

Generación de positrones en una tormenta eléctrica por el proceso de desintegración beta (β^+) y su interacción con la materia

Diana Alexandra Sánchez-Sierra¹

Cómo citar este artículo:

Sánchez-Sierra, D. A. (2022). Generación de positrones en una tormenta eléctrica por el proceso de desintegración (β^+) y su interacción con la materia. Pre-Impresos Estudiantes, (22), 10-34.

Resumen

Las tormentas eléctricas son fenómenos atmosféricos con los que las personas se encuentran familiarizadas debido a su frecuencia, sin embargo, no muchos conocen los principios físicos que las rigen, ni los demás procesos que pueden llegar a surgir de ellas, como la generación de positrones por desintegración (β^+), que traen consigo serias consecuencias a la salud humana; por esta razón, es de gran importancia entender su comportamiento. El modelo de desintegración explica la generación de positrones, lo cual resulta crucial para validar la hipótesis de Wilson (1925) sobre las reacciones nucleares por desintegración que ocurren en el interior de una tormenta eléctrica. Con base en lo anterior, se realizará una breve descripción sobre la formación de una tormenta eléctrica, seguida de una explicación sobre la definición, la teorización y el descubrimiento del positrón, para luego dar paso a un recorrido por los diferentes estudios y conceptos como los RREA, los TGF, la radiación *bremstrahlung*, que permitieron validar la hipótesis de Wilson (1925), para finalizar con la manera en que se detectan dichos positrones

por medio de la aniquilación positrón-electrón y las consecuencias a la salud humana. Se concluye la importancia de estudiar dicho fenómeno atmosférico para la comprensión de los conceptos físicos y la prevención de someterse constantemente a dichas condiciones, como lo es el caso de los pilotos de avión, las azafatas y los pasajeros de avión.

Palabras clave: aniquilación positrón-electrón; *bremstrahlung*; desintegración beta; RREA; TGF

Abstract

A thunderstorm is an atmospheric phenomenon that people are familiar with due to its frequency. However, not many are aware of the underlying physical principles that govern it, nor the other processes that can arise, such as the generation of positrons through β^+ decay, which can have serious consequences for human health. Therefore, it is of great importance to understand its behavior. The decay model explains the generation of positrons, which is crucial for validating the hypothesis proposed by Wilson (1925)

¹ Estudiante de Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional. Miembro activo de diversas actividades académicas y de divulgación científica, incluyendo conferencias y talleres. Destacada participación como monitora en cursos de Mecánica II y Electromagnetismo II. Su compromiso y dedicación reflejan su vocación como futura maestra de física. dasanchezs@upn.edu.co

regarding nuclear reactions through decay that occurs within a thunderstorm. Based on this, a brief description of thunderstorm formation will be provided, followed by an explanation of the definition, theorization, and discovery of the positron. This will be followed by an exploration of various studies and concepts such as Relativistic Runaway Electron Avalanches (RREA), Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF), and Bremsstrahlung radiation, which allowed the validation of Wilson's hypothesis. Finally, the detection of these positrons through positron-electron annihilation and the resulting consequences for human health will be discussed. In conclusion, it is essential to study this atmospheric phenomenon for the understanding of physical concepts and the prevention of constant exposure to such conditions. This is particularly relevant for professionals such as pilots, flight attendants, and airplane passengers.

Keywords: RREA; TGF; Bremsstrahlung; beta decay; positron-electron annihilation

Introducción

En los fenómenos de la naturaleza, nos encontramos con una amplia variedad de sucesos intrigantes y misteriosos, como los huracanes, terremotos, erupciones volcánicas, etc. Estos despiertan nuestra curiosidad y nos llevan a plantearnos preguntas acerca de sus orígenes y causas subyacentes.

Afortunadamente, contamos con herramientas como teorías científicas y planteamientos lógicos para abordar estas preguntas y buscar respuestas fundamentadas. Estas teorías y enfoques lógicos nos permiten examinar el comportamiento de los fenómenos naturales, analizando sus patrones, procesos y principios. Esto por medio de explicaciones que se basan en la observación, experimentación y análisis riguroso de datos recopilados a lo largo del tiempo.

Si analizamos la física que podemos encontrar al interior de una tormenta eléctrica, y pensamos

en el resplandor de un rayo o el sonido de un trueno, notaremos que hay una serie de explicaciones que podemos dar al ¿cómo sucede?, y al ¿por qué sucede esto?, y si nos adentramos más a fondo, nos encontraremos con la grata sorpresa de que en el interior de estas tormentas eléctricas hallaremos otra serie de fenómenos particulares, tales como la avalancha de electrones relativistas fugitivos (RREA), los rayos gamma terrestres (TGF), y el proceso de generar positrones por desintegración beta (β^+).

La comprensión de estos fenómenos son de gran interés, ya que la constante interacción que mantenemos con la naturaleza ha llevado a numerosos pensadores a cuestionarse su funcionamiento, lo que ha permitido el desarrollo de herramientas para predecir los cambios climáticos y adaptarse a los posibles peligros que puedan surgir, de tal manera se explica físicamente cómo se comporta una tormenta eléctrica, y se descubre que al interior de esta se generan procesos de desintegración nuclear que liberan energía en forma de rayos X y rayos gamma, que son perjudiciales para la salud del ser humano. Adicionalmente, se crean antipartículas que por lo general se hallan en aceleradores de partículas construidos por la humanidad, mientras que una tormenta eléctrica las aceleraría de forma natural.

Aunque por muchos años se describió la generación de positrones por medio de la producción de pares, hace poco tiempo se ideó un nuevo modelo, este explica que los positrones se obtienen por medio de radioisótopos como ^{13}N o ^{15}O , ya que por mucho tiempo se realizaron estudios sobre obtención de neutrones en tormentas eléctricas (Carlson *et al.*, 2010; Babich *et al.*, 2014), lo que llevó a cuestionar sobre ¿qué sucedía con los elementos que perdían estos neutrones?, y se concluyó que se convertían en átomos inestables, que liberan un neutrino electrónico, un positrón, y un elemento estable que cambiaría debido a la variación del número de protones (Enoto *et al.*, 2017).

Para poder comprender completamente cómo surge dicho fenómeno es esencial conocer las condiciones iniciales que permiten el desarrollo de este, por tal motivo se describe la formación de una tormenta eléctrica hasta llegar a su etapa de madurez.

Formación de una tormenta eléctrica

Si nos preguntamos, ¿cómo se genera una tormenta eléctrica?, partiremos de que en la superficie de la tierra, el aire se calienta debido a la constante radiación del sol en el planeta; al aumentar de temperatura, el aire se expande y comienza a ascender, ya que su densidad será menor a la del aire que lo rodea, y a medida que va ascendiendo se va enfriando porque a mayor altura, menor será la temperatura. Cuando el aire comienza a subir por la atmósfera (10 km-15 km) su vapor de agua se comenzará a condensar, y se formarán pequeñas gotas que, a causa de las bajas temperaturas ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$) comenzarán a cristalizarse y formarán pequeños trozos de hielo.

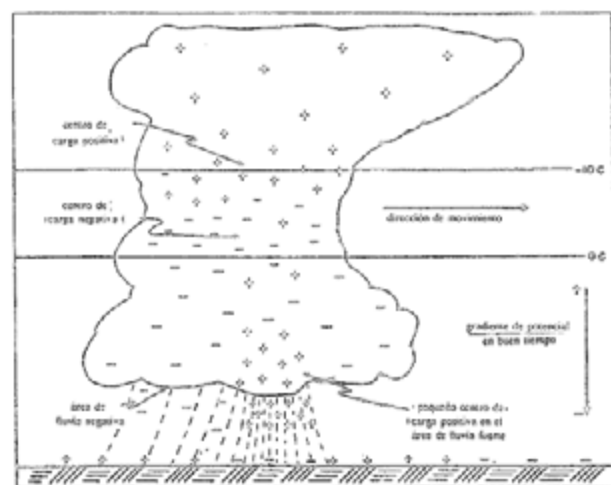
Cuando la cantidad de hielo se hace mayor, la densidad de este hace que la corriente de aire ascendente no lo pueda sostener y comienzan a caer, de esta manera se genera una corriente de aire frío descendente que da origen a la precipitación de la lluvia; es en este momento cuando comienzan los fenómenos eléctricos en el interior de las nubes.

De esta manera se modela que al tener dentro de la nube gotas de agua y de hielo que están sometidas a un campo eléctrico generado por la interacción entre iones de la atmósfera, estas adquirirán una carga que las posicionará en algún polo de la tormenta eléctrica (Feynman y Leighton, 1998). Si pensamos en la nube como una batería gigante, encontraremos que la base de la nube tiene una carga negativa, y la parte

superior de esta una carga positiva. Es importante mencionar que el tipo de nubes en las que suceden las tormentas eléctricas son las conocidas cumulonimbos, que al ser tan altas y cargar con tanta agua en su interior son muy densas y adquieren ese peculiar color gris oscuro a negro, ya que la luz no logra pasar a través de ellas.

Ahora bien, si pensamos en las gotas de agua con una dipolaridad (dos polaridades) que, al chocar con un ion de la atmósfera cargado negativamente, la gota quedará cargada negativamente, por lo tanto, se verá atraída a posicionarse en la base de la nube, esto pasa de la misma manera con el hielo, y la parte superior de la nube estará llena de iones positivos o algunos fragmentos de hielo y agua que lleguen a quedar cargados positivamente. Para simplificar lo que acabamos de decir, la nube adquiere una di polaridad debido a la interacción de las gotas de agua y los trocitos de hielo con los iones, de esta manera el agua y el hielo serán partículas más pesadas que se encuentran en la base de la nube, mientras que las partículas más livianas, que quedan con carga positiva terminarán en la parte superior de esta.

Figura 1. Distribución de cargas eléctricas en una nube de tormenta eléctrica

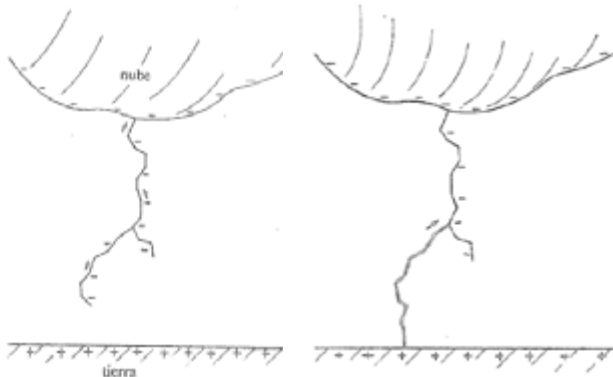


Fuente: adaptado de Feynman y Leighton (1998).

Al cargarse la nube de esta manera, induce al suelo a cargarse positivamente, debido a que la diferencia de potencial que se da entre la nube y el suelo busca que el sistema se encuentre en equilibrio (figura 1).

Esta diferencia de potencial va a hacer que las cargas se sientan atraídas, de esta manera comienza a descender desde el cielo una guía, donde los electrones que se encuentran en la base de la nube viajan a altas velocidades de manera escalonada ionizando el aire a su paso, hasta llegar al suelo y crear un camino conductor, como el aire es un gas ionizado este será considerado un plasma, y en el momento que las cargas del suelo comienzan a subir por este hilo conductor de electrones (rayo de retorno), los átomos y moléculas del aire ionizado comenzarán a excitarse, y al regresar a su estado original liberarán energía en forma de fotones, cuyo intenso resplandor es el que vemos en una tormenta eléctrica. Este primer rayo es tan solo el predecesor a otra serie de descargas eléctricas que surgen y que generan más rayos (figura 2).

Figura 2. Descarga guía escalonada-Rayo de retorno.
Distribución de cargas eléctricas en una nube de tormenta eléctrica



Fuente: adaptado de Feynman y Leighton (1998).

Ya que el rayo genera un aumento de temperatura en el aire, el volumen del gas se expandirá a gran velocidad, pero llega un punto en el

que el aire circundante es demasiado frío, por lo tanto, el volumen del aire disminuirá, es la expansión y la rápida contracción del aire la que genera ondas de choque, que es aquel ensordecedor sonido que escuchamos, el trueno.

Una vez que entendemos el modelo más básico de cómo se genera un rayo, podemos nombrar que los rayos no se dan solo de esta manera, podemos encontrarlos entre una nube y otra, en el interior de una nube, o entre la nube y el aire, y comprender que funciona bajo el mismo principio.

Positrones

Antes de profundizar con la manera en que se generan positrones en una tormenta eléctrica, es necesario exponer quién descubrió estas partículas, y cuáles son algunas de sus características.

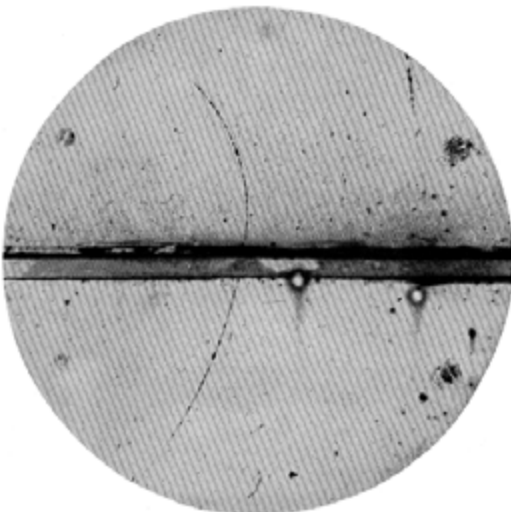
A lo largo de los años, la construcción de las teorías científicas no ha sido un proceso lineal y continuo, por el contrario fueron procesos investigativos con errores y vacíos, que necesitaron de tiempo y trabajo para poder llegar a ser concluidos correctamente. Uno de estos casos fue la teoría descrita por Dirac (1931), quien fue capaz explicar el movimiento de las partículas desde la energía relativista, siguiendo el trabajo que Schrödinger (1926) había hecho sobre el movimiento de estas a través de la función de onda desde el concepto de energía clásica.

Dirac (1928) publicó *The quantum theory of the electron*, el que llega a una ecuación que da como resultado los posibles niveles de energía del electrón, donde dos de ellas son negativas y las otras dos son positivas, aunque en un primer lugar él creía que la solución a su ecuación tenía ciertos errores por la obtención de energías negativas, al final concluyó que era inevitable deshacerse de ellas y fue cuando ideó lo que se conoce como “el mar de Dirac”, en este plantea que si todos los electrones en el espacio tienen una energía negativa, y alguna de estas partículas adquiere energía positiva, quedará un hueco

que describe el movimiento de partículas con carga positiva, por lo tanto, establece que estos huecos deben ser protones. Pero más adelante, cuando Dirac realiza el proceso de aniquilación entre un protón y un electrón, descubre que estos no se aniquilan debido a la diferencia de las masas de las partículas y no cumplirían con la conservación de la energía, es por esta razón que Dirac (1931) publicó *Quantised singularities in the electromagnetic field*, donde el hueco en el mar de Dirac debe ser en realidad una partícula con la misma masa y espín que el electrón pero con carga opuesta a la del electrón (positrón).

Fue Anderson (1933) quien tomó una fotografía en la cámara de ionización, pues intentaba detectar huellas de los rayos cósmicos y se encontró con la denominada partícula positrón, esto dio la validez a la teorización de la antipartícula que predijo Paul Dirac unos años atrás (figura 3).

Figura 3. Un positrón de 63 millones de voltios ($H_p = 2.1 \times 10^5$ gauss-cm) pasando a través de una placa de plomo de 6 mm y emergiendo como un positrón de 23 millones de voltios ($H_p = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm)



Fuente: tomado de Anderson (1933, p. 2).

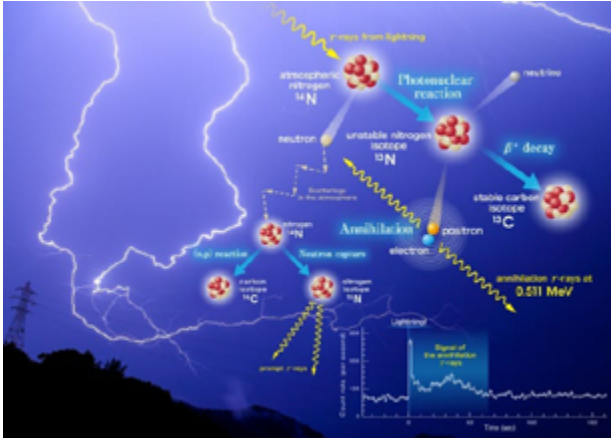
Surgimiento de positrones en la descarga de un rayo

Ahora sí podremos analizar los procesos de desintegración nuclear y el origen de positrones que se dan en la tormenta eléctrica. Si pensamos en la cantidad de electrones libres que hay en la tormenta debido a los constantes choques entre las partículas de polvo, agua y trozos de hielo, podemos asumir que estos comenzarán a acelerarse a grandes velocidades cercanas a la luz, por el campo eléctrico que existe en el interior de la nube. Como consecuencia, las partículas relativistas (e^-) ganarán cantidades de energía muy grandes, y cuando se ven atraídas al núcleo positivo de las moléculas de aire, estas cambiarán de trayectoria y, por lo tanto, frenarán y perderán energía que será liberada en forma de rayos gamma o rayos X, a este fenómeno se le conoce como radiación de frenado o *bremstrahlung*.

Este fenómeno de aceleración de electrones sucede en gran cantidad, lo que nos da como resultado una serie de rayos gamma en el interior de la tormenta, que al interactuar con un átomo de nitrógeno (^{14}N) del aire hará que se separe un neutrón (n) de este, por lo tanto el ^{14}N se transformará en un isotopo inestable ^{13}N que buscará volverse estable, y si sabemos que ^{14}N tiene 7 protones (p) y 7 neutrones (n), cuando este se vuelva inestable quedarán 7 protones y 6 neutrones; de esta manera, ese protón extra se transformará en un neutrón para volver estable el átomo, y contará con 6 protones y 7 neutrones, pero claro, al cambiar el número de protones, obtendremos un átomo diferente al nitrógeno y este es un carbono (^{13}C), por lo tanto, el proceso de desintegración beta (β^+) consistirá en que un protón se transformará en un neutrón en donde a su vez se emitirá un positrón, un neutrino eléctrico y un elemento atómico estable (Enoto *et al.*, 2017).

De esta manera, observaremos que el decaimiento beta (β^+) es aquel que libera positrones en el proceso de una descarga de electrones en una tormenta. En la figura 4 se muestra el modelo de lo que se describió anteriormente.

Figura 4. Reacciones fotonucleares por la descarga de un rayo



Fuente: adaptado de Kyoto University (2017).

Interacción de los positrones con los electrones

Es interesante pensar de qué manera se sabe que dichos positrones se encuentran en la atmosfera; lo anterior se debe a los diferentes detectores espaciales, aéreos o terrestres, que funcionan bajo el principio de analizar los datos de energías que reciben. Aunque existen varios tipos de detectores de rayos gamma, el más común es el detector de centelleo, que consta de un cristal o material escintilante, como el yoduro de sodio o el germanato de gadolinio, que emite luz visible cuando es golpeado por un fotón de rayos gamma. La luz emitida es recogida por un fotomultiplicador, que convierte la luz en un pulso eléctrico que puede ser registrado y medido por un sistema de adquisición de datos, y así se logra identificar el valor de 0,511 mega electronvoltios que describe la energía que posee un positrón.

Pero estos detectores no perciben la energía de la partícula en sí, sino que cuando se tienen los positrones en la tormenta eléctrica debido a la desintegración beta (β^+), este en algún momento chocará con un electrón relativista de la avalancha de electrones, cuando un electrón choca con un positrón, sucede lo que se denomina aniquilación entre una partícula de materia y una de antimateria, de esta manera, toda la energía que tiene cada partícula en el choque se transforma en dos rayos gamma del valor mencionado, se aniquilan por completo las partículas y se obtienen rayos gamma con energías asociadas a dichas partículas.

A continuación, se puede observar que la energía de los rayos corresponde al valor de las partículas, como ya se sabe la energía relativista que tiene una partícula es:

$$E=mc^2$$

Por lo tanto, si conocemos el valor de la masa de un electrón que es igual a un positrón, ya que ambos tienen misma masa, pero diferente carga, podremos sustituir los valores junto con su velocidad, y recordemos que estas partículas están siendo aceleradas a velocidades cercanas a la de la luz debido al fuerte campo eléctrico de la tormenta.

$$m_{electron}=9,1093837015 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$c=299792458 \text{ m/s}$$

Reemplazando los valores obtendremos el siguiente resultado:

$$E=8,187105777 \times 10^{-14} \text{ J}$$

$$E=510998,6983 \text{ eV}=0,511 \text{ MeV}$$

De esta manera, logramos determinar que la cantidad de energía que es detectada de los rayos gamma en el interior de la tormenta coincide con el valor de energía relativista que puede llegar a tener la partícula del positrón o el electrón.

Predicción de Charles Thomson Rees Wilson

El físico Wilson (1925) publicó un artículo titulado *The acceleration of β -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds*, en el que habla sobre la aceleración de electrones a velocidades cercanas a la de la luz (RREA-relativistic runaway electron avalanche), debido a la intensidad de los campos eléctricos en el interior de una tormenta, en esta explicación genera una hipótesis que dice que estos electrones acelerados, al chocar con un núcleo atómico, pueden dar paso a generar reacciones nucleares del tipo de desintegración.

Debido a la época en la que se generó la hipótesis, nunca se pudo comprobar si esta era cierta o no, ya que no se tenían detectores atmosféricos de partículas.

A continuación, haremos un importante recorrido histórico sobre la detección de rayos gamma y cómo esta serie de estudios nos llevarán a uno en particular que válida la hipótesis que Charles Wilson propuso en el artículo antes mencionado.

En 1994, el físico Fishman y otros científicos publicaron un artículo titulado *Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin*, en este trabajo hablan del proyecto BATSE (Burst and Transient Source Experiment) de la NASA, cuyos detectores se encontraban en el observatorio CGRO (Compton Gamma Ray Observatory). Fishman *et al.* (1994) explican la observación de los datos obtenidos por el detector, y establecen que los resultados de los niveles energéticos de rayos gamma terrestres (TGF) se asocian con el evento de una tormenta eléctrica. Siendo esta la primera investigación que reportó energías de rayos gamma asociadas a la descarga de una tormenta eléctrica.

Seis años después de este inesperado descubrimiento, el físico Aleksandr (Alex) Viktorovich Gurevich, junto a otros científicos, publica: *Generation of electron-positron pairs in runaway breakdown* (Gurevich *et al.*, 2000); en este artí-

culo desarrollan la teoría cinética del fenómeno denominado como ruptura fugitiva o mejor conocido como avalancha de electrones fugitivos relativistas (RREA) que había sido descrita por Gurevich previamente (Gurevich *et al.*, 1992), pero adicional a ello y en lo que compete al análisis de la generación de positrones, determinan una relación matemática para saber el número de pares positrón-electrón que puede haber en una tormenta con base en la recolección de datos sobre los fotones emitidos en la aniquilación de estos (Gurevich *et al.*, 2000).

El primer estudio en establecer un modelo para la generación de positrones en una tormenta eléctrica se publicó en un artículo titulado: *High-energy electron beams launched into space by thunderstorms*, dirigido por Dwyer *et al.* (2008); en este explican que los TGF o rayos gamma terrestres al chocar con algún átomo de la atmosfera se producirían positrones y electrones debido a la producción de pares.

En 2011 Briggs *et al.* descubrieron y publicaron en un artículo titulado *Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with fermi GBM* que en el detector GBM (Gamma-ray Burst Monitor) que se encontraba en el telescopio espacial de rayos gamma-Fermi, valores de 0,511 MeV que coincidían con el valor energético en un proceso de aniquilación entre un positrón y un electrón, ellos explican que la manera en que estos positrones surgen se debe a la producción de pares.

En 2015 se publicó el artículo *Positron clouds within thunderstorms*, dirigido por Dwyer *et al.* (2015), en este se explicaba como un jet privado ADELE (Airborne Detector for Energetic Lightning Emissions) cuenta con 6 detectores, que al volar en el interior de una tormenta eléctrica lograron tomar datos de energías de 0,511 MeV que se originaban entre dos nubes de tormenta, este artículo, al igual que el anterior, explica que la obtención de positrones asociados a las energías detectadas se dan debido a la producción de pares.

Por último, tenemos la publicación *Photonuclear reactions triggered by lightning discharge*, de Enoto *et al.* (2017), en el que él y su grupo de investigación realizaron una serie de detectores terrestres que dispusieron en ciertos puntos de la costa del mar de Japón, con estos lograron detectar energías de 0,511 MeV. Como ya se sabía, esta energía explicaba la existencia de positrones en las tormentas eléctricas. Lo interesante de este trabajo fue la ilustración del modelo de obtención de positrones que fue explicado en uno de los apartados del presente artículo.

Acá el modelo de generación de positrones es la desintegración beta más, con esto se puede evidenciar que la hipótesis que generó Charles Wilson en el año 1925 era cierta.

Consecuencias

Debido a la cantidad de energía en forma de rayos gamma que se genera en una tormenta eléctrica, se pone en evidencia la afectación directa al ser humano, por ejemplo, muchos aviones viajan a altitudes donde pasan por medio de tormentas eléctricas (Dwyer *et al.*, 2010; Stephan y Shmatov, 2021), y como es conocido, el cuerpo humano no debe ser sometido a radiación de alta energía, ya que esta puede llegar a causar una mutación en el ADN, que genere el crecimiento de tumores y aumente la posibilidad de desarrollar cáncer. Adicional a esto, se han realizado estudios que analizan los daños que causan los rayos gamma en los componentes de los aviones (Tavani *et al.*, 2013), por tal razón, se han probado ciertos materiales para la construcción de los aviones que pueden disminuir la radiación que reciben pilotos, azafatas y tripulantes (Perdana *et al.*, 2016).

Conclusiones

La generación positrones en una tormenta eléctrica por el proceso de desintegración es un claro ejemplo de que las tormentas eléctricas pueden ser aceleradores de partículas naturales, y que la gran cantidad de energía que en ellas surge es de importante entendimiento por la afectación al ser humano.

Aunque las tormentas eléctricas son un fenómeno que conocemos de nuestro día a día, ya que se originan con frecuencia en todo el mundo, realmente muy pocos entendemos los conceptos físicos que describen la formación de estas, y con ello las serias consecuencias que pueden llegar a traer a nuestra salud, por lo tanto, se vuelve importante dar a conocer dichos procesos de desintegración con el objetivo de informar a la sociedad.

Hoy en día, el estudio de la atmosfera y de las tormentas eléctricas sigue vigente, ya que es de gran importancia predecir y abordar el comportamiento del clima para poder tomar medidas de protección frente a catástrofes ambientales, como los huracanes, las erupciones de volcanes, las tormentas eléctricas.

De esta manera, se espera dar a conocer a los lectores un fenómeno natural que acontece sobre sus cabezas, para que se conozcan de las serias consecuencias que este puede llegar a producir, y los principios físicos que describen su comportamiento.

Referencias

Anderson, C. D. (15 de Marzo de 1933). *The Positive Electron*. Obtenido de Physical Review Journals Archive Published by the American Physical Society. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.43.491>

- Babich, L. P., Bochkov, E. I., Kutsyk, I. M., & Rassoul, H. K. (13 de Mayo de 2014). *Analysis of fundamental interactions capable of producing neutrons in thunderstorms*. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.89.093010>
- Brigg, M. S., Connaughton, V., Wilson-Hodge, C., Preece, R. D., Fishman, G. J., Kippen, R. M., . . . Smit, D. M. (20 de Enero de 2011). *Geophysical Research Letters*. GBM. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010GL046259>
- Carlson, B. E., Lehtinen, N. G. & Inan, U. S. (21 de Abril de 2010). *Neutron production in terrestrial gamma ray flashes*. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2009JA014696>
- Dirac, P. (1 de Septiembre de 1931). *Journal Article*. <https://www.jstor.org/stable/95639>
- Dirac, P. A. (1 de Febrero de 1928). *The Quantum Theory of the Electron*. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1928.0023>
- Dwyer, J. R., Grefenstette, B. W. & Smith, D. M. (31 de Enero de 2008). *High-energy electron beams launched into space by thunderstorms*. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2007GL032430>
- Dwyer, J. R., Smith, D. M., Hazelton, B. J., Grefenstette, B. W., Kelley, N. A., Lowell, A. W., . . . Rassoul, H. K. (5 de junio de 2015). *Cambridge Core*. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-plasma-physics/article/positron-clouds-within-thunderstorms/652DE2A444195FEC39307E9825E5A6D3>
- Dwyer, J. R., Smith, D. M., Uman, M. A., Saleh, Z., Grefenstette, B., & Hazelton, B. (15 de Mayo de 2010). *Estimation of the fluence of high-energy electron bursts produced by thunderclouds and the resulting radiation doses received in aircraft*. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2009JD012039>
- Enoto, T., Wada, Y., Furuta, Y., Nakazawa, K., Yuasa, T., Okuda, K., . . . Tsuchiya, D. U. (01 de Noviembre de 2017). *Nature*. <https://www.nature.com/articles/nature24630>
- Feynman, R. & Leighton, R. (1998). Lecciones de física de Feynman Volumen II. En R. Feynman, & R. Leighton, *Física Volumen II: Electromagnetismo y materia* (págs. 84-93). Addison Wesley.
- Fishman, G. J., Bhat, P. N., Mallozzi, R., Horack, J. M., Koshut, T., Kouveliotou, C., . . . Christian, H. J. (27 de mayo de 1994). *Science*. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.264.5163.1313>
- Gurevich, A., Carlson, H., Medvedev, Y. & Zybin, K. (2 de Octubre de 2000). *Generation of electron-positron pairs in runaway breakdown*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375960100005582>
- Gurevich, A., Milikh, G. & Roussel-Dupre, R. (01 de Junio de 1992). *Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037596019290348P>
- Perdana, I., Al-Hadi, A. & Bukhari, M. (20 de Mayo de 2016). *The Shielding Materials from EM Radiation for Aircraft Fuselage*. <https://www.scientific.net/MSF.857.598>

- Schrödinger, E. (1926). *Quantisierung als Eigenwertproblem*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19263840404>
- Stephan, K. D. & Shmatov, M. L. (29 de Junio de 2021). *Hazards to Aircraft Crews, Passengers, and Equipment from Thunderstorm-Generated X-rays and Gamma-Rays*. <https://www.mdpi.com/2673-592X/1/3/15>
- Tavani, M., Argan, A., Paccagnella, A., Pesoli, A., Palma, F., Gerardin, S., . . . Giommi, P. (30 de Abril de 2013). *Possible effects on avionics induced by terrestrial gamma-ray flashes*. <https://nhess.copernicus.org/articles/13/1127/2013/>
- University, K. (27 de Noviembre de 2017). *Lightning, with a chance of antimatter*. <https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research-news/2017-11-27-0>
- Wilson, C. R. (1925). *Cambridge Core*. Obtenido de The Acceleration of β -particles in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds: <https://www.cambridge.org/core/journals/mathematical-proceedings-of-the-cambridge-philosophical-society/article/abs/acceleration-of-particles-in-strong-electric-fields-such-as-those-of-thunderclouds/546F772689DBAC8F6FC76C1201453E78>