

El Problema con la anti-materia

Diego Roa

Facultad de Ciencias, Universidad Antonio Nariño

dieroa@uan.edu.co

Resumen

La idea de anti-partículas fue planteada en los años 20 del siglo XX, en los albores de la mecánica cuántica. Actualmente, además de inspirar historias que sirven para llevar la literatura fantástica y el cine, es un campo muy activo de investigación que apunta a la comprensión de problemas fundamentales de la física. Parte de estos estudios pretenden responder si la naturaleza tiene leyes distintas para materia que para anti-materia. Dentro de los resultados están muchos sistemas de partículas en los cuales se observa el fenómeno por medio de la violación de simetría de carga-paridad. Estos estudios no solo contribuyen al desarrollo científico, sino que permiten perfilar el uso de sistemas basados en materia anti-materia como fuente de energía.

¿Qué es la anti-materia?

La anti-materia es uno de los descubrimientos más fascinantes del siglo XX. Alrededor de la idea de la anti-materia, historias fantásticas se han tejido. Por ejemplo, el libro *Ángeles y Demonios* (Brown, 2017), explora la idea de la anti-materia como una sustancia casi mágica producida en los aceleradores de partículas y puede ser sintetizada para producir energía. Incluso, allí la anti-materia es utilizada para construir una diminuta bomba que sería utilizada para destruir el Vaticano. Aunque desde esta perspectiva la anti-materia parece algo exótico, en la actualidad es producida de una forma más bien habitual e incluso con aplicaciones prácticas en campos como la medicina.

De todas formas, el estudio de la anti-materia es un campo de mucho crecimiento en la física fundamental y de partículas.

La anti-materia es todo material que está constituido principalmente de lo que se conoce como anti-partículas (Barnet, Muehry & Queen, 2000). Toda especie de partícula que conocemos tiene un “gemelo siniestro” idéntico en todo sentido, excepto en que tiene una carga eléctrica opuesta. La anti-partícula más famosa es el positrón, el compañero del electrón. Cuando una partícula se encuentra con su anti-partícula, estas se aniquilan, es decir que se desintegran produciendo un destello de luz.

Dirac y los anti-electrones

La historia del descubrimiento del positrón ha sido muy difundida y al menos en su versión más popular resulta fascinante. Según esta, las anti-partículas, en especial los positrones, fueron primeramente predichas por el físico británico Paul Dirac cuando estaba intentando combinar

dos de las más grandes ideas de la física del siglo XX: la teoría especial de la relatividad con la mecánica cuántica.

En el ámbito de la relatividad especial, la materia es un tipo de energía, y como toda energía, se puede transformar. De este modo, sería posible cambiar masa en radiación y viceversa. Hasta este punto, sería posible transformar una partícula con masa como el electrón, en una partícula de luz, es decir en un fotón. Sin embargo, el electrón tiene carga eléctrica, y el fotón no la tiene. Entonces surge la necesidad de alguna partícula que permita conservar la carga eléctrica en este proceso, es decir una partícula con las mismas características del electrón, pero con carga eléctrica opuesta (ver Imagen 1).

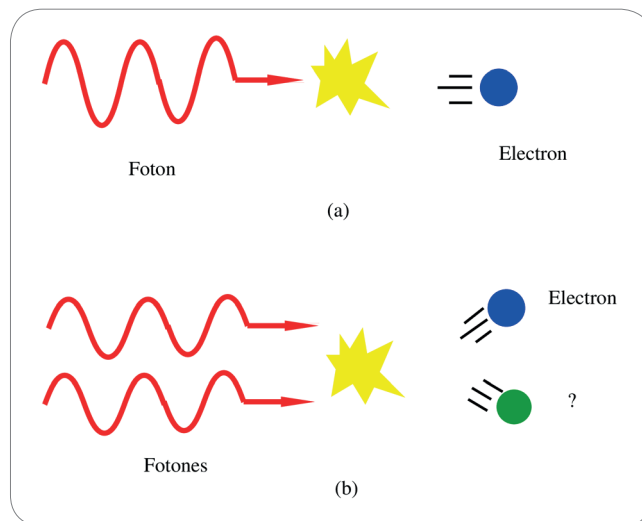


Imagen 1. La energía de un fotón podría transformarse en la masa del electrón. (a) Un solo fotón se transforma en un electrón. Este proceso no es posible porque no se conservan varias cantidades físicas entre ellas la carga. (b) Para que se conserve la carga y el momentum se necesitan dos fotones, que se pueden transformar en partículas con masa, una puede ser un electrón, pero la otra tiene que ser positiva para que se conserve la carga y la suma total de esta sea cero.

Los trabajos de Dirac desembocaron hacia el año de 1927 en una ecuación que describía el comportamiento cuántico del electrón en el marco de la relatividad especial. Al principio la ecuación tuvo mucho éxito, ya que reproducía el

comportamiento del electrón incluso en regímenes no relativistas y era capaz de predecir ciertas propiedades del mismo, como su espín y momento magnético. Además, se podría decir que la ecuación de Dirac guarda cierta estética y belleza matemática (Farmelo, 2010).

Sin embargo, hacia 1928 Dirac se encontró con una aparente inconsistencia en la ecuación. Esta predecía masas negativas, lo cual no parece tener mucho sentido si uno asocia la masa con la cantidad de materia de un objeto (siempre es positiva). A Dirac le tomó casi dos años dar con una explicación a este problema, aunque dicha explicación fue recibida con algo de escepticismo.

Para encontrar una forma de entender la explicación dada por Dirac, imagine que el vacío es análogo a una llanura muy extensa. Si se hace un gran agujero en el suelo, entonces la tierra que se sacó formará una gran pila, la cual aparecerá en el paisaje junto con el agujero. Si uno asocia el nivel del suelo con el nivel cero de energía, la pila, que se eleva sobre dicho nivel se puede asociar a una energía positiva, es decir a la partícula. Por otro lado, el agujero, se puede asociar a una energía negativa o una anti-partícula.

En lugar de imaginar una llanura, Dirac imaginó un mar, lo que ahora se llama el “mar de Dirac”. Las partículas con energía negativa se encontraban en una especie de mar, que es invisible a los niveles de energía normales. La idea es que cuando la partícula saltaba a niveles de energía normales, deja una especie de hueco, un faltante, que se constituye en la anti-partícula.

En busca de candidatos para la anti-partícula del electrón, Dirac propuso primero, al protón, la cual era la única partícula positiva conocida hasta ese momento. Dicha propuesta no fue recibida con entusiasmo, dada la diferencia de masas entre el electrón y el protón. El protón es alrededor de mil veces más pesado que el electrón.

Después, en su artículo sobre los monopolos magnéticos, Dirac propone la idea de lo que sería el positrón: una partícula idéntica al electrón, pero con carga eléctrica positiva. Posterior a esta publicación no hay evidencia que muestre que Dirac propusiera de forma activa la búsqueda experimental de la partícula que él había teorizado.

La prueba experimental de las anti-partículas fue encontrada tiempo después en la observación rayos cósmicos.

Estos rayos cósmicos son radiación tanto electromagnética como partículas, que caen a la atmósfera proveniente del espacio interestelar. Dicha radiación es de muy alta energía e interactúa con la atmósfera.

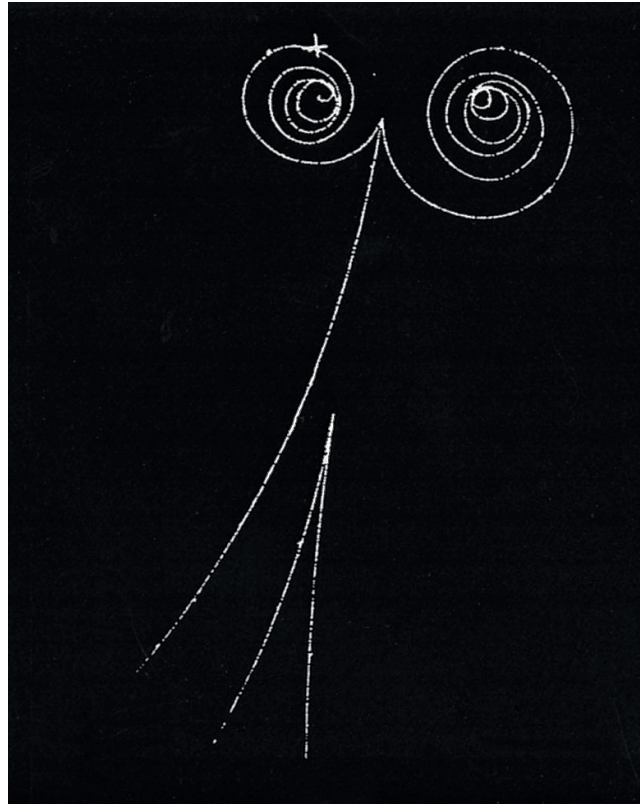


Imagen 2. Imagen en una cámara de niebla de la creación de un par electrón-positrón. Fuente Physics (2014).

Al chocar contra los átomos de los gases de la atmósfera, los rayos cósmicos producen nuevas partículas reacciones en cadena, lo que lleva cascadas que caen a la superficie terrestre. Entre toda la fauna de partículas que se producen hay positrones.

En 1932, una foto tomada con una cámara de niebla, dispositivo que permite visualizar las trayectorias de partículas cargadas, resultó, por casualidad, dando la evidencia de la existencia de las partículas “predichas” por Dirac. Consistía en una traza de una partícula con la misma masa y magnitud de carga del electrón, pero con carga positiva (Imagen 2). Dicha foto fue tomada por Carl Anderson del Instituto

Tecnológico de California. Al publicar sus resultados, Anderson no menciona la teoría de Dirac o algo similar. Posteriormente dicho descubrimiento sería asociado con los anti-electrones.

Actualmente son comunes las aplicaciones como la tomografía de emisión de positrones (PET por sus siglas en inglés), en la que una sustancia con la propiedad de emitir estas partículas

copiosamente y que es preparada de modo tal que puede ser metabolizada por el organismo, se utiliza para producir imágenes tridimensionales de cuerpo humano de manera no invasiva (Manabu, Itho, Fujimoto, Masud, Watanuki & Yanai, 2008).

El enigma de la anti-materia

La física que conocemos predice que al producir materia se debe producir una cantidad igual de anti-materia. Se esperaría que este fuera el caso de el Big Bang, lo que resulta en un problema, porque si hubiera igual cantidad de materia que de antimateria en el universo, toda partícula se aniquilaría con una correspondiente anti-partícula, llevando todo lo que conocemos a un colapso en un destello inmenso de energía pura.

Una de las claves de este misterio puede relacionarse con las simetrías en la naturaleza. Se esperaría que las leyes de la física fueran las mismas para las partículas que para las anti-partículas. Esto se conoce con la simetría de intercambio carga-paridad -CP (Sutton, s.f.). Sin embargo, en algunos casos particulares la naturaleza no gusta de obedecer esta ley. Un campo de investigación con mucha fuerza en la actualidad, consiste en estudiar si existe una relación entre la violación de la simetría CP en algunos fenómenos y el hecho de que en el universo la materia prevalece sobre la anti-materia.

Diversos experimentos han mostrado que algunas desintegraciones radiactivas no producen igual cantidad de partículas que de anti-partículas. Dichas desintegraciones están asociadas con la Interacción electro-débil descrita en el modelo estándar de partículas elementales.

Para entender dicha asociación, hay que saber que ciertas partículas sub-atómicas no son fundamentales sino que poseen estructura, es decir, que están compuestas por otras partículas, siendo estas últimas realmente fundamentales. Los protones, por ejemplo, tienen estructura conformada por lo que se conoce como "quarks". Estos quarks, interactúan a través de fuerzas electromagnéticas e interacciones fuerte y débil.

La fuerza electro-débil sobre los quarks, aparece actuando no en los quarks individuales sino en combinaciones de estos. En 1972 los físicos japoneses Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa

La física que conocemos predice que al producir materia se debe producir una cantidad igual de anti-materia

propusieron que dicha combinación, implicaría de manera natural la aparición de violación de simetría CP si se tuvieran al menos seis tipos de quarks.

Para la época se conocían cuatro, y de este modo se predijo la existencia de los quarks “bottom” en 1977 y “top” en 1992 (Ver Imagen 3).

MODELO ESTÁNDAR		LEPTONES		QUARKS	
Partículas presentes en la materia ordinaria.	Primera Familia	Electrón $m=0,51$ $q=-1$	Neutrino electrónico $m\sim 0$ $q=0$	Up $m=1,5-5$ $q=2/3$	Down $m=3-9$ $q=-1/3$
Partículas existentes poco después del Big Bang. Actualmente están presentes en los rayos cósmicos y se obtienen en los aceleradores de partículas.	Segunda Familia	Muón $m=105$ $q=-1$	Neutrino muónico $m\sim 0$ $q=0$	Charm $m=1100-1400$ $q=2/3$	Strange $m=60-170$ $q=-1/3$
	Tercera Familia	Tau $m=1.777$ $q=-1$	Neutrino tau $m\sim 0$ $q=0$	Top $m=170.000$ $q=2/3$	Bottom $m=4.100-4.400$ $q=-1/3$

$m = \text{masa en MeV}/c^2$ (MeV, millones de electronvoltios; c , velocidad de la luz)

Figura 3. Modelo estándar de partículas fundamentales. Los quarks top y bottom fueron encontrados gracias a que se necesitaban para poder explicar la violación de simetría CP. Fuente: Calle Ciencia (2012).

La simetría carga - paridad

La violación de simetría CP fue descubierta en 1964 por Cronin y Fitch en los laboratorios de Brookhaven en el estado de Nueva York. El sistema en el que se encontró fue en las partículas conocidas como mesones K_s y K_L . Estos son partículas neutras que consisten en un quark “down” y un quark “strange” (Christensen, Cronin, Fitch & Turlay, 1964).

Esta simetría es la combinación de dos simetrías fundamentales. La simetría de paridad supone que si en un sistema de coordenadas cambiáramos el signo de las coordenadas (cambiar x por $-x$) las leyes de la naturaleza deberían ser las mismas. Esto es lo mismo que

decir que las leyes de la naturaleza deberían ser las mismas si se cambia un sistema por su imagen en el espejo. La simetría de carga contempla que, si la carga eléctrica de las partículas se cambiara de positivo a negativo, el universo no sufriría ningún cambio.

Se ha encontrado comportamientos de violación de simetría CP en muchos otros sistemas desde entonces. Para realizar estos estudios, se producen partículas de todas las especies utilizando aceleradores de partículas y como se desintegran. Para estudiar los distintos comportamientos entre materia y anti-materia, se contabilizan las desintegraciones de partículas en un canal específico, y se compara el resultado con respecto al proceso análogo para las anti-partículas. Experimentos en el Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN, por sus siglas en francés) han mostrado resultados muy interesantes en este sentido.

Los últimos anuncios en este sentido muestran el fenómeno de violación de simetría CP en mesones D. Estos son partículas constituidas

por dos quarks, uno de ellos un quark “charm”. El 21 de marzo de 2019, la colaboración de científicos del experimento LHCb del CERN, publicó la observación de la violación de simetría CP para este sistema, respuesta que se esperaba desde el descubrimiento del quark “charm” en los años 70 (LHCb Collaboration, 2017).

El experimento ATLAS de LHC, colaboración a la que pertenece la Universidad Antonio Nariño, también ha contribuido a estos estudios, como por ejemplo encontrando muestras de violación de simetría CP en mesones B_c , los cuales son partículas con contenido de quark bottom (ATLAS Collaboration, 2012).

Aunque son muchos los casos de violación de simetría CP que se han encontrado desde los años 60 del siglo XX, todavía los parámetros de violación CP medidos no son suficientes para comprender la hegemonía de materia sobre anti-materia en el universo. Es por esto que hace falta más investigación para poder resolver esta inquietante pregunta.

En este sentido, surgen otras preguntas como, por ejemplo, si es distinto el efecto de la gravedad entre materia y anti-materia. Para esto se han construido nuevos experimentos en CERN, como ALPHA-g, dando lugar a átomos de anti-hidrógeno (Alpha, s.f.).

Todo este esfuerzo no solo permite avanzar a la ciencia. En lo que no se equivoca Dan Brown en *Ángeles y Demonios* es que la anti-materia puede servir como una nueva fuente de energía, poderosa y limpia. Como siempre, no sabemos a dónde llegaremos al hacernos este tipo de preguntas, pero siempre vale la pena tratarlas de responder.

Referencias

- Alpha (s.f.). Alpha experiment. Tomado de: [<http://alpha.web.cern.ch/>].
- ATLAS Collaboration (2012). CP Violation measurements with the ATLAS detector. *Nuclear Physics B*, Vol. 233.
- Barnet, R., Muehry, H. & Queen, H. (2000). *The Charm of Strange Quarks*. Oxford: Ed. Springer.
- Brown, D. (2017). *Ángeles y demonios*. España: Ed. Planeta.
- Calle Ciencia (2012). Estructura de la materia. Blog on line de divulgación científica. Disponible en: [<https://calle-ciencia.wordpress.com/tag/javier-cuevas-maestro-cern/>].
- Christensen J., Cronin J., Fitch V. & Turlay R. (1964). Evidence for the 2π decay of the K_0 Meson, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 13 (138).
- Farmelo, G. (2010). Did Dirac Predict the Positron? *Contemporary Physics*, Vol. 51 (2).
- LHCb Collaboration (2017). Measurement of Matter-Antimatter differences in beauty baryon Decays. *Nature Physics*, Vol. (13).
- Manabu, T., Itho M., Fujimoto T., Masud M., Watanuki S. & Yanai K. (2008). Application of positron emission tomography to neuroimaging in sports sciences, *Methods*, Vol. 45 (4).
- Physics (2014). Why does the spiral of a positron have a larger radius than that of an electron in this picture in a bubble chamber? Disponible en: [<https://physics.stackexchange.com/questions/95918/why-does-the-spiral-of-a-positron-have-a-larger-radius-than-that-of-an-electron>].
- Sutton, C. (s.f.). “CP Violation”, Enciclopedia Britannica. Tomado de: [<https://www.britannica.com/science/CP-violation>].