GENERACIÓN DE POSITRONES EN UNA TORMENTA ELÉCTRICA: UNA APROXIMACIÓN AL PROCESO DE DESINTEGRACIÓN BETA (β^+)

Diana Alexandra Sánchez Sierra

Línea de Profundización II

La Enseñanza de la Física y la Relación Física Matemática

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

Bogotá 2024

GENERACIÓN DE POSITRONES EN UNA TORMENTA ELÉCTRICA: UNA APROXIMACIÓN AL PROCESO DE DESINTEGRACIÓN BETA (β^+)

Diana Alexandra Sánchez Sierra

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN FÍSICA

Asesor:

Fernando Isidro Espitia Castañeda

Línea de Profundización II

La Enseñanza de la Física y la Relación Física Matemática

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

Bogotá 2024

“El científico no estudia la naturaleza porque le es útil; la estudia porque se deleita en ella y se deleita porque es hermosa. Si la naturaleza no fuera hermosa, no valdría la pena conocerla, y si la naturaleza no valiera la pena conocerla, no valdría la pena vivirla”

Henri Poincaré

Agradecimientos

A todos aquellos que creyeron en mi proceso, mi capacidad y mi dedicación, les estoy profundamente agradecida, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida.

Para comenzar me gustaría mostrar mi más sincera muestra de gratitud al profesor Fernando, quien me aconsejo, corrigió y dirigió a lo largo de este proyecto, y que sin su ayuda no hubiera obtenido el resultado que hoy presento. A la profesora Sandra por su acompañamiento en todo mi recorrido como estudiante, por su excelente trabajo, y por su dedicación día a día con el propósito de formar excelentes licenciados en física. Al grupo de investigación GRIFO, y a sus docentes directores, que fueron una guía en mi proceso de desarrollo escritural y de oratoria, les estoy muy agradecida.

En seguida le expreso enorme gratitud a mis amigos Leonardo y Juanes quienes, a su manera, me ayudaron a desarrollar no solo mi pensamiento como persona, sino que me demostraron que del trabajo en equipo se obtienen resultados impresionantes, a Leo por estar presente durante todos estos años como amigo incondicional y compañero, y a Juan por su paciencia y cariño, les ofrezco mi admiración y afecto.

A aquellas personas a las que considero las más importantes, mi familia, cada motivación para realizar este trabajo surge del enorme amor y compresión que recibí de todos y cada uno de ellos, por todo lo que me han enseñado y me han ayudado les estoy infinitamente agradecida, a mi hermana quien estuvo conmigo en todo mi proceso, quien me ha visto crecer como persona y licenciada le quiero dar el mérito de haberme ayudado en más de una ocasión a hacer este proceso más fácil y ameno, a mi madre, quien siempre se ha mostrado orgullosa de la persona y estudiante que soy, y quien ha hecho todo esto posible, les entrego este trabajo, como muestra de gratitud, y promesa de que esto es solo el comienzo.

Por último, y no menos importante expreso con orgullo y felicidad mi propio trabajo, mi intensidad y mi determinación por haber culminado con éxito esta tesis, por haber tomado las mejores decisiones, y por permitirme enamorarme profundamente de mi carrera como licenciada y como física.

Tabla de contenido

Introducción 10

Capítulo I: Problema de Investigación 11

1.1. Contexto Problemático 11

1.2. Objetivos 14

1.2.1. Objetivo General 14

1.2.2. Objetivos Específicos 14

1.3. Antecedentes 14

Capítulo II: Revisión Histórica 16

2.1. Historia de la Desintegración Radioactiva y Decaimiento Beta 16

Capítulo III: Formación y Procesos en una Tormenta Eléctrica 29

3.1. Análisis de la Formación de una Tormenta Eléctrica 29

3.1.1 Atmósfera Terrestre 29

3.1.2 Formación y Distribución Eléctrica de la Nube 30

3.1.3 Campo Eléctrico de la Tormenta 32

3.1.4 Descarga de un Rayo 34

3.2. Avalancha de Electrones Relativistas Fugitivos 35

3.3. Destellos de Rayos Gamma Terrestres 37

3.3.1. Destellos de Rayos Gamma Terrestres Descendentes 39

Capítulo IV: Desintegraciones en una Tormenta Eléctrica y sus Posibles Consecuencias a la Salud Humana 42

4.1. Consideraciones Iniciales sobre las Desintegraciones 42

4.2. Generación de Positrones por la Descarga de un Rayo 53

4.3. Análisis de Datos Energéticos GROWTH y su Afectación a la Salud 57

Una Propuesta para la Enseñanza del Proceso de Desintegración Beta (β^+) 62

Conclusiones 76

Bibliografía 77

Lista de Tablas

Tabla 3.1. Composición del aire seco de la atmósfera. Adaptado de “Física: curso teórico-práctico de fundamentos físicos de la ingeniería” por F.J. Gálvez, R. López, A. Llopiz, C. Rubio, 1998, Editorial Tébar Flores, p. 456.

Tabla 4.1. Datos de Radiación Gamma del programa GROWTH-2017. Adaptado de “Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges” por Yuki Wada, 2021, Springer Theses.

Tabla 4.2. Efectividad Biológica Relativa según cada radiación. Adaptado de “Physics with Health Science Applications” por Robert Tremblay y Paul Peter Urone, 2017, Kendall Hunt Publishing.

Tabla 4.3. Factores de Absorción Biológica. Adaptado de “Sources and Effects of Ionizing Radiation” por United Nations Scientiffic Committe on the Effects of Atomic Radiation, 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes.

Tabla 4.4. Conversión de unidades de la tabla 4.1 (Mega electronvoltios a Joules). Adaptado de “Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges” por Yuki Wada, 2021, Springer Theses.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Comportamiento de radiación α, β, γ en un campo eléctrico y magnético. Tomado de "HyperPhysics" por Nave, Rod. (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/radact.html)

Figura 2.2a Tabla sobre el decaimiento de isótopos según la Ley Periódica de Soddy. Adaptada de "The origins of the conceptions of isotopes" por Frederick Soddy, 1922, Nobel Lecture

Figura 2.2b Tabla actual de nucleidos, con el ejemplo del Torio-232. Tomada de "Thorium Series" por NuclearPower, 2024, https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radioactive-decay/radioactive-decay-chain/radioactive-series- radioactive-cascade/thorium-series/

Figura 2.3a Espectros de energía discretos para las emisiones de desintegración α y γ. Emisiones de partículas alfa, para los isótopos Polonio-209, Plutonio-239, Polonio-210 y Americio-241. Tomado de "Alpha-particle spectroscopy" por Wikipedia, 2006, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha1spec.png

Figura 2.3b Espectros de energía discretos para las emisiones de desintegración α y γ. Emisiones de radiación gamma, para el isotopo Cobalto-60. Tomado de "Gamma ray" por Wikipedia, 2021, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:60Co_gamma_spectrum_energy-de.svg

Figura 2.4. Distribución energética de electrones en la desintegración Beta del isótopo Radio E (Bismuto-210). Tomado de "The average energy of disintegration of radium E" por Ellis, S. C. D., y Wooster, W. A., 1927, Royal Society.

Figura 2.5. Espectro energético general de las partículas beta. Representación de un valor aleatorio de la energía del electrón, y su energía restante asignada al neutrino. Adaptado de "Radioactivity Introduction and History, From the Quantum to Quarks Second Edition" por L'Annunziata, Michael F., 2016, Elsevier.

Figura 2.6a Representación del momento lineal de los "dos" productos de la desintegración beta, antes de la teorización del neutrino. Tomado de "Conservación del momento lineal: el descubrimiento del neutrino" por Teresa Fernández Caramés, 2019, Diarium-blog de la Universidad de Salamanca.

Figura 2.6b Ilustración de la no conservación del momento lineal de los "dos" productos de desintegración. Adaptado de "Conservación del momento lineal: el descubrimiento del neutrino" por Teresa Fernández Caramés, 2019, Diarium-blog de la Universidad de Salamanca.

Figura 3.1a Dirección del campo eléctrico en la atmósfera en condiciones normales (antes de la tormenta). Adaptado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

Figura 3.1b Polarización de las gotas de agua debido al campo eléctrico de la atmósfera Adaptado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

Figura 3.2. Distribución de cargas eléctricas en una nube de tormenta. Tomado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

Figura 3.3a. Campo eléctrico de un dipolo. Tomado de "Física Universitaria con física moderna, volumen 2" por Young, Freedman, 2009, Pearson Education.

Figura 3.3b. Líneas de campo eléctrico de una tormenta eléctrica dipolar. Tomado de "Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations" por Jeremy A. Riousset, Victor P. Pasko, Paul R. Krehbiel, Ronald J. Thomas, y William Rison, 2007, Journal of Geophysical Research Atmospheres.

Figura 3.4a. Guía escalonada que toma el mejor camino conductor de la atmósfera. Tomado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

Figura 3.4b. Rayo de retorno por la guía escalonada. Tomado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

Figura 3.5. Energía mínima para la producción de los RREA (Relativistic Runaway Electron Avalanche). Tomado de "A fundamental limit on electric fields in air" por J. R. Dwyer, 2003, Geophysical Research Letters.

Figura 3.6. Registro de rayos Gamma TGF, provenientes de tormentas eléctricas. Tomado de "Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV" por Smith, David M.; Lopez, Liliana I.; Lin, R. P.; Barrington-Leigh, Christopher P., 2005, Science.

Figura 3.7. Representación gráfica de los procesos físicos para el origen de los TGF por medio del proceso de Bremsstrahlung en los RREA. Elaboración Propia en Paint, 2024.

Figura 4.1. Estabilidad nuclear de isótopos. Tomado de "Physics: Principles with Applications, Global Edition-Seventh Edition" por Douglas C. Giancoli, 2016, Pearson.

Figura 4.2. Representación del tiempo de semivida o periodo de semidesintegración con relación al porcentaje de una muestra. Tomado de "Adobe Stock" por Nandalab, https://stock.adobe.com/es/images/half-life-curve-in-nuclear-chemistry-vevtor-illustration/551099764.

Figura 4.3. Tabla de isótopos radiactivos y estables. Tomado de "Wikimedia commons", 2008, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Table_isotopes.svg.

Figura 4.4a. Fotografía de la traza de un positrón y el retroceso del nucleido hijo ($^{6}_{3}Li_{3}$) del decaimiento del isótopo. Tomado de "The Effect Of Neutrino Recoil In The Beta Decay Of He6", 1957, Soviet Physics Jetp.

Figura 4.4b. Representación del momento lineal para las partículas del proceso de desintegración beta positivo. Adaptado de "The Effect Of Neutrino Recoil In The Beta Decay Of He6", 1957, Soviet Physics Jetp.

Figura 4.5. Representación de la aniquilación positrón-electrón. Tomado de "Radioactivity Introduction and History, From the Quantum to Quarks Second Edition" por L'Annunziata, Michael F., 2016, Elsevier.

Figura 4.6. Representación de los procesos de desintegración nuclear en una tormenta eléctrica de Japón. Tomado de "Positron Annihilation in Thunderstorms" por Teruaki Enoto, 2019, Nuclear Physics News.

Figura 4.7. Mapa de cuatro detectores de GROWTH según su latitud (Eje Y) y longitud (Eje X). Tomado de "Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges" por Yuki Wada, 2021, Springer Theses.

Figura 1. (Propuesta de enseñanza). Energías de desintegración del isótopo Nitrógeno-13. Tomado de "Radioactivity Introduction and History, From the Quantum to Quarks Second Edition" por L'Annunziata, Michael F., 2016, Elsevier.

Introducción

Cada fenómeno de la naturaleza ha sido explicado bajo las concepciones propias de la humanidad, mediante el desarrollo de modelos, teorías y leyes que describen el comportamiento del Universo, permitiendo a la sociedad evolucionar en diferentes ámbitos, como la salud, la tecnología, la economía, el cuidado del ambiente, todos construidos bajo los pilares de las ciencias.

La interacción del ser humano con su entorno, lo llevó a cuestionarse sobre el porqué de las cosas, lo que marcó el inicio de la construcción del conocimiento. A través de la observación del funcionamiento de los fenómenos naturales, en cierto punto, algunos pensadores llegaron a describir sucesos presentes en el ambiente, tales como los días y las noches, la lluvia, el movimiento de las estrellas, entre otros.

Además, en esa necesidad de querer dar explicación a su entorno, surgió también el interés por la materia, por su composición más esencial y su comportamiento. Esto condujo a la interpretación de los átomos y partículas, los cuales albergan un mundo completamente desconocido y desconcertante que, de igual manera, ha sido objeto de intentos de explicación por parte del raciocinio humano.

Por lo tanto, el presente trabajo se encarga de describir el comportamiento de los átomos a nivel nuclear, desde la explicación de la radiactividad y su relación con el fenómeno de las tormentas eléctricas, desarrollando en cinco capítulos la aproximación de los procesos de desintegración que se originan en una tormenta. En el primer capítulo, se presenta la problemática que sustenta el desarrollo de la presente investigación. Por su parte, en el capítulo 2, se busca situar al lector en los eventos históricos más relevantes de finales del siglo XIX, los cuales dieron pie al estudio de la radiactividad. Luego, en el capítulo tres, se aborda la formación de tormentas, su comportamiento eléctrico, sus campos eléctricos, y los fenómenos de aceleración de partículas y emisión de rayos gamma que estas generan, mostrando el origen de elementos radiactivos por medio de estos procesos.

En el capítulo cuatro se explica la desintegración de la materia y su clasificación en varios tipos. Sin embargo, se analiza específicamente el proceso de decaimiento beta (β^+), por el cual se emiten partículas como los positrones y los neutrinos, además de desencadenar grandes cantidades de energía que pueden ser perjudiciales para la salud humana. Por lo tanto, se hace un análisis de los datos del programa GROWTH de Japón, encargado de detectar radiación en tormentas, y se examina la interacción de esta energía con el tejido humano, considerando las dosis de absorción, equivalencia y efectividad.

Por último, se presenta una propuesta de enseñanza que sirve como herramienta para que los docentes en formación que estén interesados en el tema puedan revisarla, ajustarla (si así lo consideran) e implementarla con el fin de aproximar a los estudiantes que se impactan al proceso de desintegración beta en las tormentas eléctricas, por medio del análisis de isótopos radiactivos presentes en estas.

Capítulo I: Problema de Investigación

1.1. Contexto Problemático

Desde tiempos remotos, en la antigua Grecia (siglo IV a.C.), Aristóteles ya realizaba trabajos sobre el comportamiento del clima (Candel, 2015). Con el paso de los años, se fueron sumando más investigaciones a este estudio de la física, como el barómetro de Torricelli (Herrera, 2012), la relación de la altitud con la presión atmosférica por Pascal, Descartes y Halley (Frisinger, 1974), la explicación de Benjamín Franklin en 1752 sobre las tormentas eléctricas y cómo estás eran una forma de electricidad (Pelkowski, 2006), etc.

Es por esta razón que se evidencia que algunos pensadores se preguntaron sobre los fenómenos naturales que ocurrían a su alrededor, y cómo su relación cotidiana con ellos desarrolló un pensamiento empírico que les permitió predecir los comportamientos del clima, las estaciones del año, el movimiento celeste de los astros, y con ello adaptarse a las condiciones cambiantes de su entorno (Viñas, 2021; Lieberman y Gordon, 2018).

Según la sociedad ha progresado, surgieron avances científicos y tecnológicos que dieron paso a la creación de detectores espaciales, aéreos y terrestres para informar sobre los fenómenos atmosféricos de la Tierra. Esto para observar el comportamiento del clima y adaptarse a su constante cambio.

En la Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima se destacó la importancia de pronosticar los desastres naturales, para que cada país, a través de las organizaciones gubernamentales encargadas de la gestión de riesgos, pueda tomar medidas de prevención para disminuir o evitar daños en la vida de las personas (Mundial, 2009). Este tipo de iniciativas son fundamentales para garantizar la seguridad y el bienestar de la población en el presente y en el futuro.

Los efectos potenciales de una tormenta eléctrica son diversos y de gran magnitud, como por ejemplo la electrificación de una persona, el inicio de incendios, la inundación de lugares, el daño en la red eléctrica, entre otros (Superior, 2015). Por esta razón, el desarrollo de la ciencia ha permitido a los seres humanos recurrir a alternativas o estrategias que disminuyan la probabilidad de que estos accidentes ocurran.

En este sentido, la necesidad de anticipar la aparición de una tormenta eléctrica ha impulsado el avance de varias herramientas y tecnologías que facilitan su detección temprana. Entre ellas, se destacan el uso de radares meteorológicos y modelos numéricos de pronóstico climático, ambas estrategias implementadas para predecir la manifestación de este fenómeno natural (Pabón y Beisiegel, 2011)

Es importante destacar que la prevención es un elemento clave en la reducción de los riesgos asociados a las tormentas eléctricas. Por esta razón, la educación y la concienciación sobre los

peligros de este fenómeno son esenciales para disminuir la probabilidad de accidentes y garantizar la seguridad de las personas y las propiedades.

Las tormentas eléctricas son fenómenos naturales que tienen consecuencias significativas en el entorno en el que se producen. Uno de los efectos menos conocidos es que son aceleradores naturales de partículas, que generan reacciones fotonucleares que pueden causar daños a la salud de los seres humanos. Como menciona Enoto et al. (2017), la radiación emitida durante este proceso puede tener valores de Mega electronvoltios (MeV) y generar positrones a través del proceso de desintegración beta (β+), que trae consigo serias afectaciones para los tripulantes de los vuelos.

Por lo tanto, a altitudes entre los 10 Km-15 Km donde transitan los vuelos comerciales existen consecuencias que afectan a pilotos, azafatas y pasajeros que con frecuencia se encuentran en dichas condiciones, ya que la radiación gamma que recibe una persona (1 Sievert-Sv) puede causar daños en el ADN, generando tumores y desarrollando diferentes tipos de cáncer (Dwyer et al., 2010; Stephan y Shmatov, 2021; Pallu et al., 2021). Además, se han realizado estudios que analizan los daños causados por la radiación gamma en los componentes electrónicos de los aviones (Tavani et al., 2013) y como al utilizar ciertos materiales para la construcción de estos se puede disminuir la radiación que reciben las personas a bordo del vuelo aéreo (Perdana et al., 2016).

Los rayos gamma emitidos por este fenómeno natural llegan a la superficie terrestre y se detectan con mayor frecuencia en zonas costeras o en altas montañas cercanas a la base de la nube (Enoto et al., 2017; Tsuchiya et al., 2012), y como en los casos de aviación, esto trae serias consecuencias para la salud.

El desarrollo de procesos de desintegración nuclear afecta a la salud de las personas como los casos mencionados anteriormente, por lo tanto, se hace necesario conocer de esos fenómenos de interés social, a esto se le llama alfabetización científica, que permite a la población tomar decisiones informadas frente a los temas más relevantes de nuestra sociedad, en la salud, el medio ambiente, la tecnología y la innovación (Hernández y Zaccon, 2010).

Esto lleva a plantear el rol del docente en dicho aspecto, según Arteaga (2009):

> *"Los docentes deben proporcionarles a los estudiantes las herramientas necesarias para conocer, interpretar y comprender la compleja realidad de la región, del país y del mundo, para que éstos intervengan y se comprometan de manera reflexiva y crítica con el proceso de transformación histórica y social, que lleva al mejoramiento de la calidad de vida del hombre y la mujer en sus entornos."* (p. 3)

Por consiguiente, se vuelve necesario que el maestro adquiera conocimientos de física moderna en torno a problemáticas de la sociedad actual, para desempeñar de manera óptima su papel como formador de futuras y futuros ciudadanos.

Según lo anterior, se espera que los licenciados en física comprendan el proceso de desintegración beta por las consecuencias de que se origine, como en las tormentas eléctricas, permitiendo a si formarse bajo los conceptos necesarios para desarrollar su rol como docente en la alfabetización científica de los estudiantes. De esta manera, el trabajo cumple con el enfoque de la línea II (La Enseñanza de la Física y la Relación Física Matemática) que establece la importancia de enseñar física moderna, ya que ha generado una revolución cognitiva al proporcionar una nueva visión del mundo, y según (DFI-UPN, 2020):

> *"Es por esta razón que los trabajos de grado… no solo tiene como objetivo la divulgación saber-hacer propio de las teorías científicas modernas, sino que buscan reorientar la enseñanza de las disciplinas desde la reflexión propia de su pertinencia para un país en desarrollo que carece de una infraestructura científico-técnica y que por ende precisa de una discusión profunda del por qué y para qué de la enseñanza de la física"* (p. 15)

En la licenciatura en física de la Universidad Pedagógica Nacional se da el tópico de profundización Física Atómica y Nuclear, donde los procesos de decaimiento hacen parte del programa curricular del curso, pero al consultar con el docente se evidenció que, por las condiciones de desarrollo y tiempo de la clase, estos procesos se alcanzan a abordar de manera superficial y no se puede analizar un caso particular o ejemplo que permita profundizar en la comprensión de los procesos de desintegración nuclear.

Considerando que la enseñanza de las teorías y modelos físicos, se entienden con mayor claridad cuando se abordan ejemplos o casos específicos presentes en los fenómenos naturales (no provocados por la acción humana) (Hosson et al., 2016; Brown, 1992) y citando a Forero et al. (2016):

> *"El ejemplo se constituye en uno de los recursos de mayor énfasis en la actualidad en los diversos sistemas educativos para la práctica didáctica del docente, al cual recurre para colocar a disposición de los estudiantes los conocimientos y conceptos de manera que puedan ser comprendidos y asimilados de forma fácil y práctica"* (p.137)

De esta manera se espera que, por medio del caso particular de la generación de positrones en una tormenta eléctrica, los estudiantes de la licenciatura en física puedan comprender el proceso de desintegración beta ($\beta+$) y sus consecuencias a la salud de las personas.

Explicar los procesos de desintegración radioactiva por medio de aplicaciones (Strunk et al., 2018), analogías (Sáenz y Cubillos, 2011), o ejemplos particulares (Middlecamp, 2012) es una herramienta de enseñanza que se usa con frecuencia, sin embargo, no se han realizado investigaciones sobre la alternativa de comprender dichos procesos por medio de la generación de positrones en una tormenta eléctrica, cuyo propósito es el del presente trabajo.

Dado lo anterior surge la siguiente pregunta problema que orienta el proceso de investigación:

¿Cómo a partir de la generación de positrones en una tormenta eléctrica se puede generar una propuesta de enseñanza para el proceso de desintegración (β+)?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Realizar un acercamiento al proceso de desintegración beta (β+), a partir de la generación de positrones en las tormentas eléctricas como una propuesta de enseñanza.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Establecer un breve recorrido histórico del proceso de desintegración beta, a partir de una revisión bibliográfica de los principales autores que contribuyeron a la compresión del fenómeno.
- Explicar las condiciones de una tormenta eléctrica que permiten la obtención del isótopo radiactivo Nitrógeno-13, causante de la desintegración beta (β+).
- Mostrar cómo la producción de positrones en el proceso de desintegración (β+) generado en las tormentas eléctricas, causa afectaciones en la salud, a partir de la interpretación de datos suministrados por "The Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds" (GROWTH).
- Diseñar una propuesta de enseñanza para el proceso de Desintegración Beta β^+ a través del decaimiento del isótopo Nitrógeno-13 presente en una Tormenta Eléctrica.

1.3. Antecedentes

Como soporte para la realización de este trabajo, se hizo una búsqueda de antecedentes que sirven de guía para poder desarrollar la idea planteada, a continuación, se encuentran las tres principales:

- "Aproximación al concepto de potencial eléctrico a partir del fenómeno de formación del rayo en la tormenta eléctrica", Jorge Iván Hernández Loaiza, Universidad Pedagógica Nacional, Colombia-Bogotá, 2021: Es de especial interés por el apartado en el que explica la formación de tormentas eléctricas, describe las nubes de tormenta y la producción de un rayo, por lo tanto, sirvió de guía para definir las condiciones iniciales que darán paso a la producción de positrones por desintegración beta.

- “Detecting thunderstorm gamma radiation with LORA”, Ewoud Wempe, University of Groningen, Países Bajos-Groninga, 2019: En este trabajo sea habla del análisis de datos experimentales registrados por el detector terrestre de rayos cósmicos LORA, en donde se explica que son los RREA (Relativistic Runaway Electron Avalanche) y como estos pueden generar los denominados TGF (Terrestrial Gamma-Ray) en una tormenta eléctrica, fue por ello de gran importancia al desarrollo del presente trabajo.
- “Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges”, Yuki Wada, University of Tokyo, Japón-Tokyo, 2021: Este trabajo de grado abarca gran parte del marco teórico de la presente investigación, ya que se enfoca en el análisis de las reacciones fotonucleares que son desencadenadas por las descargas eléctricas de los rayos, explicando a detalle el modelo de generar positrones por el proceso de desintegración beta ($\beta+$).

Capítulo II: Revisión Histórica

En el presente capítulo se hace una breve revisión histórica de la radioactividad, enfatizando en los procesos de desintegración beta y reconociendo esta época como un punto de varias aportaciones para entender la naturaleza de la materia. El descubrimiento de la radiación artificial con los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen, abrieron el camino a la investigación de la física nuclear, que se vio acompañada de la radiación natural presente en los trabajos de los físicos Antoine Henri Becquerel, Marie-Pierre Curie y Paul Ulrich Villard.

Según avanzaba el siglo XX, físicos como Ernest Rutherford y Enrico Fermi contribuyeron al desarrollo de la radioactividad, sentando las bases del estudio moderno de desintegraciones, y el entendimiento de los átomos radiactivos. A su vez, se establecieron descubrimientos como el neutrino, el positrón y los isótopos artificiales, que abrieron nuevas puertas hacia aplicaciones principalmente en medicina.

Lo que acá se presenta es un breve recorrido por la historia de grandes físicos y químicos que contribuyeron a construir la física nuclear en relación con la radiactividad, resaltando su aporte a la comprensión de los procesos de decaimiento en núcleos atómicos, sin ninguna intención de realizar un contexto histórico profundo, ya que no es el propósito del presente trabajo.

2.1. Historia de la Desintegración Radioactiva y Decaimiento Beta

La radiactividad es un proceso cuya investigación se remonta a finales del siglo XIX. En 1895, para ser más precisos, el 8 de noviembre el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen, al estudiar con rayos catódicos (flujo de electrones emitidos por un cátodo, debido a la excitación térmica) en el interior de un tubo de Crookes[1], descubrió los famosos Rayos X[2] o Rayos Röntgen, que fueron nombrados así por el mismo Röntgen (1896):

> *"Un trozo de aluminio de lámina, de 15 mm de espesor, todavía permitía el paso de los rayos X (como llamaré a los rayos, por brevedad), pero reducía en gran medida la fluorescencia"* (p.274)

Estos fueron nombrados como rayos X debido a que la X se asociaba con un valor desconocido. Por otro lado, se tiene que Röntgen notó la fluorescencia[3] de un plato de papel cubierto de platino-cianuro de bario ($Ba\ Pt\ (CN)_4$), lo que significaba que dicho material estaba absorbiendo energía de algún tipo de radiación (Rayos X). Este hallazgo lo llevó a demostrar que los rayos catódicos, al chocar con el ánodo del tubo al vacío, emitían rayos X. La pequeña longitud de onda y la alta

[1]Tubo de vidrio parcialmente evacuado
[2]La longitud de onda de los rayos X oscila desde 10 nm hasta 0,001 nm aproximadamente.
[3]La fluorescencia es un fenómeno en el cual un material absorbe radiación electromagnética de cierta longitud de onda y luego emite radiación electromagnética de longitud de onda más larga, generalmente en el rango visible (400 nm-750 nm).

energía de estos rayos permitía atravesar la densidad de diferentes materiales, siendo esta la manera en que Röntgen logró tomar la primera radiografía de la mano de su esposa (Röntgen, 1896).

La radiactividad artificial, descubierta por Röntgen, se refiere a la producción de radiación mediante artefactos creados por el ser humano. Por otro lado, la radiactividad natural está presente en la naturaleza como una propiedad de ciertos elementos. Uno de los trabajos pioneros en esta última fue el realizado por Antoine Henri Becquerel, quien fue un físico francés. Sus experimentos en 1896 con cristales constituidos por sales de uranio, dieron como resultado un tipo de radiación invisible que se dio a conocer como rayos de Becquerel, que más adelante sería denominada radiación alfa y beta.

Becquerel colocó los cristales de uranio sobre unas placas fotográficas, las cuales envolvió con papel negro o aluminio para protegerlas de la exposición de la luz, y al cabo de unas horas, se pudo evidenciar la forma de los cristales impresa en la placa fotográfica. Gracias a estos descubrimientos se le reconoció junto con Marie y Pierre Curie el Premio Nobel de Física en 1903 (Blaufox, 1996).

Dado lo anterior, se sabe que la pareja de esposos Curie se conoció cuando Marie estaba cursando sus estudios en La Sorbona de París, mientras que Pierre era profesor de la Escuela Municipal de Física y Química. Ellos se casaron en 1895, mismo año en que Pierre terminó su doctorado, lo que le permitió a Marie hacer uso de su laboratorio.

Interesada en los trabajos de la radiación invisible de Röntgen (Rayos X) y Becquerel (Radiación Natural), Marie comenzó a realizar investigaciones sobre cómo no solo el uranio emitía radiación natural, sino que también lo hacía el torio. Fue acá donde se acuñó el término radioactivo para referirse a la radiación de tales elementos (Curie, 1903). Sin embargo, dicho trabajo se había publicado dos meses antes por Gerhard Carl Schmidt, lo que llevó a Madame Curie a publicar rápidamente sus trabajos sobre el Pechblenda (UO_2), cuyo mineral podía contener otros elementos radiactivos, como lo fueron el polonio y el radio, descubiertos por los Curie en 1898.

Además, Marie Curie realizó varios trabajos en el tratamiento del cáncer con radioterapia, destacando así las palabras de su esposo en la conferencia del Premio Nobel en 1905, donde se especificaba que la radiación podía ser usada para un bien común o para el mal en las manos incorrectas (Curie P, 1905).

Hasta el momento de esta historia, se han descubierto los rayos X de manera artificial y la radiación alfa y beta de manera natural. Sin embargo, para la época, estos últimos aún no eran conocidos por este nombre.

Otra radiación natural se conoció gracias al francés Paul Ulrich Villard, quien realizó una serie de trabajos con una muestra de radio. Al someter los rayos desviables (α, β) a un campo magnético, logró descubrir un nuevo tipo de radiación penetrante que no se desviaba (Villard, 1900). Esta era la radiación gamma, que no fue nombrada así hasta unos años después por Ernest Rutherford junto con la radiación alfa y beta.

Los aportes de Ernest Rutherford en Física y Química son varios y de gran importancia para la comprensión de la estructura atómica y del comportamiento de la materia. En 1899, el físico publicó un documento donde explicaba cómo la ionización del aire por parte de la radiación del

uranio (α, β) podía determinar el nivel de penetración que se tenía sobre la materia, esto explica que la radiación proveniente de elementos radiactivos como el uranio, podía decaer por medio de desintegración alfa (átomo de helio) y beta (electrones), cuyas partículas cargadas interactúan con los átomos de aire haciendo que estos pierdan electrones que quedan libres y dejan iones positivos. En palabras de Rutherford (1899):

> *"El gas a través del cual pasa la radiación se convierte en un conductor temporal de electricidad y conserva su poder de descarga eléctrica durante un breve periodo de tiempo después de que la fuente de radiación haya sido retirada."* (p.109)

En este experimento, Rutherford envolvió las muestras de uranio con hojas metálicas de distintos espesores y las colocó entre dos placas conectadas a un electrómetro de cuadrantes[4], para poder medir la corriente que surgía del aire ionizado. Así notó que a mayor número de hojas disminuía la ionización del aire, ya que al agregar más capas la radiación no podía penetrar en estas, causando la disminución en la ionización.

De esto logró evidenciar que la radiación menos penetrante fue a la que denominó alfa α y la más penetrante fue la radiación beta β, concluyendo que la radiación alfa sería absorbida más fácilmente por la materia que la radiación beta. (Rutherford, 1899).

En 1900, cuando Rutherford se encontraba en la universidad de McGill en Montreal, realizó observaciones sobre la radiación del torio y la ionización del aire. Al hacerlo, notó que esta disminuía conforme pasaba el tiempo, por lo tanto, fue el primero en definir la desintegración radioactiva en términos del período o semivida de un isótopo, que es el tiempo que tarda una muestra en perder su radiactividad inicial (Rutherford, 1900). Rutherford estableció que la corriente debido a la ionización del aire, causada por la radiación, era proporcional a la radioactividad de dicho material.

En 1902, Rutherford, junto con Frederick Soddy quien fue un químico y físico británico, descubrieron que los átomos radiactivos que emiten partículas alfa o beta se desintegran en átomos de peso más ligero (Rutherford y Soddy, 1902). Por ende, informaron sobre las tasas de transformación de un elemento radiactivo (isótopo inestable) en otro elemento (isótopo estable).

Cuando existe un elemento de la naturaleza, por ejemplo, el oxígeno (O), carbono (C), nitrógeno (N), estos poseen ciertas propiedades físicas y químicas que los diferencian, pero cuando los elementos varían en su número atómico[5] (Z) y conservan su número másico[6] (A), se obtendrán una serie de "isótopos" del mismo elemento (Por ejemplo: ${}^{12}_{6}C_6$, ${}^{13}_{6}C_7$, ${}^{14}_{6}C_8$).

Estos isótopos se encuentran presentes en la naturaleza de manera estable e inestable, cuando un isótopo es estable su número de protones y neutrones en el interior del núcleo tienden a ser bastante similar, aunque estos no son iguales, si se debe cumplir que el número de neutrones sea mayor o

[4]Es un tipo específico de electrómetro que se utiliza para medir diferencias de potencial eléctrico o para determinar la cantidad de carga eléctrica en un objeto.
[5] Número de protones (Z=p)
[6] Suma total de protones y neutrones en el núcleo (A=p+n)

el suficiente para contrarrestar la fuerza eléctrica[7] existente entre los protones al interior del núcleo, y que de esta manera la fuerza nuclear fuerte (FNF)[8] pueda encargarse de mantener unido el núcleo.

Por otro lado, los isótopos inestables o isótopos radiactivos, son aquellos cuyo número de protones supera el número de neutrones, causando un desbalance en la fuerza nuclear fuerte, por lo tanto, los átomos liberan partículas (α, β-radiación), para poder estabilizar la relación entre la fuerza eléctrica y la fuerza nuclear fuerte al interior del átomo.

De esta manera, Soddy y Rutherford informaron este último comportamiento como la emisión de radiación en isótopos inestables, que es conocido actualmente como la desintegración de un nucleido padre[9] en un nucleido hijo[10].

Rutherford (1903) nombró y clasificó los tres tipos de radiación natural de la siguiente manera:

> *1. Los rayos alfa, que son absorbidos muy fácilmente por capas delgadas de materia, y que dan lugar a la mayor parte de la ionización del gas observada en condiciones experimentales habituales.*
>
> *2. Los rayos beta, que consisten en partículas cargadas negativamente proyectadas a gran velocidad, y que son similares en todos los aspectos a los rayos catódicos producidos en un tubo de vacío.*
>
> *3. Los rayos gamma, que no se desvían por un campo magnético y que tienen un carácter muy penetrante.* (p.77)

De las deducciones sobre los diferentes tipos de radiación a las que llego Rutherford, se establece que del primer enunciado los rayos alfa son los que mayormente ionizan el gas de hidrógeno que Rutherford había utilizado para tal experimento, mientras que las radiaciones beta y gamma no alcanzaban los mismos niveles de ionización, esto se hizo para poder determinar el comportamiento de la radiación alfa con mayor precisión, sin embargo, cuando se utiliza el aire en lugar del hidrógeno, la ionización de las radiaciones β y γ son mayores a la radiación α.

Del segundo numeral se sabe que las partículas cargadas negativamente hacen alusión a los denominados electrones, esta afirmación corresponde a la relación de la masa y la carga de las partículas beta que halló Becquerel en 1900, cuyo valor era el mismo para las partículas de los rayos catódicos que había deducido el físico Joseph John Thomson en su descubrimiento del electrón.

Y el último numeral hace referencia a la gran penetración que tiene la radiación gamma, ya que de las tres era aquella que más ionizaba el aire con relación al grosor de las capas de aluminio, en las que se envolvían las muestras de radio.

---

[7] Es responsable de la interacción entre cargas eléctricas, ya sean positivas o negativas. Puede ser tanto atractiva (entre cargas de signos opuestos) como repulsiva (entre cargas del mismo signo).

[8] La fuerza nuclear fuerte es la fuerza que mantiene unidos los nucleones (protones y neutrones) en el núcleo atómico.

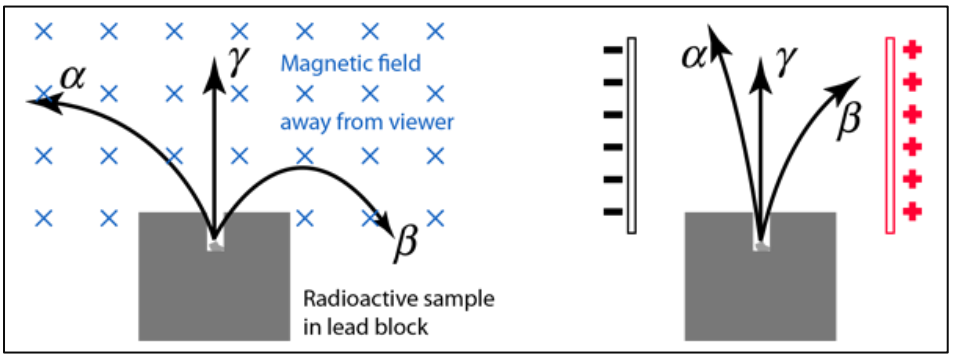
[9] Isótopo inicial u original que sufre desintegración radiactiva para dar lugar a otros isótopos (llamados radionucleidos hijos) como resultado de un proceso de decaimiento radiactivo

[10] El radionucleido hijo, también conocido como producto de decaimiento, se refiere a un isótopo resultante del decaimiento radioactivo de otro isótopo, llamado radionucleido padre.

Se evidencia que la clasificación se basa en la penetrabilidad que tenía la radiación en la materia y su des viabilidad al ser sometida a campos magnéticos y eléctricos, como se muestra en la Figura 2.1 que representa el trabajo realizado por Villard.

Figura 2.1.

Comportamiento de radiación α, β, γ en un campo eléctrico y magnético.



Nota: En la figura de la izquierda se muestra la desviación de las emisiones de radiación alfa y beta cuando se encuentran en un campo magnético, mientras que, en la figura de la derecha, estas emisiones se desvían en un campo eléctrico, pero en dirección opuesta a sus desviaciones en el campo magnético. En ambos casos, la radiación gamma no experimenta ninguna desviación bajo la influencia de ninguno de los dos campos. Tomado de "HyperPhysics" por Nave, Rod. (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/radact.html)

En 1908, Rutherford fue galardonado con el Premio Nobel de Química por su trabajo en el análisis de la descomposición de los elementos y la química de las sustancias radiactivas, siendo uno de los contribuyentes al estudio de los isótopos radioactivos.

Otro gran investigador en esta área de la física fue Frederick Soddy (1913a), quien se encontraba en la universidad de Glasgow. Explicó que la emisión de partículas alfa producirá un elemento que disminuya 4 unidades su número másico (A=n+p) y 2 unidades su número atómico (Z=p) como se describe en la Ecuación 2.1, mientras que la emisión de partículas beta mantendrá el mismo número másico y aumenta en 1 unidad el número atómico (Ecuación 2.2), esto únicamente para la desintegración beta negativa (β^-), que se caracteriza por emitir un electrón y un átomo estable o radionucleido[11] hijo, ya que para la época no se conocía la desintegración beta positiva (β^+).

Desintegración Alfa (α) $\quad {}^{A}_{Z}X_N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X_{N=(A-Z)}$ 2.1

Desintegración Beta (β^-) $\quad {}^{A}_{Z}X_N \rightarrow {}^{A}_{Z+1}X_{N=(A-Z)}$ 2.2

Cuando Soddy (1913b) enunció está Ley Periódica o Ley de Desplazamiento (Ecuación 2.1 y 2.2), estableció que los isótopos son nombrados de acuerdo con el radionucleido padre, por ejemplo, en la Figura 2.2a. el camino de flechas rojas muestra el decaimiento de los isótopos MsTh1, MsTh2, RaTh, ThX, ThEm, Th A, Th B, Th C, ThC´, ThD y Pb207 (radionucleidos hijos) que eran elementos que decaían del Torio-232[12] (radionucleido padre), sin embargo, más adelante fueron establecidos como isótopos inestables del Radio-228, Actinio-228, Torio-228, Radio-224, Radón-

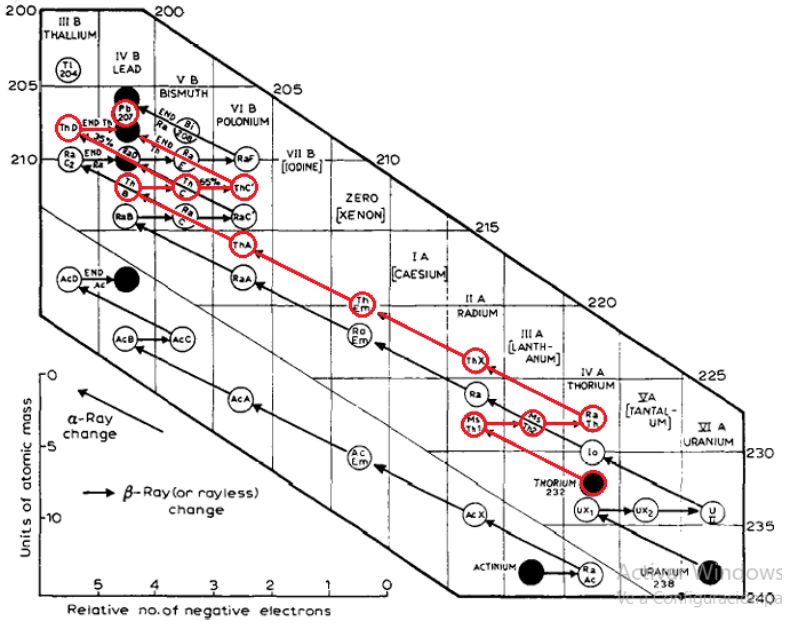
[11] Un radionucleido es un radioisótopo o isotopo que emite radiación debido a su inestabilidad atómica
[12] Manera de nombrar los isótopos de acuerdo a su número másico (A=n+p). Elemento-A (Torio-232)

220, Polonio-216, Plomo-212, Bismuto-212 que puede decaer en Polonio-212 o Talio-208 y estos dos terminan la serie en Plomo-208 respectivamente (Figura 2.2b).

Figura 2.2.

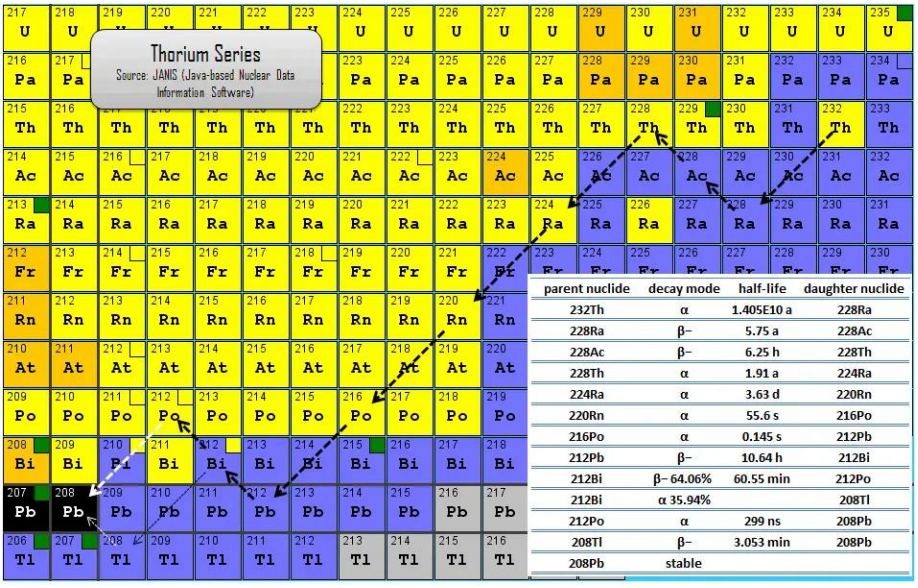
Tabla de Radionucleidos

Figura 2.2a



Nota: Tabla sobre el decaimiento de isótopos según la Ley Periódica de Soddy. Adaptada de "The origins of the conceptions of isotopes" por Frederick Soddy, 1922, Nobel Lecture

Figura 2.2b



parent nuclide	decay mode	half-life	daughter nuclide
232Th	α	1.405E10 a	228Ra
228Ra	β−	5.75 a	228Ac
228Ac	β−	6.25 h	228Th
228Th	α	1.91 a	224Ra
224Ra	α	3.63 d	220Rn
220Rn	α	55.6 s	216Po
216Po	α	0.145 s	212Pb
212Pb	β−	10.64 h	212Bi
212Bi	β− 64.06%	60.55 min	212Po
212Bi	α 35.94%		208Tl
212Po	α	299 ns	208Pb
208Tl	β−	3.053 min	208Pb
208Pb	stable		

Nota: Tabla actual de nucleidos, con el ejemplo del Torio-232. Tomada de "Thorium Series" por NuclearPower, 2024, https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radioactive-decay/radioactive-decay-chain/radioactive-series-radioactive-cascade/thorium-series/

La Figura 2.2a. es el gráfico predecesor a la tabla de nucleidos[13] actual (Figura 2.2b), que permite ver como algún isótopo se desintegra en los diferentes decaimientos, además de enunciar diferentes propiedades como el periodo de desintegración que tarda un núcleo en decaer, la energía liberada en el proceso, su momento angular, entre otras.

Ahora, teniendo en cuenta que este trabajo analiza la formación de positrones en el interior de una tormenta eléctrica, hay que mencionar los grandes aportes del físico Charles Thomson Rees Wilson, tanto a la detección de partículas cargadas en una cámara de niebla como sus muchos aportes a modelar la configuración eléctrica de las tormentas lo cual se abordará en detalle en el capítulo 3.

Todo comienza en 1894 cuando Wilson observa el fenómeno óptico denominado Gloria, dicha observación fue realizada en las montañas Ben Nevis, Escocia, que consiste en la formación de anillos de colores concéntricos, debido a la interacción de la luz solar con las gotas de agua en nubes o neblina, este fenómeno puede ser visto únicamente con el observador posicionado entre la fuente de luz y las gotas de agua. Esto lo inspiró a replicar dicho fenómeno, que dio paso a la creación de la primera cámara de niebla en 1897 en el Laboratorio de Cavendish, Wilson demostró por primera vez que, tras repetidas expansiones de su cámara de nubes, aparecía una condensación parecida a la lluvia (Williams, 2010).

Sus trabajos con la cámara de niebla contribuyeron a varios estudios de física atmosférica como lo son el circuito eléctrico global, la separación de cargas en las nubes de tormenta, y la regeneración del campo eléctrico de las tormentas, por mencionar algunos. Para el año 1911, Wilson modificó la cámara de niebla original para la observación de las primeras huellas individuales de partículas energéticas, como lo fueron las partículas α y β (Wilson, 1912).

De esta manera se tiene que la cámara de niebla ideada por Wilson fue construida principalmente para trabajos de física atmosférica, sin embargo, esta permitió que Carl David Anderson descubriera los positrones en 1932, justo dos años después de que Paul Dirac teorizará dicha partícula en 1930 (Salamanca, 2023). El positrón es una antipartícula[14] del electrón, lo que significa que tiene las mismas propiedades de este, a excepción de la carga cuya magnitud es la misma, pero con signo opuesto ($+1{,}602176634x10^{-19}\ C$), de esta manera se establece que la masa del positrón es de $9.10938291x10^{-31}kg$, y que su espín es de ½ (Haynes, 2014). Esta antipartícula es uno de los productos (partícula beta) del proceso de desintegración beta positivo, junto con un radionucleido hijo y un neutrino.

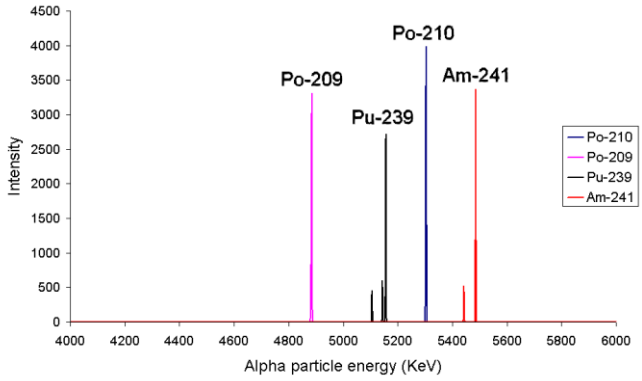
Para los primeros años del siglo XX se estudiaban los espectros de energía de las partículas alfa, beta y gamma, cuyos valores discretos en las radiaciones alfa y gamma eran bien aceptadas (Figura 2.3.), estos valores de energía pueden variar según el elemento radioactivo que se esté utilizando, sin embargo, para cada uno existe un valor discreto establecido.

[13] La tabla de nucleidos es una representación gráfica que muestra información sobre los diferentes isótopos de los elementos químicos.
[14] Antipartículas que componen la antimateria, cada una de estas tiene las mismas propiedades que sus correspondientes partículas, pero con carga opuesta.

Figura 2.3.

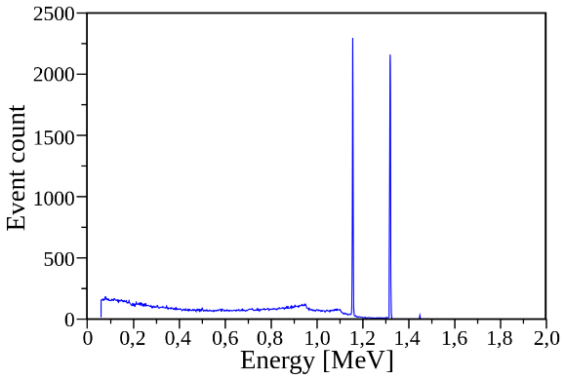
Espectros de energía discretos para las emisiones de desintegración α y γ

Figura 2. 3a.



Nota: Emisiones de partículas alfa, para los isótopos Polonio-209, Plutonio-239, Polonio-210 y Americio-241. Tomado de "Alpha-particle spectroscopy" por Wikipedia, 2006, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha1spec.png

Figura 2. 3b.



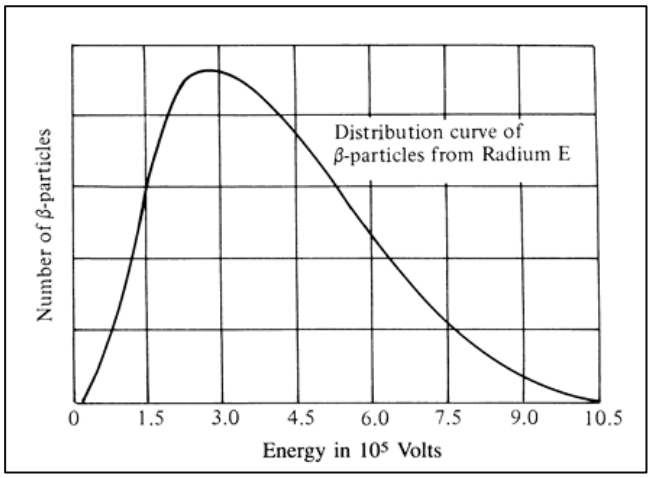
Nota: Emisiones de radiación gamma, para el isotopo Cobalto-60. Tomado de "Gamma ray" por Wikipedia, 2021, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:60Co_gamma_spectrum_energy-de.svg

Por otro lado, para el año 1914 el físico James Chadwick Marcial descubrió que el espectro de energía de los electrones en el proceso de desintegración beta no era discreto, sino que este era continuo, lo que significó que la partícula beta (electrones) podía adquirir valores desde cero hasta una energía máxima (Chadwick, 1914).

En la Figura 2.4 se puede observar el espectro de energía continua de la desintegración beta del Radio E, que hoy en día es el isótopo Bismuto-210, este fue publicado por Sir Charles Drummond Ellis y William Alfred Wooster (1927) para medir el calor absoluto en la absorción de electrones y así rectificar que las partículas beta contaban con un espectro de energía continua como descubrió Chadwick.

Figura 2.4

Distribución energética de electrones en la desintegración Beta del isótopo Radio E (Bismuto-210)



Nota: Tomado de "The average energy of disintegration of radium E" por Ellis, S. C. D., y Wooster, W. A., 1927, Royal Society

Esto llevó a dos posibles interpretaciones, una de ellas fue que las leyes de conservación de energía podían no aplicarse al proceso de desintegración beta, y fue apoyada por Niels Bohr, mientras que la segunda interpretación establecía que este principio de conservación era inquebrantable, por lo que explicaba que dicha desintegración además de emitir electrones, también podía emitir una nueva partícula neutra, esta afirmación fue sugerida por el físico austriaco Wolfgang Pauli, ya que en 1930 dirigió una carta al grupo de Radioactivos en la reunión de la sociedad distrital de Tubinga en la que declara lo siguiente (Winter, 2000):

> *"Se me ha ocurrido un remedio desesperado para salvar el teorema de intercambio de estadísticas y la ley de conservación de la energía. Esta es la posibilidad de que existan partículas eléctricamente neutras que llamaré neutrones, las cuales existen en los núcleos, tienen un espín de ½ y obedecen al principio de exclusión, y que además difieren de los cuantos de luz en que no viajan con la velocidad de la luz"* (p.4)

Pauli teorizó una nueva partícula que explicó cómo se conservaba la energía, el momento angular y el momento lineal, siendo nombrada como "neutrón", ya que hasta el momento Chadwick no había descubierto aún el neutrón que compone el átomo, esto lo haría dos años después, mientras que la nueva partícula de Pauli adquiriría el nombre de Neutrino en los trabajos de Enrico Fermi.

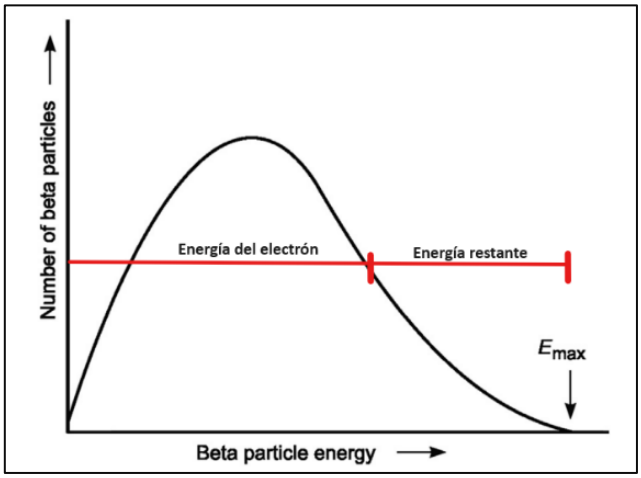
Como se pudo evidenciar, la desintegración beta fue un proceso que causó mucho revuelo, ya que muchas de las leyes de conservación no se aplicaban a tal caso, por lo tanto, se analiza como la introducción del neutrino ayudo a solucionar este problema. Al examinar la Figura 2.4 se evidencia que la gráfica representa un espectro continuo, esto significa que la energía de los electrones en distintas mediciones puede dar valores diferentes. Al no haber un valor fijo en todas las medidas, la ley de conservación de energía no se cumplía.

Ahora se muestra la Figura 2.5 dónde al tomar una medida de la energía del electrón, cuyo valor puede cambiar en cada medición debido al espectro continuo que posee, se evidencia un tramo de

energía restante que experimentalmente no concuerda con el predicho teóricamente, este último valor se calculaba para un problema que emite 2 cuerpos en la desintegración beta, ya que se creía que los productos del decaimiento eran únicamente el radionucleido hijo y la partícula beta (electrón-positrón).

Figura 2.5

Espectro energético general de las partículas beta.



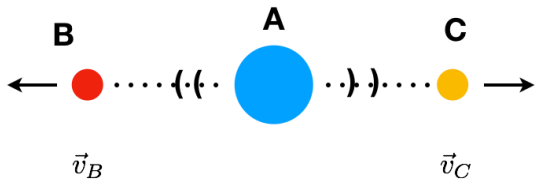
Nota: Representación de un valor aleatorio de la energía del electrón, y su energía restante asignada al neutrino. Adaptado de "Radioactivity Introduction and History, From the Quantum to Quarks Second Edition" por L'Annunziata, Michael F., 2016, Elsevier.

Otro problema era la conservación del momento lineal, donde se tenía que las direcciones de los electrones (B) y del nucleido hijo (C) tras la desintegración del nucleido padre (A) debían ser iguales, pero, en sentido opuesto, para poder cumplir con la conservación del momento lineal, sin embargo, se detectó que esto no se cumplía, en la Figura 2.6a se representa como se debería conservar el momento lineal, y en la Figura 2.6b se ilustra lo que realmente sucedía.

Figura 2.6

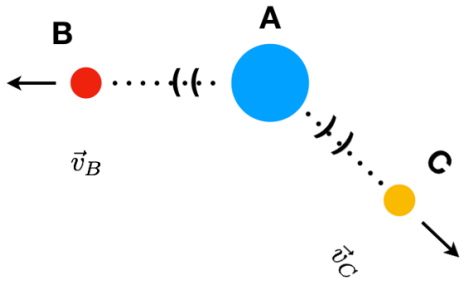
Representación del momento lineal de los productos de la desintegración beta

Figura 2.6a



Nota: Representación del momento lineal de los "dos" productos de la desintegración beta, antes de la teorización del neutrino. Tomado de "Conservación del momento lineal: el descubrimiento del neutrino" por Teresa Fernández Caramés, 2019, Diarium-blog de la Universidad de Salamanca.

Figura 2.6b



Nota: Ilustración de la no conservación del momento lineal de los "dos" productos de desintegración. Adaptado de "Conservación del momento lineal: el descubrimiento del neutrino" por Teresa Fernández Caramés, 2019, Diarium-blog de la Universidad de Salamanca

Además, no se cumplía la conservación del momento angular[15] en el proceso de desintegración beta, ya que por ejemplo $n \rightarrow p^+ + e^-$ se tiene que el neutrón (n), protón (p^+) y electrón (e^-) cuentan con spin[16] de ½ (despreciando el momento angular orbital), por lo tanto, se puede evidenciar que el momento angular del spin en este caso no se conserva $n(1/2) \rightarrow p^+(1/2) + e^-(1/2)$

Por último, la conservación de la carga no se violaba en este caso, ya que el neutrón y el neutrino tienen una carga 0e, el protón tiene una carga positiva +1e y el electrón una carga negativa -1e, dado una conservación de la carga $n(0) \rightarrow p^+(1) + e^-(-1) + \nu(0)$.

La introducción del neutrino ayudó a que la energía del electrón, que adquiría cierto valor, se sumara a la del neutrino manteniendo así el principio de conservación, el momento lineal también se mantenía, ya que la introducción del tercer cuerpo concordaba con las direcciones predichas y la conservación del momento angular quedaba en 1/2.

Por lo tanto, esto llevó a la interpretación de que la desintegración beta no era un problema de dos cuerpos, como es el caso de la desintegración alfa, sino que era un problema donde se emitían tres cuerpos (Ecuación 2,3-Ecuación 2.4).

Estos trabajos fueron predecesores a la teoría de desintegración beta de Fermi cuya publicación se realizó en diciembre de 1933, dos meses después de su participación en la séptima Conferencia de Solvay en la Universidad Libre de Bruselas, Bélgica, que reunió a grandes físicos de la época para hablar de los nuevos avances en física atómica y nuclear.

La teoría de Fermi estableció que el neutrón en el interior de un núcleo se transforma en un protón, y dicho proceso se relaciona con el origen de las partículas beta (electrón-positrón) y el neutrino que teorizó Pauli. Se expresa según las siguientes reacciones:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} \qquad 2.3$$

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu \qquad 2.4$$

Fermi propuso una nueva fuerza dentro del núcleo que permite que un protón y un neutrón se transformaran uno en el otro para mantener la estabilidad nuclear, esta fuerza sería menor que la fuerza nuclear fuerte o interacción fuerte que mantiene unidos a los nucleones[17] dentro del núcleo. La propuesta de interacción débil de Fermi ha evolucionado hacia una teoría electrodébil unificada (Guerra y Robotti, 2009).

De esta manera se estableció que la desintegración beta se da de dos formas, la ya mencionada beta negativa (Ecuación 2.2) que es la emisión de un radionucleido hijo, un electrón (e^-) y un antineutrino ($\bar{\nu}$) y la positiva (Ecuación 2.5) que es la emisión de un radionucleido hijo, un positrón (e^+) y un neutrino (ν), que expresadas en términos de la ley periódica de Soddy queda como:

[15] El momento angular cuántico es una propiedad física que describe la cantidad de rotación o giro asociada con una partícula subatómica, este se conforma por el momento angular orbital y por el momento angular de spin.
[16] El espín es una propiedad intrínseca de las partículas subatómicas, como electrones, protones y neutrones, que está relacionada con su momento angular intrínseco.
[17] Los nucleones son las partículas fundamentales que componen el núcleo de un átomo. Estos incluyen protones y neutrones.

Desintegración Beta (β^-) ${}^{A}_{Z}X_N \rightarrow {}^{A}_{Z+1}X_{N=(A-Z)}$

Desintegración Beta (β^+) ${}^{A}_{Z}X_N \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X_{N=(A-Z)}$ 2.5

Un ejemplo del proceso de desintegración beta (β^+) es el Bismuto-208:

$$^{208}_{83}Bi_{125} \rightarrow {}^{208}_{82}Pb_{126} + e^+ + v \quad 2.6$$

De este ejemplo se concluye, que la teoría de Fermi describe que un isótopo inestable ($^{208}_{83}Bi_{125}$) al tener un nivel de energía mayor pasa a un isótopo de menor energía ($^{208}_{82}Pb_{126}$), además en la Ecuación 2.6 se puede evidenciar que la desintegración beta emite dos partículas elementales[18], la primera es el positrón que se expresa con el símbolo del electrón, pero con carga positiva (e^+), o con la letra griega beta con el símbolo positivo (β^+), que hace referencia a la partícula beta emitida en el proceso que lleva su nombre. Y la segunda es el neutrino, cuya letra griega con la que se representa es nu (v). Estas dos partículas en conjunto suman el espectro de energía de la desintegración beta.

En el amplio campo de investigadores en radiactividad se suman Frederic Joliot e Irene Joliot (hija de Pierre y Marie Curie), quienes no solo descubrieron los primeros radioisótopos producidos artificialmente, sino que también fueron los primeros en producir positrones en un laboratorio.

Los Joliot en sus diversos trabajos llegaron a dos conclusiones, la primera es que la producción de positrones por producción de pares[19] se daba cuando, bombardeaban berilio con partículas alfa[20] producidas del polonio, que emitían un neutrón y rayos gamma, la radiación gamma al chocar con una lámina de plomo producía un par electrón-positrón, al origen de estos positrones se les denominó por materialización.

La segunda conclusión establece que, al bombardear aluminio con partículas alfa provenientes del polonio, estas generaban neutrones y positrones según la reacción $^{27}_{13}Al_{14} + {}^{4}_{2}He_2 \rightarrow {}^{30}_{15}P_{15} + n$ [21], pero por medio de transmutación[22], cuyo término se utiliza para referirse a la transformación de un elemento a otro, esto explica que su origen era del núcleo atómico (desintegración beta), además que el espectro de energía continuo de los positrones era similar al de las partículas beta (electrones) emitidas en la desintegración natural (Guerra et al., 2012).

Por lo tanto, los Joliot al irradiar partículas alfa provenientes del polonio, sobre láminas de aluminio produjeron neutrones y positrones por transmutación. Lo interesante aquí es que cuando movían la fuente de partículas alfa (polonio) lejos del aluminio la producción de neutrones disminuía, pero no lo hacía la producción de positrones, de esta manera se midió con un contador Geiger-Müller[23] el tiempo de decaimiento de dichas emisiones que daba un valor de menos de 5 minutos. Este impresionante hallazgo llevó a los Joliot a concluir que de la interacción de las

[18] Las partículas elementales son aquellas que constituyen la materia; para ser más precisos son partículas que no están constituidas por partículas más pequeñas.
[19] La producción de pares es un fenómeno en física en el que un fotón de alta energía se convierte en un par de partículas, por ejemplo, un electrón y un positrón
[20] Las partículas alfa son átomos de helio ($^{4}_{2}He_2$)
[21] Los neutrones surgieron de la interacción de las partículas alfa con el aluminio, al igual que la obtención de isotopo $^{30}_{15}P_{15}$ que emitía positrones por medio de desintegración.
[22] La transmutación es el término que se asociaba en la alquimia a lo que actualmente es la desintegración radiactiva.
[23] Un contador Geiger-Müller es un dispositivo utilizado para detectar partículas ionizantes, como partículas alfa, beta y rayos gamma.

partículas alfa (emitidas del polonio) con el aluminio, surgió un nuevo isótopo radioactivo ($^{30}_{15}P_{15}$), que emitía positrones en su proceso de "transmutación", haciendo referencia a la desintegración.

Este trabajo fue el pionero en el descubrimiento venidero de radioisótopos artificiales, ya que el Fósforo-30 decae en Silicio-30 y libera en el proceso un positrón y un neutrino ($^{30}_{15}P_{15} \rightarrow {}^{30}_{14}Si_{16} + \beta^{+} + v$) (Curie y Joliot, 1934), fue por este trabajo que recibieron el premio nobel de Química en 1935. Adicionalmente, en 1934 los Joliot descubrieron un nuevo radioisótopo, este fue el Nitrógeno-13, que se obtuvo de bombardear partículas alfa (Originarias del Boro) sobre nitruro de boro($^{10}_{5}B_5 + {}^{4}_{2}He_2 \rightarrow {}^{13}_{6}N_7 + n$). La razón de nombrar dicho descubrimiento se debe a la importancia que juega este último radioisótopo en la presente investigación.

Aunque los trabajos en radiactividad son varios y extensos, los que se nombraron fueron los más relevantes. Si se quiere ampliar en la vida e investigaciones de los físicos que acá se mencionan, puede hacerlo al revisar los libros de Malley (2011) y L'Annunziata (2016) que sirvieron de guía para la presente investigación.

Los principales procesos de desintegración (α, β, γ) que se mencionaron, se manifiestan en varios fenómenos de la naturaleza, por ejemplo, la radiación alfa se encuentra en las emisiones de Radón-222, que surgen en los volcanes debido a erupciones o terremotos (Cigolini et al., 2009), por otro lado, la desintegración gamma se da en el isótopo radiactivo Potasio-40 que se encuentra en la fruta banano, y por último la desintegración beta que está presente en las tormentas eléctricas. Así se establece que la radiación es un fenómeno que está en la naturaleza, en la vida cotidiana, en los alimentos, el ambiente, la tecnología y en los mismos cuerpos, evidenciando su participación en cada factor de la vida, sin embargo, esté pasa desapercibido muchas veces.

Teniendo presente estas consideraciones en las siguientes páginas se aborda el proceso de desintegración beta, que se origina según ciertas condiciones al interior de una tormenta eléctrica. Hasta aquí se realiza el breve contexto histórico, es de recalcar que este no es el enfoque principal del trabajo, sin embargo, introduce al lector en la terminología que se utilizará en los siguientes capítulos.

Capítulo III: Formación y Procesos en una Tormenta Eléctrica

Antes de abordar con detalle el proceso de la desintegración β^+ que se presenta en las tormentas eléctricas, primero es necesario revisar cómo acontece el fenómeno de carga y descarga en una tormenta de estas características, permitiendo así entender la generación de isótopos radioactivos en el proceso.

Las condiciones atmosféricas características de cada región geográfica son un factor influyente en la formación de nubes de tormentas, y a su vez del comportamiento eléctrico que las acompaña, regido por partículas cargadas, campos eléctricos y rayos.

Cada proceso al interior de una tormenta, contribuye al entendimiento de los mecanismos de producción de positrones derivados de la radioactividad de isótopos inestables, que se obtienen de las condiciones de interacción energética que surgen de dicho fenómeno presente día a día en la naturaleza.

Aunque las tormentas eléctricas son un fenómeno que se experimenta en la cotidianidad, oculta una gran cantidad de secretos, sobre su comportamiento y sobre aquella producción de partículas y radiación, que el ojo humano no está diseñado para observar.

3.1. Análisis de la Formación de una Tormenta Eléctrica

3.1.1 Atmósfera Terrestre

La formación de las tormentas eléctricas se origina a partir de los elementos y condiciones presentes en la atmósfera. Por lo tanto, al remontarse a la historia del desarrollo atmosférico del planeta, desde su formación hace 4500 millones de años hasta la actualidad, se evidencia un cambio entre épocas de calentamientos y glaciaciones. Esto debido a la variación de la composición química (gases) de la atmósfera, cuyas causas son el efecto invernadero, la fotosíntesis de las plantas, la actividad volcánica, el impacto de meteoritos, los cambios en la rotación, traslación y órbita del planeta, entre otros (Quintero, 2018).

Teniendo en cuenta estos constantes cambios, se puede observar que en la actualidad la composición atmosférica de la Tierra está dada por aire seco, vapor de agua y gases de ozono, en la Tabla 3.1 se muestra el porcentaje de elementos y moléculas que componen el aire seco:

Tabla 3.1

Composición del aire seco de la atmósfera

Elementos y moléculas	Aire Seco	Nitrógeno	Oxígeno	Argón	Dióxido de Carbono	Hidrógeno	Neón	Kriptón	Helio	Xenón
Porcentaje en Volumen de aire seco (%)	100	78,09	20,95	0,93	0,03	0,00005	0,0018	0,0001	0,00053	0,000008

Nota: Adaptado de "Física: curso teórico-práctico de fundamentos físicos de la ingeniería" por F.J. Gálvez, R. López, A. Llopiz, C. Rubio, 1998, Editorial Tébar Flores, p. 456.

En la Tabla 3.1 (Gálvez et al., 1998) se presentan únicamente los elementos y moléculas del aire limpio y seco, por ende, no se tienen en cuenta los demás componentes por causas externas, como lo son las emisiones de CO_2 producidas por las personas y las erupciones de volcanes. Además, la composición de la atmósfera puede variar de acuerdo con la altitud, teniendo como referencia que el 99% de la masa se encuentra entre el suelo y una altura de 32 Km(troposfera[24]) (Dias et al., 2007).

Por otro lado, el porcentaje de vapor de agua que se halla en la atmósfera varía según las condiciones climáticas de la región entre el 0% y el 4% aproximadamente, siendo este un influyente en la formación de nubes de tormenta.

3.1.2 Formación y Distribución Eléctrica de la Nube

El vapor de agua en la atmósfera surge de la radiación solar que evapora cuerpos de agua como ríos, mares y océanos, lo que provoca su expansión y, por lo tanto, una disminución de la densidad del aire (convección). Esto genera una corriente ascendente de vapor de agua que, al alcanzar cierta altitud y bajas temperaturas (-30°C, 10°C), se condensa en pequeñas gotas de agua ($2x10^{-3}m$) y trozos de hielo. Los cristales de sal marina y las partículas de suciedad en el aire actúan como núcleos de condensación[25]($1x10^{-6}m$). Cuando la nube está saturada de agua, precipita, desencadenando corrientes de aire descendente y procesos eléctricos en su interior. La condensación forma nubes cumulonimbos, con estructura de yunque, alcanzando hasta 23 km de altura y una base a 2 km de la superficie.

A lo largo de los últimos años se han descrito varias teorías sobre la distribución eléctrica[26] en el interior de una tormenta, una de las más asertivas y la más famosa es la del físico británico Charles Thomson Rees Wilson (1929). En primer lugar, se establece que el campo eléctrico en condiciones

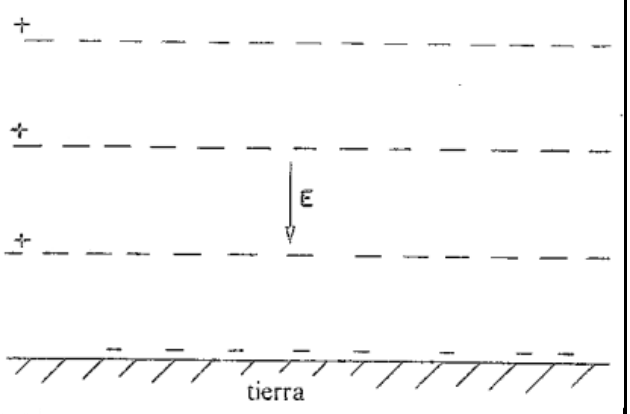
[24] La troposfera constituye la porción inferior de la atmósfera de la Tierra, abarcando desde su superficie hasta alrededor de 8 a 15 kilómetros de altura en promedio, variando según la ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas.
[25] Los núcleos de condensación son partículas presentes en la atmósfera que actúan como puntos de partida para la condensación del vapor de agua y la formación de gotas de agua o cristales de hielo. Estas partículas pueden ser polvo, hollín, sal marina, o cualquier otra sustancia suspendida en el aire.
[26] La distribución eléctrica se refiere a la disposición o la forma en que se distribuyen las cargas eléctricas en un sistema o en un medio determinado.

normales de clima es descendente, esto debido a que la carga negativa de la tierra y la carga positiva del aire generan un campo eléctrico (Figura 3.1a), aunque el aire se considera un aislante, en este existen iones libres o iones rápidos[27] (positivos y negativos), creados por la radiación cósmica[28] que permite al aire ser un conductor en ciertas regiones. (Feynman y Leighton, 1998).

Figura 3.1

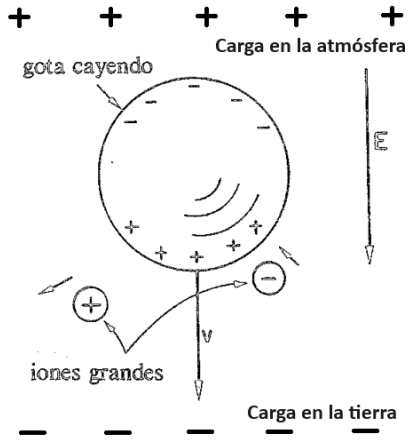
Campo eléctrico de la atmósfera y polarización de una gota de agua

Figura 3.1a



Nota: Dirección del campo eléctrico en la atmósfera en condiciones normales (antes de la tormenta). Adaptado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

Figura 3.1b



Nota: Polarización de las gotas de agua debido al campo eléctrico de la atmósfera Adaptado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

Wilson estableció que al tener una gota de agua o molécula de vapor de agua al interior del campo eléctrico en condiciones de clima normal, esta se polariza distribuyendo la carga de la gota con la parte de abajo cargada negativamente y la parte de arriba positivamente (Figura 3.1b). Como ya se tiene que la polaridad del agua (también sucede lo mismo con el hielo) distribuye las cargas al interior de la gota de esa manera, en la atmósfera existen los denominados iones grandes o iones lentos (núcleos de condensación) que son más grandes y lentos que los iones rápidos producidos por radiación cósmica, por lo tanto, si uno de estos iones grandes con carga positiva llega desde la parte de abajo hacia la gota, esta se verá repelida, y ascenderá en la corriente de aire que ya se está formando y se posiciona en la parte superior, mientras que un ion grande negativo que se atrae a la gota de agua, carga está de manera negativa y, por lo tanto, aumenta su peso y la posiciona en la base de la nube.

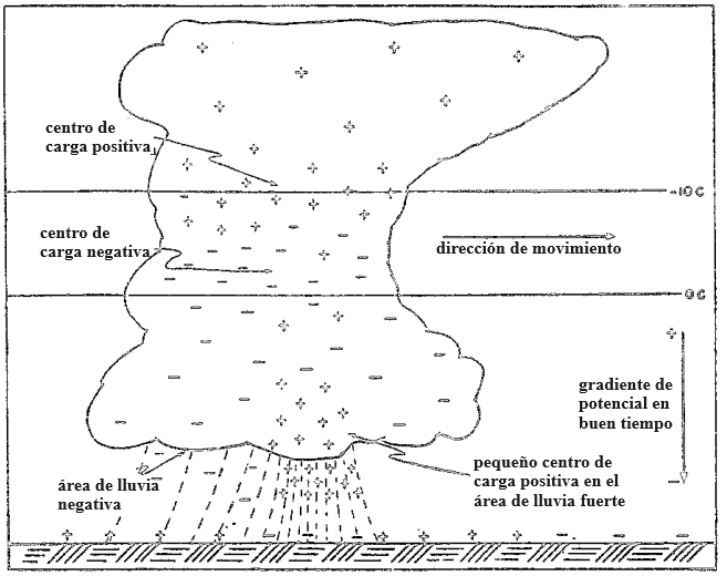
[27] Un ion rápido es una partícula cargada eléctricamente que se forma cuando un átomo o una molécula gana o pierde uno o más electrones, debido a la radiación cósmica.

[28] La radiación cósmica se refiere a partículas subatómicas de alta energía que provienen del espacio exterior, más allá de nuestro sistema solar. Estas partículas pueden incluir protones, electrones, neutrones y otros núcleos atómicos, así como fotones de alta energía, como los rayos gamma.

De esta manera, se obtendrá una dipolaridad en la nube de tormenta con las cargas negativas en la base de esta y las positivas en la parte superior. Aunque existe en algunas ocasiones una pequeña parte de cargas positivas que se sitúan en la base de la nube generando una estructura tripolar, como se ve en la Figura 3.2. Es de aclarar que para el presente trabajo se abordará la estructura dipolar, la cual representa el caso más simple y por ende facilita el abordaje del fenómeno.

Figura 3.2

Distribución de cargas eléctricas en una nube de tormenta



Nota: Tomado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.

La medición de cargas en la nube se debe a dos tipos de instrumentos, aquellos detectores que se encuentran en el suelo, y que por lo general determinan la electrificación de las gotas de agua, y las sondas que son lanzadas desde aviones o elevadas en globos, reciben información de temperatura, humedad, presión, y analizan la electricidad de las gotas de agua por medio de un oscilador de radiofrecuencia (Takahashi, 1973).

A pesar de que esta es la forma más sencilla de modelar la distribución de cargas en el interior de una nube, es importante considerar que esta distribución varía según la inestabilidad de la atmósfera, las corrientes de aire, las descargas de rayos y otras condiciones. Estos factores convierten a este fenómeno atmosférico en un desafío real para predecir con precisión.

3.1.3 Campo Eléctrico de la Tormenta

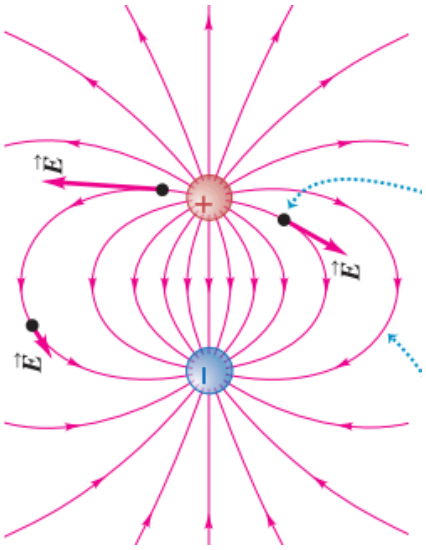
Según la distribución eléctrica descrita antes, el campo eléctrico de la tormenta se comporta como el campo de un dipolo eléctrico (Figura 3.3a), donde las líneas de campo generadas por las cargas

positivas de la nube (sección roja) se dirigen hacia fuera y las negativas lo hacen hacia adentro (sección azul), como se representa en la Figura 3.3b. Las líneas de campo que van desde el suelo (cargas positivas) hasta la base de la nube (cargas negativas) son menos en comparación a las demás líneas circundantes, esto representa que la intensidad del campo es menor debido a que el aire es en cierta medida un aislante eléctrico.

Figura 3.3

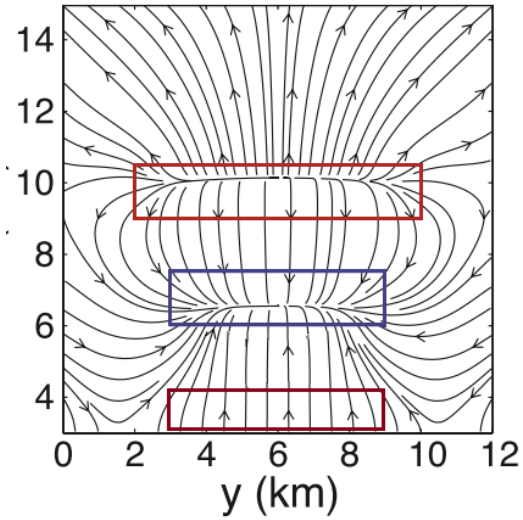
Líneas de campo eléctrico de una tormenta eléctrica dipolar y su comparación con el campo eléctrico de un dipolo eléctrico.

Figura 3.3a



Nota: Campo eléctrico de un dipolo. Tomado de "Física Universitaria con física moderna volumen 2" por Young, Freedman, 2009, Pearson Education.

Figura 3.3b



Nota: Las secciones resaltadas en color rojo representan la carga positiva de la tormenta, y la franja azul las cargas negativas. Tomado de "Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations" por Jeremy A. Riousset, Victor P. Pasko, Paul R. Krehbiel, Ronald J. Thomas, y William Rison, 2007, Journal of Geophysical Research Atmospheres.

El valor del campo eléctrico en una tormenta eléctrica puede variar según ciertas condiciones, tales como la humedad del aire, la altitud, la temperatura y la corriente de aire, entre otras. Pero los valores pueden oscilar entre unos pocos voltios por metro[29] hasta unos cientos de kilovoltios por metro. Teniendo en cuenta la magnitud de dicho campo eléctrico, las partículas como lo son los iones o electrones libres en la atmósfera pueden ser aceleradas según la carga que tengan, tomando una dirección en sentido del campo o contrario a este. Se entiende según la Ecuación 3.1:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \qquad 3.1$$

[29] Típicamente, la unidad básica de campo eléctrico que se utiliza en medición de tormentas es el voltio por metro (V/m).

La carga positiva de la partícula tomará la dirección del campo eléctrico y la negativa tomará la dirección opuesta a este, o como dice Alonso y Finn (1967):

> *"si aplicamos un campo eléctrico en una región donde haya iones positivos y negativos, el campo tenderá a mover los cuerpos cargados positivamente y negativamente en direcciones opuestas, lo cual da como resultado una separación de cargas, efecto éste llamado algunas veces polarización"* (p.30).

3.1.4 Descarga de un Rayo

Según lo descrito antes, al cargarse la nube (ver Figura 3.2.), se encuentra que la base negativa induce al suelo a cargarse positivamente[30], por la diferencia de potencial entre la nube y el suelo, lo que hace que el sistema se encuentre en equilibrio. Por lo tanto, se genera una diferencia de potencial que permite a las cargas interactuar de acuerdo a la fuerza de atracción de Coulomb[31]. De esta manera comienza a descender desde el cielo una guía, dónde los electrones que se encuentran en la base de la nube viajan a altas velocidades de manera escalonada, hasta llegar al suelo creando un camino conductor (Figura 3.4a) (Sánchez, 2022).

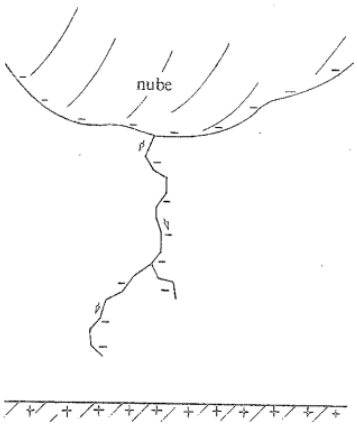
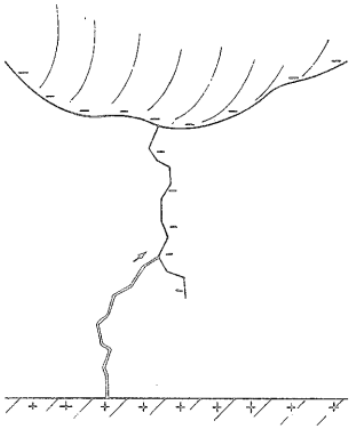
Cuando las cargas del suelo comienzan a subir por este hilo conductor de electrones, se les denomina rayo de retorno(Figura 3.4b), los átomos y moléculas del aire comienzan a ionizarse[32], convirtiendo este canal en un plasma[33], cuyo intenso resplandor es el que vemos en una tormenta eléctrica. Para ser más precisos las emisiones ópticas resultantes son principalmente de átomos ionizados de nitrógeno y oxígeno, por lo tanto, si estos átomos adquieren o pierden electrones, existe un desbalance energético en sus niveles de energía, lo que posibilita la emisión de radiación perteneciente al espectro de emisión del hidrógeno, puntualmente en una longitud de onda de 656,3 nm[34]. (Volland, 1995),

Este primer rayo es tan solo el predecesor a otra serie de descargas eléctricas que surgen y que generan más rayos (Sánchez, 2022).

[30] Se induce una parte bajo la nube, ya que la tierra está cargada negativamente
[31] La atracción ocurre entre cargas de signos opuestos, mientras que la repulsión ocurre entre cargas del mismo signo.
[32] Los electrones ionizan las moléculas del aire, lo que significa que elementos como el nitrógeno, oxigeno o moléculas de agua pierden o gana electrones.
[33] Estado de la materia en el cual los átomos se han ionizado.
[34] El rango entre 380 y 780 nanómetros (nm) es visible para el ser humano.

Figura 3.4

Descarga guía escalonada y rayo de retorno.

Figura 3.4a	**Figura 3.4b**
	
Nota: Guía escalonada que toma el mejor camino conductor de la atmósfera. Tomado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.	*Nota: Rayo de retorno por la guía escalonada. Tomado de "Física: volumen II: Electromagnetismo y Materia" por Feynman, R., y Leighton, R., 1998, Addison Wesley.*

Ya que el rayo aumenta la temperatura en el aire, el volumen del gas próximo al rayo se expandirá a gran velocidad, pero llega un punto donde el aire circundante es demasiado frío, por lo que disminuirá, es la expansión y la rápida contracción del aire la que genera ondas de choque, que es aquel ensordecedor sonido que se escucha, el trueno (Sánchez, 2022).

Una vez que se entiende el modelo más básico de cómo se genera un rayo, se establece que estos no se dan solo de esta manera, sino que se pueden encontrar entre una nube y otra, en el interior de una nube, o entre la nube y el aire, y comprender que funcionan bajo el mismo principio (Sánchez, 2022).

Pero el comportamiento exacto del origen de un rayo en una tormenta eléctrica no es preciso, se cree que este surge de un fenómeno denominado avalancha de electrones fugitivos relativistas que se explica a continuación.

3.2. Avalancha de Electrones Relativistas Fugitivos

Dadas las condiciones anteriores, Wilson (1925) describió que los electrones que se obtienen de los choques con radiación cósmica[35] al interior de la tormenta[36], adquieren velocidades cercanas a

[35] Son partículas o grupos de partículas de alta energía (representadas principalmente por protones o núcleos atómicos) que se desplazan por el espacio casi a la velocidad de la luz.

[36] Un protón que se mueve a velocidades cercanas a la de la luz, procedente del espacio, choca con una molécula de nitrógeno u oxígeno de la atmosfera, producción una lluvia partículas energéticas (electrones).

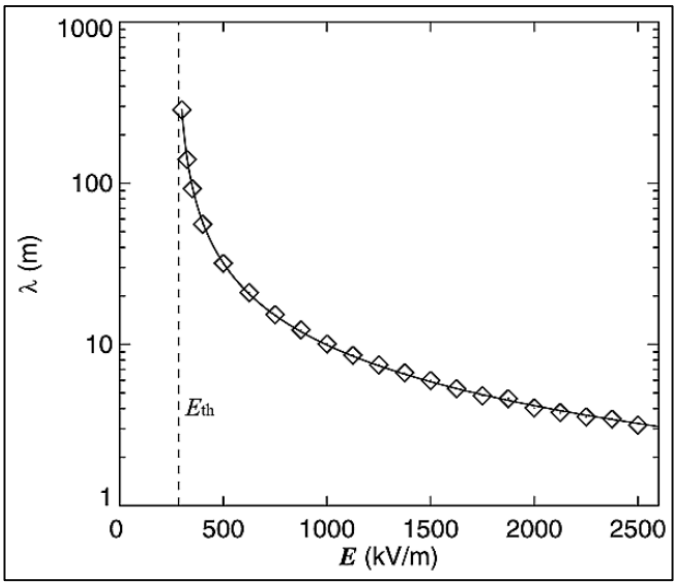
la de la luz. Esto se debe a los fuertes campos eléctricos[37], que al acelerar electrones, les permiten superar la pérdida de energía por fricción que tienen al chocar con moléculas del aire, a estos se les denominó como electrones fugitivos (Runaway Electrons-RE).

Varios años después los físicos Aleksandr Viktorovich Gurevich, Gennady Milikh, y Robert Roussel-Dupre (1992) analizaron los resultados obtenidos por Michael McCarthy y George K Parks (1985) sobre la emisión de rayos X por Bremsstrahlung[38] en la tormenta, e introdujeron un proceso de multiplicación de los RE, deduciendo así que los electrones (RE) acelerados a velocidades cercanas a la de la luz (0,89c), al chocar con átomos o moléculas también con grandes velocidades, generan la liberación de más electrones, creando una "Avalancha de Electrones Fugitivos Relativistas" o RREA por sus siglas en inglés (Relativistic Runaway Electron Avalanches).

Este proceso puede continuar siempre que los electrones estén sometidos a un intenso campo eléctrico, de esta manera el valor mínimo del campo eléctrico para que los electrones adquieran más energía de la que pierden es de aproximadamente 0,1 MeV, sin embargo, en la simulación realizada por Dwyer (2005) se estimó que este valor del campo eléctrico sería de 284kV/m como se ve en la Figura 3.5 (línea punteada).

Figura 3.5

Energía mínima para la producción de los RREA



Nota: Línea continua: descrita por la ecuación 3.2. Línea discontinua: valor mínimo del campo eléctrico para desencadenar los RREA. Tomado de "A fundamental limit on electric fields in air" por J. R. Dwyer, 2003, Geophysical Research Letters.

[37] Wilson (1925) estableció que el valor del campo eléctrico era de $2x10^6 V/m$, sin embargo, este valor no era correcto y se dedujo con precisión más adelante.

[38] Cuando un electrón es desviado por un núcleo atómico y su trayectoria se curva, su desaceleración resulta en la emisión de radiación electromagnética de alta energía, en este caso, rayos X.

Según la Figura 3.5, la longitud característica de crecimiento de avalanchas λ es un parámetro a tener en cuenta, ya que determina la distancia media en la que se propagan los RREA de acuerdo al campo eléctrico existente. La Ecuación 3.2 es la que describe el comportamiento de la curva, por lo tanto, cada valor del campo eléctrico E que supere los 248 kV/m, disminuye la distancia media λ de la avalancha, y la línea punteada representa el campo eléctrico mínimo para que los electrones desemboquen en una avalancha.

$$\lambda(E) = \frac{7200kv}{\left(E - 275\frac{kv}{m}\right)} \tag{3.2}$$

La manera de determinar la cantidad de electrones resultantes en la avalancha se deduce según la Ecuación 3.3, que depende de la cantidad de electrones iniciales (N_0), el parámetro λ, y la distancia z a la que se inicia la avalancha.

$$N_{RE} = N_0 e^{\left(\frac{z}{\lambda}\right)} \tag{3.3}$$

Esta imagen (Figura 3.5) sale de la simulación Monte Carlo realizada por Dwyer (2003) que estudia como algunos rayos gamma y positrones retroalimentan la avalancha de electrones a lo cual él denominó Relativistic Feedback o Retroalimentación Relativista, de esta manera se establece que el valor de energía mínima dado por esta investigación no es del todo concreto, ya que en otros trabajos se han registrado energías mínimas de desbocamiento de avalanchas de electrones mucho mayores que las acá sugeridas, sin embargo, este es un claro ejemplo para la estimación de la energía mínima de campo eléctrico que se requiere para modelar la avalancha de electrones fugitivos relativistas.

Por ende, se le atribuye a Gurevich, Milikh, y Roussel-Dupre (1992) el descubrimiento de los RREA, por otro lado, es interesante mencionar que hay una publicación que estudia los trabajos de Wilson, y explica como él tenía una idea sobre este fenómeno a la que denominó efecto de bola de nieve (Williams, 2010), esto lleva suponer que Wilson entendía este fenómeno desde 1933, casi sesenta años antes de que se le reconociera como RREA, pero Wilson no hablo o profundizó de el en sus publicaciones, sino que lo dejó en sus notas de estudio.

El campo eléctrico al interior de una tormenta determina la dirección que tomará la avalancha de electrones, por ejemplo en la Figura 3.3, el campo al interior de la tormenta es de la base superior de la nube a la parte inferior (descendente), se tiene que el movimiento de los electrones relativistas será contrario al campo y ascenderán durante la tormenta.

3.3. Destellos de Rayos Gamma Terrestres

Hasta el momento se ha hablado del comportamiento de los electrones en el interior de una tormenta cuyas velocidades cercanas a la de la luz desencadenan más electrones (RREA), es en este momento cuando estos al chocar con alguna molécula que compone el aire liberan una gran

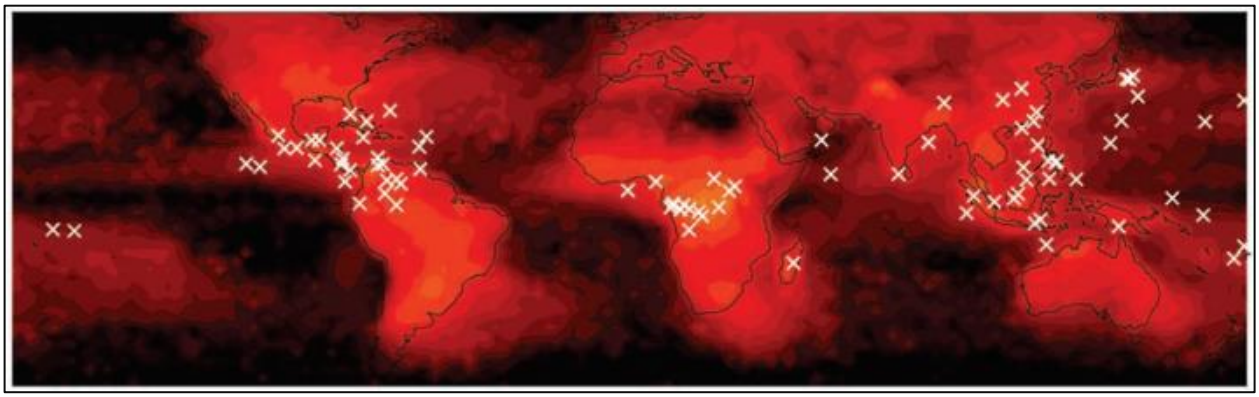
cantidad de energía, por medio de la radiación de frenado o Bremsstrahlung que explica que a medida que el electrón se ve atraído al núcleo positivo de un átomo de dicha molécula, este cambiará su trayectoria desacelerando y perdiendo energía que será liberada en forma de radiación gamma. Estos rayos gamma se les conocen como "Destellos de Rayos Gamma Terrestres" (TGF) y fueron descubiertos por primera vez por Gerald Jay Fishman (1994).

Fishman fue seleccionado en 1978 como director de investigación para el proyecto BATSE (Burst and Transiet Source Experiment) de la NASA, cuyo propósito era el de detectar estallidos de rayos gamma por medio de 8 detectores posicionados en el telescopio espacial CGRO (Compton Gamma Ray Observatory). Fue en 1994 que Fishman en dicho proyecto descubrió rayos gamma provenientes de una tormenta a los que denomino TGF, se estima que estos tienen intensidades entre 20 keV y 40 keV y duran cortos periodos temporales de milisegundos y sub-milisegundos.

Se estima que la región de origen de los TGF está dada por altitudes entre los 15km-21km (Dwyer y Smith, 2005), además se establece que la causa de producción de TGFs está dado por el desarrollo de una Tormenta eléctrica, como lo evidencian los análisis de datos del satélite RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), donde el registro de dicha radiación se da en lugares como costas, islas, penínsulas, montañas, entre otros que favorecen el desarrollo de tormentas eléctricas debido a la humedad y a las condiciones climatológicas del sector (ver Figura 3.6) (Smith et al., 2005).

Figura 3.6

TGFs registrados con el satélite RHESSI



Nota: Registro de rayos Gamma TGF, provenientes de tormentas eléctricas. Tomado de "Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV" por Smith, David M.; Lopez, Liliana I.; Lin, R. P.; Barrington-Leigh, Christopher P., 2005, Science.

De la misma manera sucede con el satélite espacial Fermi (Briggs et al., 2010), cuyos datos registrados coinciden con una mayor proporción de TGFs en zonas con mayor frecuencia de tormentas eléctricas. Los TGF detectados por satélites cumplen con ciertas propiedades como lo son las energías en magnitudes de mega electronvoltios y una duración de propagación de milisegundos, esta radiación es registrada normalmente en detectores espaciales e incluso aéreos como es el caso de ADELE (Dwyer et al., 2015).

3.3.1. Destellos de Rayos Gamma Terrestres Descendentes

Por otro lado, existe una serie de TGF que no es ascendente, sino descendente y se ha registrado en detectores terrestres como el International Center for Lightning Research and Testing at Camp Blanding (ICLRT), donde se detectaron destellos de rayos de este tipo (TGFs) en relación con la descarga de rayos causada por cohetes en el 2003, en síntesis, el grupo de investigación buscaba lanzar un cohete con cables conectados para inducir un rayo de manera artificial (Dwyer et al., 2004).

El segundo registro de un TGF a nivel del suelo se dio en el año 2009 por la red de detección de radiación llamada Thunderstorm Energetic Radiation Array (TERA) en el ICLRT, a diferencia del anterior este se registró de manera natural, y se llegó a la conclusión que los TGF descendentes al igual que los ascendentes eran causados por los RREA debido al proceso de Bremsstrahlung, ya que los cortos tiempos y las grandes intensidades(MeV) registradas coincidían con las características propias de este tipo de radiación.

Aunque el estudio del origen de los TGF sigue en investigación, hasta la fecha se conocen dos posibles procesos para la multiplicación de electrones relativistas (RREA) que por medio del proceso de Bremsstrahlung generan los Destellos de Rayos Gamma Terrestres, estos se denominan Retroalimentación Relativista modelada por Dwyer (2003) y el Mecanismo de Electrones Fugitivos en frío.

El primero consiste, en los mecanismos de retroalimentación positiva de los positrones y los fotones en la producción de los RREA. Esta retroalimentación positiva ocurre cuando los positrones y los fotones, generados por la avalancha de electrones descontrolados que surge principalmente de la semilla de radiación cósmica, se propagan hacia la región del campo eléctrico con el potencial negativo más alto y generan más electrones relativistas.

El segundo mecanismo establece como fuertes campos eléctricos en las puntas de los líderes de los rayos[39] pueden acelerar electrones a velocidades cercanas a la de la luz, dotándolos con energías relativistas, produciendo así electrones semillas que permitan la multiplicación de los RREA (Moss et al., 2006)

En una investigación dirigida por Brian Hare en 2014 se evidencia el segundo mecanismo, donde existen tres posibles maneras de explicar como un líder positivo en movimiento ascendente o UPL por sus siglas en inglés (Upward Moving Positively Charged Leader), puede desencadenar los RREA, sin embargo, la que es más probable según Hare (2016) es que:

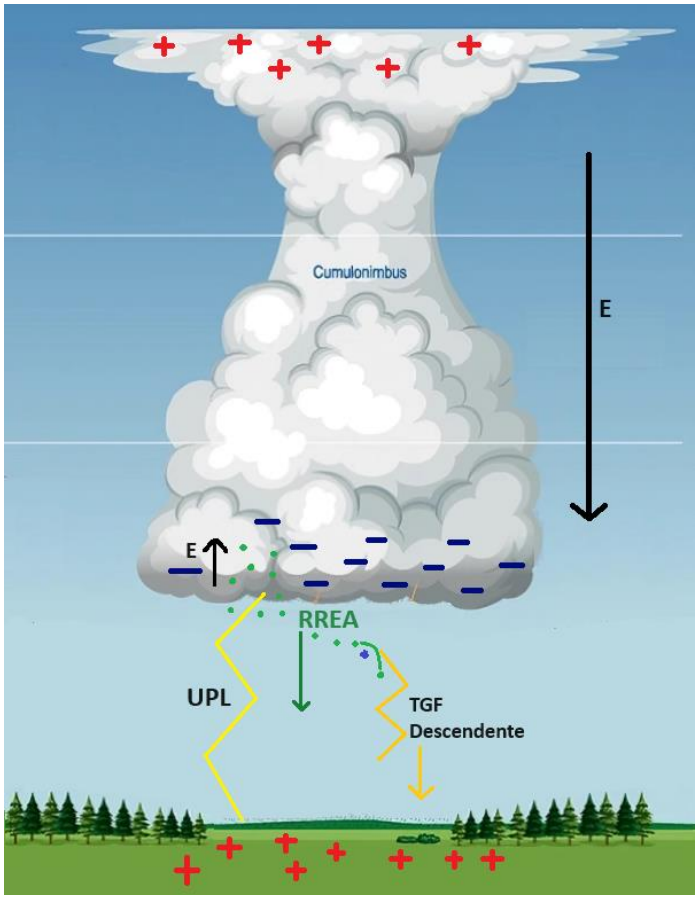
> *"El "UPL" mejoró el campo eléctrico local lo suficiente como para que ocurriera una retroalimentación relativista, lo que al menos descargó parcialmente el campo eléctrico local. Este escenario es análogo al modelo desarrollado en Dwyer* (2012)*"*(p.20)

[39] Los líderes son canales delgados, altamente ionizados y altamente conductores, también son conocidos como guías escalonadas.

Este fragmento explica que el mecanismo que describe Hare (2016) establece que un UPL que es un líder con carga positiva que asciende después del líder negativo que desciende, tendrá grandes campos eléctricos debido a la carga posicionada en las puntas de los líderes, esto causará un campo eléctrico ascendente de manera local que permitirá acelerar electrones relativistas descendentes y, por lo tanto, desencadenará un TGF descendente (Figura 3.7).

Figura 3.7

Proceso del origen de los TGF descendentes



Nota: Representación gráfica de los procesos físicos para el origen de los TGF por medio del proceso de Bremsstrahlung en los RREA. Elaboración Propia en Paint, 2024.

Cuando esta radiación gamma descendente (TGF) se origina, viaja un par de metros antes de chocar con un átomo de la atmósfera (Nitrógeno-14 u Oxígeno-16), esto causa la pérdida de un neutrón que da origen a isótopos inestables (Nitrógeno-13 u Oxígeno-15). Sin embargo, este proceso se explicará ampliamente en el siguiente capítulo.

Por otro lado, el desarrollo de estos procesos durante la tormenta y a lo largo de la troposfera, se dan en ciertos rangos de altitudes, en primer lugar, la base de la nube debe formarse entre 0,2Km y 0,8Km del suelo, y puede llegar a alcanzar una altura de entre 5 y 7km, esto es un factor de suma

importancia, porque las radiaciones que se desarrollan en una nube de este tipo, son detectadas a nivel del suelo, por otro lado, si la base de la nube se originara más arriba, la probabilidad de que la energía llegara a la superficie terrestre, sería muy baja.

Según lo anterior se establece que de la Figura 3.7, los electrones relativistas o RREA, deben desarrollarse a una altitud entre 1Km y 3,5Km, estos electrones liberan la energía TGF, esta última viaja de manera descendente un par de metros antes de chocar con un átomo de la atmósfera, y así generar los isótopos cuyo origen se da a aproximadamente 89 metros sobre el nivel del suelo (Wada, 2021).

Todos los fenómenos acá descritos se modelaron gracias a la indagación de los destellos de rayos gamma terrestres (TGF), partiendo de la descripción de los RREA como mecanismo de su producción, seguido de otro tipo de TGF, estos descendentes, que abrieron investigaciones a procesos nucleares debido a las condiciones existentes al interior de ciertas tormentas eléctricas.

Capítulo IV: Desintegraciones en una Tormenta Eléctrica y sus Posibles Consecuencias a la Salud Humana

En el desarrollo del presente capítulo se busca mostrar algunas concepciones sobre las desintegraciones radioactivas, estableciendo su origen en átomos inestables, y describiendo su comportamiento por medio de la ley exponencial de desintegración, a su vez se mencionan ciertas magnitudes como el tiempo de vida media y el periodo de semidesintegración, para así dar paso al origen de los positrones en las tormentas eléctricas debido a los procesos de desintegración y evidenciar los diversos trabajos que fueron predecesores al modelo de obtención de positrones por decaimiento.

Para concluir, se examinan los valores de radiación gamma emitidos por las tormentas eléctricas, debido a procesos nucleares, y cómo estos pueden alcanzar niveles de radiación considerable que puede afectar la salud.

4.1. Consideraciones Iniciales sobre las Desintegraciones

La radiactividad o desintegración nuclear, es un proceso físico que consiste en la liberación de energía de átomos inestables, esto se puede ver en la emisión de partículas Alfa, Beta, Gamma y Neutrones, desde el núcleo atómico, además se puede llegar a emitir partículas desde la capa electrónica del átomo como lo son los Rayos X y los Electrones Auger[40].

Todos aquellos átomos inestables se les comenzó a denominar radionucleidos y se expresan de acuerdo con el símbolo del elemento químico (X), número atómico o número de protones en el núcleo (Z), número másico que es la suma de protones y neutrones (A=n+p), y el número de neutrones en el núcleo (n) que se puede determinar cómo n=A-Z, de la siguiente manera:

$$ {}^{A}_{Z}X_{n} \tag{4.1}$$

A este tipo de átomos también se les considera como isótopos o radioisótopos nombrados así por Soddy (1913a), sin embargo, estos términos hacen referencia a un caso específico de átomos inestables, donde los nucleidos[41] de un mismo elemento, pueden variar en su número másico (A=n+p) debido a su diferente número de neutrones (n), pero que si tiene el mismo número atómico (Z=p), un ejemplo puede ser el siguiente:

$$ {}^{15}_{8}O_{7},\ {}^{16}_{8}O_{8},\ {}^{17}_{8}O_{9},\ {}^{18}_{8}O_{10},\ {}^{19}_{8}O_{11} $$

Adicionalmente, existen otras clasificaciones como lo son los isóbaros (el mismo número A, pero diferente número Z), los isótonos (mismo número de n, pero diferentes números de A) e isómeros (moléculas que tienen la misma fórmula molecular, pero difieren en la disposición tridimensional

[40] El efecto Auger implica que un electrón de una capa interna es expulsado del átomo después de que un electrón de una capa externa pase a un nivel de energía más bajo. Este proceso libera la energía en forma de un electrón de baja energía, conocido como electrón Auger

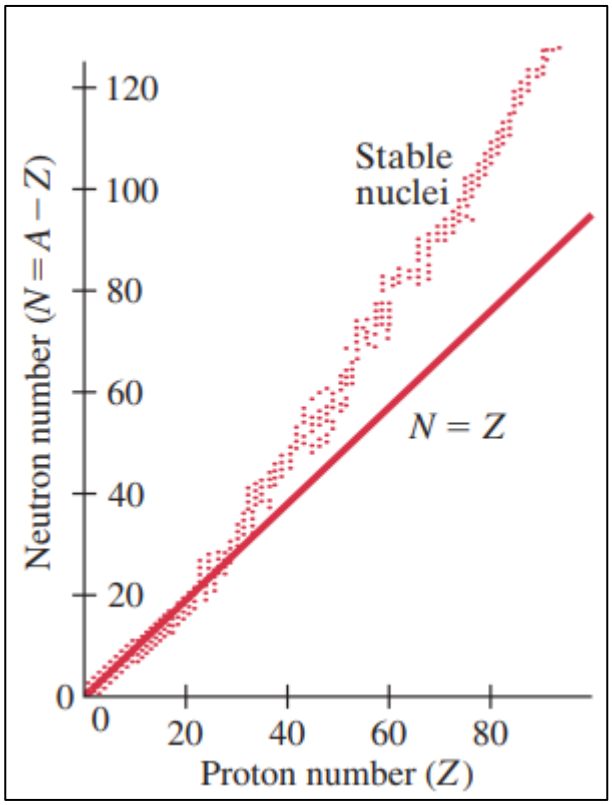
[41] Un nucleido se refiere a cada una de las distintas especies atómicas que se caracterizan por la combinación de sus nucleones.

de sus átomos), cuyas clasificaciones muestran por ejemplo que todos los procesos de desintegración beta son isóbaros como en los siguientes casos $^{22}_{14}Si_8$, $^{22}_{13}Al_9$, $^{22}_{12}Mg_{10}$, $^{22}_{11}Na_{11}$.

Cuando un átomo es estable, la proporción entre el número de protones y neutrones en su núcleo tiende a ser bastante similar, aunque no son idénticos. Sin embargo, es crucial que el número de neutrones sea igual o mayor que el número de protones para contrarrestar la fuerza eléctrica repulsiva entre los protones dentro del núcleo. Esta condición permite que la fuerza nuclear fuerte mantenga unido el núcleo. La Figura 4.1 ilustra esta relación, representando así los átomos estables.

Figura 4.1

Estabilidad nuclear de isótopos



Nota: Número de neutrones versus número de protones para nucleidos estables, que están representados por puntos. La línea recta representa N = Z. Tomado de "Physics: Principles with Applications, Global Edition-Seventh Edition" por Douglas C. Giancoli, 2016, Pearson.

Teniendo en cuenta que los elementos estables son aquellos cuya unión de neutrones y protones dentro del núcleo es bastante sólida debido a la fuerza nuclear fuerte y ,por lo tanto, estos no decaen con el tiempo o lo hacen en periodos muy prolongados, un ejemplo de estos se da con el isótopo Bismuto-209, que antes se creía que este tenía el núcleo estable más pesado, con 83 protones y 126 neutrones, sin embargo, en una investigación realizada en el año 2003 por un equipo del Institut d'Astrophysique Spatiale de Francia (Marcillac et al., 2003) se descubrió que este isótopo tenía un decaimiento alfa con un tiempo de vida media de $1{,}9\ x\ 10^{19}$ años.

De esta manera se establece que los isótopos inestables tenderán a desintegrarse, ya que la fuerza al interior del núcleo no será suficiente para mantener unidos los protones y neutrones, estos pueden llegar a decaer en tiempos de vida media extremadamente largos como es el ejemplo del Bismuto-209, o por otro lado en cortos periodos de tiempo como lo es el Hidrógeno-7 con una duración de $2{,}3\ x\ 10^{-23}$s.

Como se mencionó en el pequeño recorrido histórico, Rutherford (1900) logró determinar el tiempo de semivida o periodo de semidesintegración, que es el tiempo que tarda un radionucleido en desintegrarse, es decir, en perder (o transformar) la mitad de sus nucleidos en partículas radiactivas. Cuando Rutherford (1900) analizó la radiación del Torio, explicada previamente, y su ionización del aire que causaba una corriente al aplicar cierto voltaje entre dos placas notó en un periodo de un minuto que la intensidad de la radiación había disminuido a la mitad.

Rutherford expresó esta relación de la siguiente manera:

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda n \quad \text{o} \quad dn = -\lambda n dt \tag{4.2}$$

Donde n es el número de núcleos que no han decaído en cierto tiempo t, entonces dn es el número de decaimientos en un intervalo de tiempo dt. Siendo λ una constante de desintegración que determina la probabilidad de que un núcleo decaiga en la unidad de tiempo (s), cuya compañía con el signo negativo representa la pérdida de nucleidos en el tiempo. Además, λdt sería la probabilidad de que decaiga en un intervalo de tiempo y $\lambda n dt$ es la probabilidad que cualquiera de los núcleos decaiga en este intervalo (Eisberg y Resnick, 1994).

Ahora esta ecuación expresada de la siguiente manera,

$$\frac{dn}{n} = -\lambda dt \tag{4.3}$$

Integrando a ambos lados de la ecuación se tiene:

$$\int_{n_0}^{n} \frac{1}{n} dn = -\lambda \int_{t_0}^{t} dt$$

Cuyo resultado es

$$Ln\left(\frac{n}{n_0}\right) = -\lambda t \tag{4.4}$$

Al despejar el número de material que queda en la muestra n(t) se obtiene:

$$n(t) = n_0 e^{-\lambda t} \tag{4.5}$$

Por lo tanto, la Ecuación 4.5 es utilizada para determinar el promedio de núcleos que decae de una muestra radiactiva, según (Rutherford y Soddy, 1902) la intensidad de la radiación dependerá solo de la cantidad del elemento radiactivo presente al inicio del decaimiento(n_0), de esta manera se vuelve importante mencionar que para utilizar esta ecuación es necesario saber cuál es la cantidad inicial de átomos del material, ya que al analizar un átomo individual no hay forma de predecir cuándo se desintegrará dicho átomo, o en palabras de Eisberg y Resnick (1994):

> *"Puesto que los cálculos involucran probabilidades, estos resultados solo son correctos en promedio, pero fluctuaciones del promedio son muy pequeñas en el caso típico en el cual el número de núcleos es muy grande"* (p.639)

Acá se explica que el carácter probabilístico de la ley de desintegración se aplica en un promedio de valores (núcleos) que decaen en una muestra, por lo tanto, pueden existir algunas fluctuaciones o variaciones en los promedios calculados, sin embargo, se establece que a mayor número de núcleos o átomos que se analicen, hay menos variación de las probabilidades de desintegración.

A esta ecuación (4.5) se le conoce como ley exponencial de desintegración radiactiva, y se establece que es una ley de carácter probabilístico que se rige bajo dos axiomas (Huestis, 2002):

> *"Un solo núcleo radiactivo no tiene "memoria" de su historia pasada.*
>
> *Los tiempos de descomposición para dos núcleos cualesquiera de un isótopo dado están gobernados por exactamente las mismas distribuciones de probabilidad."* (p.524)

El primer axioma establece que la desintegración radiactiva es un proceso aleatorio a nivel de átomos individuales, ya que el núcleo de un isótopo no tiene "memoria", entonces se dice que este no "envejece" con el paso del tiempo, esto hace referencia a que la probabilidad de desintegración no aumenta (o disminuye) con el tiempo, sino que permanece constante independientemente de cuánto tiempo haya existido el núcleo. El segundo axioma explica como el tiempo de descomposición de dos núcleos del mismo isótopo, pueden seguir las mismas distribuciones de probabilidad. Esto quiere decir que, sin importar qué núcleo específico se esté observando dentro del isótopo, las probabilidades de que se descomponga en cierto tiempo van a ser las mismas para ambos núcleos.

La predicción exacta de cuándo se desintegrará un átomo radiactivo en un período de tiempo específico no es posible, sin embargo, se puede describir mediante una función de probabilidad[42] que muestra la posibilidad de que ocurra la desintegración en función del tiempo. Esta función de probabilidad se ajusta a una distribución exponencial[43], lo que significa que la desintegración disminuye exponencialmente con el tiempo.

Como se evidencia en la Ecuación 4.4 la desintegración depende de la constante λ de desintegración, por lo tanto, se puede derivar una relación entre la constante de desintegración y la semivida a partir de la ecuación 4.4.

$$Ln\left(\frac{n}{n_0}\right) = -\lambda t \tag{4.4}$$

Como ya se explicó en el proceso de desintegración los radionucleidos después de cierto intervalo de tiempo, se ven reducidos a la mitad del material radioactivo inicial, por lo tanto; $n(t) = \frac{n_0}{2}$

[42] Una función de probabilidad describe cómo se distribuyen las probabilidades entre los posibles resultados de un evento aleatorio.
[43] La distribución exponencial es una función continúa empleada para representar los períodos de espera antes de que ocurra un evento específico, esta distribución muestra la característica de "pérdida de memoria".

$$Ln\left(\frac{\frac{n_0}{2}}{n_0}\right) = -\lambda t$$

$$Ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t_{1/2}$$

Siendo de esta manera $t_{1/2}$ el tiempo de semivida o período de semidesintegración de la muestra, lo que nos da la constante:

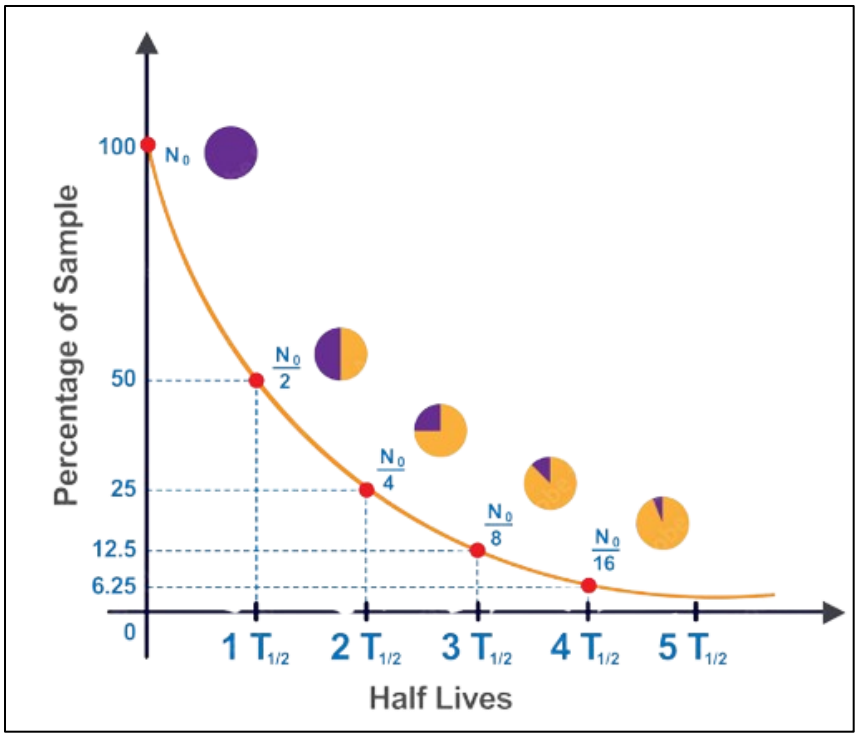
$$\lambda = \frac{0{,}693}{t_{1/2}} \tag{4.6}$$

$$t_{1/2} = \frac{0{,}693}{\lambda} \tag{4.7}$$

De esta manera se tiene una expresión del periodo de semidesintegración que depende de la constante λ, lo que realmente intenta explicar el periodo de semidesintegración ($t_{1/2}$) se puede representar en la Figura 4.2

Figura 4.2.

Curva de semivida ($t_{1/2}$)



Nota: Representación del tiempo de semivida o periodo de semidesintegración en relación al porcentaje de una muestra. Tomado de "Adobe Stock" por Nandalab, https://stock.adobe.com/es/images/half-life-curve-in-nuclear-chemistry-vevtor-illustration/551099764.

Donde se establece que una vez pasado un periodo de tiempo ($t_{1/2}$), el número de núcleos se verá reducido a la mitad ($n_0\ /2$), por lo tanto, la siguiente mitad de núcleos decae ($n_0\ /4$) en un tiempo de semivida ($2t_{1/2}$), y así sucesivamente, de esta manera se tiene que el periodo de semidesintegración ($t_{1/2}$) es el tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos de una muestra radioactiva. Este valor se determina al tomar medidas experimentales, donde se mide la cantidad de radiactividad emitida por una muestra, y dichos valores se ajustan a una curva matemática que por lo general es una curva de decaimiento como la de la Figura 4.2.

Adicionalmente, existe una relación entre el periodo de semidesintegración y lo que se conoce como vida media del radionucleido, esta se representa como τ y aunque puede confundirse con la semivida ($t_{1/2}$), son muy diferentes. Se debe aclarar que τ es el promedio de los tiempos de decaimiento de todos los átomos de una sustancia, por ejemplo, si se tiene cierto número de átomos N_1, estos decaerán en cierto tiempo t_1, si se tiene N_2 este decaerá en otro tiempo t_2, y así sucesivamente hasta que todo el material decaiga. De estos tiempos se puede determinar un promedio, que es el tiempo τ, que se encuentra según la ecuación

$$\bar{\tau} = \frac{N_1 t_1 + N_2 t_2 + N_3 t_3 \ldots N_n t_n}{N_1 + N_2 + N_3 \ldots N_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i t_i}{N_i} \tag{4.8}$$

El decaimiento al ser un fenómeno exponencial se sumará desde un tiempo cero hasta infinito, y desde la cantidad de átomos inicial, hasta cero cuando toda la muestra se desintegre, el cambio de la sumatoria discreta a la integral continua se debe a la gran cantidad de átomos (número de Avogadro[44]) que componen una muestra.

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} t dn}{\int_{n_0}^{0} dn} \tag{4.9}$$

Resolviendo la integral inferior se tiene que

$$\int_{n_0}^{0} dn = -n_0 \tag{4.10}$$

Resolviendo la integral superior se tiene que

$$\int_0^{\infty} t dn \tag{4.11}$$

Donde dn es la derivada de la Ecuación 4.5 ($n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$)

$$dn = -n_0 \lambda e^{-\lambda t} dt \tag{4.12}$$

Se sustituye 4.12 en 4.11 y se obtiene

$$\int_0^{\infty} t dn = -\int_0^{\infty} n_0 t \lambda e^{-\lambda t} dt$$

De esta manera la Ecuación 4.8 queda como

[44] El número de Avogadro es una constante fundamental cuyo valor es aproximadamente $6{,}02214076 \times 10$ moléculas por mol. Este número representa el número de entidades elementales (átomos, moléculas, iones, etc.) en un mol de cualquier sustancia.

$$\bar{\tau} = \frac{-\int_0^\infty n_0 t\lambda e^{-\lambda t} dt}{-n_0} = \lambda \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt \tag{4.13}$$

La Ecuación 4.13 se soluciona con el método de integral por partes, siendo $u = t, du = dt,$ $dv = e^{-\lambda t} dt, v = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t}$, al operar y simplificar se obtiene que

$$\bar{\tau} = (-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t})_0^\infty$$

De esta manera se obtiene que el tiempo de vida media τ es

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\lambda} \tag{4.14}$$

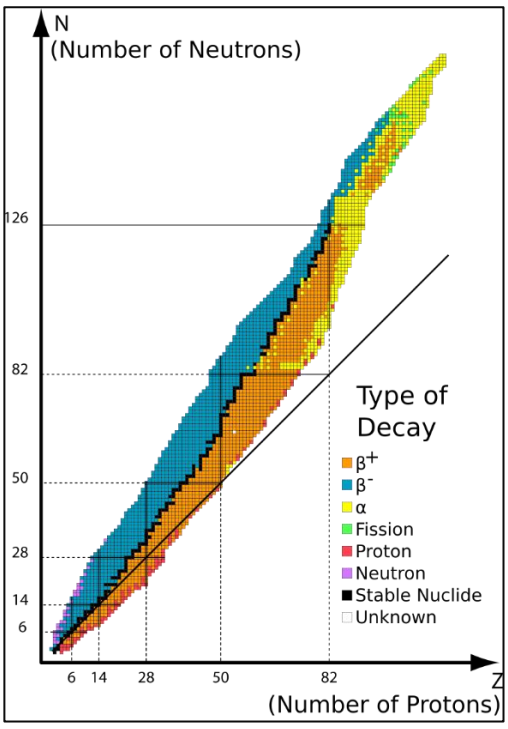
Lo cual permite concluir que la vida media de un radionucleido guarda una relación inversamente proporcional con la constante de desintegración λ.

Se han nombrado conceptos relevantes en el proceso de desintegración, y a su vez se muestra que la radiactividad de un elemento es el decaimiento de un nucleido padre (P) en un nucleido hijo (D), que puede variar según el tipo de desintegración con que se esté trabajando, como lo son la radiación alfa (α), beta (β) y gamma (γ), la Figura 4.3 demuestra como los diferentes nucleidos pueden tener alguna de las anteriores desintegraciones o mantenerse estables.

Como se ilustra, los isótopos que aparecen de color negro son átomos estables, por lo tanto, no decaen, mientras que los de color naranja, azul y amarillo son las tres desintegraciones ya mencionadas, más comunes. Siendo los colores restantes otra forma de radiactividad presente en la naturaleza o inducida de manera artificial.

Figura 4.3.

Tabla de desintegraciones en cada isótopo



Nota: Tabla de isótopos radiactivos y estables. Tomado de "Wikimedia commons", 2008, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Table_isotopes.svg.

Según lo mencionado en la sección 2, la introducción del neutrino resolvió el problema frente a la conservación de la energía, del momento lineal y del momento angular en el proceso de desintegración beta, a continuación, se aborda cada uno de estos para el proceso de decaimiento beta β^+.

En primer lugar, se tiene el problema de la conservación de la energía, donde la diferencia de energía asociada a las masas de las partículas antes y después de la desintegración no se conservaban, siendo la introducción del neutrino la solución a este problema, ya que la energía faltante la adquiría esta nueva partícula. En relación con esto se establece que los decaimientos de radiactividad tienen una energía de desintegración denominada con la letra Q, que varía según el tipo de decaimiento que se esté trabajando.

Para poder comprender esta energía se ilustrará un ejemplo con un elemento radiactivo que no está asociado a la explicación de las tormentas eléctricas, sino que servirá como herramienta para el entendimiento de la energía de desintegración Q.

Cuando un núcleo inestable emite radiación, se descompone de un núcleo de mayor energía a uno de menor energía, dado esto, se establece que esta diferencia de energía debería ser igual a la suma de las energías de los núcleos emitidos en la desintegración. Por ejemplo, en el proceso de desintegración beta β^- se tiene que $Q = (masa\ del\ nucleo\ padre - masa\ del\ nucleo\ hijo)c^2$, al analizar el caso del isótopo Berilio-10 según la notación de nucleidos ${}^{10}_{4}Be_6 \rightarrow {}^{10}_{5}B_5 + \beta^- + \bar{\nu}$, su energía sabiendo que $1u$[45] $= 931{,}494013\ MeV/c^2$, y que los valores de las masas fueron tomados de (Haynes, 2014):

$$Q = (m_{10Be} - m_{10B})c^2$$

$$Q = (0{,}0005969) * 931{,}494013 \frac{MeV}{c^2} * c^2 = 0{,}5560087764\ MeV$$

La energía de desintegración Q muestra como la energía liberada en el proceso de decaimiento representa su transformación en dos partículas (electrón-antineutrino), manteniendo así el proceso de conservación de la energía, por lo tanto, el valor $0{,}5560087764\ MeV$, es la energía que poseen la partícula beta, que puede tomar un valor de cero hasta esa energía $0{,}556MeV$ debido su espectro de energía continua, acompañado del antineutrino que adquiere la energía faltante, justo como se explicó en el Capítulo 2.

Teniendo en cuenta que la ecuación del decaimiento beta β^- está dada como ${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z+1}D + \beta^- + \bar{\nu} + K_T$, donde (P) es el nucleido padre que se desintegra en el nucleido hijo (D), K_T es la energía cinética total[46], que es la misma energía de desintegración Q[47], que se distribuye entre el electrón

[45] Unidad de masa atómica

[46] La energía cinética total de la desintegración (K_T), es aquella energía que surge de la reacción al convertir la masa en reposo de los reactivos (muestra inicial) en energía cinética de los productos.

[47] La energía de desintegración Q, es aquella que expresa todos los valores energéticos que se dan al interior de la desintegración, como la energía cinética de las partículas (productos), el valor de rayos gamma que puede surgir debido a exceso de energía, la energía de retroceso (cuando una partícula, es emitida desde un núcleo, el núcleo puede adquirir energía cinética en la dirección opuesta a la emisión de la partícula), sin embargo, estos valores se desprecian, ya que en su mayoría son valores de energía muy bajos, y por lo tanto solo se tiene en cuenta la energía cinética de los productos.

y el antineutrino ($E_{\beta^-} + E_{\overline{\nu}} = E_{KT}$), por lo tanto, la conservación de la energía en el proceso de desintegración es el siguiente:

$$E_{10Be} = E_{10B} + (E_{\beta^-} + E_{\overline{\nu}})$$

$$9327{,}546784 MeV = 9326{,}9907755 MeV + 0{,}5560087764\ MeV$$

De esta manera se evidencia como la energía se conserva, ya que al final y al inicio del proceso esta mantiene un valor constante de 9327,546784MeV.

Ahora se desarrolla el caso para el proceso de desintegración beta (β^+), en el Nitrógeno-13, cuyo isótopo inestable surge de las tormentas eléctricas justo como se explicó al final de la sección 3.3.1: ${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D + \beta^+ + \nu + K_T$, donde la ecuación del decaimiento (β^+) está dada por el nucleido padre (P) que se desintegra en el nucleido hijo (D), un positrón o partícula beta(β^+), un neutrino (ν) y la energía de desintegración o energía cinética K_T que se expresa como $Q = (m_P - m_D)c^2 - 2m_e c^2 = K_T$, en este caso se observa que el término $2m_e c^2$ es la equivalencia energética de dos masas de electrones o 1.022 MeV, que es la energía requerida para la creación del par e^+e^- en el proceso de decaimiento del positrón. Esto se debe a que dentro del núcleo se producen un par electrón-positrón donde el positrón sale emitido y el electrón se combina con un protón para formar el neutrón $\beta^- + p^+ \rightarrow n$.

De esta manera se tiene por ejemplo que la energía de desintegración del decaimiento ${}^{13}_{7}N_6 \rightarrow {}^{13}_{6}C_7 + e^+ + \nu$, tomando los valores de sus respectivas masas de (Haynes, 2014):

$$Q = (m_{13N} - m_{13C})c^2 = K_T + 2m_e c^2$$

$$Q = 0{,}002383762 \cdot 931{,}494013 \frac{MeV}{c^2} c^2 = 2{,}220460031 MeV$$

Acá el valor de la desintegración Q es la suma de la energía K_T más la energía del par electrón positrón ($2m_e c^2$), despejando se obtiene el valor de energía K_T

$$K_T = (0{,}002383762 \cdot 931{,}494013 \frac{MeV}{c^2} * c^2) - 1{,}021997856\ MeV = 1{,}198462175 MeV$$

Según la ecuación de la desintegración beta (β^+) ${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D + \beta^+ + \nu + K_T$, donde K_T es la energía cinética, que se reparte entre la partícula beta β^+ y el neutrino (ν), $(E_{\beta^+} + E_\nu) = E_{KT}$, se establece que la conservación de la energía en el proceso de desintegración es la siguiente:

$$E_{13N} = E_{13C} + (E_{\beta^+} + E_\nu) + 2m_e c^2$$

La mayoría de energías son fáciles de determinar ($E = mc^2$), según la masa de cada una de ellas, sin embargo, el neutrino es una partícula cuya masa es tan pequeña que se aproxima a cero, por lo tanto, la manera de hallar su energía en un proceso de desintegración se hace según la relación de la energía de desintegración (Q), la energía mínima para la creación del par electrón-positrón ($2m_e c^2$) y la energía del positrón o partícula beta(E_{β^+}).

$$E_{máx} = E_{\beta^+} + E_\nu = Q_{\beta^+} - 2m_e c^2 = K_T$$

Recordando que el espectro de energía de las partículas beta podía adquirir cualquier valor entre cero y la energía máxima ($E_{máx} = E_{\beta^+} + E_\nu$), de esta manera se establece que la energía cinética del neutrino al ser emitido del núcleo es:

$$E_\nu = Q_{\beta^+} - 2m_e c^2 - E_{\beta^+} = K_T - E_{\beta^+}$$

$$E_\nu = 1{,}198462175 MeV - 0.510\,998\,928 MeV = 0{,}687463247\ MeV$$

Ahora, teniendo en cuenta que ya se conocen todas las energías, se establece que el principio de conservación en esta desintegración si se cumple

$$E_{13N} = E_{13C} + (E_{\beta^+} + E_\nu) + 2m_e c^2$$

$$9330{,}638785 MeV = 9326{,}990868 MeV + 2{,}625918 MeV + 1{,}022 MeV$$

Como se puede evidenciar los valores en unidades de MeV a ambos lados de la ecuación se conservan, teniendo presente que los procesos de desintegración vistos se analizan desde un conjunto y no desde partículas individuales, como por ejemplo $p^+ \rightarrow n + e^+ + v$, ya que si se soluciona el mismo proceso para dicho caso la energía parece no conservarse, esto debido a que la masa del protón es menor que la del neutrón[48]. Por otro lado, la energía de desintegración daría negativo (Q<0), aquello significa que el proceso necesitaría de un suministro de energía para poder desintegrarse.

Según lo anterior, se tiene que al interior de un núcleo atómico los protones si decaen debido a las interacciones que tiene con los otros protones, por esta razón, cuando un protón de menor masa se transforma en un neutrón de mayor masa, se debe a la energía de enlace nuclear[49] que puede dar cuenta de la masa adicional para la formación del neutrón.

Como se explicó, el momento lineal que se representa en la Figura 2.6b, no cumplía con el principio de conservación, por lo tanto, la introducción del neutrino también contribuyó a no violar esta ley.

Aunque determinar el momento lineal de una partícula puede ser un proceso difícil, si se puede realizar en algunos casos, para ello se necesita de una situación más específica, donde se analiza el retroceso de un núcleo después de su desintegración, como se ilustra en la Figura 4.4a que muestra la detección de una partícula beta de la desintegración de ${}_2^6He_4 \rightarrow {}_3^6Li_3 + \beta^+ + v$ en una cámara de niebla (Csikai y Szalay, 1957).

En la figura 4.4b se hace un esquema de cómo sería el momento lineal, donde la línea punteada representa la emisión del positrón (flecha amarilla), la mancha más grande muestra el retroceso

[48] $Q_{\beta^+} = \left(M_p - (M_n + M_e)\right)c^2 = \left(938{,}272 MeV - (939{,}565 MeV + 0{,}511 MeV)\right) = -1{,}804 MeV$

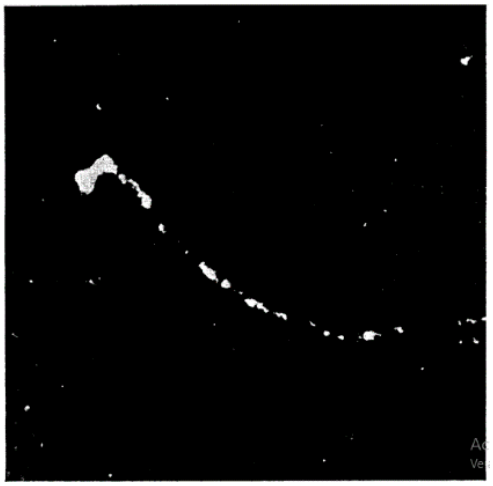
[49] Es la energía necesaria para mantener unidos los nucleones (protones y neutrones) en el núcleo atómico. Cuando se forma un núcleo atómico, su masa total es menor que la suma de las masas individuales de los protones y neutrones que lo componen. Esta diferencia de masa, conocida como "defecto de masa", se puede calcular utilizando la ecuación de Einstein ($E = mc^2$), donde E es la energía nuclear de enlace

del nucleido hijo ${}^{6}_{3}Li_3$ (flecha roja), y por lo tanto para conservar el momento lineal se deduce que el neutrino posiblemente tomará el camino de la flecha azul que se muestra.

Figura 4.4

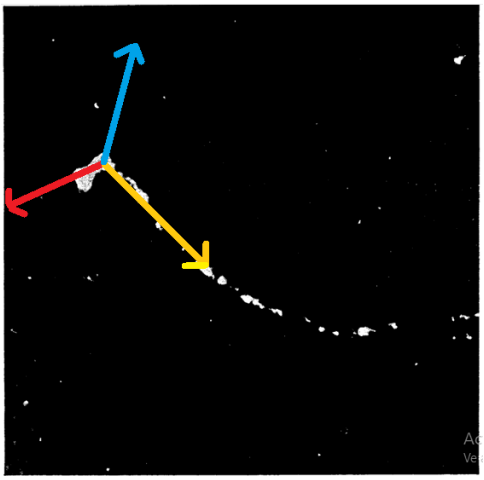
Desintegración del ${}^{6}_{2}He_4$ y su representación del momento lineal

Figura 4.4a.



Nota: Fotografía de la traza de un positrón y el retroceso del nucleido hijo (${}^{6}_{3}Li_3$) del decaimiento del isótopo ${}^{6}_{2}He_4$. Tomado de "The Effect Of Neutrino Recoil In The Beta Decay Of He6", 1957, Soviet Physics Jetp.

Figura 4.4b



Nota: Representación del momento lineal para las particulas del proceso de desintegración beta positivo. Adaptado de "The Effect Of Neutrino Recoil In The Beta Decay Of He6", 1957, Soviet Physics Jetp.

Por último, la conservación del momento angular total se da debido a la suma del momento angular orbital y del momento angular de spin ($\bar{J} = \bar{L} + \bar{S}$), de esta manera se tiene que una desintegración beta (β^-) está dada como $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$. Por lo tanto, la Ecuación 4.15 representa el proceso de conservación.

$$J_n = J_p + (J_{e^-} + J_{\bar{\nu}}) \tag{4.15}$$

Se debe tener en cuenta que el momento angular total para el análisis dependerá únicamente de los momentos angulares de spin, ya que el momento angular orbital será cero antes y después del proceso de desintegración (L=0). Esto se debe a que antes del proceso de desintegración se tiene en cuenta un sistema de masas centrales, donde el potencial central es cero, debido a que no se tiene en cuenta las interacciones externas con otras partículas. Después de la desintegración se considera que el electrón y el neutrino se originan en un punto de partida (r=0) y por lo tanto no poseen un momento angular orbital.

De esta manera se tiene que el momento angular de spin para estas partículas es de ½, ya que todas son fermiones[50], por lo tanto, la conservación del momento angular total es:

[50] Los fermiones tienen espín semi-entero y obedecen el principio de exclusión de Pauli (establece que dos fermiones idénticos no pueden ocupar el mismo estado cuántico simultáneamente dentro de un sistema cuántico)

$$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

Lo que acá sucede, es que los espines del electrón y el antineutrino $(S_{e^-} + S_{\bar{\nu}})$ puede dar dos posibles valores, el primero es que, de igual a cero, y a esto se le conoce como espines antiparalelos, mientras que el otro valor puede ser igual a uno, y se le conoce como espín paralelo, de esta manera se establece que la conservación del momento angular total se da con el espín antiparalelo, ya que este está permitido, sin embargo, el paralelo no lo está[51].

4.2. Generación de Positrones por la Descarga de un Rayo

En el momento se han abordado las condiciones que permiten explicar cómo se obtiene un átomo inestable debido a una tormenta eléctrica, por lo tanto, es necesario partir de los diferentes trabajos sobre física atmosférica que nombran el origen de positrones en tormentas eléctricas, y como estos son predecesores del modelo que establece su origen por medio del proceso de desintegración beta (β^+).

En primer lugar, y como se mencionó con anterioridad el físico Charles Thomson Rees Wilson realizó diferentes trabajos en física atmosférica, entre ellos se encuentra su investigación donde habla sobre los electrones fugitivos (1925), acá Wilson predice que tales electrones pueden llegar a causar desintegraciones nucleares:

> *"No es imposible que una partícula de este tipo pueda causar desintegraciones nucleares como una partícula alfa, o unirse con un núcleo… Sería de interés probar mediante experimentos directos si una nube de tormenta emite alguna cantidad mensurable de radiación extremadamente penetrante de tipo beta o gamma."* (p. 538)

Aunque un par de años después trabajos de sus colegas dieron resultados erróneos sobre la radiación penetrante en las tormentas eléctricas, él siguió creyendo en su hipótesis (Williams, 2010), por lo tanto, Wilson establece una primera idea para obtener radiación de los tipos alfa, beta y gama en el interior de la tormenta.

La radiación gamma terrestre o los TGF están estrechamente relacionados con la producción de positrones en una tormenta, por lo que remitiéndonos a la sección 3.3. se menciona que la persona que descubrió este tipo de radiación por primera vez fue Gerald Jay Fishman.

El trabajo de Fishman (1994) fue necesario para comparar las líneas de emisión gamma con la teoría de Gurevich (2000), ya que este último explicó en una relación matemática que los rayos gamma son producidos por la aniquilación de los pares electrón-positrón.

En ese trabajo Gurevich desarrolla en primer lugar la teoría cinética de la avalancha de electrones fugitivos relativistas que ya había sido descrita previamente por él (1992), pero adicionalmente él establece que, en la tormenta eléctrica, la Avalancha de Electrones Fugitivos Relatvista (RREA)

[51] Si desea profundizar en este tema lo invito a remitirse a (Krane, 1988)

pueden generar un flujo intensivo de rayos X y γ debido al proceso de Bremsstrahlung, y que estos fotones de alta energía pueden crear un par positrón-electrón.

Este modelo se utilizó en varios trabajos posteriores, uno de ellos fue el realizado por el físico Joseph Dwyer (2003), quien se encargó de modelar una nueva retroalimentación al proceso RREA por medio de positrones obtenidos por producción de pares (positrón-electrón) y rayos gamma por medio de dispersión Compton. Otros trabajos que usaron este modelo fueron (Dwyer et al., 2008), (Babich et al., 2005), (Malkov et al., 2016), por nombrar algunos.

Para el año 2011 ya existían una gran serie de investigaciones que buscaban predecir el origen de los TGF, explicar el funcionamiento de los RREA, mirar los mecanismos que buscan explicar el comportamiento de estos fenómenos es algo de interés en la física atmosférica.

Otro trabajo de gran importancia para la presente investigación fue liderado por el físico Michael Briggs (2011) quien explicó como un rayo gamma (TGF) es capaz de producir un par positrón-electrón, acá se analizan los datos registrados por el Telescopio espacial de Rayos Gamma Fermi en el monitor GBM, entre los que se encuentra un valor de 0,511 MeV, cuyo valor coincide con la energía característica de un positrón. Dicho valor se registró en la tormenta del desierto del Sahara que dio resultados concluyentes a la producción de positrones, siendo este un gran aporte a la comprensión de los mecanismos de TGF en las tormentas eléctricas (Sánchez, 2022).

Teniendo en cuenta que ya se comentó sobre detección de positrones en una tormenta desde un detector espacial, y como se había mencionado con anterioridad existen detectores aéreos que se encargan de medir las líneas de emisión de los destellos de rayos gamma terrestres (TGF), siendo uno de ellos el detector ADELE por sus siglas en inglés (Airborne Detector for Energetic Lightning Emissions), este se encuentra al interior de un jet privado llamado Global Hawk, donde se detectaron fotones de 0,511 MeV (TGFs) provenientes entre dos nubes de tormenta, se establece que el mecanismo de producción de pares (positrón-electrón) por medio de los TGF, permiten que el positrón tome la dirección del campo siendo llevados al origen de los RREA, y así retroalimentando la avalancha (Dwyer et al., 2015).

Antes de hablar de los positrones a nivel del suelo, es necesario mencionar algunas investigaciones referentes a la detección de neutrones en la atmósfera, y su importante papel en los procesos de desintegración (Babich et al., 2014), se establece que los neutrones en la atmósfera pueden provenir de la fusión nuclear, la reacción fotonuclear y la reacción inversa a la desintegración β, pero una de las más acertadas es la del origen de neutrones por medio de reacciones fotonucleares:

$$^{14}_{7}N_7 + \gamma \rightarrow {}^{13}_{7}N_6 + n$$

$$^{16}_{7}O_7 + \gamma \rightarrow {}^{15}_{7}O_6 + n$$

Estas reacciones se modelan con los elementos de Nitrógeno y Oxígeno porque son los que se encuentran en mayor porcentaje en la atmósfera, de esta manera se teorizó que la pérdida de un neutrón en un átomo deja como resultado átomos inestables.

Por último, se tiene que la detección de positrones a nivel del suelo trae consigo el modelo que se encarga de describir como las condiciones de una tormenta favorecen la producción de átomos

inestables que se desintegran por medio del decaimiento beta, y generan así un positrón que tiempo después será aniquilado con un electrón, por lo tanto, se da una interacción de una partícula de materia y antimateria.

Teniendo en cuenta las investigaciones anteriores, en el año (2017) se publicó un artículo titulado "Photonuclear reactions triggered by lightning discharge" que explica la emisión de tres radiaciones al interior de una tormenta eléctrica registrada el 6 de febrero de 2017 en las costas del mar de Japón, para ser más preciso en Niigata, donde se encuentra la central nuclear Kashiwazaki-Kariwa, que alberga una serie de detectores del proyecto GROWTH (The Gamma-Ray Observation of Winter Thundercloud). Este proyecto fue liderado por el astrofísico y profesor Teruaki Enoto de la universidad de Kyoto, quien ha realizado la publicación de varios artículos, entre ellos el mencionado previamente.

En esta investigación se detectaron tres emisiones de radiación que se midieron en 4 de sus detectores, ellos describen que la primera emisión de rayos gamma tuvo un tiempo menor a 1ms, se establece que este primer rayo es del tipo TGF descendente, justo como se explica en la sección 3.3.1. (Hare et al., 2016), esto se determina debido a que la energía del rayo fue tan grande que generó una salida de voltaje negativo, y esto se debe a que excedieron el rango dinámico nominal del instrumento[52].

La segunda emisión que se registra concuerda con un tiempo de 56ms después de la primera emisión, con un valor de 10MeV, cuyo origen se atribuye a las reacciones fotonucleares que se explicaron previamente sobre el origen de los neutrones en la atmósfera (Babich et al., 2014), lo que sucede es que cuando el TGF descendente (Primera emisión), choca con algún átomo estable de nitrógeno en la atmósfera, se emitirá un neutrón y un isótopo inestable como se representa según la notación de nucleidos. ${}^{14}_{7}N_7 + \gamma$ (TGF descendente) $\rightarrow {}^{13}_{7}N_6 + n$

Teniendo en cuenta que la emisión de neutrones se da debido a estas reacciones fotonucleares se determina que hay tres maneras de que estos puedan interactuar con el ambiente, en primer lugar, se dice que los neutrones pueden perder energía debido a la dispersión elástica[53] con núcleos atmosféricos, en particular con el nitrógeno, en segundo el 96% de los neutrones puede desaparecer mediante la producción de partículas cargadas ${}^{14}_{7}N_7 + \text{n} \rightarrow {}^{14}_{6}C_8 + p$, y el tercero y último establece que el 4% de los neutrones son capturados radiactivamente por el nitrógeno emitiendo así rayos γ de desexcitación ${}^{14}_{7}N_7 + \text{n} \rightarrow {}^{15}_{7}N_8 + \gamma$, siendo estos últimos los valores de radiación registrados como la segunda emisión detectada.

Por último, se tiene la tercera emisión, en este caso se sabe que del choque de la primera emisión con un átomo estable de nitrógeno en la atmósfera se obtendrán neutrones y un átomo inestable de nitrógeno (${}^{14}_{7}N_7 + \gamma$ (TGF descendente) $\rightarrow {}^{13}_{7}N_6 + n$), por lo tanto, se cuenta con un radioisótopo, que debido a su inestabilidad (${}^{13}_{7}N_6$) se desintegrará en un átomo estable, un positrón y un neutrino

[52] El rango dinámico nominal de un instrumento se refiere al intervalo de valores de entrada dentro del cual el instrumento puede medir con precisión y eficacia.

[53] La dispersión elástica es un fenómeno en el que dos partículas interactúan entre sí y luego se separan sin cambiar su naturaleza o estructura interna. En otras palabras, las partículas conservan su energía cinética y momento lineal después de la interacción.

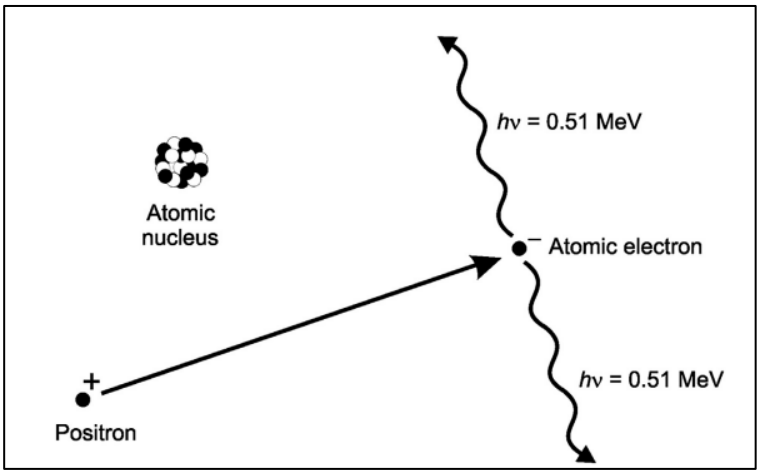
electrónico. Este es el decaimiento beta (β^+) que según la notación de nucleidos se expresa como ${}^{13}_{7}N_6 \rightarrow {}^{13}_{6}C_7 + e^+ + v$.

Cuando se producen los positrones debido a la desintegración beta, se tiene que esta "antipartícula" viajará un par de metros antes de chocar con algún electrón, en este instante ocurre la aniquilación, un proceso en el que la masa de ambas partículas se convierte en energía según la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$. En este caso, la energía producida en la aniquilación se muestra en forma de dos fotones de radiación gamma, donde estos fotones viajan en direcciones opuestas, conservando el momento total del sistema. Además de que la energía de los fotones de radiación gamma producidos es equivalente a la suma de las energías iniciales de las partículas aniquiladas (e^-, e^+), siguiendo el principio de conservación de la energía.

La Figura 4.5 representa este proceso de transformación, que establece que la energía de las partículas según su masa $E = mc^2$, se convierte en su totalidad en dos fotones de 0,511 MeV, de esta manera se mantiene la equivalencia de la masa y la energía.

Figura 4.5

Representación de la aniquilación positrón-electrón



Tomado de "Radioactivity Introduction and History, From the Quantum to Quarks Second Edition" por L'Annunziata, Michael F., 2016, Elsevier.

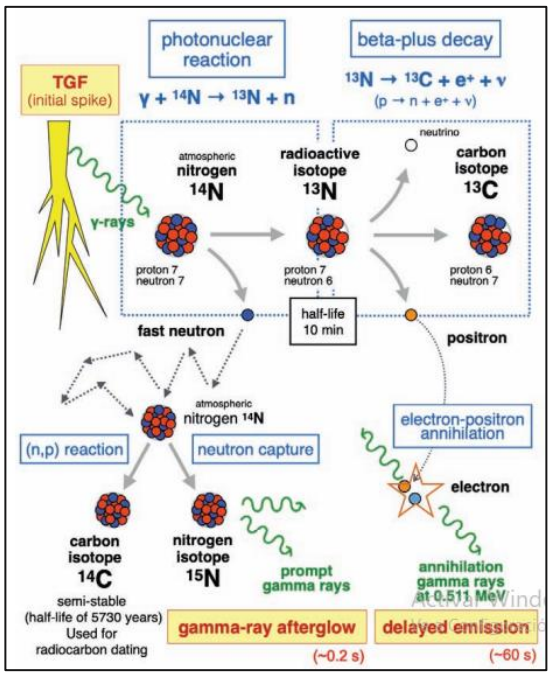
Esta radiación registrada en detectores terrestres del programa GROWTH en Japón, permitieron modelar el origen de positrones por medio del proceso de desintegración beta β^+. Por muchos años, varios estudios establecieron el origen de neutrones en tormentas debido a las distintas interacciones de la energía con átomos de la atmosfera, lo que llevo a preguntarse sobre los átomos inestables que quedaban debido a la pérdida de dicho neutrón.

De esta manera se establece la detección de estas tres emisiones subsecuentemente como se ilustra en la Figura 4.6, donde los letreros amarillos representan cada una de las emisiones descritas anteriormente, considerando que todo se desencadena por el origen de un rayo de tormenta, ya que el TGF descendente que se detectó como la primera emisión se desarrolló gracias a los campos

eléctricos presentes en el líder de carga positivo ascendente (UPL) que es el rayo, justo como se ilustra en la Figura 3.7.

Figura 4.6

Representación de las tres emisiones detectadas en la tormenta de Japón



Nota: Representación de los procesos de desintegración nuclear en una tormenta eléctrica de Japón. Tomado de "Positron Annihilation in Thunderstorms" por Teruaki Enoto, 2019, Nuclear Physics News.

La Figura 4.6 ilustra de manera clara y sencilla los procesos recién explicados, donde el inicio de las reacciones fotonucleares parte de los rayos gamma TGF que se originan en la tormenta, dando origen a los isótopos inestables como el nitrógeno 13, que al perder un neutrón puede desencadenar demás reacciones, además el proceso del átomo inestable (Nitrógeno-13) genera positrones debido a la desintegración beta β^+.

4.3. Análisis de Datos Energéticos GROWTH y su Afectación a la Salud

El programa de investigación "The Gamma-Ray Observation of Winter Thundercloud" (GROWTH) tuvo sus inicios en el año 2006, y su propósito es el de estudiar la energía de alta radiación en las tormentas y rayos. Desde entonces, su grupo de investigación se ha encargado de recopilar una amplia variación de datos energéticos característicos de diferentes procesos atmosféricos.

Uno de los líderes del proyecto es el profesor Teruaki Enoto, quien ha sido un importante precursor en el estudio de la física atmosférica, además de ser una pieza importante en las diferentes

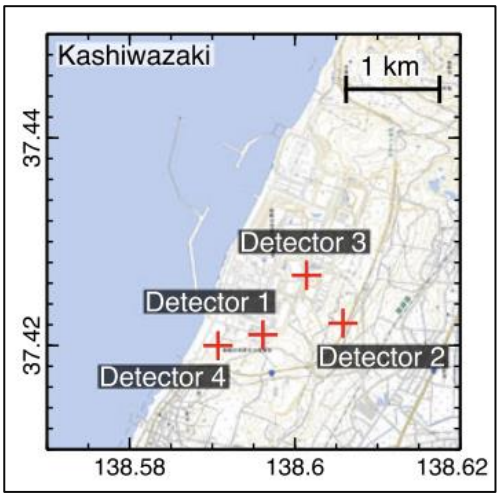
investigaciones del proyecto. Él, junto a otro grupo de investigadores de la universidad de Kyoto, ha logrado detectar una gran cantidad de radiación de diferentes procesos, entre ellos, la energía de aniquilación positrón-electrón detectada en las tormentas.

Según lo descrito se hace un análisis de los diferentes valores energéticos registrados en 3 eventos del 2017, cuyos valores de radiación coinciden con la producción de positrones y neutrones que se originaron debido a reacciones fotonucleares en la atmósfera (Wada, 2021).

Los eventos se dieron en la central nuclear Kashiwazaki, donde cuatro detectores se encontraban posicionados como lo muestra la Figura 4.7, donde se establecen los rangos de energías (rayos gamma) registrados por cada uno de los detectores para cada evento que se encuentra en la Tabla 4.1.

Figura 4.7

Detectores terrestres en la central nuclear Kashiwazaki-Kariwa (Niigata)



Nota: Mapa de cuatro detectores de GROWTH según su latitud (Eje Y) y longitud (Eje X). Tomado de "Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges" por Yuki Wada, 2021, Springer Theses.

Tabla 4.1

Datos de Radiación Gamma del programa GROWTH-2017

Detectores	1	2	3	4
Evento 1 (16/01/2017)	0.35–13.0MeV	0.35–13.0MeV	1.2–48.0MeV	0.2–27.0MeV
Evento 2 (06/02/2017)	0.35–13.0MeV	0.35–13.0MeV	0.35–13.0MeV	0.35–13.0MeV
Evento 3 (24/11/2017)	0.2–18.0MeV	0.2–26.0MeV	0.3–15.0MeV	0.2-27.0MeV

Adaptado de "Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges" por Yuki Wada, 2021, Springer Theses.

Como se evidencia, la cantidad de energías registradas está dada en una magnitud de Mega Electronvoltios, lo que a continuación se describe es como esta intensa radiación afecta la salud de las personas.

En primer lugar, se deben tener claros tres conceptos relacionados a la interacción de la energía con la materia, estos son la dosis absorbida, la dosis equivalente y la dosis efectiva, cada una de ellas permite analizar el nivel de radiación al que se expone el cuerpo humano, y como dependiendo la cantidad, el tipo de radiación y la zona donde incide pueden existir afectaciones a la salud.

La definición de dosis absorbida (D) indica la radiación ionizante recibida por un cuerpo o tejido, y esta se expresa en unidades de Gray, que se pueden determinar según la cantidad de energía en Joules que recibe cierta masa en kilogramos.

$$D = \frac{Energía\ (Joules)}{Unidad\ de\ masa\ (Kg)} \tag{4.16}$$

Esta dosis puede hallarse en el caso de que se distribuya uniformemente en el cuerpo humano, o en la masa de un órgano o tejido específico.

Por otro lado, la dosis equivalente tiene en cuenta los diferentes tipos de radiación ionizante (alfa, beta y gamma) y el impacto de estas en el cuerpo, cada una de ellas tiene una efectividad biológica relativa (W_r), que describe el nivel de alteración de efectos biológicos en el tejido humano, como por ejemplo daño en el ADN. La efectividad biológica relativa (Wr) tiene un valor diferente para cada radiación que se encuentra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2

Efectividad Biológica Relativa según cada radiación.

Radiación	Rayos x −Rayos γ	Protones	Neutrones	Electrones	Alfa
Efectividad Biologica Radiactiva W_r	1	2	2-5	1-1,7	10-20

Adaptado de "Physics with Health Science Applications" por Robert Tremblay y Paul Peter Urone, 2017, Kendall Hunt Publishing.

La dosis equivalente (H) cuenta con unidades de Sieverts (Sv), y se determina multiplicando la dosis absorbida por la efectividad biológica radiactiva (Wr)

$$H = W_r \cdot D \tag{4.17}$$

Y por último, la dosis efectiva (E) cuyas unidades también son los Sieverts, que se determinan teniendo en cuenta la dosis absorbida (D), la efectividad biológica radiactiva (Wr) y ciertos factores de absorción biológica para cada tejido (Wt) como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3

Factores de Absorción Biológica

Órgano	Gónadas	Médula Ósea Roja	Colon	Pulmón	Estomago	Pechos	Vejiga	Hígado	Esófago
Factores de ponderación de los tejidos (W_t)	0,08	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,4	0,4	0,4

Adaptado de "Sources and Effects of Ionizing Radiation" por United Nations Scientiffic Committe on the Effects of Atomic Radiation, 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes.

La fórmula que determina la dosis efectiva es:

$$E = W_t \cdot H \tag{4.18}$$

Teniendo en cuenta esto, se utilizan los valores de energía en MeV de la Tabla 4.1 y se convierten en valores de Joules, para así determinar la dosis absorbida, dosis equivalente y dosis efectiva (para un órgano puntual) en el cuerpo humano.

Sabiendo que $1MeV$ equivale a $1.602176487x10^{-13}\,J$, colocamos en la tabla 4.4 lo valores de las energías de radiación gamma en Joules.

Tabla 4.4

Conversión de unidades de la tabla 4.1 (Mega electronvoltios a Joules)

Detectores	1	2	3	4
Evento 1 (16/01/2017)	$5{,}6076x10^{-14}\,J - 2{,}0828x10^{-12}\,J$	$5{,}6076x10^{-14}\,J - 2{,}0828x10^{-12}\,J$	$1{,}9226x10^{-13}\,J - 7{,}6904x10^{-12}\,J$	$3{,}2043x10^{-14}\,J - 4{,}3258x10^{-12}\,J$
Evento 2 (06/02/2017)	$5{,}6076x10^{-14}\,J - 2{,}0828x10^{-12}\,J$	$5{,}6076x10^{-14}\,J - 2{,}0828x10^{-12}\,J$	$5{,}6076x10^{-14}\,J - 2{,}0828x10^{-12}\,J$	$5{,}6076x10^{-14}\,J - 2{,}0828x10^{-12}\,J$
Evento 3 (24/11/2017)	$3{,}2043x10^{-14}\,J - 2{,}8839x10^{-12}\,J$	$3{,}2043x10^{-14}\,J - 4{,}1656x10^{-12}\,J$	$5.6076x10^{-14}\,J - 2.0828x10^{-12}\,J$	$3{,}2043x10^{-14}\,J - 4{,}3258x10^{-12}\,J$

Adaptado de "Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges" por Yuki Wada, 2021, Springer Theses.

Para no hacer el cálculo más extenso se toman únicamente dos valores para determinar un rango de las dosis, por lo tanto, se escoge el menor valor de $3{,}2043x10^{-14}\,J$ y el mayor $7{,}6904x10^{-12}\,J$.

Ahora para determinar las dosis se supone que una persona tiene una masa de 65kg, y que uno de sus pulmones tiene más o menos 0,4 kg, teniendo en cuenta esto se realizan los siguientes cálculos:

- Dosis Absorbida:

-$D = \frac{3{,}2043x10^{-14}\,J}{65kg} = 4{,}9296x10^{-16}Gy$

-$D = \frac{7{,}6904x10^{-12}\,J}{65kg} = 1{,}1831x10^{-13}Gy$

- Dosis Equivalente:

Según la tabla 4.2 la efectividad biológica radiactiva para la radiación gamma es de 1, por lo tanto, la dosis equivalente adquiere el mismo valor de la dosis absorbida pero en unidades de Sieverts.

$$H = W_r \cdot D = 1 \cdot 4{,}9296x10^{-16}Gy = 4{,}9296x10^{-16}Sv$$

$$H = W_r \cdot D = 1 \cdot 1{,}1831x10^{-13}Gy = 1{,}1831x10^{-13}Sv$$

- Dosis efectiva

Como la dosis efectiva en total se determina sumando los cálculos para cada uno de los órganos que se encuentran en la tabla 4.3, acá solo se analiza la radiación para el pulmón.

$$E = W_t \cdot H$$

De esta manera se tiene para un pulmón que pesa 0,4 kg y cuyo valor de absorción biológica es 0,12 (W_t) la dosis absorbida y la dosis equivalente son:

-$D = \frac{3{,}2043x10^{-14}\ J}{0{,}4kg} = 8{,}0107x10^{-14}Gy \quad H = 8{,}0107x10^{-14}Sv$

-$D = \frac{7{,}6904x10^{-12}\ J}{0{,}4kg} = 1{,}9226x10^{-11}Gy \quad H = 1{,}9226x10^{-11}Sv$

De esta manera se tiene que la dosis efectiva entre el rango establecido es

$$E = W_t \cdot H = 0{,}12 \cdot 8{,}0107x10^{-14}Sv = 9{,}6204x10^{-15}Sv$$

$$E = W_t \cdot H = 0{,}12 \cdot 8{,}0107x10^{-14}Sv = 2{,}30712x10^{-12}Sv$$

Aunque este valor de radiación parece estar lejos del mínimo establecido por la organización mundial de la salud que es 1 mSv por año, se debe tener en cuenta que el rango de valores determinados es característico de una única emisión causada por un rayo, sin embargo, en las tormentas eléctricas se desencadenan decenas de rayos, e incluso millones de estos al año.

Un ejemplo de la región con más producción de relámpagos es aquella que está situada en el lago de Maracaibo-Venezuela, acá se producen entre 30 y 60 relámpagos por minuto, en un período de 9 horas, por 300 días del año (Gautier, 2016). Lo que nos lleva a calcular un promedio de 4’860.000 y 9’720.000 relámpagos al año.

Claro está que estos valores varían de acuerdo a ciertos lugares del mundo, pero lo que acá se resalta es la idea de que las tormentas eléctricas son capaces de desencadenar grandes cantidades de radiación, que pueden ser perjudiciales a la salud cuando se está sometido a estas por un período de tiempo muy prolongado (Dwyer et al., 2010).

Según la organización mundial de la salud, cuando un cuerpo está sometido a cierto tipo de radiación ionizante, esto puede generar enrojecimiento en la piel, caída del cabello, quemaduras (en casos extremos con una gran cantidad de radiación). Además, cuando la energía ionizante interactúa con las moléculas de las células, estas pueden romper las cadenas del ADN y a su vez liberar radicales libres[54], esto puede generar la malformación de tumores, síndromes, cánceres e incluso genes defectuosos que pueden ser heredados.

Los procesos que a lo largo de este trabajo se mostraron tuvieron el fin de explicar y aclarar como las tormentas eléctricas son escenarios donde se pueden presentar isotopos inestables que al decaer generan grandes cantidades de energía que puede afectar a la salud. Mostrando así el impacto de los procesos de desintegración, se busca evidenciar las diferentes concepciones que se tiene alrededor de este fenómeno, por lo tanto, a continuación se muestra una propuesta de enseñanza que permite analizar el decaimiento beta positivo.

Una Propuesta para la Enseñanza del Proceso de Desintegración Beta (β^+)

En este apartado se pretende realizar una propuesta que aproxime a los estudiantes al proceso de desintegración beta positiva, por medio del análisis del caso puntual de isotopos radiactivos producidos por una tormenta eléctrica. Cabe aclarar que esta no será llevada al aula, sino que será una herramienta para que los docentes en formación que estén interesados en el tema puedan revisarla, ajustarla (si así lo consideran) e implementarla con el fin de aproximar a los estudiantes que se impactan al proceso de desintegración beta, sin embargo, por razones de estructura se propone un público objetivo en el cual se puede aplicar.

<table>
<tr><td colspan="2">Título: Aproximación al Proceso de Desintegración Beta β^+</td></tr>
<tr><td>Curso: Física Atómica y Nuclear</td><td>Unidad: Desintegración Radiactiva (Decaimiento Beta β^+)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Introducción:
Lo procesos de desintegración son fenómenos que hacen parte de los contenidos de programas curriculares en clases de física atómica y nuclear. De esta manera se plantea un caso puntual de desintegración que permita mostrar el proceso de desintegración beta positiva.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Descripción del contenido:
Alrededor de los decaimientos radiactivos existen las siguientes concepciones que se abordaran con el ejemplo puntual.
• Inestabilidad del Átomo
• Descripción de la Desintegración Beta
• La Ley de Probabilidad Exponencial</td></tr>
</table>

[54] Los radicales libres son átomos, moléculas o iones que tienen al menos un electrón desapareado en su capa externa, estos pueden causar daño al ADN al oxidarlo, lo que puede resultar en mutaciones genéticas.

- Periodo de Semidesintegración
- Conservación de la Energía, el Momento Angular y la Carga.

Objetivo General:
Comprender el proceso de desintegración beta β^+, por medio del ejemplo del isótopo Nitrógeno-13 que tiene su origen en Tormentas Eléctricas.
Objetivos Específicos:

- Identificar los factores que contribuyen a la inestabilidad de un átomo, como el desequilibrio entre protones y neutrones.
- Entender el proceso de desintegración beta positiva, incluyendo la emisión de positrones y neutrinos por un núcleo inestable.
- Analizar cómo la ley de probabilidad exponencial se relaciona con la vida media de un isótopo radiactivo.
- Aplicar los conceptos de conservación de energía, momento angular y carga para interpretar el proceso de desintegración beta positiva.

Metodología Didáctica de Enseñanza Directa: La enseñanza directa es un enfoque didáctico en el que el profesor actúa como el principal suministrador de información, guiando a los estudiantes a través del contenido de manera estructurada y secuencial. Es especialmente efectiva para la enseñanza de conocimientos y habilidades básicas que requieren instrucción explícita.

Para que el lector pueda acceder al desarrollo que acá se presenta se le brinda un glosario que facilita la comprensión del proceso.

Glosario

- **Composición Química de la Atmósfera:** El aire está compuesto principalmente por Nitrógeno (78,09%) y Oxígeno (20,95%), además de otros gases como el Argón (0,93%), Dióxido de Carbono (0,03%), Hidrógeno (0,00005%), Neón (0,0018%), Kriptón (0,0001%), Helio (0,000535), Xenón (0,000008%).
- **Condensación:** La condensación es el proceso mediante el cual el vapor de agua en el aire se transforma en agua líquida. Por ejemplo en las tormentas eléctricas, cuando el sol incide sobre la superficie terrestre, este caliente las masas liquidas de agua (océanos, mares, lagos,etc) y las evapora; este valor de agua se condensa en las nubes de tormenta.
- **Constante de Desintegración:** La constante de desintegración (λ) es una forma de medir que tan rápido se desintegran los núcleos de un isótopo radiactivo a lo largo del tiempo. Cada isótopo tiene su propia constante de desintegración, y esta nos dice qué tan probable es que un núcleo radiactivo se desintegre en un período específico.
- **Cumulonimbos:** Los cumulonimbos son un tipo de nube de gran desarrollo vertical que se asocia con tormentas intensas, estas tienen un color gris característico debido a que su gran densidad no permite el paso de los rayos de sol.

- **Destellos de Rayos Gamma Terrestres-Terrestrial Gamma Ray Flashes (TGF):** Los destellos de rayos gamma terrestres son un tipo de radiación gamma que se emite en las tormentas eléctricas, el origen de tal radiación se debe a la avalancha de electrones (RREA). Cuando los electrones chocan con algún átomo de la atmosfera, por ejemplo, nitrógeno u oxígeno, estos se ven atraídos a su núcleo y van perdiendo energía que es liberada en forma de rayos Gamma.
- **Energía de Desintegración:** La energía de desintegración Q, es aquella que expresa todos los valores energéticos que se dan al interior de la desintegración, como la energía cinética de las partículas (productos), el valor de rayos gamma que puede surgir debido a exceso de energía, la energía de retroceso (cuando una partícula, es emitida desde un núcleo, el núcleo puede adquirir energía cinética en la dirección opuesta a la emisión de la partícula), sin embargo estos valores se desprecian ya que en su mayoría son valores de energía muy bajos, y por lo tanto solo se tiene en cuenta la energía cinética de los productos.
- **Energía cinética de Desintegración:** La energía cinética total de la desintegración (K_T), es aquella energía que surge de la reacción al convertir la masa en reposo de los reactivos (muestra inicial) en energía cinética de los productos.
- **GROWTH: "**The Gamma-Ray Observation of Winter Thundercloud" es un programa de investigación que se encarga de detectar radiación gamma proveniente de tormentas eléctricas en la costa de Japón.
- **Ley de Desintegración Exponencial:** La ley de desintegración exponencial describe el proceso de decaimiento radiactivo de un material inestable a lo largo del tiempo. En términos simples, establece que la cantidad de material radioactivo presente en una muestra disminuye con el tiempo de una manera exponencial ($n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$).
- **Neutrino:** Un neutrino es una partícula elemental de una masa extremadamente pequeña. Los neutrinos son eléctricamente neutros y apenas interactúan con la materia normal, lo que los hace extremadamente difíciles de detectar.
- **Notación de Nucleidos:** La notación de nucleidos es un sistema utilizado para representar y describir los diferentes isótopos de los elementos químicos. ${}^{A}_{Z}X_n$ donde X es el elemento químico, A es el número másico (suma de protones y neutrones), Z el número atómico (número de protones) y n el número de neutrones.
- **Periodo de Semidesintegración:** Es el tiempo que tarda la mitad de los núcleos de una muestra radiactiva en desintegrarse. Por ejemplo, si se tiene una muestra de uranio-238, un tipo de átomo, que al principio tiene 1000 núcleos y su periodo de semidesintegración es de 4.5 mil millones de años, eso significa que después de ese tiempo, la mitad de esos núcleos se habrán desintegrado. Así que, después de 4.5 mil millones de años, solo quedarán 500 núcleos de uranio-238 en la muestra ($t_{1/2} = \frac{0{,}693}{\lambda}$). Esta se deduce de la ley de desintegración exponencial $n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$, cuyos valores se determinan de manera experimental ajustando una curva matemática a los resultados obtenidos.

- **Positrón:** Un positrón es una partícula subatómica que forma parte de la familia de los leptones. Es la antipartícula del electrón, lo que significa que tiene la misma masa que un electrón, pero carga eléctrica positiva en lugar de negativa.
- **Radioisótopos:** Es una variante de un elemento químico que tiene un número diferente de neutrones en su núcleo en comparación con el número de protones. Además, un radioisótopo es un elemento químico inestable y sufre desintegración radiactiva. Esta desintegración radiactiva ocurre cuando el núcleo del radioisótopo es inestable debido a un exceso de energía o a una relación inapropiada entre protones y neutrones.
- **Radionucleido Padre:** Isótopo inicial u original que sufre desintegración radiactiva para dar lugar a otros isótopos (llamados radionucleidos hijos) como resultado de un proceso de decaimiento radiactivo.
- **Radionucleido Hijo:** El radionucleido hijo, también conocido como producto de decaimiento, se refiere a un isótopo resultante del decaimiento radioactivo de otro isótopo, llamado radionucleido padre.
- **Relativistic Runaway Electrons Avalanche-Downward (RREA):** La avalancha de electrones relativistas fugitivos o RREA por sus siglas en inglés son una serie de electrones que se encuentran al interior de una tormenta eléctrica, el campo eléctrico de esta es capaz de acelerar los electrones a velocidades cercanas a la de la luz, creando así una avalancha de electrones relativistas. Por lo tanto, los RREA-Downward son una avalancha de electrones relativistas que desciende de la tormenta.
- **Teoría de Fermi:** Esta teoría describe cómo se produce el decaimiento beta, un proceso en el cual un neutrón se convierte en un protón, un electrón (o positrón) y un antineutrino (o neutrino). Desintegración Beta β^- ($n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$) Desintegración Beta β^+ ($p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu$)
- **Tiempo de Vida Media:** τ es el promedio de los tiempos de decaimiento de todos los átomos de una sustancia, por ejemplo, si se tiene cierto número de átomos N_1, estos decaerán en cierto tiempo t_1, si se tiene N_2 este decaerá en otro tiempo t_2, y así sucesivamente hasta que todo el material decaiga ($\tau = \frac{1}{\lambda}$).
- **Troposfera:** La troposfera constituye la porción inferior de la atmósfera de la Tierra, abarcando desde su superficie hasta alrededor de 8 a 15 kilómetros de altura en promedio, variando según la ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas.

Lo que se espera realizar en el presente apartado es el diseño de una propuesta de enseñanza que utiliza la obtención de positrones en una tormenta eléctrica, en específico en la tormenta del 6 de febrero en Japón, bajo el grupo de investigaciones GROWTH.

1. Análisis de los procesos para la obtención de un átomo inestable Nitrógeno-13.

Objetivo: Identificar los factores que contribuyen a la inestabilidad de un átomo, como el desequilibrio entre protones y neutrones.

Metodología: Se desarrolla la metodología de enseñanza directa, acá se suministra la información sobre las tormentas eléctricas, su formación y como las condiciones al interior de una nube permiten la obtención de un átomo inestable, esto en una clase magistral acompañada de una serie de diapositivas con imágenes que faciliten la comprensión de los fenómenos.

Desarrollo: Las tormentas eléctricas son fenómenos atmosféricos presentes en la cotidianidad del ser humano, ya que su constante aparición en la troposfera del planeta permite la observación y análisis instrumental de esta, por lo tanto, hoy en día existen una gran variedad de modelos que intentan describir su comportamiento.

Su origen parte de las moléculas de agua (H2O-Hidróxido de Hidrógeno) presente en el aire, cuya condensación dan forma a las nubes de tormenta, conocidas como cumulonimbos, estas nubes se originan debido a corrientes de aire descendentes y ascendentes. Una vez que la nube se ha formado comienzan a desarrollarse los fenómenos eléctricos, aunque la distribución de cargas al interior de la nube tiene varios modelos, uno de los más reconocidos fue el establecido por el físico Charles Wilson (creador de la cámara de niebla), quien establece que la di polaridad de una gota de agua puede adquirir carga positiva o negativa[55], generando al interior de la nube de tormenta una di polaridad de cargas, cuyo campo magnético es similar al de un dieléctrico.

Las condiciones atmosféricas de una tormenta eléctrica son varias y pueden cambiar mucho según la temperatura, la humedad, la altitud, la contaminación y otras variables que muestran lo probabilístico del fenómeno. Teniendo en cuenta esto, se menciona la composición química que conforma la atmósfera en términos de aire seco, y se observa que el elemento presente con un mayor porcentaje en la atmósfera es el Nitrógeno.

Se utiliza el Nitrógeno (N) como elemento principal para modelar la obtención de un radioisótopo en el interior de la tormenta, cuyo número atómico es igual a 7 lo que significa que en su estado estable cuenta con 7 protones y 7 neutrones en el interior del núcleo, y 7 electrones en sus órbitas.

Un átomo se vuelve inestable cuando existe una descompensación energética en el núcleo o capa electrónica del átomo, donde no están en mínima energía y puede existir un desbalance de protones y neutrones. De esta forma, una de las maneras de que el Nitrógeno se convierta en un isótopo inestable es que este pierda un neutrón.

Según el caso que se presenta (Enoto et al., 2017), durante la tormenta eléctrica se tiene una gran cantidad de radiación saliendo de esta, como los rayos gamma terrestres (TGF) descendentes que surgen de la avalancha de electrones relativistas fugitivos (RREA), en términos sencillos, al interior de una tormenta eléctrica existe un campo eléctrico que acelera electrones que se encuentran libres al interior de la nube, estos electrones comienzan a adquirir velocidades cercanas a la de la luz, superando la perdida de energía por fricción con el aire, cuando adquieren estas grandes velocidades desencadenan una "avalancha" que va sumando más y más electrones

[55] https://www.canva.com/design/DAFi6rC9Zhw/2DYvwZZZay5pu3cFkLmSQ/edit?utm_content=DAFi6rC9Zhw&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=sharebutton

acelerados, a este fenómeno se le conoce como avalancha de electrones fugitivos relativistas o RREA por sus siglas en inglés, pero llegado cierto punto, estos RREA pueden verse atraídos por el núcleo atómico de un elemento, como por ejemplo el nitrógeno u oxígeno, al verse atraídos estos, cambian de dirección y pierden energía en la desaceleración, como un carro cuando frena en una curva, está perdida de energía se libera en forma de radiación gamma, que son los denominados TGF o destellos de rayos gamma terrestres.

De esta manera se tiene que cuando la radiación gamma descendente (TGF) choca con alguno de los átomos de ${}^{14}_{7}N_7$ presentes en la atmósfera, el resultado de la interacción será un átomo inestable y un neutrón. Lo que sucede es que la absorción de la radiación gamma por parte del átomo estable (${}^{14}_{7}N_7$) genera una excitación de este, por lo tanto, su energía se ve incrementada, y al volver a su estado inicial, libera el exceso de energía por medio de la pérdida del neutrón, dejando así un átomo inestable. ${}^{14}_{7}N_7 + \gamma$ (TGF descendente) $\rightarrow {}^{13}_{7}N_6 + n$.

Acá se evidencia como la absorción de energía de un rayo gamma puede generar una inestabilidad en los átomos, creando así radioisótopos como el ${}^{13}_{7}N_6$.

Conclusión: En esta primera sección se da cuenta de que la obtención de un átomo inestable para el presente caso se debe a la pérdida de un neutrón, generando así una desigualdad energética en el sistema, esto se aborda en el proceso de conservación de la sección tres, además de que da cuenta de las condiciones necesarias que deben existir al interior de la tormenta para que esto suceda.[56]

2. Proceso de Desintegración Beta Positiva β^+

Objetivos:

-Entender el proceso de desintegración beta positiva, incluyendo la emisión de positrones y neutrinos por un núcleo inestable.

- Analizar cómo la ley de probabilidad exponencial se relaciona con la vida media de un isótopo radiactivo.

Metodología: Se desarrolla la metodología de enseñanza directa, acá se suministra la información sobre la desintegración del isótopo Nitrogeno-13, se describe su comportamiento por medio de la ley exponencial de desintegración y se calcula el tiempo de vida media.

Desarrollo: Como se pudo evidenciar en la sección anterior, la obtención del átomo inestable Nitrógeno-13 surgió debido a la pérdida de un neutrón del elemento Nitrógeno-14, de esta manera se tiene que el número atómico del Nitrógeno disminuirá en una unidad ${}^{14}_{7}N_7 \rightarrow {}^{13}_{7}N_6$, generando así un radioisótopo. Este átomo ahora inestable ${}^{13}_{7}N_6$, al tener un protón extra genera una inestabilidad debido a la fuerza eléctrica de Coulomb, que busca repeler los protones por encima

[56] Si desea profundizar en la comprensión de los fenómenos que acá se explican para la obtención del isótopo, lo invito a remitirse al capítulo 3 del presente documento.

de la fuerza nuclear fuerte que mantiene unido el núcleo, de esta manera este protón se transforma en un neutrón liberando a su vez un positrón y un neutrino electrónico justo como lo describe la siguiente expresión $p^+ \rightarrow n + e^+ + v$.

Según la notación de nucleidos, la desintegración del Nitrógeno ${}^{13}_{7}N_6$, se expresa de la siguiente manera:

$$ {}^{13}_{7}N_6 \rightarrow {}^{13}_{6}C_7 + e^+ + v $$

Teniendo en cuenta que esta desintegración se presenta en la atmósfera debido a las condiciones de una tormenta eléctrica, se aplica la ley de desintegración exponencial $n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$, para ello se tiene que la tasa de emisión de positrones se puede expresar según la siguiente ecuación.

$$ \frac{dn(t)}{dt} = \lambda n(t) \quad (1) $$

De esta manera, al sustituir la ecuación $n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$ en la Ecuación (1) se tiene que:

$$ \frac{dn(t)}{dt} = \lambda n_0 e^{-\lambda t} $$

Que al reescribir e integrar queda en términos de

$$ \int dn(t) = \lambda \int n_0 e^{-\lambda t} dt $$

$$ n(t) = \lambda \int_{t_1}^{t_2} n_0 e^{-\lambda t} dt \quad (2) $$

Teniendo en cuenta esto, se establece que los límites de la integral son los tiempos de decaimiento que se deducen del trabajo de (Wada, 2021). Con un valor de 34,4±15s, que determina un periodo entre $t_1 = 19{,}4s; t_2 = 49{,}4s$, además se establece que la constante de desintegración del isótopo Nitrógeno-13 es $1{,}159x10^{-3}s^{-1}$. Por consiguiente, se tiene que la solución a la Ecuación (2) es:

$$ n(t) = 0{,}334 n_0 \quad (3) $$

El resultado anterior queda en términos de n_0, cuyo valor representa la cantidad de radionucleidos iniciales de Nitrógeno-13, que puede variar según la densidad del aire, y por lo tanto se establece un valor que se da por una unidad de volumen.

En este caso particular se observa como el uso de la ley de desintegración radiactiva nos permite determinar la cantidad de material radiactivo que puede surgir en la tormenta eléctrica y como este decaerá según el proceso de desintegración beta.

Por consiguiente, se puede determinar de igual manera el periodo de semidesintegración que tarda en desintegrarse dicho isótopo, este periodo se halla al conocer la constante de desintegración del Nitrógeno-13 que se enuncia en el procedimiento anterior. Por lo tanto, al determinar la Ecuación (4) se tiene que:

$$ t_{1/2} = \frac{0{,}693}{\lambda} \quad (4) $$

$$t_{1/2} = \frac{0{,}693}{1{,}159x10^{-3}s^{-1}} = 598{,}0562386s \ = 9{,}967\ minutos$$

Siendo este el periodo de semidesintegración del Nitrógeno-13, distinto al tiempo de vida media que tiene el isotopo, que se puede determinar según la Ecuación 5, recordando que τ, es el promedio de los tiempos de decaimiento de todos los átomos de una sustancia.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 862,8127s \tag{5}$$

De esta manera se cuenta con un tiempo de vida media de $862,8127s$, que tarda cierta cantidad del material en decaer, siendo el periodo de semidesintegración o semivida de $598{,}0562386s$ aquel que determina cuando ha decaído la mitad del material radiactivo.

Conclusión: La ley de desintegración exponencial describe el comportamiento de un átomo inestable, esto da cuenta que a medida que va pasando el tiempo (t), el material radiactivo n(t) va a desintegrarse en su totalidad, por esta razón cuando t=0; $n(t=0) = n_0 e^{-\lambda 0} = n_0$ y cuando t=∞; $n(t=\infty) = n_0 e^{-\lambda \infty} = 0$. Por otro lado, al observar que el tiempo de vida media me determina la mitad de la muestra que ha decaído en ese tiempo $n(t_{1/2}) = \frac{n_0}{2}$, podemos analizar la relación con la ley de desintegración, donde $n(t_{1/2}) = n_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$; $\frac{n_0}{2} = n_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$; $Ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t_{1/2}$ cuya solución da la Ecuación (4)[57].

3. Conservación del proceso de desintegración

Objetivo: Aplicar los conceptos de conservación de energía, momento angular y carga para interpretar el proceso de desintegración beta positiva.

Metodología: Se desarrolla la metodología de enseñanza directa, acá se suministra la información sobre los diferentes procesos de conservación como lo son la energía, el momento angular y la carga.

Desarrollo: El proceso de desintegración fue un verdadero enigma para los físicos de la época, ya que no se conocía porque los datos energéticos experimentales y teóricos del electrón en la desintegración no concordaban, rompiendo así las leyes de conservación de la energía, el momento lineal y el momento angular. Fue la hipótesis de Pauli la que permitió dar solución a este problema[58].

En vista de estos parámetros, se aplica el desarrollo de estas leyes de conservación al caso de la desintegración del radioisótopo Nitrógeno-13, originada por las condiciones de una tormenta. Primero se da solución a la conservación de la energía en el caso del isótopo Nitrógeno-13.

Según la notación de nucleidos el decaimiento del radioisótopo Nitrógeno-13 viene dada como:

[57] Si desea profundizar en la comprensión de los fenómenos que acá se explican sobre las diferentes propiedades y conceptos de procesos de desintegración, lo invito a remitirse al capítulo 4.1 del presente documento.
[58] Si desea ampliar en la historia del proceso, puede remitirse al capítulo 2 del presente documento.

$$^{13}_{7}N_6 \rightarrow {}^{13}_{6}C_7 + e^+ + \nu$$

La ecuación de desintegración beta (β^+) se da según el nucleido padre ($^{13}_{7}N_6 = {}^{A}_{Z}P$), el nucleido hijo ($^{13}_{6}C_7 = {}_{Z-1}{}^{A}D$), el positrón ($e^+$), el neutrino ($\nu$) y la energía cinética de la desintegración (K_T) ${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}D + e^+ + \nu + K_T$.

Por lo tanto, se determina la energía de desintegración de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q = (m_P - m_D)c^2 = K_T + 2m_e c^2$$

Acá se tiene que la masa del nucleido padre Nitrógeno-13 es $13.0057386u$ unidades de masa atómica, el nucleido hijo cuenta con una masa de $13.003354838u$, estas masas fueron tomadas del "CRC Handbook of Chemistry and Physics", cuyo manual cuenta con una amplia información de datos científicos, en las ramas de física y química.

Adicionalmente se tiene en cuenta que el valor de la unidad de masa atómica $1u$, se puede deducir en términos de MeV, de esta manera se tiene que $1u = 931{,}494013\frac{MeV}{c^2}$. Teniendo claro estas especificaciones se determina el valor de la energía de desintegración Q para el caso propuesto.

$$Q = (m_{13N} - m_{13C})c^2 = (13.0057386u - 13.003354838u)c^2$$

$$Q = 0{,}002383762 \cdot 931{,}494013\frac{MeV}{c^2}c^2 = 2{,}220460031MeV$$

Ahora se conoce el valor de Q, para determinar la energía cinética K_T restándole el término $2m_e c^2$ a Q:

$$K_T = Q - 2m_e c^2$$

El término $2m_e c^2$, determina el valor mínimo que debe poseer la energía de desintegración para poder crear el par positrón-electrón.

$$K_T = 2{,}220460031MeV - 1{,}021997856\,MeV = 1{,}198462175MeV$$

Ahora, según la ecuación de la desintegración beta (β^+) ${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}D + \beta^+ + \nu + K_T$, donde K_T es la energía cinética, que se reparte entre la partícula beta β^+ y el neutrino ν, así la conservación de la energía en el proceso de desintegración es la siguiente:

$$E_{13N} = E_{13C} + (E_{\beta^+} + E_\nu) + 2m_e c^2$$

La mayoría de las energías son fáciles de determinar, según la masa de cada una de ellas, sin embargo, el neutrino es una partícula cuya masa es tan pequeña que se aproxima a cero, por lo tanto, la manera de hallar su energía en un proceso de desintegración se hace según la relación de la energía de desintegración (Q), la energía mínima para la creación del par electrón-positrón ($2m_e c^2$) y la energía del positrón o partícula beta(E_{β^+}).

$$E_{máx} = E_{\beta^+} + E_\nu = Q_{\beta^+} - 2m_e c^2 = K_T$$

Según esto, la energía del neutrino viene dada por $E_\nu = K_T - E_{\beta+}$, conociendo que el valor de la energía del positrón es $E_{\beta+} = m_{\beta+}c^2 = 0.510\,998\,928 MeV$:

$$E_\nu = 1{,}198462175 MeV - 0.510\,998\,928 MeV = 0{,}687463247 MeV$$

Como ya se cuenta con todos los valores de las energías establecidos, se muestra que la conservación de la energía está dada bajo los siguientes valores:

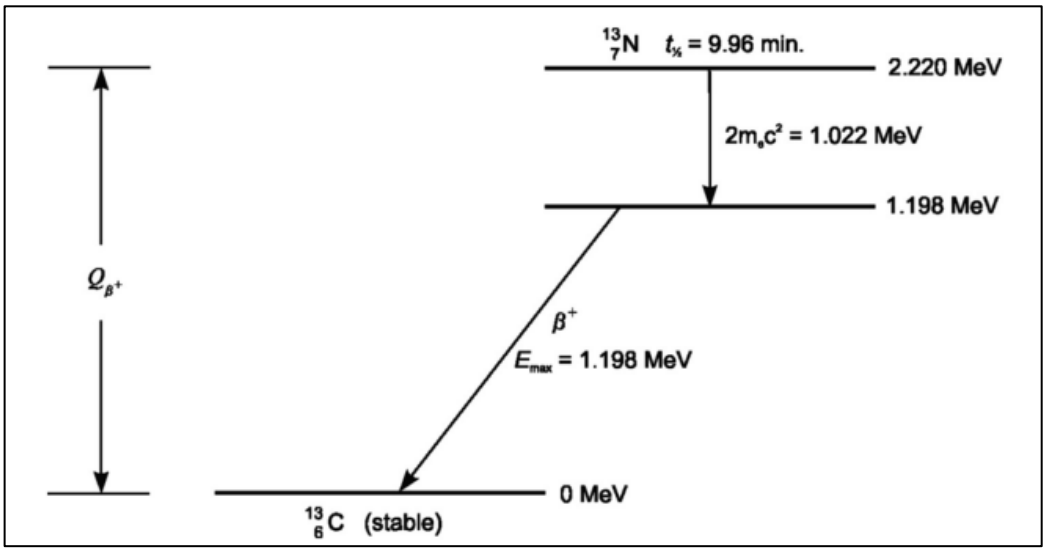
$$E_{13N} = E_{13C} + (E_{\beta+} + E_\nu) + 2m_e c^2$$

$$12114{,}76764 MeV = 12112{,}54718 MeV + 1{,}198462 MeV + 1{,}021996 MeV$$

Al observar los resultados se tiene que a ambos lados de la ecuación se encuentra una igualdad, se puede establecer que la energía de conservación se mantiene en este caso en particular. En la Figura 1 se evidencian los valores de las energías descritas.

Figura 1

Energías de desintegración del isótopo Nitrógeno-13



Tomado de "Radioactivity Introduction and History, From the Quantum to Quarks Second Edition" por L'Annunziata, Michael F., 2016, Elsevier.

En esta imagen se observa como la energía de desintegración Q que se da en el proceso, tiene un valor de $Q = 2{,}220460031 MeV$, mientras que la energía K_T, que en este caso es igual a la energía máxima que toma la suma del positrón y el neutrino, tiene un valor de $K_T = 1{,}198462175 MeV$, se nota que la diferencia entre la energía de desintegración y la energía cinética es el término $2m_e c^2$.

Como ya se evidenció la conservación de la energía, ahora se realiza el desarrollo del proceso de conservación del momento angular, para ello se parte nuevamente de la notación de nucleidos

$$^{13}_{7}N_6 \rightarrow {}^{13}_{6}C_7 + e^+ + v$$

Determinar el momento angular de los isótopos es un proceso algo extenso, por esta razón se toman los valores de la NUBASE 2020, que es una base de datos de propiedades nucleares de átomos en su estado fundamental y excitado (Kondev et al., 2021).

Según la base de datos, el momento angular del isótopo $^{13}_{7}N_6$, tiene un valor de $\frac{1}{2}-$, y el $^{13}_{6}C_7$ igualmente cuenta con un momento angular de $\frac{1}{2}-$, de esta manera se tiene que al conocer el momento angular de las partículas restantes que componen la desintegración, las cuales son el positrón y el neutrino, cuyo momento angular es $\frac{1}{2}\pm$, la conservación del momento angular para la desintegración beta en el caso del Nitrógeno-13 es:

$$-\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$$

De esta manera, se establece que la conservación del momento angular se cumplirá, siempre y cuando los valores de $\pm\frac{1}{2}$ del positrón y el neutrino adquieran un valor contrario al otro, por ejemplo, si el positrón toma un valor de $+\frac{1}{2}$, el neutrino deberá tomar $-\frac{1}{2}$, y viceversa, a esto se le conoce como espines antiparalelos, si desea profundizar en el tema puede remitirse a (Krane, 1988).

Por último, se aborda la conservación de la carga en el proceso, teniendo presente la teoría de fermi, donde la transformación de un protón a un neutrón, un positrón y un neutrino mantiene su carga a lo largo de dicho proceso.

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + v$$

De esta manera se sabe que las cargas de cada una de las partículas están dadas según la siguiente expresión:

$$1e^+ \rightarrow 0 + 1e^+ + 0$$

Por esta razón, la conservación de la carga nunca se supuso como violada, ya que el neutrino es una partícula que no tiene carga.

Considerando el desarrollo de esta sección, se establece una propuesta de enseñanza sobre la desintegración beta positiva del isótopo Nitrógeno-13, que se obtuvo gracias a las condiciones físicas al interior de una tormenta eléctrica. Asumiendo a su vez, conceptos entorno a los decaimientos radiactivos, como la energía de desintegración, la ley exponencial de decaimiento, el periodo de semidesintegración, el tiempo de vida media, y las diferentes leyes de conservación. Sin dejar de lado la importancia histórica que tuvo este proceso, generando controversias y permitiendo a su vez el futuro descubrimiento de una nueva partícula (neutrino)[59].

[59] Si desea profundizar en la comprensión de los fenómenos que acá se explican sobre los diferentes procesos de conservación, lo invito a remitirse al capítulo 4.1 del presente documento.

Conclusión: Aunque el proceso de desintegración causo muchos problemas a los físicos del siglo XX, este fenómeno da cuenta de que las leyes de conservación de la física siempre se cumplen, además que su descubrimiento dio pie a la detección de nuevas partículas. Para los tres mecanismos de conservación que acá se analizan se tienen en cuenta diversos elementos teóricos que pueden ser abordados a mayor profundidad en (L'Annunziata, 2016).

Resultados de aprendizaje: Dado que esta propuesta no será implementada, se incluyen una serie de preguntas destinadas a describir los objetivos de aprendizaje para los licenciados en formación. Estas preguntas son respondidas considerando los resultados que se espera que los estudiantes logren alcanzar.

- ¿Cómo se describe la inestabilidad de un átomo y cuál es uno de los factores que puede llevar a que un átomo se vuelva inestable?

Respuesta: Un átomo se vuelve inestable cuando hay una descompensación energética en su núcleo o capa electrónica, lo que puede resultar en un desbalance entre protones y neutrones. Uno de los factores que puede llevar a que un átomo, se vuelva inestable es la pérdida de un neutrón.

- ¿Cómo se relaciona la absorción de radiación gamma, proveniente de una tormenta eléctrica (o cualquier otra fuente), con la formación de átomos inestables?

Respuesta: La absorción de radiación gamma por parte de un átomo estable genera una excitación en este átomo, incrementando su energía. Al volver a su estado inicial, el átomo libera el exceso de energía mediante la pérdida de un neutrón, convirtiéndose así en un átomo inestable. Esto ilustra cómo la absorción de energía puede desencadenar la inestabilidad en los átomos, generando radioisótopos.

- Describa el proceso de desintegración Beta positivo.

Respuesta: Durante la desintegración beta positiva, ocurre un cambio en el núcleo de un átomo donde un protón se convierte en un neutrón. Como parte de este proceso, el núcleo emite un positrón, que es una partícula con carga positiva, junto con un neutrino.

- Si se tiene un isótopo cuyo número atómico es Z=9, y su número másico es A=18, que sucede si este pierde un protón, ¿Cuál es el radionucleido padre y el radionucleido hijo?

Respuesta: Si un isótopo con número atómico Z=9 y número másico A=18 pierde un protón, su número atómico disminuye en una unidad, convirtiéndose en Z=8, mientras que su número másico permanece igual. Por lo tanto, el radionucleido padre es el flúor-18 ($^{18}_{9}F_{9}$), y el radionucleido hijo es el oxígeno-18 ($^{18}_{8}O_{10}$), además se libera un positrón y un neutrino.

- ¿Cómo se aplica la ley de desintegración exponencial para calcular la tasa de emisión de positrones durante la desintegración?

Respuesta: Se aplica la ley de desintegración exponencial mediante la ecuación ($n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$), donde n(t) representa la cantidad de radionucleidos en función del tiempo (t) y λ es la constante de desintegración. Esta ecuación se integra considerando los límites de tiempo de

decaimiento, obteniendo así la cantidad de material radiactivo presente en un momento dado durante la desintegración.

- ¿Cuál es la diferencia entre el periodo de semidesintegración y el tiempo de vida media, y cómo se calculan estos valores?

Respuesta: El periodo de semidesintegración representa el tiempo necesario para que la mitad del material radiactivo se desintegre. Se calcula mediante la ecuación ($t_{1/2} = \frac{0{,}693}{\lambda}$), donde λ es la constante de desintegración. Por otro lado, el tiempo de vida media (τ) es el promedio de los tiempos de decaimiento de todos los átomos de un isótopo y se calcula como ($\tau = \frac{1}{\lambda}$).

- Si se tiene el periodo de semidesintegración del isótopo Bismuto-210, cuyo valor es de 5,012d, calcule la constante de desintegración.

Respuesta: Aplicando la ecuación $t_{1/2} = \frac{0{,}693}{\lambda}$, y reemplazando el valor del periodo, se determina la constante de desintegración $\lambda = \frac{0{,}693}{t_{1/2}} = 1{,}6 \times 10^{-6} s^{-1}$

- ¿Cuál fue el enigma que enfrentaron los físicos en relación con el proceso de desintegración beta y cómo se resolvió?

Respuesta: Los científicos se encontraron con un dilema cuando los resultados observados y las predicciones teóricas sobre la energía del electrón en el proceso de desintegración no coincidían. Esto desafiaba las leyes fundamentales de la conservación de la energía, el momento lineal y el momento angular. La solución a esta discrepancia llegó con la propuesta de Pauli, quien sugirió la existencia de una partícula sin carga y de masa extremadamente pequeña: el neutrino. Esta idea permitió explicar cómo se conservaba la energía en el proceso de desintegración beta.

- ¿Cómo se calcula la energía de desintegración y la energía cinética en el proceso de desintegración del isótopo?

Respuesta: La energía de desintegración se calcula restando las masas del radionucleido padre y del radionucleido hijo, y luego multiplicando por la velocidad de la luz al cuadrado (c^2). La energía cinética se determina restando la energía mínima necesaria para la creación del par electrón-positrón ($2m_e c^2$) de la energía de desintegración.

- Calcular la energía de desintegración en el proceso de decaimiento del isótopo Carbono-10, y demostrar la conservación de la energía en este caso.

Respuesta:

La energía de desintegración del decaimiento ${}^{10}_{6}C_4 \rightarrow {}^{10}_{5}B_5 + \beta^+ + \nu$, tomando los valores de sus respectivas masas de (Haynes, 2014) es la siguiente:

$$Q = (m_{10C} - m_{10B})c^2 = K_T + 2m_e c^2$$

$$Q = (0{,}0039162) * 931{,}494013 \frac{MeV}{c^2} * c^2 = 3{,}647916854\ MeV$$

El valor de la desintegración Q es la suma de la energía K_T más la energía del par electrón positrón ($2m_e c^2$), despejando se obtiene el valor de energía K_T

$$K_T = (0{,}0039162) * 931{,}494013 \frac{MeV}{c^2} * c^2 - 1{,}021997856\ MeV = 2{,}625918998 MeV$$

Según la ecuación de la desintegración beta (β^+) ${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D + \beta^+ + \nu + K_T$, donde K_T es la energía cinética, que se reparte entre la partícula beta β^+ y el neutrino (ν), $(E_{\beta^+} + E_\nu) = E_{KT}$, se establece que la conservación de la energía en el proceso de desintegración es la siguiente:

$$E_{10C} = E_{10B} + (E_{\beta^+} + E_\nu) + 2m_e c^2$$

La mayoría de energías son fáciles de determinar ($E = mc^2$), según la masa de cada una de ellas, sin embargo, el neutrino es una partícula cuya masa es tan pequeña que se aproxima a cero, por lo tanto, la manera de hallar su energía en un proceso de desintegración se hace según la relación de la energía de desintegración (Q), la energía mínima para la creación del par electrón-positrón ($2m_e c^2$) y la energía del positrón o partícula beta(E_{β^+}).

$$E_{máx} = E_{\beta^+} + E_\nu = Q_{\beta^+} - 2m_e c^2 = K_T$$

Recordando que el espectro de energía de las partículas beta podía adquirir cualquier valor entre cero y la energía máxima ($E_{máx} = E_{\beta^+} + E_\nu$), de esta manera se establece que la energía del neutrino se halla según

$$E_\nu = Q_{\beta^+} - 2m_e c^2 - E_{\beta^+} = K_T - E_{\beta^+}$$

$$E_\nu = 2{,}625918998\ MeV - 0.510\ 998\ 928 MeV = 2{,}11492007\ MeV$$

Ahora, teniendo en cuenta que ya se conocen todas las energías, se establece que el principio de conservación en esta desintegración si se cumple

$$E_{10C} = E_{10B} + (E_{\beta^+} + E_\nu) + 2m_e c^2$$

$$9330{,}638785 MeV = 9326{,}990868 MeV + 2{,}625918 MeV + 1{,}022 MeV$$

Como se puede evidenciar los valores en unidades de MeV a ambos lados de la ecuación se conservan.

Esta propuesta de enseñanza es tan solo un prototipo que puede ser ampliado y profundizado por el lector, aunque el contenido este bastante generalizado, su desarrollo puede ser resuelto con la información que a lo largo de la tesis se presenta, ya que esta cuenta con las explicaciones de manera clara y detallada, aportando a su vez ejemplos particulares e ilustraciones que faciliten la comprensión del proceso de desintegración beta β^+.

Conclusiones

- A lo largo del desarrollo del documento, fue posible identificar como la historia incide en la construcción e interpretación del proceso de desintegración beta, debido a que brinda una perspectiva desde las primeras concepciones de radioactividad hasta el descubrimiento de nuevas partículas tales como el positrón y el antineutrino. Lo cual proporciona al lector que se acerque al trabajo un enfoque histórico que, aunque no muy amplio, permite resaltar como la historia aporta en la comprensión de un fenómeno particular y en los conceptos que lo componen.
- La mayoría de los procesos de desintegración se muestran desde una perspectiva teórica, presentando los fenómenos ajenos a la realidad física, por consiguiente es de resaltar que al trabajar con casos puntuales que están presentes en la naturaleza, por ejemplo, el caso de una tormenta eléctrica, donde es posible encontrar elementos radiactivos como los presentados en la desintegración beta positiva, permiten un abordaje complementario del fenómeno en cuestión, lo que genera que los futuros licenciados en física dispongan de herramientas alternativas para estudiar fenómenos de esta naturaleza.
- La formación integral de los docentes, enfocados en ciencias básicas, que impactan en las instituciones de educación media y superior, debe propender por acercar a los estudiantes al conocimiento desde diferentes puntos de vista, no solo teórico, sino cimentado en aplicaciones prácticas, con el fin de realizar en ellos un proceso de enseñanza aprendizaje que les permita identificar, analizar y cuestionarse sobre los diferentes temas de interés social en la actualidad, por lo tanto, el documento brinda una herramienta al docente en formación que le permite clarificar los procesos de desintegración y las energías que se liberan de este, generando una actitud reflexiva sobre las posibles afectaciones a la salud de las personas, teniendo en cuenta esto, el documento suministra un enfoque social, aportando una conciencia relacionada con los cuidados de la salud.
- Con el mismo enfoque que se expone en el párrafo anterior, el presente trabajo queda como soporte e insumo para robustecer el repositorio de la Universidad Pedagógica Nacional, con el fin de motivar futuras investigaciones relacionadas con la concepción de antipartícula y antimateria, no dejando de lado su aplicabilidad en el estudio y comprensión de fenómenos naturales tales como los concernientes a las tormentas eléctricas. Adicional, el maestro en formación que se acerque al documento podrá encontrar una propuesta de enseñanza que se desprende del mismo, dicha propuesta queda como material para alguna posible implementación sujeta a modificaciones que el futuro investigador considere pertinentes para su trabajo.

Bibliografía

Alonso, M., & Finn, E. J. (1967). Interacción eléctrica. En *Física Volumen II: Campos y Ondas* (pág. 30). Fondo Educativo Iberamericano.

Arteaga, I. H. (2009). El docente investigador en la formación de profesionales. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, 1-21.

Babich, L. P., Bochkov, E. I., Kutsyk, I. M., & Rassoul, H. K. (2014). Analysis of fundamental interactions capable of producing neutrons in thunderstorms. *PHYSICAL REVIEW* .

Babich, L. P., Donskoy, E. N., Kutsyk, I. M., & Roussel-Dupré, R. A. (2005). The feedback mechanism of runaway air breakdown. *Geophysical Research Letters*.

Blaufox, M. D. (1996). Becquerel and the Discovery of Radioactivity: Early Concepts . *Seminars in Nuclear Medicine*, 145-154.

Briggs, M. S., Connaughton, V., Wilson-Hodge, C., Preece, R. D., Fishman, G. J., Kippen, R. M., . . . Smit, D. M. (2011). Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM. *Geophysical Research Letters* .

Briggs, M. S., Fishman, G. J., Connaughton, V., Bhat, P. N., Paciesas, W. S., Preece, R. D., . . . Chekhtman, A. (2010). First results on terrestrial gamma ray flashes from the FermiGamma-ray Burst Monitor. *Journal of Geophysical Research*.

Brown, D. E. (1992). Using examples and analogies to remediate misconceptions in physics: Factors influencing conceptual change. *The Journal of Research in Science Teaching*.

Candel, M. (2015). *Acerca del cielo-Meteorológicos.* Gredos.

Chadwick, J. (1914). Intensitätsverteilung im magnetischen Spektrum der ß-Strahlen von Radium B + C. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.*

Cigolini, C., Poggi, P., Ripepe, M., Laiolo, M., Ciamberlini, C., Donne, D. D., . . . Genco., R. (2009). Radon surveys and real-time monitoring at Stromboli volcano: Influence of soil temperature, atmospheric pressure and tidal forces on 222Rn degassing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Csikai, J., & Szalay, A. (1957). The Effect Of Neutrino Recoil In The Beta Decay Of He6. *SOVIET PHYSICS JETP* .

Curie, I., & Joliot, F. (1934). Un nouveau type of radioactivité. . *Comptes Rendus*, 254-256.

Curie, M. S. (1903). *Recherches sur les substances radioactives.* Paris, Gauthier-Villars.

Curie, P. (06 de Junio de 1905). Radioactive substances, especially radium. *Nobel Lectures in Physics, 1901-1970, Nobel Lectures, Physics, 1901e1921 (1967), vol. 1.* Amsterdam: Elsevier Publishing.

DFI-UPN. (2020). Lineamientos de Práctica Educativa para la Licenciatura en Física. Bogotá: Universidad Pedagogica Nacional.

Dias, A. A., Andrade-Neto, A. V., & Miltao, M. S. (2007). *A ATMOSFERA TERRESTRE: COMPOSIC AO E ESTRUTURA.*

Dwyer, J. (2003). A fundamental limit on electric fields in air. *Geophysical Research Letters*.

Dwyer, J. R. (2012). The relativistic feedback discharge model of terrestrial gamma ray flashes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*.

Dwyer, J. R., & Smith, D. M. (2005). A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations. *Geophysical Research Letters*.

Dwyer, J. R., Grefenstette, B. W., & Smith, D. M. (2008). High-energy electron beams launched into space by thunderstorms. *Geophysical Research Letters*.

Dwyer, J. R., Rassoul, H. K., Al-Dayeh, M., Caraway, L., Wright, B., Chrest, A., . . . Smyth, C. (2004). A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. *Geophysical Research Letters*.

Dwyer, J. R., Rassoul, H. K., Al-Dayeh, M., Caraway, L., Wright, B., Chrest, A., . . . Smyth, C. (2004). A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. *Geophysical Research Letters*.

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.* Journal of Geophysical Research: Atmospheres: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2009JD012039

Dwyer, J., M.Smith, D., J.Hazelton, B., W.Grefenstette, B., A.Kelley, N., W.Lowell, A., . . . K.Rassoul, H. (2015). Positroncloudswithinthunderstorms. *Journal of Plasma Physics*.

Eisberg, R., & Resnick, R. (1994). *Física cuántica de atomos, moleculas, solidos,nucleos y particulas.* Mexico: LIMUSA.

Ellis, C. D., & Wooster, W. A. (1927). The average energy of disintegration of radium E. *Proc. Roy. Soc.*

Enoto, T., Wada, Y., Furuta, Y., Nakazawa, K., Yuasa, T., Okuda, K., . . . Tsuchiya, H. (2017). Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. *Nature*.

Feynman, R., & Leighton, R. (1998). Lecciones de física de Feynman Volumen II. En R. Feynman, & R. Leighton, *Fisica Volumen II: Electromagnetismo y materia* (págs. 84-93). Addison Wesley.

Fishman, G. J. (1994). Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of . *Science*, 1313-1316.

Forero, N., Bareño, R., & Acosta, N. (2016). La importancia del uso del ejemplo en estudiantes de ingeniería para fortalecer el auto aprendizaje. *Ingenium-Revista de la Facultad de Ingieneria-Universidad Manuela Beltran*, 136-141.

Frisinger, H. (1974). Mathematicians in the history of meteorology: The pressure-height problem from Pascal to laplace. *Historia Mathematica*, 263-286.

Gálvez, F., López, R., Llopiz, A., & Rubio, C. (1998). Higrometría. En F. Gálvez, R. López, A. Llopiz, & C. Rubio, *Física: curso teórico-práctico de fundamentos físicos de la ingeniería* (pág. 456). Madrid: Tébar Flores.

Gautier, A. (2016). The Maracaibo beacon. *EarthData*.

Geiger, J., & Müller, W. (1928). Elektronenzählohr zur Messung schwächster Aktivitäten. *Naturwissenschaften*, 617-618.

Guerra, F., & Robotti, N. (2009). Enrico Fermi's Discovery of Neutron-Induced Artificial Radioactivity: The Influence of His Theory of Beta Decay. *Physics in Perspective*.

Guerra, F., Leone, M., & Robotti, N. (2012). The Discovery of Artificial Radioactivity. *Physics in Perspective 14*, 33-58.

Gurevich, A., Carlson, H., Medvedev, Y., & Zybin., K. (2 de Octubre de 2000). *Generation of electron–positron pairs in runaway breakdown.* Physics Letters A: 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.* Physics Letters A: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037596019290348P

Hare, B. M., Uman, M. A., Dwyer, J., Jordan, D. M., Biggerstaff, M. I., Caicedo, J. A., . . . Bozar, A. (2016). Ground-level observation of a terrestrial gamma ray flash initiated by a triggered lightning. *Geophysical Research Letters* .

Haynes, W. M. (2014). *CRC Handbook of Chemistry and Physics 95th Edition.* Taylor & Francis Group.

Hernández, S. A., & Zaccon, F. C. (2010). *COMPETENCIAS BÁSICAS Alfabetización científica. Química al alcance de todos.* Congreso Iberoamericano de Educación, Metas 2021.

Herrera, R. M. (2012). Historias de Matemáticas Historia del experimento barométrico. *G.I.E Pensamiento Matemático*.

Hosson, C. d., Decampar, N., & Colin, P. (2016). L'usage des exemples dans l'enseignement de la physique à l'université : un marqueur de l'identité pédagogique des enseignants-chercheurs ? *Recherches en éducation*.

Huestis, S. P. (2002). Understanding the Origin and Meaning of the Radioactive Decay Equation. *Journal of Geoscience Education*, 524-527.

Kondev, F., Wang, M., Huang, W., Naimi, S., & Audi, G. (2021). *The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties.* Chinese Physics C .

Krane, K. (1988). *Introductory Nuclear Physics* . John Wiley & Sons Inc.

L'Annunziata, M. F. (2016). *Radioactivity Introduction and History, From the Quantum to Quarks Second Edition.* Amsterdam: Elsevier.

Lieberman, B., & Gordon, E. (2018). *El cambio climático en la historia de la humanidad: Desde la prehistoria al presente.* España: Almuzara.

Loaiza, J. I. (2021). Aproximación al concepto de potencial eléctrico a partir del fenómeno de formación del rayo en la tormenta eléctrica. Bogota, Colombia: Universidad Pedagogica Nacional.

López Trujillo, J. A. (Septiembre de 2011). Tesis de Maestría para obtener el título de Magister en Ingeniería. *Metodología para predicción de tormentas eléctricas a partir de mediciones de campo electrostático ambiental y sistemas de localización de rayos en zona montañosa*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Malkov, M., Diamond, P., & Sagdeev, R. (2016). Positive charge prevalence in cosmic rays: Room for dark matter in the positron spectrum. *Physical Review D covering particles, fields, gravitation, and cosmology*.

Malley, M. C. (2011). *Radioactivity: A History of a Mysterious Science.* New York: Oxford University Press.

Marcillac, P. d., Coron, N., Dambier, G., Leblanc, J., & Moalic, J.-P. (2003). Experimental detection of α-particles from the radioactive decay of natural bismuth. *Nature*.

McCarthy, M., & Parks, G. K. (1985). Further observations of X-rays inside thunderstorms. *Geophysical Research Letters,* 393-396.

Middlecamp, C. (2012). Teaching and Learning on Radioactive Landscapes: Nuclear Unclear. *Science Education and Civic Engagement: The Next Level*, 65-67.

Moss, G. D., Pasko, V. P., Liu, N., & Veronis, G. (2006). Monte Carlo model for analysis of thermal runaway electrons in streamer tips in transient luminous events and streamer zones of lightning leaders. *Journal of Geophysical Research* .

Mundial, O. M. (2009). *Organización Meteorologíca Mundial* . chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6942

Pabón, D., & Beisiegel, T. (2011). Pronóstico de granizadas mediante modelos numéricos regionales en la zona andina: El caso de la tormenta del 3 de noviembre de 2007 sobre Bogotá D.C. Colombia: Conferencia: Noveno Congreso Colombiano de Meteorología, "200 años de la meteorología y la climatología en América Latina".

Pallu, M., Celestin, S., Trompier, F., & Klerlein, M. (2021). Estimation of Radiation Doses Delivered by Terrestrial Gamma Ray Flashes Within Leader-Based Production Models. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*.

Pelkowski, J. (2006). Los albores de la electricidad atmosférica en las calendas de Benjamin Franklin. *Meteorologia Colombiana*, 146-160.

Perdana, I., Al-Hadi, A., & Bukhari, M. (20 de Mayo de 2016). *The Shielding Materials from EM Radiation for Aircraft Fuselage*. Materials Science Forum: https://www.scientific.net/MSF.857.598

Quintero Plaza, D. (2018). *Una Breve Historia de la Atmósfera Terrestre.* Agencia Estatal de Meteorología: http://hdl.handle.net/20.500.11765/10206

Röntgen, W. C. (1896). On a New Kind of Rays. *Nature*, 274-276.

Röntgen, W. C. (1896). On a New Kind of Rays. *Nature*.

Rutherford, E. (1899). Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. *Philosophical Magazine*, 109-163.

Rutherford, E. (1900). A radioactive substance emitted from thorium compounds. *Philosophical Magazine And Journal Of Science*.

Rutherford, E. (1903). The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium. *Philosophical Magazine And Journal Of Science*.

Rutherford, E., & Geiger, J. (1908). The charge and nature of the alpha particle. *Proceedings of the Royal Society*.

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). The cause and nature of radioactivity. *Philosophical Magazine*.

Sáenz, D. P., & Cubillos, A. A. (2011). La Enseñanza del Decaimiento Radiactivo a partir de aproximaciones analógicas . Bogota, Colombia: 5º CONGRESO NACIONAL DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA.

Salamanca, J. E. (2023). El Telar Del Universo Invisible: de Paul Dirac hasta Richard Feynman. *Pre-Impresos Estudiantes*, 25-36.

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

Savchuk, W. (2006). The naturalist I. P. Puljuj and the discovery of X-rays. *The Global and the Local: The History of Science and the Cultural Integration of Europe.* .

Smith, D. M., Lopez, L. I., Lin, R. P., & Barrington-Leigh, C. P. (2005). Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV. *Science*.

Soddy, F. (1913a). Intra-atomic charge. *Nature*.

Soddy, F. (1913b). The radio-elements and the periodic Law. *The Chemical News*.

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*. Radiation: https://www.mdpi.com/2673-592X/1/3/15

Strunk, A., Gazdovich, J., Redouté, O., Reverte, J. M., Shelley, S., & Todorova, V. (2018). Model PET Scan Activity. *The Physics Teacher*, 278-280.

Superior, C. (2015). City of Superior Hazard Mitigation Plan Update. *THUNDERSTORM HAZARDS* . Superior, Winsconsin, Estados Unidos.

Takahashi, T. (1973). Measurement of electric charge of cloud droplets, drizzle, and raindrops. *Reviews of Geophysics*, 903-924.

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.* Europa Geosciences Union: https://nhess.copernicus.org/articles/13/1127/2013/

Tsuchiya, H., Hibino, K., Kawata, K., Hotta, N., Tateyama, N., Ohnishi, M., . . . Makishima, K. (2012). Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet. *PHYSICAL REVIEW D covering particles, fields, gravitation, and cosmology*.

University, K. (27 de Noviembre de 2017). *Lightning, with a chance of antimatter*. Kyoto University: https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research-news/2017-11-27-0

Villard, P. U. (1900). Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1010-1012.

Viñas, J. M. (2021). *El tiempo: Todo lo que te gustaría saber sobre los fenómenos meteorológicos.* Shackleton Books.

Volland, H. (1995). *Handbook of Atmospheric Electrodynamics Volume I.* Taylor & Francis Group.

Wada, Y. (2021). Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges. Tokio, Japon: Springer Theses.

Wempe, E. (2019). Detecting thunderstorm gamma radiation with LORA. Groninga, Paises Bajos: University of Groningen.

Williams, E. R. (2010). Origin and context of C. T. R. Wilson's ideas on electron runaway in thunderclouds. *Journal of Geophysical Research* .

Wilson, C. (1912). On the expansion apparatus for making visible the tracks of ionizing particles in gases and some results obtained by its use. *Proceedings of the Royal Society*.

Wilson, C. T. (1925). The Acceleration of β-particles in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 534-538.

Wilson, C. T. (1929). Some Thundercloud Problems. *Journal of The Franklin Institute Devoted to Science and the Mechanic Arts*, 1-12.

Wilson, C. T. (1956). A theory of thundercloud electricity. *Proceedings of the Royal Society of London*, 297–317.

Winter, K. (2000). Neutrino Physics. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology.

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2009). *Física universitaria, con física moderna volumen 2.* Pearson Education.