

La Asimetría Bariónica del Universo y la Materia Oscura

Sheryl Melara

Instituto de Física, UNAM

20 de septiembre de 2021



¿De qué se compone el universo?



La materia ordinaria (o materia bariónica) está compuesta de **bariones** y electrones. Los bariones, a su vez están formados por bloques más pequeños que llamamos quarks. Los quarks y electrones son *partículas elementales*.

Las partículas elementales se dividen en dos grandes grupos: fermiones y bosones.

STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES



¿Qué es la anti-materia?

Ecuación de Dirac

$$(i\cancel{\partial} - m)\psi = 0$$

Esta ecuación de onda relativista que describe partículas de espín 1/2, predijo la existencia de *anti-materia*.

- En 1926 se postula la ecuación de Schrödinger.
- En 1928 Paul Dirac propone una ecuación de onda relativista.
- En 1932 se descubre el positrón por Carl Anderson.



Figura: Paul Dirac

Una anti-partícula posee la misma masa que la correspondiente partícula, pero con carga opuesta. Ejemplo: el positrón, la anti-partícula del electrón tiene su misma masa pero carga positiva como la de un protón.

¿En dónde se encuentra la anti-materia?



Figura: Desacelerador de protones en CERN



Figura: Complejo de aceleradores en Fermilab



Figura: Escáner de tomografía por emisión de positrones

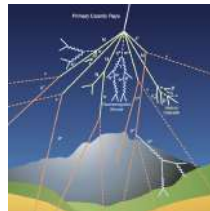
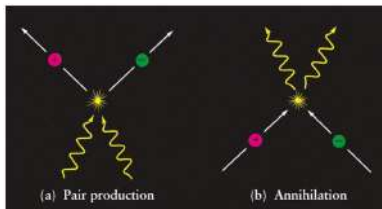


Figura: Rayos cósmicos

La Asimetría entre Materia y Anti-Materia

Durante el Big-Bang se creó igual cantidad de materia que anti-materia debido al principio de Conservación de Energía.

Sin embargo, observamos que desde las formas más pequeñas de vida en la Tierra hasta las más grandes estructuras en el universo están formadas casi completamente de materia y no anti-materia.



La materia y anti-materia se crean y aniquilan en pares; por tanto, el universo no debería contener más que energía...

¿Por qué hay más materia que anti-materia en el universo?

Bariogénesis

Es el proceso físico mediante el cual se generó una asimetría entre el número de bariones y anti-bariones en el universo temprano.

Razón Bariones-fotones:

$$\eta_B = \frac{n_B - \bar{n}_B}{n_\gamma}$$

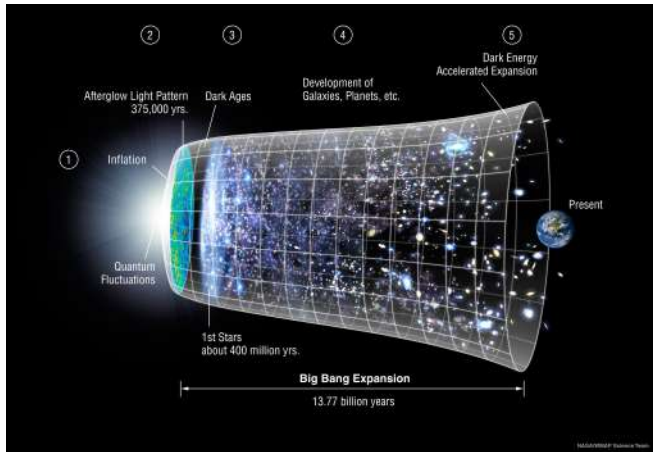
$$\eta_B = (5.80 - 6.50) \times 10^{-10}$$

De no haberse generado una asimetría entre materia y anti-materia, el universo estaría vacío...



¡La bariogénesis es la razón de nuestra propia existencia!

¿Cuándo ocurre la bariogénesis?



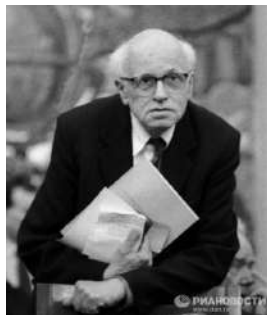
La asimetría entre materia y anti-materia debió generarse después de la Inflación y antes de BBN.

En 1967 Andrei Sakharov propuso las condiciones para que ocurra la bariogénesis:

- Violación de número leptónico/bariónico.
- Violación de C y CP.
- Romperse el equilibrio térmico

Tipos de bariogénesis

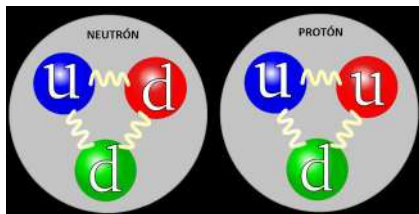
- Decaimiento de partículas pesadas fuera del equilibrio.
- Bariogénesis electrodébil.
- Mecanismo de Affleck-Dine.



Ref:

A. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967).

Número leptónico y número bariónico



Los bariones son partículas formadas por tres quarks. El protón y neutrón son ejemplos de bariones.



En un determinado proceso, siempre que encontramos un barión le asignamos **número bariónico** 1. Si tenemos la anti-partícula de un barión, le asignamos número bariónico -1. De igual manera, a un electrón le asignamos **número leptónico** 1 y al positrón -1.

Conservación de carga, número leptónico y bariónico

Ley de conservación de la carga

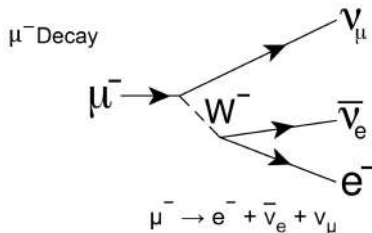
La cantidad total de carga eléctrica en un sistema no cambia con el tiempo. En un determinado proceso físico se producen iguales cantidades de carga positiva y negativa.

Decaimiento beta

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

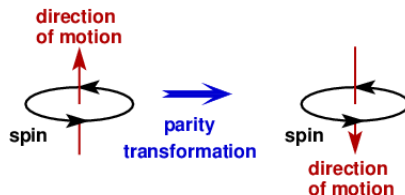
	n	p^+	e^-	$\bar{\nu}_e$
Carga	0	1	-1	0
Número leptónico	0	0	1	-1
Número bariónico	1	1	0	0

Hasta ahora en todos los procesos observados en el laboratorio se cumple la conservación de la **carga**, el **número bariónico** y el **número leptónico**.



Simetrías discretas: Paridad

Al aplicar paridad hacemos una transformación de reflexión. Las leyes de la física deben ser las mismas bajo reflexión.



Transformaciones de paridad:

$$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$$

$$\vec{v} \rightarrow -\vec{v}$$

$$\vec{L} \rightarrow \vec{L}$$

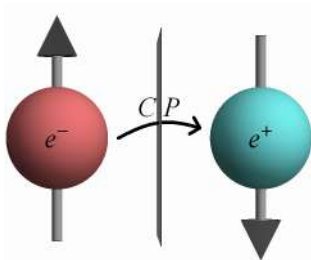
$$\vec{S} \rightarrow \vec{S}$$

La paridad se conserva en la interacción Fuerte y en la Electromagnética. En cambio, en los decaimientos débiles se observa una violación de paridad.

Helicidad

Es la proyección del espín en la dirección de movimiento. Si la proyección va en la misma dirección que la del momento $\vec{p}$, decimos que la helicidad es positiva y la partícula es derecha. Si en cambio la proyección del espín tiene dirección opuesta, la helicidad es negativa y la partícula es izquierda.

$$H = \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s} \cdot \vec{p}|}$$



Al aplicar una transformación de CP, cambiamos la dirección de movimiento de la partícula y su carga como se muestra en la imagen. Es decir, obtenemos la anti-partícula con helicidad opuesta. Bajo paridad, un electrón izquierdo e_L^- se convierte en un positrón derecho e_R^+ .

Se observó violación CP por primera vez en decaimientos de kaones neutros K^0 en 1964 y posteriormente en decaimientos de mesones B (2001) y D (2019).

En el Modelo Estándar:

- CP se rompe explícitamente
- La fuente de violación CP está dada por la fase δ_{KM} de la matriz CKM del sector de quarks.
- CP aparece solamente en las interacciones de quarks mediante corrientes cargadas.

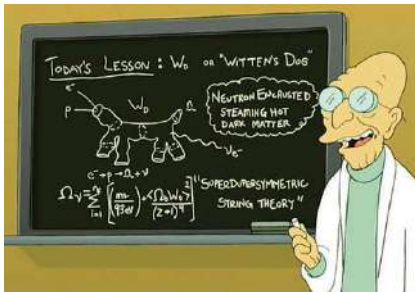
Sin embargo, la violación CP producida en el Modelo Estándar no es suficiente para explicar la asimetría bariónica del universo.



Para explicar la asimetría entre materia y anti-materia se necesita buscar fuentes de violación CP más allá del Modelo Estándar.

Aunque el Modelo Estándar ofrece una descripción adecuada de la naturaleza, no puede explicar:

- El origen de la masa de los neutrinos.
- La asimetría entre materia y antimateria.
- La interacción gravitacional.
- La existencia de materia oscura.



Podemos encontrar pistas para explicar la asimetría bariónica en la física de neutrinos y la materia oscura.

¿Violación CP en neutrinos?

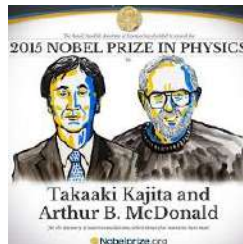
En 1998 se comprobó por Super Kamiokande que los neutrinos cambian de sabor, fenómeno que se conoce como *Oscilación de Neutrinos*.

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^n U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

Donde i representa el índice de masa y α el índice de sabor.



U es la matriz PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata), la cual es una matriz unitaria que tiene 3 ángulos de mezcla y una fase de violación CP.



¡La oscilación de neutrinos prueba el hecho de que los neutrinos tienen masa!

¿Violación CP en neutrinos?

El modelo de oscilación con 3ν tiene 6 parámetros independientes:

- $\Delta m_{12}^2 = 7.39_{-1.9}^{+0.21} \times 10^{-5} \text{eV}^2$
- $\Delta m_{32}^2 = 2.449_{-0.030}^{+0.032} \times 10^{-3} \text{eV}^2$
- $\theta_{12} = 33.82_{-0.76}^{+0.78}$
- $\theta_{13} = 8.61_{-0.13}^{+0.13}$
- $\theta_{23} = 48.3_{-1.9}^{+1.2}$
- $\delta_{CP} = 222_{-28}^{+38}$

Si los parámetros de oscilación de los neutrinos son distintos a los de los anti-neutrinos, entonces existe violación CP en el sector de neutrinos.

Hay distintos experimentos enfocados en confirmar la violación CP en neutrinos como: T2K, No ν a y DUNE.

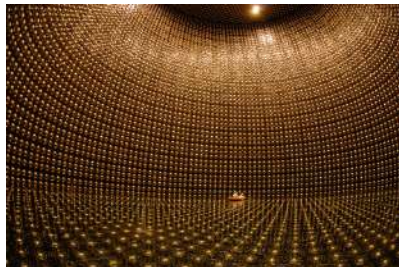


Figura: Interior del detector de neutrinos Super Kamiokande.

T2K ha observado evidencia de violación CP en neutrinos a 3σ . Futuras mediciones determinarán si la violación CP en el sector leptónico es mayor que en el sector de quarks.



$$\frac{1}{2} m_M \bar{f}^c_X f_X + h.c.$$

Donde:

$$f = f^c$$

Los fermiones de Majorana son partículas sin carga que son su misma anti-partícula. Fueron postulados en 1937 por Ettore Majorana.

Dentro del Modelo Estándar, los neutrinos son posibles candidatos a ser fermiones de Majorana, debido a que no poseen carga.

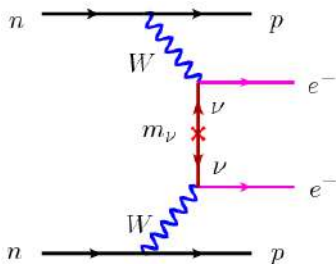
¿Por qué nos interesa saber si los neutrinos son partículas de Majorana?

El término de masa de Majorana viola todas las cargas de $U(1)$ y el número leptónico en 2 unidades.

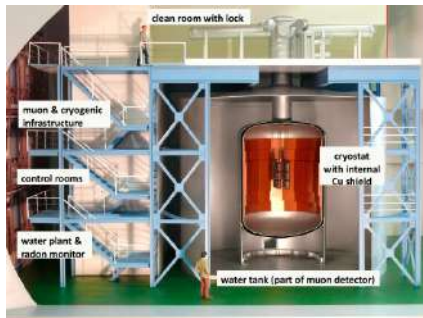
$$\Delta L = 2$$

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^{-}$$

Este proceso viola el número leptónico en 2 unidades y tiene una mitad de vida $t_{1/2} \sim 10^{26}$ años.



El experimento GERDA (Germanium Detector Array) busca detectar el doble decaimiento beta sin neutrinos de ^{76}Ge .



La confirmación experimental del doble decaimiento beta sin neutrinos, nos traerá pistas importantes para comprender la asimetría bariónica.

Además de la asimetría bariónica, el Modelo Estándar no puede explicar la existencia de materia oscura... Pero, ¿Qué es la materia oscura?

En 1968 Vera Rubín y Kent Ford determinaron que la curva de rotación de galaxias espirales tiene una forma distinta a la predicha por la teoría.

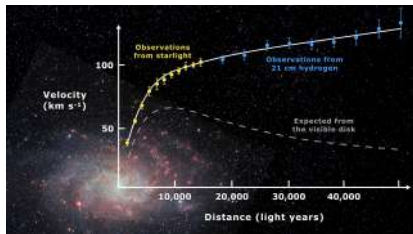


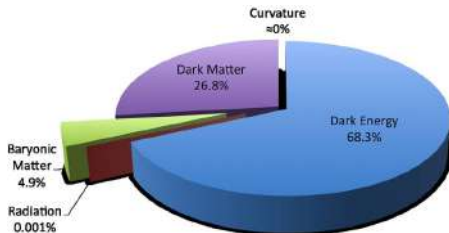
Figura: curva de rotación de una galaxia espiral

La materia ordinaria no es suficiente para producir ese efecto, por tanto, hay otro tipo de materia en las galaxias que no podemos observar.



La materia oscura es un tipo de materia que no absorbe ni emite luz. Esta materia es responsable de mantener unidas las galaxias.

- Es eléctricamente neutra (No interactúa con los fotones)
- Interactúa débilmente con otras partículas (Podría interactuar solamente a través de la gravedad)
- Es estable
- Es no relativista



Poco más de la cuarta parte del universo está hecha de materia oscura, mientras que la materia ordinaria ocupa solamente alrededor del 5 %

¿Qué tiene que ver la materia oscura con la bariogénesis?

Se puede generar bariogénesis a través de la aniquilación de partículas de materia oscura. Además, podemos construir modelos que expliquen la densidad de materia oscura, la asimetría bariónica y el origen de la masa de los neutrinos a la vez.



Los modelos de tipo *escotogénico* permiten explicar satisfactoriamente todos estos fenómenos. El mecanismo más simple para generar bariogénesis es a través de decaimientos de partículas pesadas, el cual podemos estudiar en un modelo escotogénico mínimo.

Si agregamos al modelo estándar 3 neutrinos pesados N_i + un doblete inerte η , podemos generar bariogénesis a través de los decaimientos fuera del equilibrio de los neutrinos:

$$N_i \rightarrow \ell\eta, \bar{\ell}\eta^*$$

Supongamos que tenemos un tipo de partícula "X" que decae en un par de distintos canales, con número bariónico B_1 , B_2 , número leptónico L_1 y L_2 y razones dadas por r y $1 - r$ respectivamente. Las antipartículas decaen entonces a canales con número bariónico $-B_1$ y $-B_2$, números leptónicos $-L_1$ y $-L_2$ y razones de decaimiento $\bar{r}$ y $1 - \bar{r}$. De manera que el número bariónico total producido en el decaimiento de una partícula X es:

$$B_X = rB_1 + (1 - r)B_2$$

Para el decaimiento de la correspondiente antipartícula el número bariónico producido es:

$$B_{\bar{X}} = -\bar{r}B_1 - (1 - \bar{r})B_2$$

Finalmente, el número bariónico total $B_X + B_{\bar{X}}$ es:

$$\Delta B = rB_1 + (1 - r)B_2 - \bar{r}B_1 - (1 - \bar{r})B_2 = (r - \bar{r})(B_1 - B_2)$$

Notamos que si $r \neq \bar{r}$ se produce un número bariónico neto. Esto ocurre cuando se viola C y CP . Por tanto, violación CP es una condición necesaria para que se produzca la asimetría bariónica.

¿Distintos problemas conectados?

Asimetría bariónica

Violación CP en leptones

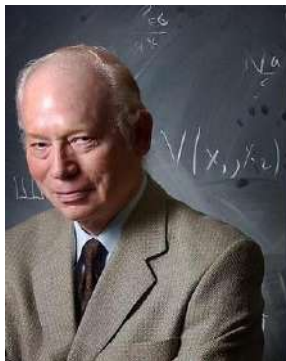


Origen de la masa de los neutrinos

Materia Oscura

“Esto es justo lo que los físicos aman: ver muchas cosas que parecen diferentes como varios aspectos de un fenómeno fundamental” -Steven Weinberg

- En el ME la violación CP en el sector de quarks no es suficiente para explicar la asimetría entre materia y anti-materia. Se necesita confirmar la violación CP en leptones.
- Explicar la asimetría bariónica requiere de física más allá del ME.
- La detección del doble decaimiento beta sin neutrinos confirmaría la hipótesis de que los neutrinos son partículas de Majorana y además nos ayudaría a explicar la asimetría bariónica.
- Se ha observado evidencia de violación CP en neutrinos pero se necesita restringir más los parámetros y mejorar la significancia estadística de los resultados para su confirmación.
- Resulta conveniente construir modelos que expliquen simultáneamente el origen de la masa de los neutrinos, la existencia de materia oscura y la generación de bariogénesis.



The effort to understand the universe is one of the very few things that lifts human life a little above the level of farce, and gives it some of the grace of tragedy.

~ Steven Weinberg

"El esfuerzo por comprender el universo es una de las pocas cosas que elevan la vida humana un poco por encima del nivel de la farsa, y le da un toque de la gracia de la tragedia"

¡Gracias por su atención!