



Creación y aniquilación de partículas

Particulares

Universidad de Sonora

22 de mayo de 2019

Índice

- Origen histórico.
 - Positrón y Antimateria.
- Creación de pares.
 - Conceptos clave.
 - Condiciones para la creación de pares.
 - Principio de incertidumbre de Heisemberg.
 - Justificación matemática.
- Aniquilación partícula-antipartícula.
 - Partícula-Antipartícula.
 - Electrón-Positrón.
 - Protón-antineutrón.
- Radiación de Hawking.
 - Descripción
 - Temperatura de la radiación del agujero negro
- Conclusión
 - Aplicaciones
 - Problema

Positrón y antimateria.

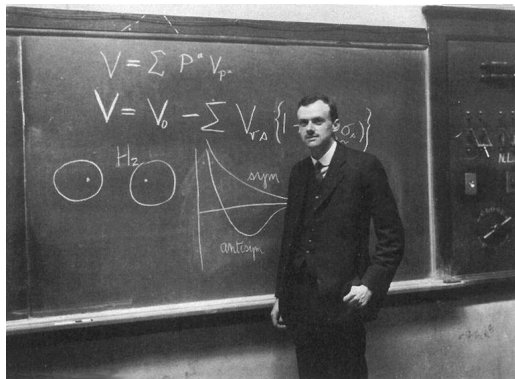


Figura 1: Paul Dirac; responsable de la predicción de la partícula llamada *positrón*, dando luz verde a futuras investigaciones sobre creación y aniquilación de partículas.

Positrón y antimateria.



Figura 2: Carl D. Anderson; fue el primer científico en mostrar el positrón en un experimento.

Positrón y antimateria.

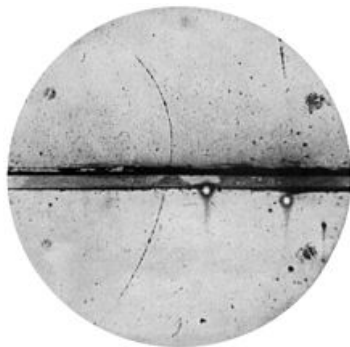


Figura 3: Representación experimental del positrón, en base a las primeras aproximaciones dadas por Paul Dirac.

Positrón y antimateria.

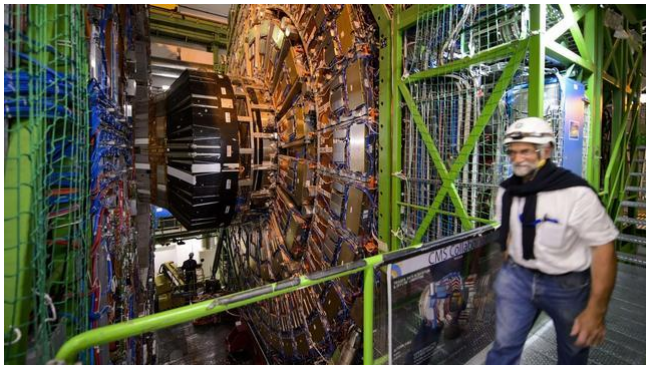


Figura 4: Gran Colisionador de Hadrones en el año 1990.

Conceptos clave.

Cuando un fotón tiene suficiente energía, puede crear materia en forma de un par partícula-antipartícula. Tales conversiones solo pueden tomar lugar donde no se viola la ley de conservación de la energía. En adición a la carga y a la conservación de el *momento-energía*, otros números cuánticos pueden afectar a los posibles estados finales de el fotón.

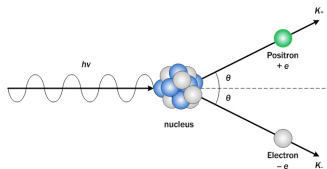


Figura 5: Representación gráfica de la creación par.

Principio de incertidumbre de Heisemberg

La creación de partículas en el vacío se debe a este principio el cual, a primera instancia, nos menciona que no se puede conocer la velocidad y posición exacta de una partícula debido a que mientras más conoces una más se desconoce la otra.

$$\Delta x \Delta v = \hbar/2$$

Esto también aplica para la energía

$$\Delta E \Delta t = \hbar/2$$

Condiciones para la creación de pares

- El proceso de creación de pares no puede darse en el vacío, pues como se demostrará a continuación, es imposible que en ausencia de materia se pueda conservar la energía y el momento al mismo tiempo.
- El fotón debe ser lo suficientemente energético para poder *generar* un par. La energía mínima que el fotón debe contener para que la creación de un par se produzca es de 1.022 MeV , para poder así generar el par *positrón-electrón* con 0.511 MeV , representado como masa, cada uno de estos.
- Estas partículas virtuales se crean debido a las fluctuaciones cuánticas explicadas por el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Justificación matemática

Suponemos que un fotón en el vacío se transforma en un par electrón (P_1) positrón (P_2) como se muestra en la *figura 6*.

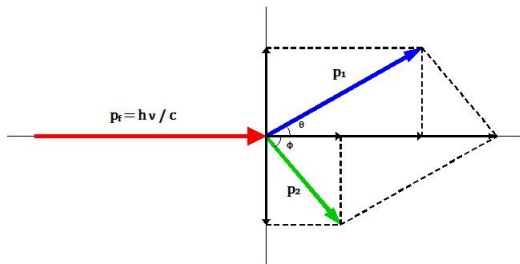


Figura 6: Diagrama de la situación física. Un fotón desaparece creando un par electrón-positrón

Estado inicial: El fotón viaja en dirección positiva del eje x. La energía inicial y el momento del fotón son:

$$\vec{p}_f = \frac{h\nu}{c} \hat{i}$$

$$E_f = h\nu$$

Estado final: El fotón ha desaparecido creando un electrón (1) que se desplaza en una dirección que forma un ángulo θ hacia arriba con respecto al eje x; y un positrón (2) que se desplaza en una dirección que forma un ángulo ϕ hacia abajo con respecto al eje x. Sus momentos y energías son:

$$\vec{p}_1 = p_1 \cos \theta \hat{i} + p_1 \sin \theta \hat{j}$$

$$\vec{p}_2 = p_2 \cos \phi \hat{i} - p_2 \sin \phi \hat{j}$$

$$E_1 = \sqrt{m^2 c^4 + p_1^2 c^2}$$

$$E_2 = \sqrt{m^2 c^4 + p_2^2 c^2}$$

De la conservación del momento:

$$\vec{p}_f = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \quad (1)$$

$$\frac{h\nu}{c} = p_1 \cos \theta + p_2 \cos \phi \quad (2)$$

Observemos que $p_1 \cos \theta + p_2 \cos \phi \leq p_1 + p_2$, entonces

$$\boxed{\frac{h\nu}{c} \leq p_1 + p_2} \quad (3)$$

De la conservación de la Energía:

$$h\nu = E_1 + E_2$$

$$(h\nu)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2$$

$$(h\nu)^2 = 2m^2c^4 + p_1^2c^2 + p_2^2c^2 + 2E_1E_2$$

$$\left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 = 2m^2c^2 + p_1^2 + p_2^2 + \frac{2}{c^2}\sqrt{(m^2c^4 + p_1^2c^2)(m^2c^4 + p_2^2c^2)}$$

$$\left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 = p_1^2 + p_2^2 + 2m^2c^2 + 2\sqrt{p_1^2p_2^2 + p_1^2m^2c^2 + p_2^2m^2c^2 + m^4c^4}$$

En esta última igualdad todos los sumandos del interior del radicando son no negativos con m^4c^4 y $2m^2c^2$ mayores de cero, lo que nos permite deducir la siguiente desigualdad rigurosa:

$$\left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 > p_1^2 + p_2^2 + 2m^2c^2 + 2\sqrt{p_1^2p_2^2}$$

$$\left(\frac{h \nu}{c}\right)^2 > p_1^2 + p_2^2 + 2 p_1 p_2 = (p_1 + p_2)^2$$

Entonces

$$\boxed{\frac{h \nu}{c} > p_1 + p_2} \quad (4)$$

Podemos ver que la ecuación (3) y (4) presentan una inconsistencia matemática por lo que queda demostrado que en el vacío no se pueden crear pares de partícula-antipartícula mientras se conserva la energía y el momento simultáneamente.

Partícula-antipartícula

La aniquilación ocurre cuando una partícula colisiona con su respectiva antipartícula. La energía total y el momento del par inicial de partículas se conserva en el proceso y se distribuye entre las partículas del estado final. Esta aniquilación se debe a que cuando una se encuentra con su anti-partícula, ambas poseen la misma masa pero sus números cuánticos son opuestos, de modo que cuando interactúan estos el resultado de los números cuánticos es cero.

Electrón-Positrón

Este proceso debe satisfacer algunas leyes de conservación en las que se incluyen:

- Conservación de la carga eléctrica. La carga neta antes y después es cero.
- Conservación del momento lineal y de la energía total. Esto prohíbe la creación de un solo fotón.
- Conservación del número total de leptones.

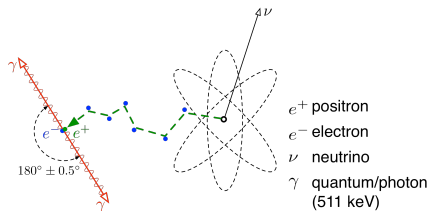


Figura 7: Aniquilación de un electrón proveniente del decaimiento beta con un positrón.

Colisión a bajas energías

A bajas energías, el resultado de la colisión es la aniquilación del electrón y positrón y la creación de dos fotones.

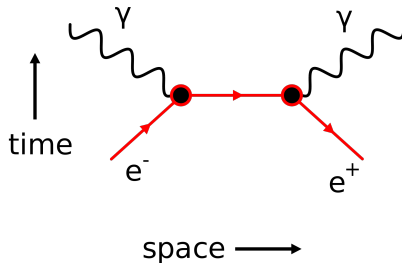


Figura 8: Diagrama de Feynman que representa la aniquilación electrón-positrón en dos fotones.

Colisión a altas energías

Si el electrón o el positrón, o ambos, tienen energía cinética apreciable otras partículas pesadas pueden ser producidas.

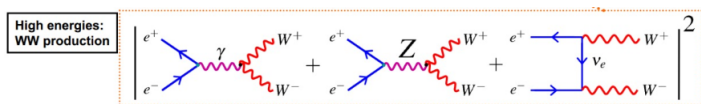


Figura 9: Diagrama de Feynman que representa una colisión a altas energías.

Protón-antiprotrón

En este caso, cuando ambos chocan con bajas energías no es necesario que el resultado sea pura energía (fotones) sino que a bajas energías suele involucrar la creación de mesones, los cuales eventualmente terminarán decayendo en neutrinos, fotones, electrones y positrones.

Esto pasa de manera más general para cualquier interacción de baryon antibaryon(número impar de quark´s de valencia).

Radiación de Hawking

Stephen Haking postuló la existencia de este fenómeno en 1974, fenómeno de naturaleza cuántica ya que su origen cae en el principio de incertidumbre de Heisemberg.

Gracias a este fenómeno se crean pares de partículas virtuales cerca del horizonte de eventos del agujero negro, donde una cantidad de partículas-antipartículas caen al agujero negro y otras no, dando origen a la creación de fotones vease, radiación.



Figura 10: Stephen Hawking

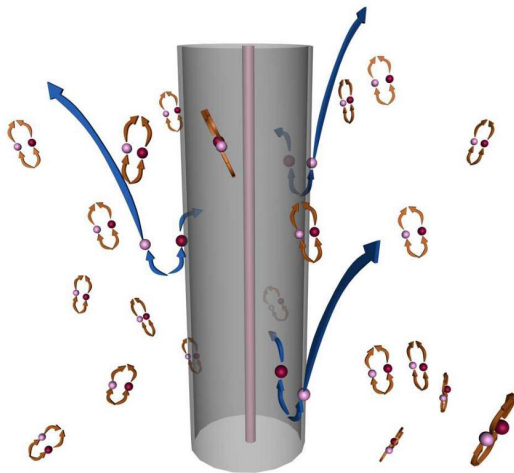


Figura 11: Ejemplo muy sencillo de partículas que parecen ser creadas de la nada

Temperatura de la radiación del agujero negro

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B} \left(\approx \frac{1,227 \times 10^{23} \text{ kg}}{M} K \right)$$

\hbar = constante reducida de Planck

c = velocidad de la luz

k_B = constante de Boltzman

G = constante gravitacional

M = masa del agujeronegro

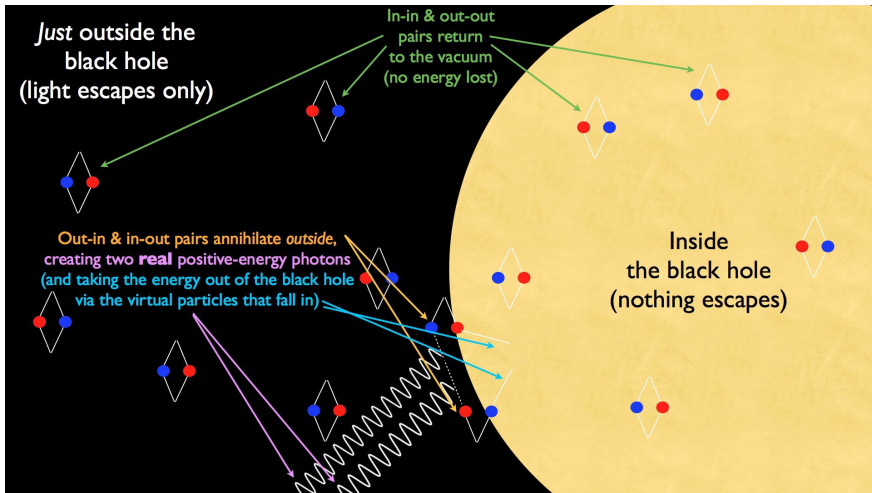


Figura 12: Simplificación de la radiación de Hawking

Aplicaciones

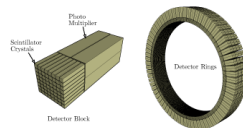
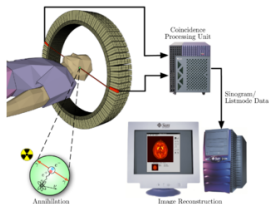
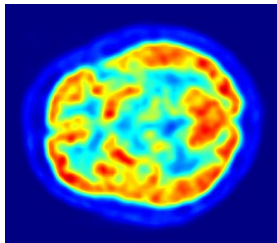


Imagen de la actividad cerebral construida a partir de positrones interactuando con los electrones del cerebro.

Aplicaciones



Figura 13: Una de las aplicaciones más controversiales.

Aplicaciones

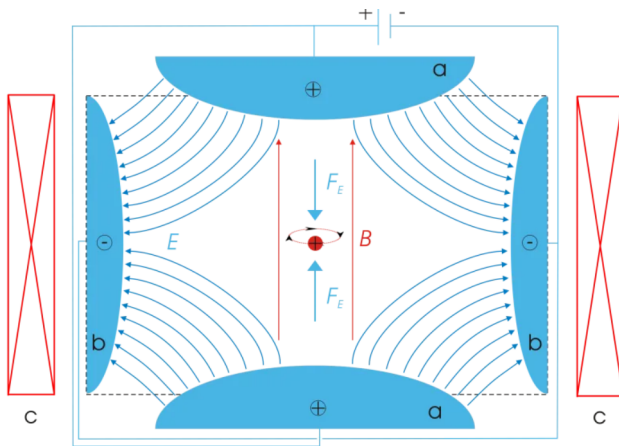


Figura 14: Trampa iónica para almacenar antimateria.

Problema

Un fotón γ de 5 MeV genera un par electrón-positrón en las proximidades de un núcleo pesado, inicialmente en reposo. Suponiendo que estas partículas se reparten por igual la energía, calcúlese la energía cinética del par partícula-antipartícula y su velocidad.

Para calcular la energía cinética se tomará en cuenta que la energía del fotón es igual a la suma de las energías del electrón y del positrón.

$$E = E_- + E_+$$

$$E = (m_0c^2 + k_+) + (m_0c^2 + k_-)$$

Como $k_+ = k_-$

$$E = 2k + 2m_0c^2$$

De esta expresión deducimos el valor de la energía cinética:

$$k = \frac{E - 2m_0c^2}{2} = \frac{2\text{MeV} - 1,022\text{MeV}}{2} = 1,99\text{MeV}$$

Ahora para obtener la velocidad.

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (5)$$

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (5)

$$E^2 = \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - (v/c)^2} + m_0^2 c^4$$

De aquí podemos obtener la ecuación para la velocidad:

$$v = \frac{c}{E} \sqrt{E^2 - m_0^2 c^4} \quad (7)$$

Sustituyendo los datos:

$$v = \frac{c}{2,50 \text{ MeV}} \sqrt{(2,50 \text{ MeV})^2 - (0,511 \text{ MeV})^2} = 0,98c$$

Conclusión

¡Gracias kiks!



Figura 15: Nissan Kicks

Bibliografía

- **Principio de incertidumbre de Heisemberg**
<https://www.nucleares.unam.mx/vieyra/node20.html>
- **How do Black Holes evaporate?** <https://medium.com/starts-with-a-bang/how-do-black-holes-evaporate-5463dbda6832>
- **Quantum fluctuation**
https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_fluctuation
- **Uncertainty principle**
https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle
- **What happens when a proton and an antiproton collide?**
<https://www.quora.com/What-happens-when-a-proton-and-an-antiproton-collide>
- **CERN**
<https://home.cern/>
- **Annihilation**
<https://en.wikipedia.org/wiki/Annihilation>

- **Introduction to Nuclear and Particle Physics**, Second Edition, A. Das and T. Ferbel, <https://forum.lawebdefisica.com/entries/593-Imposibilidad-de-la-creación-de-pares-electrón—positrón-en-el-vacío>
- **Imposibilidad de la creación de pares electrón-positrón en el vacío** <https://forum.lawebdefisica.com/entries/593-Imposibilidad-de-la-creación-de-pares-electrón—positrón-en-el-vacío>
- **Paul Dirac**
https://es.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac
- **Carl David Anderson**
https://es.wikipedia.org/wiki/Carl_David_Anderson
- **Cámara de niebla**
https://es.wikipedia.org/wiki/Cámara_de_niebla
- **Ejercicio**
https://www.eweb.unex.es/eweb/fisteor/andres/fisica_cuantica/2010-2011/ejercicio1_6.pdf