

BARIOGÉNESIS EN UNA TRANSICIÓN DE FASE ELECTRODÉBIL SUPERFRÍA Y SU RELACIÓN CON MATERIA OSCURA

Héctor Eduardo Parga Nájera, David Yves Ghislain Delepine, Elvia Tomasa Sosa Vergara

Bachillerato General, Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato | he.parganajera@ugto.mx

División de Ciencias e Ingenierías, Campus León | delepine@ugto.mx

Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior | elviatsv@yahoo.es

Resumen

El Modelo Estándar de Partículas es uno de los mayores orgullos de la ciencia del siglo XX. Con él, se han logrado explicar casi todos los fenómenos físicos y predecir muchos resultados experimentales. Sin embargo, existe un fenómeno que éste aún no ha logrado explicar: según los modelos cosmológicos, el Universo tenía que ser compuesto por la misma cantidad tanto de materia que de antimateria; materia y antimateria se aniquila y no deberíamos existir. Esta problemática de la existencia de más materia que de antimateria es lo que se llama la asimetría bariónica (entre bariones y antibariones) del Universo. El mecanismo para generar esta asimetría se llama bariogénesis. En este trabajo, nos dedicaremos a estudiar los mecanismos de rompimiento de simetría, que se basarán en las Condiciones de Sakharov. Así bien, consideraremos el uso de leptogénesis, el análogo de bariogénesis en los leptones. De ahí derivaremos a un caso sencillo, que implica el uso de los Neutrinos de Majorana y nos da una asimetría considerable para la explicación materia-antimateria sin utilizar Teorías de Gran Unificación. Aparte examinaremos las transiciones de fase en el universo y se planteará una solución teórica al problema de bariogénesis por medio de la materia oscura.

Abstract

The Standard Model of Particles is one of the greatest prides from 20th Century science. With it, it has been able to explain almost all physic phenomena, and predict many experimental results. However, it could not explain one of them: according to the cosmologic models, the Universe must be compound by the same quantity of matter as antimatter; matter and antimatter must be annihilated themselves, and we must not exist. This problema, about more matter tan antimatter, is named baryonic asymmetry (between baryons and antibaryons) of the Universe. The mechanism to generate this asymmetry is called baryogenesis. In this work, we will dedicate to study the mechanisms of asymmetry breaking, which would be based on Sakharov's Conditions. In addition, we will considerate using leptogenesis, the analogy of baryogenesis in leptons. From there, we will derivate a simply case, that implicate using Majorana's Neutrinos, und gives us a considerable asymmetry for the explanation matter-antimatter without using Great-Unification's Theories. Apart, we will examine the phase transitions of the Universe and propose a theoretical solution to Baryogenesis problem by means of dark matter.

Palabras Clave

Bariones; Leptones; Asimetría; Antimateria; Fase.

INTRODUCCIÓN

Modelo Estándar de Partículas [1]

El modelo estándar de partículas es el conjunto de partículas elementales, y sus interacciones en base a las cuatro fuerzas fundamentales. Esto con el fin de dar un conjunto de reglas que sean determinantes en el desarrollo del universo tal y cómo es. Es una travesía para explicar el todo.

Bariogénesis [2]

Entendemos como bariogénesis a la serie de procesos ocurridos tras la creación del universo que implementaron una asimetría en la producción de bariones y antibariones (materia formada por quarks y antiquarks). Esta alteración es fácilmente observada, ya que nuestra existencia misma depende de la “desaparición” de la antimateria.

El fenómeno de la bariogénesis se descubrió con el desarrollo de la física relativista. El físico Paul Dirac, descubrió una ecuación para la descripción del electrón a una partícula con la misma masa, misma energía y misma vida media, pero con carga eléctrica opuesta: el positrón. Poco después se descubriría físicamente y, por tanto, se daría paso a definir la antimateria. Sin embargo, se observaba que las partículas de materia y antimateria se aniquilaban entre sí mismas, liberando cantidades enormes de energía. De ahí se emitió que la materia no puede interactuar libremente con la antimateria. Además se obtuvo que ambas partes debían de ser creadas en la misma cantidad, pues las teorías del momento indicaban que a cada partícula le corresponde una antipartícula. El problema comienza al analizar las cantidades de materia-antimateria en el universo:

$$B = \frac{\eta_B - \eta_{\bar{B}}}{\eta_\gamma} \approx 6 \times 10^{-10}$$

Dónde B es la asimetría bariónica, η_B la densidad de bariones, $\eta_{\bar{B}}$ la densidad de antibariones y η_γ la densidad de fotones.

Con esto, podemos observar entonces una variación, aunque pequeña, entre la existencia de materia-antimateria. Entonces nos surge la pregunta:

¿Por qué hay más materia que antimateria en el universo?

Existen dos teorías principales de la variación de B :

- La primera indica que desde el principio del universo (e incluso antes) existía una preferencia por la materia, lo que ocasionaría mantenerse así durante el transcurso del tiempo.
- La segunda indica que en un principio, no había preferencia alguna hacia materia o antimateria. Se basa en dos argumentos centrales: uno filosófico, que atiende a que no hay nada fuera del universo y no hubo nada antes; y uno científico, que demuestra la anulación de cualquier asimetría por el proceso inverso (en equilibrio térmico).

Condiciones de Sakharov [2]

Ante esta problemática, el físico nuclear Andrei Sakharov fundamentó y colocó los pilares del sustento de la bariogénesis mediante la imposición de tres condiciones que necesitaba cumplir cualquier sistema que quisiera generar dicha asimetría. Estas estuvieron inspirados en los descubrimientos de la radiación de fondo cósmico (ondas radiactivas aparentemente procedentes de *ningún* y *cualquier* lugar del universo) y la violación de CP en un sistema de Kaones neutros.

Violación del Número Bariónico

El número bariónico es un número cuántico que sólo poseen los bariones, y que teóricamente debería mantenerse en cualquier tipo de reacción entre partículas. Es decir, si una partícula, mediante un proceso, decae a dos o más, la suma de los números bariónicos de . Aunque el modelo estándar considera la violación de la conservación de este número, no hay evidencia experimental que resulte en una violación de este tipo.

$$X \rightarrow Y + B \qquad \bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{B}$$

Violación de simetría C y simetría CP

En física teórica se utilizan los siguientes dos operadores:

- **C**, que cambia el signo de la carga eléctrica y de los demás números cuánticos. Cambia partículas por antipartículas. Teóricamente debería presentarse la misma probabilidad de coalición entre partículas como con sus antipartículas.
- **P**, que invierte el signo de todas las coordenadas espaciales de las partículas,

$\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$. Presenta teóricamente la igualdad entre probabilidades de colisiones al darse inversión espacial (posición, velocidad). [3]

La violación de ambos operadores (CP) se presentó en el experimento de Christenson (1964) en un sistema de kaones. Por simetría, CP, el hecho de que en interacción débil se dé $\kappa_L^0 \rightarrow 2\pi$ está prohibido. Sin embargo, este experimento obtuvo el resultado *no deseado*, dictaminando que la simetría tenía puntos rompibles. Además, el modelo estándar considera el rompimiento de simetría C y CP.

En Bariogénesis, se considera C como una simetría de universo. Si C se conserva:

$$\Gamma(X \rightarrow Y + B) = \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{B})$$

donde se conserva el número bariónico. Por tanto, C debe de ser violado.

Ahora, si el número bariónico se viola en $X \rightarrow q_L q_L$, por CP, lo mismo sucede para $X \rightarrow q_R q_R$. Por lo tanto:

$$\Gamma(X \rightarrow q_L q_L) + \Gamma(X \rightarrow q_R q_R) = \Gamma(X \rightarrow \bar{q}_L \bar{q}_L) + \Gamma(X \rightarrow \bar{q}_R \bar{q}_R)$$

donde se conserva el número bariónico. Por lo que, CP debe ser violado.

Interacción fuera del equilibrio térmico

Dentro de un sistema en equilibrio térmico, las operaciones que pueden dar lugar a una asimetría, pueden fácilmente regresar a la simetría inicial al darse el proceso inverso. En busca de una diferencia entre la producción de materia antimateria, se observa que el ritmo de generación de procesos asimétricos debe ser menor al de la expansión del universo, ya que esta ordena los cambios de temperatura que afectan la realización de dichos procesos (considerando que el universo era extremadamente caliente en su origen y que bajó su temperatura drásticamente por su inflación).

Leptogénesis [4]

La leptogénesis se ha utilizado como una manera de encontrar candidatos para la bariogénesis sin utilizar teorías de gran unificación. En pocas palabras, pretende configurar la asimetría del número bariónico mediante la creación de

asimetría en el número leptónico (su análogo en los leptones).

Transiciones de Fase [5]

Se define como una fase al sistema o subsistema que bajo ciertas condiciones cumple con distintas propiedades físicas y químicas y se mantiene de manera estable y continua. Por tanto, cuando dichas condiciones se ven alteradas, se produce un cambio en las propiedades, a esto se le llama transición de fase.

El ejemplo más claro de esto son las fases termodinámicas de la materia, mejor conocidas como estados físicos de la materia. El agua se presenta generalmente a temperatura ambiente y presión atmosférica de la Tierra en forma líquida, pero si se le hace descender a 273.15 K o menos, se solidifica, y si se eleva a 373.15 K o más, se evapora. Por tanto el estado sólido, líquido o gaseoso son fases de agua. Así también puede suceder (como en el caso del agua) que una fase se divida en otras más pequeñas, cambiando su composición.

Consideremos entonces el punto de transición líquido-gaseoso. Se tiene agua líquida aislada, y se le empieza a aplicar presión y calor constante a una parte del líquido. Entonces una fracción del líquido se transformará en vapor cuando alcance su calor latente de vaporización. Si continuamos, en un momento, todo el líquido se evaporará, y el vapor se seguirá calentando. Pero si se interrumpe la entrega de calor y se mantiene la temperatura y presión constante, notamos que las porciones de agua líquida y gaseosa se mantienen constantes. Esto es, coexisten dos fases en equilibrio termodinámico. Lo mismo puede suceder en los puntos sólido-líquido y sólido-gaseoso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Leptogénesis en un caso sencillo.

Los candidatos ideales son los neutrinos súper-masivos de Majorana [4], regidos por su propio sistema (Naturaleza de Majorana): no poseen interacción con el modelo estándar y se mantienen fuera de equilibrio térmico. Pueden decaer tanto en leptones como en antileptones. De ahí **violan el número leptónico**. Su alta cantidad de masa los hace decaer fácilmente.

$$N_R \rightarrow l_L + \psi$$

$$N_R \rightarrow \bar{l}_L + \psi$$

Nótese la diferencia en ambas ramificaciones donde **CP es violado** a través de una simetría de corrección de Higgs. Así también hay interferencia de número leptónico por decaimiento de N_R , con $\epsilon \approx 10^{-8}$.

En el primer caso, en equilibrio térmico, tenemos $\Gamma(X \rightarrow Y) = \Gamma(Y \rightarrow X)$. Consideramos la temperatura mayor con las masas de neutrinos. Existen tres tipos N_1, N_2, N_3 , por orden de masa (menor a mayor). Obtenemos que para cualquier N_i su decaimiento interfiere con la violación del número leptónico, y así como puede diferenciarla, puede igualarla.

Por tanto, consideramos el caso **fuera del equilibrio térmico**, que bloquea los procesos inversos, es decir, la masa en el límite térmico.

Suponiendo que un decaimiento del neutrino N_3 genere una asimetría en el número leptónico, debemos contemplar un ligero cambio en el número bariónico, pero no lo suficientemente masivo. Por lo que el cambio podría ser fácilmente revertido por los otros dos neutrinos. Lo mismo pasaría si se considera el segundo neutrino: cualquier cambio que genere sería fácilmente descartado por el decaimiento del más ligero de los neutrinos. Esto es:

$N_{2,3} \rightarrow X_{2,3}$ será revertido y regresado por $N_1 \rightarrow X_1$.

Por tanto, los decaimientos en neutrinos N_2 y N_3 , se consideran irrelevantes. Dejando entonces al neutrino N_1 como único candidato.

Ahora bien, los decaimientos del neutrino N_1 sólo se llevan a cabo a temperaturas de aproximadamente 1TeV o mayor, por lo que sólo fueron realizados en las primeras instancias del universo.

Matemáticamente, por la ecuación de Boltzmann, sus interacciones están dados por:

$$\frac{dN_{N_1}}{dt} = -\Gamma_D(N_{N_1} - N_{N_1}^{eq})$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \epsilon\Gamma_D(N_{N_1} - N_{N_1}^{eq})$$

Donde $\Gamma_D = \frac{1}{8\pi}(h^\dagger h)_{11}M_1 \frac{k_1(z)}{k_2(z)}$, la razón de decaimiento leptones-antileptones (donde k_i son funciones de Bessel modificadas, $z = \frac{M_1}{T}$, y h es la matriz de Yukawa del neutrino de Dirac). Este término puede ser aproximado para $z > 1$ a la masa del Neutrino para $\Gamma_D \approx 10^{18} GeV$.

En una Transición de Fase Electro débil.

El modelo estándar contempla la violación de C. Se sabe que ν_L interactúa con W^\pm, Z^0 . Y por C, $\bar{\nu}_L$ también debería de hacerlo. Mas experimentalmente, se sabe que $\bar{\nu}_L$ actúa de manera muy parecida a ν_R , que no interactúa con dichos bosones. Por tanto C es violado.

La fuerza de interacción de decaimiento se mide en base a la matriz

$$V_{ckm} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{21} & V_{31} \\ V_{12} & V_{22} & V_{32} \\ V_{13} & V_{23} & V_{33} \end{pmatrix}$$

Ahora si CP se conserva, la fuerza de interacción $V_{u_\alpha d_\beta}$ en el decaimiento $u_\alpha \rightarrow d_\beta + W^+$, y la fuerza de decaimiento $V_{\bar{u}_\alpha \bar{d}_\beta}$ en $\bar{u}_\alpha \rightarrow \bar{d}_\beta + W^-$ son iguales. También se sabe que, $V_{\bar{u}_\alpha \bar{d}_\beta} = V_{u_\alpha d_\beta}^*$. Por tanto, si $V_{u_\alpha d_\beta}$ tiene un número complejo como elemento (que tiene alta probabilidad de suceder), CP es violado.

Ahora, la descripción de la violación de B se ve ligada al número topológico de Chern-Simons, de la manera $\Delta B \cong \Delta N$. Asociándole un vacío $|0\rangle$ equivale a los campos $W^{\mu\pm}, Z_0^\mu$. Gráficamente [FIGURA 1], se puede observar que según la física clásica, es imposible pasar de un vacío a otro, pero según la física cuántica existe una posibilidad dada por la ecuación de Schrödinger, que implica $\Gamma_{\Delta B} \sim e^{-\frac{1}{\alpha_w}}$ (con $\alpha_w \sim \frac{1}{137}$ la fuerza débil). Esto denota un "efecto túnel", pasando de un vacío a otro. En nuestros tiempos no puede suceder, pues implicaría el decaimiento del protón.

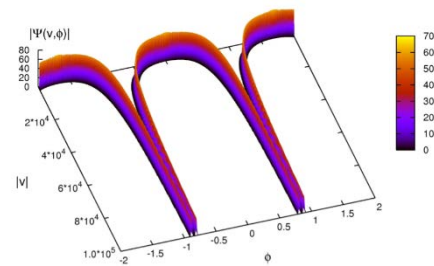


IMAGEN 1: Gráfico de los vacíos para el número de Chern-Simons.

Ahora, si recorremos el tiempo, ¿qué pasa en un rango T de 100 GeV a 10^{12} GeV de temperatura (inicios del Universo: fase electro débil)? Ahí

$\Gamma_{\Delta B} \sim \alpha_w^4 T \sim e^{-\frac{E_{sph}}{T}}$, con $E_{sph} \propto \langle 0|\Phi(T)|0\rangle = v(T)$, la relación de Higgs al vacío. La transición de fase se

puede observar como una burbuja (fase próxima, con $v \neq 0$) que se expande por el resto del universo (fase anterior, con $v = 0$). Conforme se va expandiendo, las partículas interactúan continuamente con la pared de la burbuja. Como C y CP se violan, entonces la interacción de la pared con las partículas es distinta a la interacción con las antipartículas. Es ahí donde se produce una asimetría bariónica, ya que los bariones que atraviesan la pared, se añaden y elevan el número bariónico de la nueva fase. Además, el número bariónica fuera de la burbuja debe borrarse por lo que $\Gamma_{\Delta B}$ debe de tener su valor máximo, así puede desaparecer, mientras que dentro de la burbuja debe de mantenerse, por lo que $\Gamma_{\Delta B}$ debe ser su mínimo (tender a 0), lo cual implica $\frac{v(T)}{T} > 1$. Pero, para que esto suceda, se debe de considerar la $m_H < 70 \text{ GeV}$, y el modelo estándar contempla $m_H \approx 125 \text{ GeV}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- En el primer caso tenemos una disposición de candidatos meramente teóricos, por lo que su existencia queda en la duda y causa por sí mismo el problema al considerarse una situación real.
- En el segundo punto, tenemos un problema entre teoría y práctica en base a la masa de Higgs. Por tanto, se tienen dos opciones: recurrir a física fuera del modelo estándar (considerando uno nuevo) o usar una nueva partícula como referencia, dentro de la cual destaca la materia oscura como candidato principal.

CONCLUSIONES

En la ciencia cada día se hacen nuevos descubrimientos, y con ello surgen nuevas preguntas. Se ha enfocado siempre en la búsqueda de la verdad, pero parece que esta jugara a las escondidas y no quisiera ser encontrada. Cada vez que se propone un modelo, se le encuentran defectos (o cualidades) que lo hacen imperfecto. Y eso es lo que hace a la ciencia interesante: busca lo perfecto en lo imperfecto.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer mi asesor, Dr. Delepine, por todo el apoyo, la orientación y el tiempo brindado para realizar este proyecto. A mi asesora, Elvia Sosa, por los apoyos (aún desde lejos). A la ENMS-Gto, y al Sr. Alejandro, por el transporte brindado. A la DCI-León por las instalaciones prácticas. Y a mis padres por su constancia y confianza.

REFERENCIAS

- [1] Young, H.D. Freedman, R.A. (2009) Física Universitaria con Física Moderna. Vol. 2 (12° ed.) pp. 1519-1531. México, DF: Pearson Educación.
- [2] Perepiletsa, B.V. (2008) Sakharov Conditions for Baryogenesis. Recuperado de <http://phys.columbia.edu/~dvp/dvp-sakharov.pdf>, el 3 de Julio de 2015.
- [3] Vidal Maroño, M. (?) Violación CP y Cosmología. Recuperado de <http://nuclear.fis.ucm.es/FNYP-C/19/VioCPyCosmo.pdf>, el 3 de Julio de 2015.
- [4] Buchmüller, W. (2006) Leptogenesis: Standard Model & Alternatives. pp. 11-16. Recuperado de http://www.archive.ph.ed.ac.uk/sussp61/lectures/16_Buchmueller_Leptogenesis/sandrew.pdf, el 3 de Julio de 2015.
- [5] Cannas, S.A. (2010) Termodinámica y Mecánica Estadística I – Notas Cap. 11. pp. 97-98. Recuperado de http://www.famaf.unc.edu.ar/~cannas/Notas_Termol/Termol-09-cap11.pdf, el 9 de Julio de 2015.