

LOS EFECTOS GRAVITATORIOS CUANTICOS EN LOS RAYOS COSMICOS DE ENERGIAS ULTRAALTAS

Jorge Alfaro Solís
Profesor Titular

Facultad de Física, Pontificia Universidad Católica de Chile
Casilla 306, Santiago 22, A.P. 690-4411, Chile
jalfaro@puc.cl

Rayos C3smicos

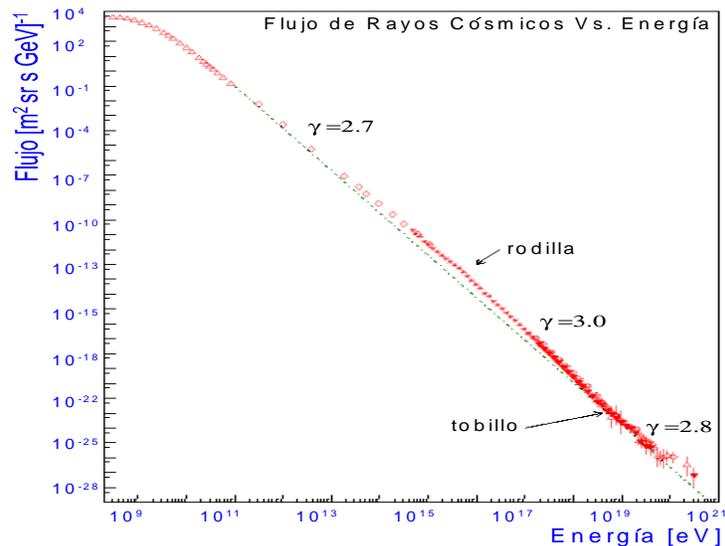


Figura 1: Espectro energ3tico de rayos c3smicos

Cada d3a estamos siendo bombardeados por una enorme cantidad de part3culas procedentes del Sol, del interior de nuestra galaxia (v3a L3ctea) y de fuentes lejanas. Estos son los rayos c3smicos. La atm3sfera filtra gran parte de esta radiaci3n, produciendo cascadas de part3culas secundarias que son detectadas por aparatos instalados en globos o sobre la superficie de la Tierra. El mayor de estos detectores se est3 instalando en Argentina (Pierre Auger Observatory).

La naturaleza y origen de los rayos cósmicos depende de su energía. En la Fig.1 se presenta la distribución de rayos cósmicos como función de su energía. En el eje horizontal se especifica la energía en eV(1eV es la energía adquirida por un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1V(volt))¹ En el eje vertical está el flujo, es decir el número de rayos cósmicos por unidad de área por unidad de tiempo.

El espectro cubre aproximadamente desde 1GeV(10^9 eV) hasta 10^{11} GeV.

Para describir el espectro se supone que las fuentes de rayos cósmicos tienen un flujo de emisión $F(E)$ proporcional a $E^{-\gamma}$ donde γ es el índice de generación de la ley de potencia. De esta manera se puede clasificar el espectro de rayos cósmicos en tres sectores principales: aquellos con energías bajo la rodilla($E \sim 4 \times 10^{15}$ eV), con $\gamma = 2.7$; los que están entre la rodilla y el tobillo($E \sim 4 \times 10^{18}$ eV), con $\gamma = 3.2$ y la región ubicada sobre el tobillo con $\gamma = 2.7$.

Existe un gran número de mediciones y estudios del sector del espectro con energías menores al tobillo; la existencia de la rodilla está aún incompletamente explicada. Para energías mayores al tobillo los rayos cósmicos ya no pueden ser confinados por el campo magnético de la Vía Láctea y provienen de todas las direcciones por igual. Esto indica que estos rayos cósmicos proceden de fuera de la Galaxia. Además, las mediciones del grupo experimental Fly's Eye sugieren que los rayos bajo el tobillo son principalmente núcleos de átomos pesados(mayormente Fe), mientras que los eventos sobre el tobillo son exclusivamente protones y neutrones. Esto es consistente con la hipótesis de que los rayos supra-tobillos son extragalácticos, ya que los núcleos pesados con energías superiores a 4×10^{18} eV no podrían sobrevivir un viaje extragaláctico debido al roce con el Fondo de Radiación Cósmica (FRC), mecanismo que se describirá más adelante.

En este artículo nos interesarán los Rayos Cósmicos Altamente Energéticos(RCAE). Su energía supera los 4×10^{18} eV.

El Fondo de Radiación Cósmica

Uno de los soportes experimentales de la Teoría Estándar del Origen

¹ 1eV= 1.6×10^{-19} Joules

del Universo(Big Bang) fue descubierto en 1965 por Penzias y Wilson. Estos investigadores constataron la existencia de una radiación electromagnética que llena el Universo. Su origen se remonta a la época (379000 años después del Big Bang) ,en que la temperatura del universo descendió hasta permitir la formación de átomos estables, con la consiguiente absorción de los electrones libres. Dado que los electrones libres son los causantes principales de la dispersión de la luz, la luz se separó de la materia y el universo se volvió transparente.

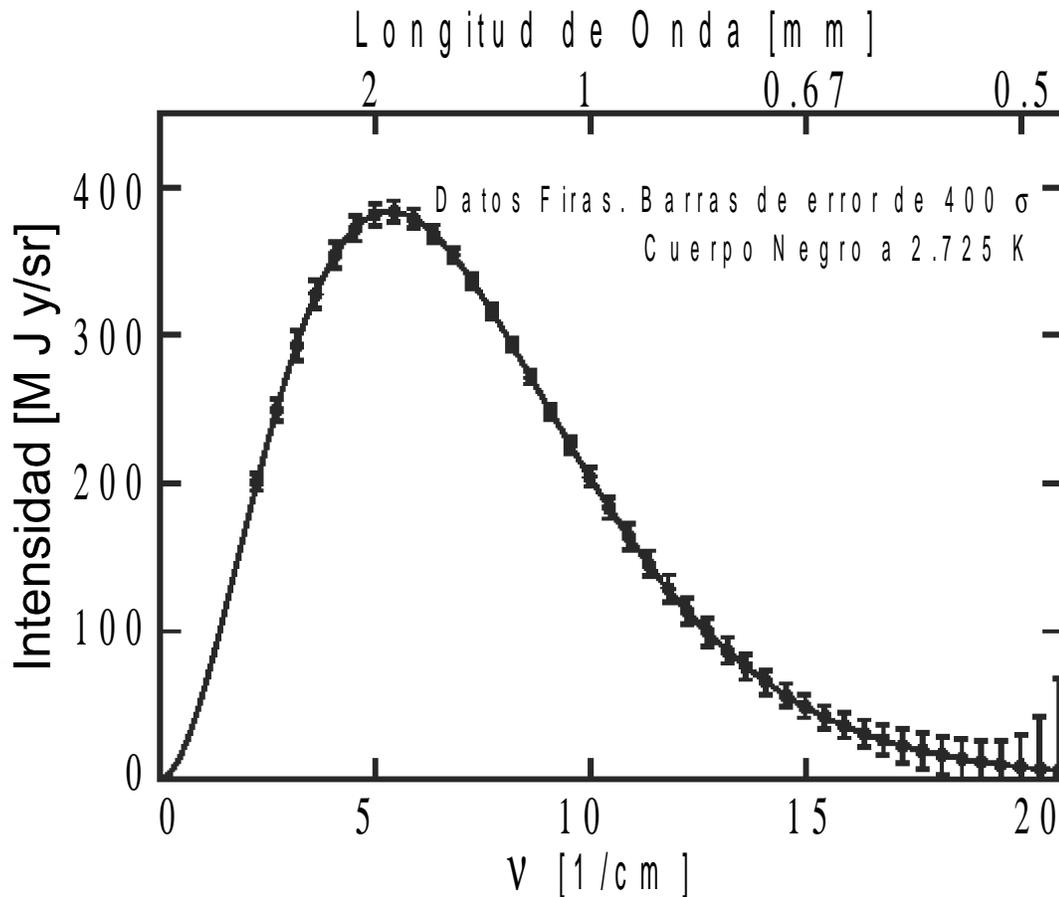


Figura 2. Espectro del Fondo de Radiación Cósmica obtenido por el satélite COBE.

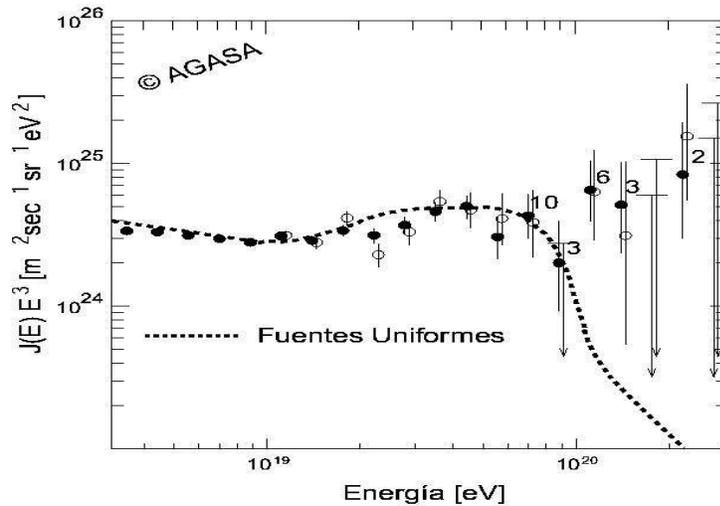
Con el pasar de los siglos esta luz primordial se fue enfriando(debido a la expansión del Universo) hasta alcanzar su temperatura actual de 2.725K(1K=-273.15C). Se llama Fondo de Radiación Cósmica(FRC). En la figura 2 se muestra el espectro del FRC medido por el satélite COBE.

Límite GZK

Pero que sucede con nuestros RCAE que están navegando a través de

las inmensidades del Cosmos? Ellos se encuentran enfrentados a la luz primordial del FRC. Para una partícula que viaja con energías menores a la de los RCAE, el FRC no produce efectos dramáticos. Sin embargo, en el caso de los RCAE el impacto es considerable. Si miramos lo que sucede en el sistema de referencia que se mueve con el protón, lo que vemos es una inmensa lluvia de fotones del FRC con energías del orden de 10^{18} eV. Estos tremendos fotonazos producen reacciones nucleares del tipo Protón+Fotón->Protón +Pión (La energía mínima necesaria para producir esta reacción es de 5×10^{18} eV), que implican un desgaste de la energía del protón (un roce cósmico). El efecto acumulado sobre todo el viaje del protón es que RCAE de esta energía o mayor debiesen viajar a lo más una distancia de 100 Megaparsecs (10^8 parsecs) (1parsec=3.6 años-luz). Esto es el límite GZK(Greisen,Zatsepin y Kuz'min(1966)).

Sin embargo, se han detectado en AGASA(Akeno Giant Air Shower Array) y en Fly's Eye eventos con energía superior a ésta, que provendrían de una distancia superior a 100 Megaparsecs (dado que los astrónomos no conocen fuentes cercanas que puedan producir RCAE de tan alta energía). Esto crea un problema llamado la anomalía GZK que es necesario explicar. En la figura 3 se presenta el espectro de energía observado por AGASA. El eje vertical del espectro está multiplicado por E^3 . Las barras de error representan los límites de Poisson superior e inferior con un 68% de aceptación (C.L.)y las flechas corresponden a límites superiores con un 90% de aceptación (C.L.). Los números junto a los puntos muestran la cantidad de eventos en cada intervalo de la energía. La curva azul representa el espectro teórico esperado para protones, suponiendo que las fuentes extragalácticas están distribuidas uniformemente en el Universo. El error en la medición de la energía de cada evento está estimado en un 30% para energías mayores que 10^{19} eV. El volumen de exposición de los detectores fue de 4.6×10^{16} m² sr s.



FISICA CUANTICA

Cuando observamos una gota de agua en la inmensidad del mar nos da la sensación de un todo único, continuo, sin vacíos. Sin embargo si observamos la intimidad de la gota con un microscopio de gran resolución o mejor aún con rayos X, descubriremos en su seno, como constituyentes fundamentales, una miríada de átomos en constante movimiento. En el fondo, la materia es discreta y son las interacciones de estos constituyentes discretos los que determinan las propiedades de la materia tal como la vemos cotidianamente. Este fue el gran triunfo del SXIX y principios del SXX.

En el SXX no sólo se ratificó la discretitud de la materia. Se descubrió que la energía y otros elementos fundamentales de ésta también son discretos. Es así como el espectro de los átomos (su impronta luminosa, la secuencia de colores y oscuridad que se obtiene al descomponer la luz producida por un elemento químico con un prisma) se entendió como el resultado natural de la existencia de niveles estacionarios. Estos son niveles discretos de energía que

pueden tener los electrones en los átomos, estando prohibido cualquier otro valor de la energía.

En la primera mitad del siglo XX surgieron dos teorías físicas que cambiaron nuestra concepción del mundo: La Relatividad General (Teoría de Gravitación de Einstein)(1916) y la Mecánica Cuántica (1925). A la Relatividad General le debemos nuestro modelo cosmológico actual y los Agujeros Negros. La Mecánica Cuántica nos ha permitido penetrar los misterios más profundos de la materia en su dimensión atómica y ha producido toda suerte de avances tecnológicos como el transistor, los reactores nucleares y la bomba atómica. Paralelamente ha cambiado tal vez de una manera más radical nuestra forma de comprender el mundo y como nos relacionamos con él. En esta línea basta mencionar Las Relaciones de Incertidumbre de Heisenberg que mostraron que el determinismo clásico debía ser reemplazado por estimaciones de probabilidad de los eventos físicos. Las Relaciones de incertidumbre establecen la imposibilidad de determinar simultáneamente, con precisión absoluta, la posición y la velocidad de una partícula. El producto de la incertidumbre en la posición por la incertidumbre en la velocidad no puede ser menor que una constante fundamental² dividida por la masa de la partícula. Para partículas macroscópicas, la masa es grande comparada con la masa de un átomo, por lo que la cota inferior es muy pequeña creando la ilusión de que podemos medir velocidad y posición al mismo tiempo, con precisión absoluta.

Durante todo el siglo pasado se intentó combinar las dos teorías en un todo consistente. De esta manera se podrían estudiar las etapas finales de la formación de un agujero negro y responder a la inquietud de qué pasa dentro de él y adonde se fue toda la materia que lo formó. También sería posible discutir en detalle como se produjo el Big Bang y si éste es un ciclo más del devenir cósmico o es único.

Sin embargo sólo recientemente se han establecido los marcos teóricos necesarios para lograr esta meta. Existen actualmente dos candidatos a ser la Teoría de Gravitación Cuántica: La teoría de cuerdas y Gravedad Cuántica de Lazos(LQG). En este artículo consideramos sólo la fenomenología de LQG.

GRAVEDAD CUANTICA DE LAZOS

² $h/(4\pi)=5 \times 10^{-35}$ Joule-segundo

La Relatividad General de Einstein es una teoría de la gravitación. Explica la fuerza de gravedad como una deformación de la geometría del espacio-tiempo debido a la presencia de la materia. La materia curva el espacio-tiempo creando relaciones espacio-temporales distintas a las usuales. En particular la luz al pasar cerca de una estrella ya no se mueve en línea recta sino que se curva hacia la estrella. Si usamos los rayos de luz para definir las líneas rectas de la geometría del espacio-tiempo, vemos que necesariamente esta geometría no será la euclídeana cerca de una estrella.

En los últimos 20 años se ha progresado en la aplicación de las reglas de la Mecánica Cuántica a la Relatividad General. Por lo tanto lo que se tiene es una "Geometría Cuántica": Así como los valores de la energía de los átomos son discretos, los valores de la geometría también lo son. Esto es el volumen y el área de una región del espacio es un múltiplo entero de un volumen y área fundamental dada por l_p^3 y l_p^2 respectivamente³.

Cómo se entiende esta discretización? Para ello es necesario entrar a definir los estados cuánticos permitidos por la teoría. Se llaman espín networks, porque se catalogan por los mismos carteles asociados al espín de los electrones (su "movimiento de rotación intrínseco") . Para entender como se definen consideremos un ejemplo (ver figura 4) .El volumen del cubo lo asociamos con un punto dibujado en su centro (nodo); hacia cada una de las caras del cubo dibujamos líneas a partir del nodo (links:conexiones). Además si sobre este cubo, pegamos otro de igual lado y conectamos los nodos correspondientes obtendremos la figura B. Asignando nodos y conexiones de esta manera con la geometría vemos que para cada geometría existe un espín-network(una red completa de nodos y conexiones). Recíprocamente, cada espín-network corresponde a una geometría, sólo que, en general, esta geometría será curva y no se podrá representar por la adición de cuerpos macroscópicos como en la figura B.

Las reglas de la Mecánica Cuántica aplicadas a la geometría determinan que cada nodo y cada conexión lleven un número entero asociado. En la figura C representamos un cuerpo macroscópico. Su volumen es igual al número de nodos que contiene y su área es el número de conexiones que cruzan su superficie.

³ $l_p = 1.6 \times 10^{-35}$ m

Esta teoría permite entender la entropía de un agujero negro y el espectro de radiación emitido por éste al evaporarse (radiación de Hawking).

La pequeñez de la escala discreta de la geometría es la que ha dificultado su detección en experimentos hasta ahora. Por lo tanto es necesario mirar a los sucesos cósmicos de más alta energía⁴. En particular, aquellos que estén prohibidos por la física convencional. He ahí el interés por estudiar el Espectro de Rayos Cósmicos Altamente Energéticos y la posible violación del límite GZK.

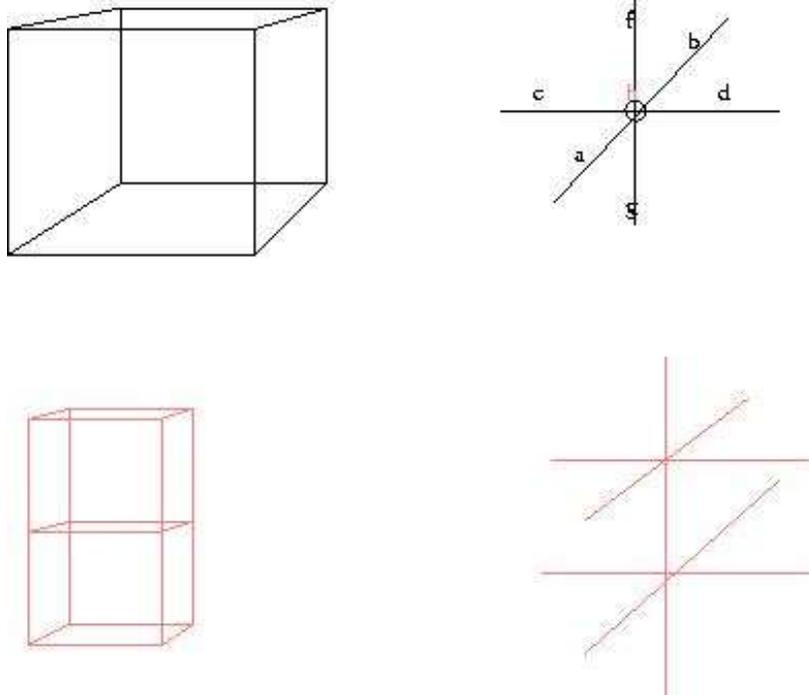


Figura 4: En un espín network un cuanto de área se representa por una línea. Un punto representa un cuanto de volumen.

COMPARACION CON EL CONTINUO

Resumiendo:

En LQG el espacio tridimensional se cubre con lazos de diversos tamaños. Estos lazos contienen la información sobre la geometría. Aplicando las reglas usuales de la Mecánica Cuántica a estos lazos se obtiene una imagen pictórica del espacio que consiste en lo siguiente:

⁴ Para ver distancias de un tamaño L , se requieren proyectiles con $E/c > h/L$ (Relación de incertidumbre). E es la energía y c es la velocidad de la luz.

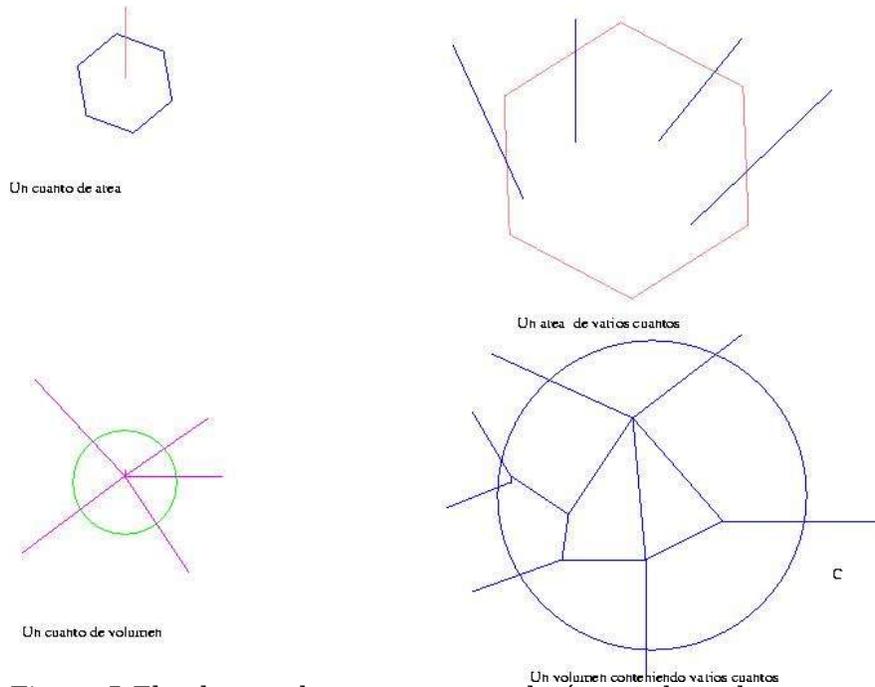


Figura 5: El volumen de un cuerpo es el número de nodos que envuelve. Su área está dada por el número de líneas que cruzan su superficie.

1. A escalas muy pequeñas (del orden de l_p) la geometría está constantemente fluctuando, aleatoriamente.
2. La geometría a esta escala es discreta. Las distancias son múltiplos enteros de l_p .

Los detalles de este cuadro microscópico no se conocen bien. Para eso sería necesario resolver el problema dinámico, una tarea que supera nuestras posibilidades actuales.

Sin embargo, los dos puntos mencionados más arriba permiten hacer algunas predicciones importantes (Gambini y Pullin (1999), J. Alfaro, L.F. Urrutia y H. Morales-Técolt (2000, 2002)):

Las partículas libres no obedecen la Relatividad Especial usual. Su relación de dispersión (Energía E como función del momentum p) es:
 $E^2 = p^2 + 2\alpha p^2 + \eta p^4 + 2\lambda p + m^2$ (Para fermiones)
 $E^2 = p^2 + 2\alpha p^2 + 2\theta l_p p^3$ (Para fotones)

Y no la relación más sencilla predicha por la Relatividad Especial de Einstein:

$$E^2=p^2+m^2$$

En estas relaciones m es la masa de la partícula, $\alpha, \eta, \lambda, \theta$ son parámetros fenomenológicos que se deben fijar por los experimentos. Además, para simplificar la notación, hemos utilizado un sistema de unidades donde la velocidad de la luz es $c=1$.

Para pasar desde una geometría discreta para distancias del orden de l_p , a la geometría continua del mundo macroscópico, se introduce el concepto de un estado semiclásico, que interpola entre las dos geometrías. La definición precisa del estado semiclásico se investiga en la actualidad. Pero para obtener las relaciones de dispersión modificadas basta saber las propiedades más generales del estado interpolante. A saber, que preserva la simetrías observadas del espacio continuo: invarianza bajo rotaciones y traslaciones. La ignorancia del estado semiclásico preciso se refleja en las constantes arbitrarias que aparecen en las relaciones de dispersión modificadas.

El estado semiclásico interpolante posee una escala asociada llamada \mathcal{L} , de tal manera que la geometría es discreta para distancias $l_p \ll d \ll \mathcal{L}$ y es continua para $d \gg \mathcal{L}$. Al interior del volumen \mathcal{L}^3 , hay una enorme cantidad de puntos similares a los de la Figura 5. Las relaciones de dispersión modificadas resultan de promediar sobre los puntos contenidos en \mathcal{L}^3 . Los parámetros arbitrarios $\alpha, \eta, \lambda, \theta$, dependen de l_p y \mathcal{L} .

Estas nuevas relaciones de dispersión significan que las partículas que se mueven con energías muy altas tienen una velocidad diferente a la predicha por Einstein. En particular, la luz, que en la Teoría de Relatividad Especial se mueve siempre a la velocidad $c=300000$ km/s, independiente de su longitud de onda(color), en el nuevo contexto tendría una velocidad dependiente de su longitud de onda(color). Esta velocidad diferente se podría detectar estudiando los tiempos de llegada de los distintos colores de la luz emitida por fuentes muy lejanas como algunos Gamma Ray Bursts (GRB)⁵. Habría un pequeñísimo retardo de algunos colores respecto a otros, que podría medirse con los detectores de la próxima generación. La diferencia de velocidad entre los distintos colores es extremadamente pequeña, así que para poder detectarla, debemos mirar aquellos GRB que vienen de fuentes muy lejanas (10^{10} años-luz) (Amelino-Camelia et al. 1998).

⁵ Los GRB son destellos de rayos gama, muy intensos y bastante frecuentes, que provienen de fuera de la Vía Láctea.

Sin embargo donde ya podría estar apareciendo una evidencia experimental de la nueva Física es precisamente en el espectro de los RCAE. Si AGASA tiene razón y se confirma la violación del límite GZK, las nuevas relaciones de dispersión jugarán un rol decisivo en la interpretación del fenómeno.

Hemos visto que el límite GZK se produce porque las partículas del RCAE cuando viajan en el Cosmos, no están solas. En efecto, están siendo constantemente bombardeadas por los fotones del Fondo de Radiación Cósmica, lo que produce un efecto de roce sobre los RCAE.

La descripción cuantitativa de este roce cósmico depende crucialmente de dos leyes fundamentales de la Física, que siguen siendo válidas en el nuevo contexto:

La conservación del momentum lineal. Cada partícula del universo tiene un momentum lineal que es el producto de su masa por su velocidad: $p=mv$

Dado que la velocidad es un vector, p también es un vector(No basta afirmar que me muevo a 100 km/h. Debo agregar en que dirección me muevo).

Una consecuencia fundamental de las leyes de la Física es la conservación del momentum lineal:

La suma(vectorial) de los momentum de todas las partículas de un sistema aislado es constante(Un sistema se considera aislado si no actúan fuerzas externas sobre él). Una mesa de billar es una excelente aproximación a un sistema aislado . Las jugadas maestras de un jugador experimentado son una manifestación de esta ley, así como los errores de los jugadores novatos.

La conservación de la energía. Cada partícula del universo tiene una energía cinética que está precisamente dada por la relación de dispersión. Una ley fundamental de la Física de los choques entre partículas afirma que la suma de las energías cinéticas de las partículas antes del choque iguala a la suma de las energías cinéticas de las partículas después del choque, aún cuando ya no se trate de las mismas partículas. Este último caso es relevante en las reacciones nucleares que son producto de choques entre partículas. En general las partículas resultantes del choque son diferentes al proyectil y al blanco.

El balance energético en una reacción nuclear se ve modificado si cambia la relación de dispersión. Por esta razón, las nuevas relaciones de dispersión producto de la discretización del espacio afectan al límite GZK

Cálculo del espectro de RCAE

Para calcular el espectro de RCAE es necesario tomar en cuenta varios factores:

1) La manera en que la fuente lejana emite partículas de alta energía. Esto se toma en cuenta suponiendo que la fuente emite partículas de acuerdo a una ley de potencias:

$$n \sim E^{-\gamma}$$

El índice γ se determina adaptando la predicción a los datos experimentales en la zona anterior al límite GZK.

2) La distribución de fuentes de RCAE se supone uniforme sobre todo el espacio. Esta hipótesis simplifica el cálculo y tiene respaldo experimental.

3) Las reacciones más importantes que suceden a una energía de 3×10^{19} eV y que explican el límite GZK, son las siguientes:

protón+fotón \rightarrow protón+pión

4) Es necesario tomar en cuenta la expansión del universo. Los RCAE atraviesan grandes regiones del espacio, así que demoran un tiempo considerable en llegar a la Tierra.

5) Para simplificar el análisis se ha supuesto que $\alpha_p=0$, $\alpha_e=0$ y α_b distinto de cero, donde los parámetros corresponden a los términos de la relación de dispersión modificada proporcionales a p^2 , para el protón, el electrón y el pión respectivamente.

Sumando todos estos factores se obtiene la curva de la figura 3, si las relaciones de dispersión son las de Einstein y la curva de la figura 6 si se utilizan las relaciones de dispersión de LQG. En ambas figuras hemos superpuesto los datos de AGASA. Se ve un claro progreso en la figura 6.

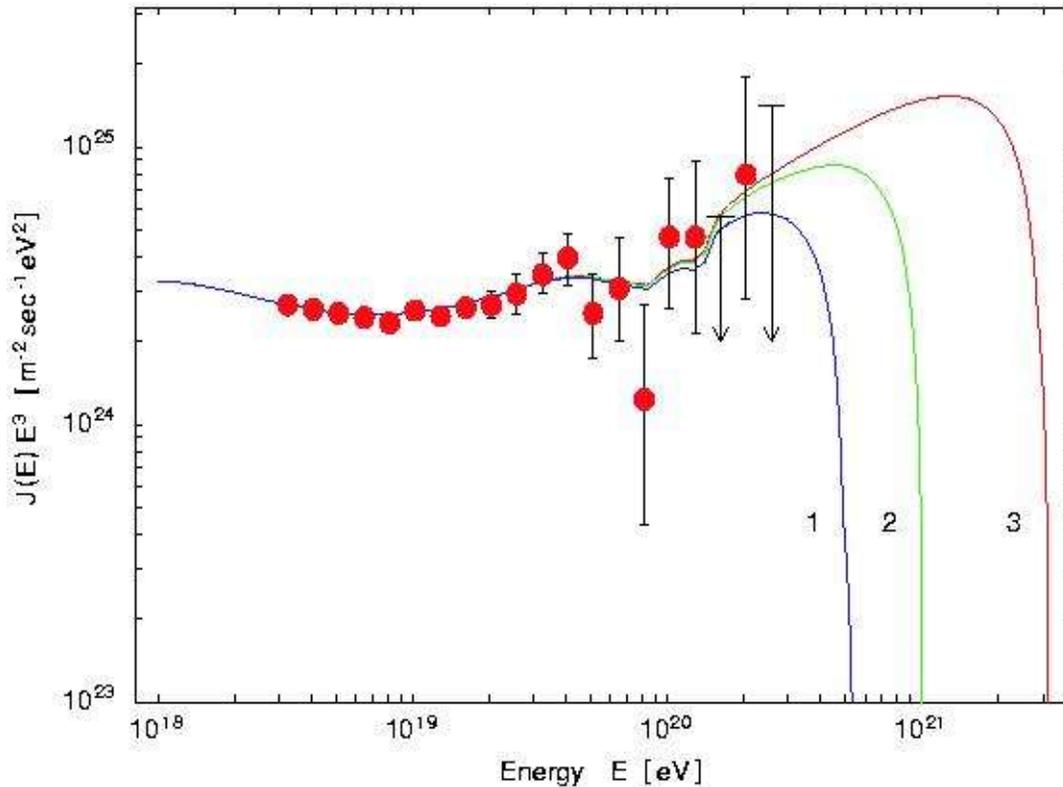


Figura 6: Espectro de rayos c3smicos con $\alpha_b=10^{-22}$, para distintas energías de corte, junto con los datos de AGASA. Curva 1: $E_c=5 \times 10^{20}$, curva 2: $E_c=10^{21}$, curva 3 $E_c=3 \times 10^{21}$.

COTAS: En la literatura científica reciente se han propuesto varias relaciones de dispersión modificadas, con parámetros arbitrarios, a ser determinados por los experimentos. El espectro de rayos c3smicos provee una cota muy fuerte sobre varios de estos parámetros, que a nuestro juicio los elimina totalmente. En particular, sólo el término α . utilizado aquí para calcular el espectro de rayos c3smicos, sobrevive a este análisis. Ilustraré el método discutiendo la siguiente relación de dispersión:

$$E^2 = p^2 + m^2 + \chi p^3$$

donde χ es una escala por ahora arbitraria, pero universal (válida para todas las partículas), suposición compartida por la mayoría de los trabajos en la materia.

La cota se basa en la siguiente observación de la figura 3,6.

Hasta energías menores que 4×10^{19} eV, la física convencional da una excelente descripción del espectro. En esta zona de energías el proceso relevante es la creación de pares electrón-positrón: $\text{protón} + \text{fotón} \rightarrow \text{protón} + \text{electrón} + \text{positrón}$.

Por lo tanto es necesario imponer que el término cúbico no afecte el umbral de esta reacción. Un cálculo detallado (Alfaro y Palma, 2003), muestra que:

$$|\chi| < 3.26 \times 10^{-41} \text{ eV} = 3.98 \times 10^{-13} l_p$$

lo que elimina totalmente el término cúbico en la relación de dispersión.

REFERENCIAS

K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16, 748(1966); G.T. Zatsepin and V.A. Kuz'min, Zh. Eksp. Teor. Fiz., Pis'ma Red. 4, 114(1966).

QUANTUM GRAVITY, Carlo Rovelli, Cambridge University Press, 2004.
<http://www.cpt.univ-mrs.fr/~rovelli/rovelli.html>

G. Amelino-Camelia, J. Ellis, N.E. Mavromatos, D.V. Nanopoulos and S. Sarkar, Nature 393,763(1998)

NONSTANDARD OPTICS FROM QUANTUM SPACE-TIME, R. Gambini and J. Pullin, Phys. Rev. D59, 124021(1999).

QUANTUM GRAVITY CORRECTIONS TO NEUTRINO PROPAGATION, Jorge Alfaro, Hugo A. Morales-Tecotl, Luis F. Urrutia, Phys.Rev.Lett.84:2318-2321,2000.

LOOP QUANTUM GRAVITY AND LIGHT PROPAGATION, Jorge Alfaro, Hugo A. Morales-Tecotl, Luis F. Urrutia, Phys.Rev.D65:103509,2002.

LOOP QUANTUM GRAVITY AND ULTRAHIGH-ENERGY COSMIC RAYS, Jorge Alfaro, Gonzalo Palma Phys.Rev.D67:083003,2003.

AGASA Collaboration: <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>.

Fly s Eye Collaboration:

<http://www.physics.adelaide.edu.au/astrophysics/index.html>

PIERRE AUGER Observatory:<http://www.auger.org/>

COBE: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>