

Violación CP y Cosmología

Curso de Doctorado de Cosmología
Miguel Vidal Maroño



Ciemat Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas.



P y C

Inversión espacial: Operador P

Invierte el signo de todas las coordenadas de las partículas $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$

La probabilidad de un proceso de colisión es la misma que la del proceso obtenido por inversión espacial, cambiando de signo las posiciones y velocidades \leftarrow [Invariancia frente a P](#)

El operador P actuando sobre el vector de estado de una partícula:

$$P|A; \vec{r}; m \rangle = \eta_P(A)|A; -\vec{r}; m \rangle \text{ con } \eta_P(A) \text{ paridad intrínseca de la partícula } \pm 1$$

Conjugación de carga: Operador C

Cambia el signo de la carga eléctrica y de los demás números cuánticos. Su efecto consiste en cambiar partículas por antipartículas.

La probabilidad de un proceso de colisión entre partículas es la misma que la del mismo proceso con sus antipartículas \leftarrow [Invariancia frente a C](#)

Para una partícula A, caracterizada por una función de onda Φ , la aplicación de C es:

$$C|A; \Phi, l, m_l; m_s \rangle = \eta_C(A)|\bar{A}; \Phi, l, m_l; m_s \rangle \text{ con } \eta_C(A) \pm 1$$

Violación CP

Primer proceso demostrado con violación CP, $K^0 - \bar{K}^0$:

Los K^0 , producidos por interacción fuerte parecen estar formados por dos partículas distintas cuando estudiamos su desintegración débil, K_S^0 y K_L^0

$$\tau(K_S^0 \rightarrow 2\pi) = 0.9 \times 10^{-10} \text{ sec}$$

$$\tau(K_L^0 \rightarrow 3\pi) = 0.5 \times 10^{-7} \text{ sec}$$

$$CP|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$$

Los estados finales de 2π y 3π son auto-estados de CP con autovalores +1 y -1, respectivamente. Si CP se conserva, se pueden identificar los auto-estados del K^0 con:

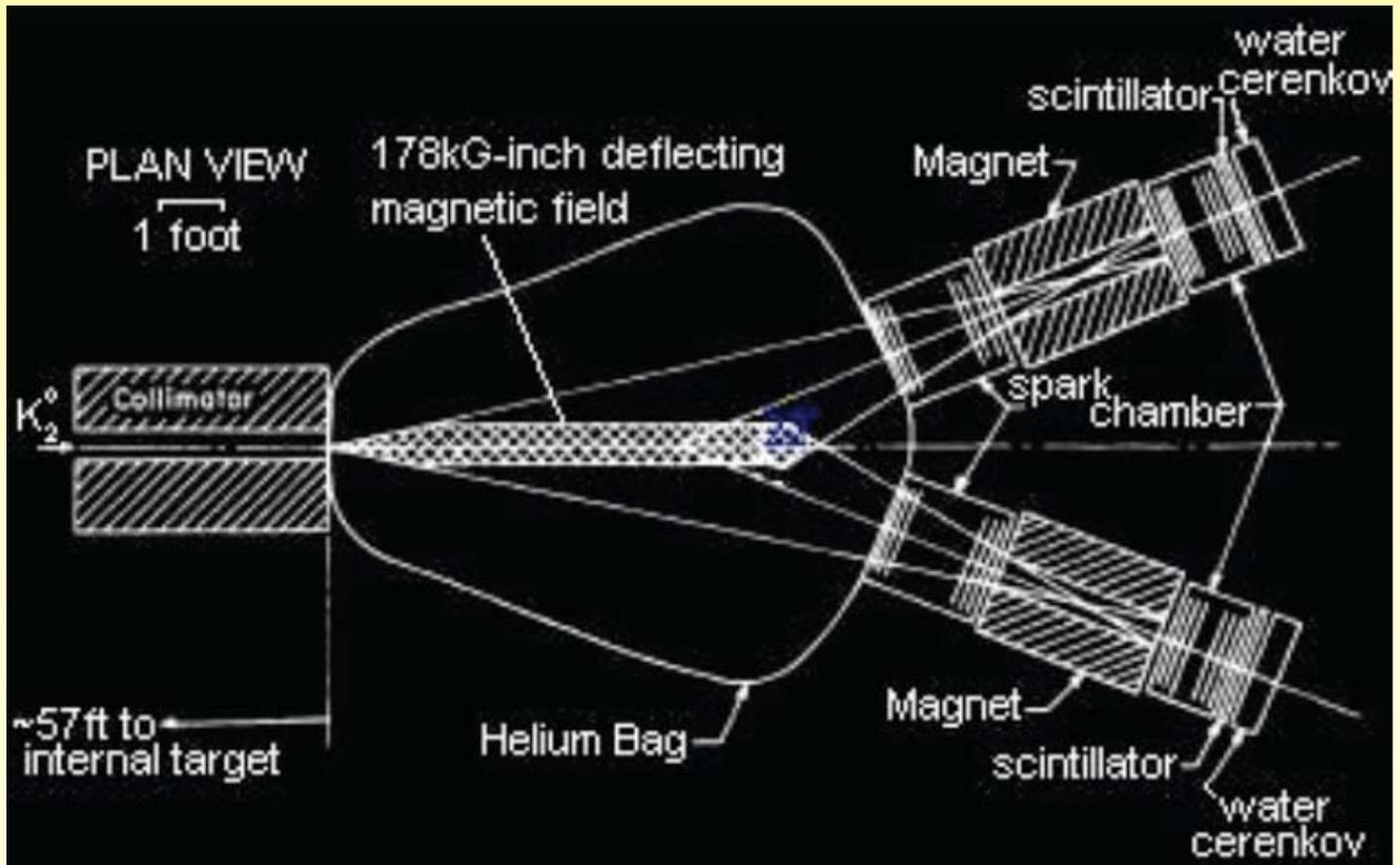
$$|K_S^0\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}} [|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle] \quad (CP = +1) \quad \text{Decae en } \pi^+ \pi^-$$

$$|K_L^0\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}} [|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle] \quad (CP = -1) \quad \text{Decae en } \pi^+ \pi^- \pi^0$$

Violación CP

Si CP es una buena simetría, en interacción débil $K_L^0 \rightarrow 2\pi$ está prohibido.

Sin embargo se observa en el siguiente experimento
by Christenson et al. in 1964



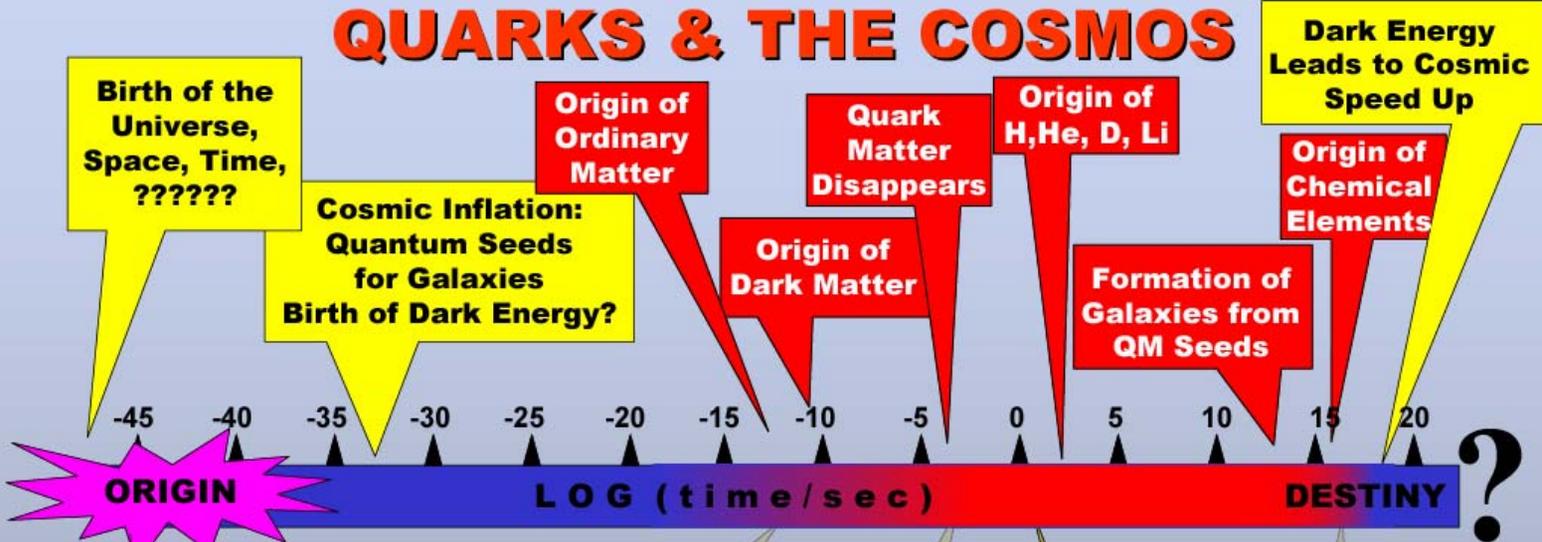
Violación CP

Grandes experimentos posteriores:

- **NA-48** en el CERN con mesones K
- **CLEAR** en el CERN con mesones K
- **BaBar** en SLAC con mesones B
- **CDF y D0** en FERMILAB con mesones B (B_S y B_C) exclusivos en Tevatron, futuro próximo.
- **LHCb** en el CERN en un futuro próximo.

Bariogénesis

DEEP CONNECTIONS: QUARKS & THE COSMOS



ORIGIN

LOG (time/sec)

DESTINY ?

Theory,
Serendipitous
Discoveries

Neutrino Expts,
Underground Lab

RHIC
RHIC II

JLab (6 GeV)
JLab (12 GeV)
ELIC / eRHIC

HRIBF, ATLAS
NSCL, etc.
RIA

GENESIS TIMELINE

Adapted from M.S. Turner and R. Orbach

Asimetría Materia-Antimateria

- ¿Por qué hay más quarks que antiquarks y más leptones que antileptones?
- Universo hecho de materia !!!!
- Pequeña proporción de antimateria en la radiación cósmica $\approx 10^{-4}$

Si en el universo primitivo el nº de quarks y antiquarks hubiese sido igual, su aniquilación una vez que $KT < 1\text{GeV}$ se estima en:

$$\eta \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 10^{-19}$$

Sin embargo actualmente se observa

$$\eta \approx 10^{-9} \gg \frac{n_{\bar{B}}}{n_\gamma}$$

Asimetría Materia-Antimateria

Requisitos de **Sakharov**:

- Violación de número bariónico B
- Violación C y CP
- Universo fuera del equilibrio térmico

Las 3 condiciones se satisfacen en el
Standard Model

Modelos para Asimetría Materia-Antimateria (GUT)

Si GUT fuese válida en los límites de la bariogénesis, es probable que B (nº bariónico) y L (nº leptónico) no sean cantidades exactamente conservadas.

Reacciones que violan B y L no son invariantes bajo conjugación de carga \longrightarrow Las tasas de desintegración de B y $\text{anti}B$ no son idénticas.

En el $SU(5)$ GUT la desintegración de B ocurre a través de la producción de bosones muy pesados X (con masa $M_X c^2$)

Modelos para Asimetría Materia-Antimateria (GUT)

Para $KT \gg M_X c^2$ los procesos pueden estar en equilibrio térmico con densidades $n_X \approx n_\gamma$

Sin embargo para $KT \ll M_X c^2$ los bosones X solo pueden desintegrarse. Si las tasas son las siguientes:

$X \rightarrow ql$	tasa de desintegración	r
$X \rightarrow \bar{q}\bar{q}$	tasa de desintegración	$(1 - r)$
$\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{l}$	tasa de desintegración	\bar{r}
$\bar{X} \rightarrow qq$	tasa de desintegración	$(1 - \bar{r})$

Modelos para Asimetría Materia-Antimateria (GUT)

La tasa de producción bariónica por par X-antiX a través de desintegraciones es:

$$\Delta B = \frac{1}{3}r - \frac{2}{3}(1-r) - \frac{1}{3}\bar{r} + \frac{2}{3}(1-\bar{r}) = r - \bar{r} \equiv \varepsilon$$

donde ε es la magnitud de violación CP.

Una vez que las partículas y antipartículas se aniquilan en fotones el exceso bariónico es:

$$\eta \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} \approx \varepsilon \frac{g_X}{g_*}$$

g_X \longrightarrow n° de estados de spin de X

g_* \longrightarrow n° de grados de libertad del spin a $KT = M_X c^2$

Modelos para Asimetría Materia-Antimateria (GUT)

- Para obtener el η observado se necesita $\varepsilon = 10^{-8}$
- No hay una forma fácil de relacionar ε (cantidad de violación CP a altas escalas de masa en GUT) con la cantidad observada en sistemas de poca masa, $K^0 - \bar{K}^0$
- El mínimo SU(5) GUT con 3 generaciones y 2 multipletes de Higgs da $\varepsilon \ll 10^{-8}$. Este número se puede incrementar si se consideran mas generaciones o multipletes de Higgs mas altos.

Modelos para Asimetría Materia-Antimateria

Otras posibilidades:

- Bariogénesis electrodébil (EW):
 - No es posible en el Modelo Estándar.
 - Tal vez con ayuda de la súper-simetría (SUSY):
 - nuevas fuentes de violación CP.
 - Más campos escalares??
 - Más parámetros????

CP violation may be the reason we exist... if it is big enough



*This could be the greatest discovery of the century.
Depending, of course, on how far down it goes.*

FIN