado que inicialmente la materia nuclear consiste solamente en quarks  $u$  y  $d$ , tenemos que la extrañeza original del sistema de partículas es cero. Por la ley de la conservación de la extrañeza, tenemos que después de los procesos regidos por las leyes de la interacción fuerte, esta debe conservarse. Tendremos entonces que las partículas extrañas creadas deberán aparecer en pares partícula-antipartícula o partículas para la conservaciones de la extrañeza.

## EL GRAN ACELERADOR COLISIONADOR

Muy cerca de Ginebra, Suiza, se construyó la máquina más grande del mundo con el propósito de reproducir en un pequeño fragmento de materia, lo que ocurrió durante los primeros microsegundos del nacimiento del universo. Esta máquina tiene una parte que consiste de un inmenso tubo en forma de anillo circular de 27 Km de longitud, sepultado a una profundidad de cien metros bajo la superficie terrestre, localizándose una parte en Suiza y otra en Francia.

Esta máquina, que es el acelerador de partículas más grande y de mayor energía del mundo, se terminó de construir en el año 2008. Se conoce como el Gran Acelerador Colisionador de Hadrones (LHC por Large Hadron Collider). Uno de los grandes éxitos del LHC, como se le llama en forma

abreviada, fue el descubrimiento del bosón de Higgs en el año 2012 que era la pieza que faltaba para completar la estructura teórica del modelo estándar. Con esto se tiene ahora una teoría robusta para explicar las interacciones entre las partículas elementales.

En el LHC serán aceleradas partículas como protones u otros núcleos atómicos, hasta alcanzar velocidades muy cercanas a la de la luz, circulando en haces con direcciones opuestas en el anillo de 27 kilómetros de largo. El choque entre los dos haces de partículas será tan violento que reproducirá las condiciones iniciales del universo. Los experimentos están actualmente en proceso y se esperan grandes sorpresas, con fenómenos nunca antes observados, los cuales abrirán nuevas líneas de investigación en el campo de la física de partículas elementales.

El proyecto de la búsqueda del PQG es de naturaleza multinacional donde colaboran más de mil científicos de treinta nacionalidades diferentes. Las temperaturas alcanzadas en el interior de los núcleos serán las más elevadas del universo, llegando a temperaturas cien mil veces mayores que las del interior del Sol. Se espera tener resultados sobre la recreación de lo que ocurrió en los primeros microsegundos del universo para el año 2016.<sup>15,16</sup>

Recientes descubrimientos han sido dados a conocer en choques de iones plomo-plomo y oro-oro. Hasta ahora no se ha logrado observar rastros de que se haya producido el estado de PQG en estos procesos.<sup>16</sup> Más recientemente, se anunció que se observó este estado en colisiones protón-plomo, sin embargo todavía es prematuro asegurar que se logró este objetivo.<sup>17-18</sup>

## COMENTARIOS FINALES

Como toda teoría física, la CDC requiere que se confirmen sus predicciones para fortalecerse como tal. Ya se ha desarrollado la tecnología para llevar a cabo la colisión de partículas y detectar la presencia de aquellas que se generan durante las colisiones, por ejemplo: con el experimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)<sup>19</sup> en el CERN se ha reportado que en colisiones plomo-plomo se producen partículas que corresponden al PQG,<sup>20</sup> y

lo mismo se reporta para colisiones protón-plomo.<sup>21</sup> Sin embargo, estos resultados son recientes y son aun controversiales<sup>22</sup> por lo que aún se están realizando experimentos que resuelvan esta controversia. Sin embargo, lo más importante hasta ahora es que la evidencia encontrada no se contrapone con la teoría propuesta para la formación del estado PQG.

## REFERENCIAS

1. Connecting Quarks with the Cosmos. National Research Council of The National Academies of Sciences. The National Academies Press. Washington, D.C. (2003).
2. E. V. Shuryak, *The QCD Vacuum, Hadrons and Superdense Matter*, Second edition, World Scientific, (2004).
3. G.B. Alaverdyan, A.R. Arutyunyan, Yu L.Vartanyan, *Astronomy Letters* 28,24 (2002).
4. P. Castorina, R.V. Gavai, H. Satz, *Eur. Phys.J.* C69 (2010) 169-178.
5. Satz Helmut, *The Quark-Gluon Plasma*, <http://arxiv.org/pdf/1101.3937.pdf> (2011).
6. Peskin E. Michael and Schroeder, V. Daniel, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, (1995).
7. Gross David, J., *Twenty Five Years of Asymptotic Freedom*, hep-th/9809060.
8. Weinberg, Steven, *Gravitation and Cosmology*, John Wiley & Sons, N.Y., (1972).
9. Hotsaka, A. and Toki, H., *Quarks, Baryons and Chiral Symmetry*, World Scientific Publishing Co., (2001).
10. Greiner, W., Neise, L. and Stöcker, H., *Thermodynamics and Statistical Mechanics*, Springer-Verlag, N.Y., (2000).
11. Abramowitz, M. and Stegun, I.A., *Handbook of Mathematical Functions*, Dover, (1972).
12. HUGHENS, I.S., *Elementary Particles*, Cambridge University Press, (1996).
13. J. Schaffner, C. Greiner and H. Stocker, *Phys. Rev. C* 46, 322(1992).
14. GSI-Nachrichten 1/98.
15. <http://physicsweb.org/article/world713/10/9>
16. <http://home.cern/about/experiments/alice>
17. [https://inspirehep.net/record/1380029/files/Vol81\\_2015\\_1\\_Art46.pdf](https://inspirehep.net/record/1380029/files/Vol81_2015_1_Art46.pdf)

18. <http://phys.org/news/2015-09-littlest-quark-gluon-plasma-revealed-physicists.html>  
19. <http://home.cern/about/experiments/alice>  
20. <http://link.springer.com/article/10.1007/JHEP06%282015%29190#page-3>

21. <http://phys.org/news/2015-09-littlest-quark-gluon-plasma-revealed-physicists.html>  
22. <http://www.popsci.com/science/article/2010-02/rhic-collider-creates-72-trillion-degrees-fahrenheit-quark-gluon-plasma>



Revista  
**Ingenierías**

consúltala en:  
<http://ingenierias.uanl.mx/>