

Espectroscopía por aniquilación de positrones en la fatiga de materiales como una alternativa para la explicación del concepto de antipartícula.

Yancy Marcela Castillo Sepúlveda



**UNIVERSIDAD
PEDAGÓGICA
NACIONAL**

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Licenciatura en Física



Línea de profundización: La Enseñanza de la Física y la relación Física Matemática

Bogotá, D.C.

2026

Espectroscopía por aniquilación de positrones en la fatiga de materiales como una alternativa para la comprensión del concepto de antipartícula.

Yancy Marcela Castillo Sepúlveda

trabajo de grado para optar al título de:

LICENCIADA EN FÍSICA

Asesor

Fernando Isidro Espitia Castañeda

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Licenciatura en Física

Línea de profundización: La Enseñanza de la Física y la relación Física Matemática

Bogotá, D.C.

2026

“Recuerda mirar arriba, a las estrellas, y no hacia abajo, a tus pies. Intenta encontrar el sentido a lo que ves y pregúntate qué es lo que hace que el universo exista.

Sé curioso.

Por muy difícil que te parezca la vida, siempre hay algo que puedes hacer y en lo que puedas tener éxito.

Lo único que cuenta es no rendirte.”

Stephen Hawking

Agradecimientos

Sin duda alguna, en cada logro en el que explícitamente aparece mi nombre, de manera implícita está el de mi mamá, Nancy Sepúlveda, la mujer más fuerte e inteligente que conozco, y por quien hoy en día estoy donde estoy. Gracias mamá porque incluso cuando yo no confío en mí, tú con fe ciega, crees en las capacidades de quien un día fue su primera bebé.

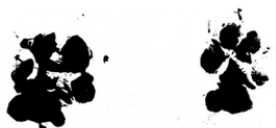
A mis abuelitos: Al abuelo Rafael quien desde hace un tiempo no está con nosotros, pero su amor y sus enseñanzas viven en nuestros corazones; a mi abuelita Ofelia, a quien considero mi segunda mamá, pues su amor y sus oraciones me acompañan desde muy pequeña a donde quiera que voy.

Y al hombre cuyo paso por mi vida se lo agradezco inmensamente a la probabilidad: sus cuidados y su amor estos últimos años han sido mi refugio en todo momento y ha dejado una huella permanente en mi corazón.

A Karitol y a Damián quienes alegran mi vida, con sus travesuras de niños.

A mi asesor, el profesor Fernando Espitia, por su acompañamiento y guía en este proceso, y por ser uno de mis referentes a lo largo de la carrera. ¡Muchas gracias profe!

Finalmente a mi Katthy preciosa, porque siempre que necesité una mano, tu patita estuvo ahí. Llenaste mi vida de felicidad durante catorce años y, aunque me hubiese gustado tenerte más tiempo a mi lado, ahora eres el recuerdo más hermoso que llevo en mi corazón y en mi memoria.



Contenido

Introducción.....	1
Problemática	2
Objetivos	5
<i>Objetivo general:</i>	5
<i>Objetivos específicos:</i>	5
Antecedentes.....	5
Capítulo I El lado oculto de la materia: fundamentos históricos de las antipartículas.	7
1.1 La necesidad de nuevas teorías físicas en el siglo XX.....	7
1.2 El descubrimiento del positrón: de la teoría a la evidencia experimental.....	10
1.3 Cuando el positrón se vuelve herramienta: Una mirada tecnológica a las antipartículas. ..	15
Capítulo II Cuando la antimateria revela la materia: la espectroscopía por aniquilación de positrones.	17
2.1 El positrón como antipartícula: Propiedades físicas relevantes.	17
2.2 Aniquilación de la antimateria: Un encuentro entre mellizos.....	18
2.3 Interacción del positrón con la materia: De la implantación a la aniquilación.	20
2.3.1 <i>Interacción con la superficie</i>	20
2.3.2 <i>Termalización</i>	21
2.3.3 <i>Difusión</i>	24
2.4 Principio físico de la espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS)	30
2.4.1 <i>Subtécnicas de la espectroscopía por aniquilación de positrones</i>	30
2.5 Sensibilidad de la PAS a defectos y su relación con la fatiga de materiales.	35
Capítulo III La espectroscopía por aniquilación de positrones y la transformación del concepto de antipartícula.....	37
3.1 La antipartícula como entidad teórica.....	37
3.2 La antipartícula como entidad experimental.....	38
3.3 El positrón como herramienta experimental: de entidad física a sonda microscópica ...	40
3.4 Aplicabilidad del conocimiento y formación de docentes en física.	43
Conclusiones	47
Referencias	49

Lista de figuras

Figura 1: Trayectoria de positrones en una cámara de niebla.....	13
Figura 2: Trayectoria de positrones en una cámara de niebla.....	15
Figura 3: Diagrama de Feynman para la aniquilación electrón-positrón en dos fotones.....	19
Figura 4: Interacciones de positrones en la superficie de un metal.....	25
Figura 5: Comparación entre el átomo de positronio y el átomo de hidrogeno.....	27
Figura 6: Diagramas de Feynman que muestran la aniquilación de para-positronio (p-Ps) en dos fotones y orto-positronio (o-Ps) en tres fotones.....	29
Figura 7: Esquema de desintegración del sodio 22.....	30
Figura 8: Esquema de un sistema experimental para la medición del tiempo de vida del positrón (PALS).....	31
Figura 9: Espectro de tiempos de vida del positrón obtenido mediante espectroscopía PALS ...	32
Figura 10: Esquema de un sistema experimental para la medición del ensanchamiento Doppler (DBS).....	33
Figura 11: Espectro energético de la radiación de aniquilación obtenida con la espectroscopía de ensanchamiento Doppler (DBS).....	34

Lista de tablas

Tabla 1: Coeficientes de absorción (α^+) y rangos medios (R^+) de implantación de positrones en metales seleccionados.....	23
--	----

Introducción

En el siglo XX la física que emanaba aires de completitud y que ofrecía respuestas satisfactorias a los objetos de estudio del momento, sufrió una serie de fracturas que llevaron al nacimiento de nuevas teorías: la cuántica y la relatividad, las cuales trajeron consigo un nuevo paradigma, que puso en el foco de las investigaciones, nuevos fenómenos y problemas de estudio. Se empezaron a buscar formas de explicar la evolución de los sistemas cuánticos y relativistas, así como también se empezó a buscar una manera de conectar estos dos grandes campos de estudio.

En ese proceso, emerge un nuevo concepto a la luz: el de antipartícula. El cuál es la base de la investigación de este trabajo. Por consiguiente, inicialmente se presenta la problemática que fundamenta tanto la pregunta problema como los objetivos de la investigación. En el primer capítulo se realiza una breve revisión histórica, que muestra cómo y de donde surge la predicción de la existencia del positrón con el trabajo de Paul Dirac y como posteriormente es confirmado experimentalmente de manera casi accidental en una de las investigaciones de Carl Anderson. El objetivo central de este primer capítulo es brindar un panorama inicial a la investigación.

En el capítulo II, se muestra como esta antipartícula se utiliza como herramienta de detección de defectos en la estructura interna de los materiales, mediante la técnica de espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS). Se realiza una descripción de las propiedades físicas de la partícula y del proceso de aniquilación que sufre al encontrarse con su contraparte: el electrón. Seguido de esto, se describen las diferentes etapas que atraviesa el positrón al entrar en contacto con un material mostrando como se modifica su estado respecto al inicial y como esto influye en la forma de aniquilación, bien sea como partícula libre, como un estado ligado a un defecto, o como un estado ligado a un electrón, más conocido como átomo de positronio.

Se realiza una descripción de dos de las subtécnicas de la PAS, la espectroscopía de tiempo de vida del positrón (PALS) y la espectroscopía por ensanchamiento Doppler (DBS), así como la respectiva descripción de las propiedades de la aniquilación que se miden en estas técnicas y de los montajes que se utilizan. Mostrando que la PAS se posiciona como una técnica efectiva para dar cuenta del estado de un material a escala atómica, permitiendo detectar la fatiga mecánica en materiales.

Finalmente en el capítulo III se realiza una discusión de cómo evoluciona el concepto de antipartícula desde tres dimensiones, como entidad teórica, como un fenómeno observable y como instrumento de caracterización. Respondiendo a tres momentos, primero la predicción teórica de su existencia, segundo, la comprobación experimental de la predicción y tercero, su utilización como herramienta que permite intervenir la realidad y generar conocimiento. Posteriormente se traslada ese cambio conceptual de la antipartícula al campo de la enseñanza de la física, donde se expone como al incluir la aplicabilidad del conocimiento, se logra impactar de manera positiva los procesos de enseñanza y aprendizaje.

Problemática

A lo largo de la historia el ser humano ha mostrado curiosidad por estudiar su entorno con el fin de descifrarlo y formular explicaciones que le permitan acercarse a la comprensión de diversos fenómenos físicos. Sus campos de estudio se han centrado tanto en los sistemas grandes y lejanos como las estrellas, hasta los más pequeños, como los átomos y las partículas que las constituyen.

Entre estos campos de estudio se encuentra la física moderna¹, cuyo desarrollo ha traído avances tecnológicos y médicos. Innovaciones como el celular, la radioterapia y las tomografías son algunos ejemplos de cómo esta ha transformado la vida cotidiana.

Sin embargo, desde una mirada educativa, estos avances suelen percibirse como algo tan cotidiano que pocas veces los estudiantes se detienen a reflexionar sobre los principios físicos en los que se basan, o tan si quiera se utilizan de ejemplo en las clases para mostrar la aplicabilidad que tiene la ciencia que se enseña. Según señala Buitrago Gallego (2019) en muchas ocasiones es en contextos no escolares, como en series y películas donde los estudiantes se encuentran con términos atractivos de la física que hacen parte de estos avances tecnológicos, como, por ejemplo, antimateria, metamateriales, nanotecnología, entre otros. Lo que sugiere la existencia de una desconexión entre la ciencia que se está enseñando en las aulas de las instituciones educativas y la que actualmente tiene aplicaciones en el mundo.

Según Salgado Fino et al. (2021), en las aulas de clases de educación básica y media no se está enseñando la ciencia moderna, lo que está reflejado en la escasa presencia de contenidos contemporáneos de la física. En concordancia con este diagnóstico, al revisar los lineamientos curriculares establecidos por el Ministerio de Educación Nacional (1998), que tienen como fin orientar y unificar la enseñanza en Colombia, se observa que, en el componente de Ciencias Naturales y Educación Ambiental, no hay una mención directa a concepciones de la física moderna a excepción de la estructura atómica.

Esta situación difiere con lo que ocurre en países como Reino Unido, Alemania y Canadá, donde posterior a una revisión de los currículos (Department for Education, 2015; Kultusministerkonferenz, 2024; Ministry of Education Ontario, 2008), se evidenció que en sus planes de estudio para la asignatura de física sí se integra la enseñanza de la física moderna de una manera más amplia, esto con el objetivo de proporcionar una educación científica más completa y relevante.

Al hacer esta comparación se hace notorio que el currículo Colombiano se encuentra desactualizado ya que se centra en abordar concepciones de la física clásica, dejando de lado la física moderna como lo señalan Jaramillo Zapata et al. (2012). Asimismo, esta ausencia de concepciones modernas de la física en el currículo limita la comprensión de los estudiantes sobre

¹ (Mittelstaedt, 1969). En su libro Problemas Filosóficos de la Física Moderna define la física moderna como el período de la física que comienza con el análisis del espacio y tiempo de Einstein en 1905 y se extiende hasta la fecha de publicación de su obra.

los avances tecnológicos, así como también reduce su interés por acceder a carreras con un enfoque STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas).

Estudios han demostrado que aplicar el conocimiento en contextos reales permite a los estudiantes ver su utilidad en la vida cotidiana, facilitando la comprensión de los conceptos y su aplicación fuera del aula, lo que hace que el aprendizaje sea más valioso y útil para ellos (Romero Hoyos, 2011)

La existencia de una conexión entre los contenidos escolares y las problemáticas del mundo real puede incidir en la motivación de los estudiantes para elegir una carrera STEM, ya que les ayuda a reconocer que la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas tienen aplicaciones directas y relevantes para su futuro (Villegas Dianta, 2024). Esto a su vez, contribuye a cambiar la percepción de que estas disciplinas son demasiado difíciles o exclusivamente teóricas, permitiendo que los estudiantes vean que el conocimiento científico tiene un impacto real en el mundo y puede ser una herramienta para transformar su entorno.

Por su parte, Sanmartí (2002) señala la importancia de que la población adquiera conocimientos científicos actualizados, no solo por su impacto en el desarrollo económico de los países, sino también porque contribuyen a fomentar una sociedad más democrática y al desarrollo cultural. Esto se debe a que la ciencia, además de tener un valor práctico, también posee un fuerte valor social, que ayuda a las personas a comprender su entorno, expresar sus opiniones de manera fundamentada y tomar decisiones informadas en pro del beneficio colectivo.

Si bien la propuesta no pretende favorecer directamente a los estudiantes de educación básica y media, sí está enfocada en otro de los actores del sistema educativo: los docentes, ya que son ellos los encargados de guiar a sus estudiantes en el proceso de aprendizaje y, por lo tanto, en la adquisición de conocimientos científicos actualizados, así como de promover el desarrollo de las habilidades necesarias para enfrentarse a un mundo cada vez más complejo y tecnificado. No obstante, Sanmartí (2002) menciona que los maestros en formación adquieren saberes disciplinares que se encuentran desligados de los fenómenos cotidianos, lo que da como resultado que, en su quehacer profesional, repliquen clases tradicionales y descontextualizadas, impidiendo que sus futuros estudiantes se aproximen a los conocimientos científicos actuales.

De esta manera y desde un contexto local, como futuros docentes de ciencias físicas, resulta pertinente cuestionarse sobre aquellas oportunidades de mejora que existen para mitigar el poco abordaje de conceptos modernos en la enseñanza de la física.

En consecuencia y como producto de un interés propio, al realizar una revisión de los recursos bibliográficos en el repositorio de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN) se evidencia que la producción textual que existe por parte de los maestros en formación, en relación con la física moderna y puntualmente la enfocada en el tema de las antipartículas es reducida. Además, como una problemática adicional, los estudiantes de la licenciatura en física, durante su formación académica tienen pocas oportunidades de profundizar en dicho tema, ya que al consultar los contenidos programáticos del curso de Mecánica Cuántica, el tópico de Mecánica Cuántica II

y el tópico de Estado Sólido, se pudo identificar que el tratamiento de las antipartículas y su aplicación en la caracterización de materiales, en estos cursos es poco profundo.

En este sentido, resulta relevante profundizar en el concepto de antipartícula, el cual nos remonta directamente al auge de la física moderna en la primera mitad del siglo XX, con los descubrimientos fundamentales sobre la estructura de la materia y de las partículas subatómicas que la componen, donde también se evidenció la existencia de su contraparte, las antipartículas, predichas por Paul Dirac en 1928 y descubiertas experimentalmente por Carl Anderson en 1932 (Aguilar Benítez, 2008). La existencia de estas antipartículas se fundamenta en la idea de que, durante el Big Bang, debieron generarse tanto materia como antimateria en cantidades inicialmente comparables, lo que se asocia a principios de simetría fundamentales en la física de partículas, como la simetría de Carga y Paridad (CP) (Gato Rivera, 2020), pero la realidad es que actualmente los estudios han mostrado que parece haber una predominancia de la materia y muy poca antimateria por lo que hoy en día la antimateria sigue siendo objeto de estudio. Más allá de su relevancia teórica, algunas antipartículas presentan aplicaciones prácticas, como es el caso del positrón, utilizado en técnicas espectroscópicas y de diagnóstico, evidenciando que la antimateria también tiene un valor instrumental en el desarrollo científico y tecnológico.

De manera particular el positrón es utilizado como sonda microscópica en la espectroscopía por aniquilación de positrones y permite develar información de la estructura interna de la materia e identificar la fatiga mecánica en materiales. Es por esta razón, que al considerar las observaciones de los autores anteriormente mencionados en cuanto a la importancia de que los maestros tengan una formación actualizada y relacionada a los campos de estudio que hoy están activos como lo es el caso de las antipartículas, y de la misma manera teniendo en cuenta las pocas oportunidades de acercamiento que tienen los maestros en formación a este concepto y la poca producción textual que hay alrededor de las mismas al interior de la Universidad Pedagógica Nacional, es que nace la siguiente pregunta que orienta la investigación:

¿Cómo abordar, desde la dimensión teórica, experimental y de aplicación, el concepto de antipartícula a partir del estudio de la espectroscopía por aniquilación de positrones, aplicada en el análisis de la fatiga de materiales, como una explicación integral del concepto?

Objetivos

Objetivo general:

Analizar el concepto de antipartícula desde el estudio de la fatiga de materiales, a través de la espectroscopía por aniquilación de positrones con el fin de presentar un abordaje introductorio para los estudiantes de la licenciatura en física.

Objetivos específicos:

- Realizar una breve revisión histórica que permita identificar en contexto el surgimiento y desarrollo del concepto de antipartícula destacando las principales problemáticas que lo abordaron.
- Explicar la técnica de espectroscopía por aniquilación de positrones a través de los fundamentos físicos, con el fin de abordar el proceso de detección de defectos en materiales.
- Generar una discusión en torno al concepto de antipartícula desde los fundamentos teóricos, experimentales y de aplicación, para brindar un abordaje integral del concepto.

Antecedentes

- *Una recontextualización histórica. Desde los orígenes de la mecánica cuántica hasta la idea de las antipartículas de Paul Dirac.* Salamanca Quintana (2024), Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá. Este trabajo de grado ofrece un análisis histórico sobre la mecánica cuántica y las antipartículas, que permite situar en contexto esta investigación. Mientras este documento se enfoca en los fundamentos teóricos e históricos, el presente trabajo se orienta hacia la aplicabilidad de las antipartículas.
- *Generación de positrones en una tormenta eléctrica: una aproximación al proceso de desintegración beta (β^+).* Sánchez Sierra (2024), Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá. Este trabajo de grado aborda la producción de positrones en fenómenos naturales como las tormentas eléctricas, con base en el análisis del proceso de desintegración beta positiva. Este documento es especialmente valioso para la presente investigación porque promueve una formación integral, donde el conocimiento no se limita al plano teórico, sino que se sustenta en aplicaciones prácticas con impacto social.
- *Estudio de la formación de defectos en materiales por la interacción con iones por medio de la técnica de espectroscopía de ensanchamiento Doppler de la radiación de aniquilación de positrones.* Pérez Flores (2017), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Este trabajo de maestría desarrolla un

sistema experimental para analizar defectos en materiales solidos mediante el uso de técnicas basadas en la aniquilación de positrones, específicamente la espectroscopía de ensanchamiento Doppler (DBS) y la de tiempo de vida (PALS). Este documento resulta relevante para la presente investigación debido a que proporciona una base experimental y teórica sobre el uso de técnicas de aniquilación de positrones como herramientas para caracterizar defectos en materiales.

Capítulo I

El lado oculto de la materia: fundamentos históricos de las antipartículas.

1.1 La necesidad de nuevas teorías físicas en el siglo XX.

Si bien el propósito del presente documento no es realizar un trabajo histórico riguroso, en este primer capítulo se desarrolla una breve revisión histórica que expone algunos de los hitos más relevantes en el surgimiento de la idea de las antipartículas. La finalidad es ofrecer al lector un panorama general sobre las condiciones científicas y los protagonistas que hicieron posible este avance conceptual. Asimismo, se aborda cómo, con el paso del tiempo, dichas antipartículas dejaron de ser una mera predicción teórica para convertirse en un recurso experimental, alcanzando aplicaciones concretas como la técnica de Espectroscopía por Aniquilación de Positrones (PAS) por sus siglas en inglés.

Para finales del siglo XIX, muchos de los científicos del momento consideraban que la física había alcanzado un punto de completitud, donde no había nada fundamental e imprescindible por descubrir. La mecánica de Newton, el electromagnetismo de Maxwell y las leyes de la termodinámica, ofrecían explicaciones precisas y altamente satisfactorias para entender los fenómenos de la naturaleza conocidos.

Prueba de esta percepción triunfalista de la ciencia es que el físico William Thomson, conocido mayormente como Lord Kelvin, en una de sus conferencias en 1900 en la Royal Institution de Londres, titulada *“Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light”* manifestó que lo único que faltaba por resolver eran dos nubes en el horizonte, algo densas: las inconsistencias del teorema de la equipartición de la energía en la teoría estadística y el movimiento relativo de la Tierra respecto al éter (Herrera Corral, 2014) hipótesis que más adelante sería descartada con el trabajo de Albert Einstein. La primera de estas dificultades se relacionó poco después con el problema de la radiación del cuerpo negro², pues el fracaso de la equipartición para explicar la distribución de energía en la radiación térmica puso en evidencia la necesidad de un cambio profundo en la teoría física, cambio que se concretó con la propuesta cuántica de Max Planck en 1900.

Sin embargo, esas dos nubes en el horizonte de Lord Kelvin no eran simples minucias que se resolvieran ajustando datos experimentales como era la percepción en dicha época donde reinaba la cosmovisión mecanicista según lo menciona Kragh (2007), sino que se tratarían de los primeros indicios de un giro inesperado en la historia de la física, ya que aunque varios de los físicos del momento tales como: Lord Rayleigh y Wilhelm Wien quienes trabajaban en el estudio de la radiación del cuerpo negro o Hendrik Lorentz, Joseph Larmor y George FitzGerald en la teoría del éter, intentaban aproximarse a estos fenómenos con modelos ingeniosos sostenidos en el seno de la teoría clásica, sus aproximaciones no terminaban por ser suficientes debido a que estos modelos

² Un cuerpo negro es un objeto físico idealizado que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él, y que emite radiación en todo su espectro en función de su temperatura.

no se ajustaban a los datos experimentales. Ejemplo de ello, es la catástrofe ultravioleta³ en la radiación del cuerpo negro y el experimento por parte de Michelson y Morley⁴ que buscaba detectar el éter y que no tuvo éxito, siendo estos los primeros latidos de una crisis inevitable.

Es así como surge un nuevo hito en la historia de la física, donde se marca el fin de una gran era y el comienzo de una nueva que haría necesario reformular conceptos tan fundamentales como el espacio y el tiempo, un nuevo paradigma que permitiría el surgimiento de nuevas teorías y a su vez ofrecería la oportunidad de que salieran a la luz otros de los eminentes físicos en la historia de la humanidad. Centrándonos en la teoría cuántica, para el año 1900. El físico alemán Max Planck habría sorprendido al mundo y fundido el eslabón que faltaba para resolver la teoría de la radiación del cuerpo negro con su ley de la radiación y, unos meses más tarde, con su hipótesis de la cuantización de la energía.

La clave de su propuesta fue suponer que la radiación no variaba de manera continua como se pensaba en el momento, sino que lo hacía en forma de paquetes de energía llamados cuantos. Así, Max Planck logró ajustar los resultados teóricos a los experimentales, debido a que al introducir el cuanto de energía, en la región ultravioleta la intensidad dejaba de ser infinita y pasaba a tomar valores de frecuencia altos que sí coincidían con lo esperado, dando de esta manera solución al problema del cuerpo negro. No sobra mencionar que incluso Planck en los inicios de su trabajo consideraba que su hipótesis no era necesariamente un opuesto a la teoría clásica de la física y que estas podrían llegar a reconciliarse, consideración que tendría que dejar de lado, ya que después el mismo diría:

Mis vanos intentos de encajar de algún modo el cuanto elemental de acción en la teoría clásica continuaron durante varios años, y me costaron un gran esfuerzo. Muchos de mis colegas vieron en esto algo casi trágico. Pero yo lo veo de otra manera. La profunda iluminación que recibí fue aún más valiosa. Ahora sabía con certeza que el cuanto elemental de acción desempeñaba un papel mucho más importante en la física de lo que inicialmente había sospechado, y este reconocimiento me hizo ver claramente la necesidad de introducir métodos de análisis y razonamiento totalmente nuevos en el tratamiento de los problemas atómicos. (Planck, 1948, p.45)

³ Al intentar describir la radiación de un cuerpo negro desde las teorías clásicas, particularmente usando la ley de Rayleigh-Jeans, se obtenía que la energía emitida en la región ultravioleta era infinita, lo cual fuera de ser un resultado absurdo también discrepaba de los datos experimentales. Este hallazgo fue denominado como la catástrofe ultravioleta (1900).

⁴ El experimento de Michelson y Morely (1887) buscaba detectar el movimiento relativo de la Tierra respecto al éter luminífero, que era el medio hipotético en el que se creía que se propagaba la luz. Para ello compararon, mediante un interferómetro, la velocidad de la luz en distintas direcciones de la órbita terrestre. El resultado fue nulo, ya que no se observó ninguna variación, lo que contradecía las predicciones de la física clásica y puso en crisis la existencia del éter.

El 14 de diciembre del año 1900 Planck presenta de manera pública ante la Sociedad Física Alemana, su deducción teórica sobre la cuantización de la energía, momento que sería oficialmente el nacimiento de la nueva era en la física, con la teoría cuántica. Mientras tanto, otros fenómenos en investigación comenzaban a acumularse. Uno de ellos fue el efecto fotoeléctrico descubierto por Heinrich Hertz en 1887. El cual consiste en iluminar con luz de diferentes frecuencias una placa metálica colocada dentro de un tubo al vacío. Al incidir la luz, los electrones del metal pueden desprenderse si la energía de los fotones es suficiente. Estos electrones liberados son atraídos por un colector conectado a un circuito eléctrico, donde finalmente un galvanómetro registra el paso de esos electrones como una corriente llamada fotocorriente. Este experimento permite apreciar la interacción que tiene la luz con la materia.

Durante aproximadamente veinte años se recogieron una gran cantidad de datos experimentales acerca de este efecto, sin embargo, no existía ninguna teoría que explicara los resultados obtenidos, ya que se esperaba que la emisión de electrones dependiera de la intensidad de la luz que se irradiaba sobre el metal y no de una frecuencia mínima de esta luz y la cual variaba en función del metal utilizado. Además, se pensaba que debía existir un tiempo de espera para que los electrones acumularan la energía proporcionada por la luz, antes de desprenderse del material. No obstante, se observó que la emisión de los electrones era prácticamente instantánea (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2003).

Cómo se menciona en García Castañeda & Ewert De-Geus (2003), no fue hasta 1905 cuando Albert Einstein trabajando en la teoría cuántica dio solución a este problema haciendo una generalización del trabajo de Planck a toda la radiación electromagnética, su propuesta sobre que la luz también estaba cuantizada en paquetes de energía llamados fotones, permitió explicar por qué la intensidad de la luz incidente no era la responsable del desprendimiento de los electrones. De esta manera se dejaba atrás la concepción clásica de que la luz, entendida como una onda, alimentaba de manera continua al electrón hasta que este lograba salir del material.

Einstein demostró que en realidad lo que determinaba el desprendimiento era la frecuencia de la luz que se irradiaba sobre la placa, ya que cada metal tiene una frecuencia necesaria para liberar electrones. Por ejemplo, en el caso de una lámina de oro, que requiere radiación en la región ultravioleta, si se iluminaba con una fuente de luz infrarroja, no importaba que esta fuera muy intensa o que permaneciera durante un tiempo prolongado, no se producía ninguna emisión. En cambio, bastaba la llegada de un solo fotón ultravioleta con la energía suficiente para que el electrón se desprendiera.

Pensar el hecho de que Einstein realizó una generalización del trabajo de Planck, como una muestra de afinidad entre las ideas de estos dos grandes de la física, es erróneo, ya que esta idea de Einstein era considerada como “un tiro errado de sus especulaciones” esto dicho en palabras de Planck y Walther Nernst, al nominarlo como miembro de la Academia de Ciencias Prusiana en 1913. Sin embargo, el trabajo de Albert fue tan exitoso que en combinación con su evidente profetización de que la teoría cuántica para nada era parte de la física clásica, hizo que muchos

consideraran que fue en ese punto de la historia en que realmente nació la teoría cuántica (Kragh, 2007).

Durante los próximos años, dos grandes ramas de la física empezarían a gestarse y a forjar su naturaleza, por un lado, la relatividad de Einstein y por otro la mecánica cuántica que tuvo más de un pionero en su desarrollo; personajes como Planck, Bohr, Heisenberg y Schrödinger. En este entramado intelectual surgiría también una de las figuras más influyentes en la comprensión profunda de la teoría cuántica: Paul Dirac, cuyo aporte marcaría una de las etapas más significativas en la consolidación y estudio de las antipartículas y de quien se hablará más adelante.

1.2 El descubrimiento del positrón: de la teoría a la evidencia experimental

Ahora la comunidad científica disponía de un marco para estudiar los sistemas microscópicos a través de la mecánica cuántica y otro para describir aquellos que se movían a velocidades cercanas a la de la luz mediante la relatividad especial. Con el uso de estas nuevas teorías, la comprensión de la estructura de la materia y su comportamiento era cada vez más sólida, pero en este punto surgió un nuevo desafío ¿Cómo describir un electrón que se desplaza a velocidades cercanas a las de la luz?

La ecuación de Schrödinger que era la herramienta central de la mecánica cuántica en el momento y la cuál surgió hacia 1926 inspirada en la dualidad onda-partícula de De Broglie para explicar los niveles de energía y la estabilidad atómica, fue muy exitosa en el régimen no relativista para resolver el átomo de hidrógeno. Sin embargo, su versión relativista fue descartada para describir electrones, ya que no incorporaba el espín ni explicaba correctamente la estructura fina. Esto hizo evidente la necesidad de extender la formulación cuántica a un marco relativista que pudiera dar cuenta de tales sistemas (Tsutsui et al., 2025).

La mecánica cuántica ondulatorio de Schrödinger inspirada en la dualidad onda-partícula buscaba una descripción continua de los procesos atómicos en el espacio y el tiempo. Schrödinger rechazaba profundamente la idea de los saltos cuánticos discontinuos e interpretó inicialmente la función de onda ψ como una suerte de función peso de la densidad de carga eléctrica, sugiriendo que el electrón estaba repartido por el espacio en lugar de ser una partícula localizada. Defendía la importancia de la claridad de visualización utilizando ecuaciones diferenciales familiares que hicieron su teoría mucho más popular y fácil de aplicar para los físicos de la época.

Por otro lado la interpretación de Heisenberg conocida como mecánica matricial se fundamentó en un criterio positivista de observabilidad que descartaba conceptos clásicos inobservables, como las exposiciones exactas o las órbitas de los electrones dentro del átomo. En lugar de trayectorias, propuso una reinterpretación de la mecánica donde las magnitudes físicas se representaban mediante tablas de símbolos o matrices. Una característica matemática clave y misteriosa de este enfoque era la no conmutatividad lo que implicaba que el orden de los factores alteraba el producto.

Paul Dirac sale a la luz pública en el año 1926 cuando se encontraba terminando su doctorado en filosofía en la Universidad de Cambridge, al resolver la disputa existente entre las ideas de Heisenberg y Schrödinger, quienes tenían una representación matemática diferente de la mecánica cuántica, por un lado, la matricial de Heisenberg y por el otro la Ondulatoria de Schrödinger. Dirac unificó estas dos representaciones en lo que desde su trabajo se conoce como notación Bra-Ket, mostrando que ambas eran equivalentes (Kragh, 2007).

A partir de esta formulación de estados y operadores, Dirac buscó una ecuación que describiera de manera simultánea el comportamiento cuántico y relativista del electrón, superando las limitaciones de la ecuación de Schrödinger.

El punto de partida fue la ecuación relativista de la energía:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

La cual relaciona la energía total de una partícula, con su momento lineal y la masa que posee, pero al intentar incorporar esta relación al formalismo cuántico mediante las sustituciones operatoriales habituales, se obtiene una ecuación diferencial de segundo orden en el tiempo, este hecho genera dificultades con la interpretación probabilística de la función de onda propuesta por Born, ya que la densidad obtenida no es necesariamente positiva y, por lo tanto, no puede interpretarse de manera consistente como una densidad de probabilidad. Por esta razón, Dirac propuso una linealización de la ecuación que permitiera que la energía apareciera en primer orden, de modo que la ecuación fuera más coherente con el formalismo de Schrödinger. Para lograrlo, introdujo un conjunto de matrices (α y β) llamadas matrices gamma 4x4 que cumplen ciertas reglas de conmutación y permiten reescribir la relación relativista de manera lineal. El resultado fue una ecuación que unificaba los dos grandes marcos teóricos de su tiempo: la cuántica y la relatividad.

La ecuación de Dirac expandida en la componente temporal y las componentes espaciales se representa así:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = (-i\hbar c \alpha \cdot \nabla + \beta mc^2) \psi \quad \text{Ec.1}$$

Donde: $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$ representa la energía total del sistema; la derivada temporal de ψ indica cómo evoluciona el estado cuántico de la partícula en el tiempo, $-i\hbar c \alpha \cdot \nabla$ es el término asociado a la energía cinética relativista; las matrices α son matrices 4x4 que vinculan el momento lineal con el espín, garantizando la compatibilidad con la relatividad especial, βmc^2 corresponde a la energía en reposo de la partícula; la matriz β mantiene la simetría relativista del sistema y dado que tanto α como β son matrices 4x4, ψ debe ser una función de onda de cuatro componentes, la cual contiene

la información completa del estado cuántico, incluyendo el espín y la dinámica espacio-temporal. Posteriormente, Paul Ehrenfest en 1932 denominó este tipo de función de onda como espinores de Dirac (Tomonaga, 1997).

Esta ecuación permitió describir a los electrones en movimiento relativista y al mismo tiempo, mantuvo la estructura de la teoría cuántica. En términos generales, la ecuación de Dirac sirve para explicar cómo se comportan las partículas de espín⁵ $\frac{1}{2}$ como el electrón cuando se mueven a velocidades cercanas a la de la luz.

Esa estructura matemática, surgida del propio formalismo, incorpora el espín del electrón de forma natural, sin necesidad de añadirlo como una hipótesis externa. De esta manera, el espín dejó de ser una propiedad añadida y pasó a considerarse una consecuencia directa de la simetría relativista de la ecuación y su covarianza bajo las transformaciones de Lorentz, es decir, de la propiedad de mantener su misma forma matemática para todos los sistemas de referencia inerciales. (Kragh, 2015; Salamanca Quintana, 2024).

Aunque pueda parecer sencillo al contarle, la ecuación de Dirac trajo consigo una verdadera revolución conceptual. Al resolverla, Dirac encontró soluciones con energía positiva que correspondían al electrón, como era de esperarse. Sin embargo, también aparecieron soluciones con energía negativa (Ec. 2), algo que en ese momento resultaba difícil de interpretarse físicamente. En lugar de desechar estas soluciones, Dirac propuso que podían tener un significado físico profundo: representaban estados posibles de una partícula con las mismas propiedades que el electrón, excepto por su carga eléctrica que es positiva. De este modo, anticipó la existencia del antielectrón o positrón, una partícula que no se había observado aún, pero cuya predicción sería confirmada pocos años después experimentalmente.

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \quad \text{Ec. 2}$$

En relación a las soluciones de energía de la ecuación de Dirac, mostradas en la Ec. 2 puede consultar el análisis histórico y formal desarrollado por Duarte (2024) en el trabajo [*Análisis histórico del origen de la ecuación de Dirac, a partir de su relación con la estructura fina del hidrógeno*](#), disponible en el repositorio de la Universidad Pedagógica Nacional, donde se expone la estructura matemática de la ecuación, el procedimiento que conduce a estas soluciones y las implicaciones conceptuales asociadas a dichas soluciones.

En un primer intento por darle sentido a esas soluciones de energía negativa que aparecían en su ecuación, Dirac propuso lo que se conoce como el mar de Dirac, este modelo exclusivamente

⁵ El espín es una propiedad cuántica intrínseca de las partículas subatómicas que representa el momento angular interno de esta. Aunque no implica un giro físico real, se comporta como si la partícula rotara sobre sí misma, generando un momento magnético que le permite interactuar con los campos magnéticos externos.

teórico establecía que el vacío realmente no estaba vacío, sino que estaba lleno de estados de energía negativos, este mar cumple con la estadística de Fermi-Dirac, donde se establece que un estado cuántico solo puede ser ocupado por un fermión⁶ a la vez. La idea era que todos esos estados negativos estaban ya ocupados por electrones que no podían ser observados directamente porque no interactuaban con la materia, formando así un mar infinito de electrones invisibles. Esto ocasionaba que los electrones “reales” no pudiesen ocupar esos niveles (Tsutsui et al., 2025).

Ahora, si uno de esos electrones invisibles era removido del mar, quedaba un hueco que se comportaba como una partícula con la misma masa que el electrón, pero con carga positiva. Aunque esta teoría fue útil para imaginar el porqué de esas energías negativas, con el tiempo se vio que tenía varias inconsistencias sobre todo cuando se intentaba extenderla a otras partículas. Por eso, el modelo fue descartado como una descripción física real.

En la figura 1 se muestra una representación del mar de Dirac, donde un fotón interactúa con un electrón que está ocupando un estado de energía negativa y que, al recibir la suficiente energía, se excita y se desplaza a un estado de energía positiva, dejando un hueco que se interpreta como la antipartícula, es decir el positrón.

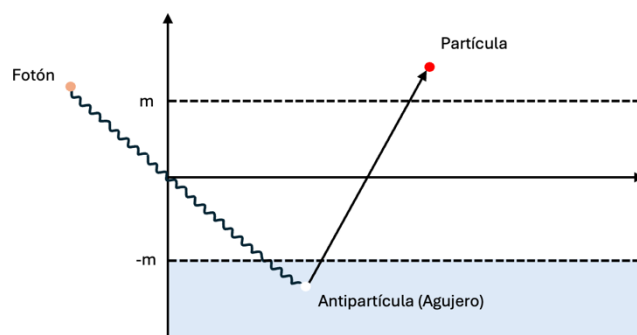


Figura 1. Representación conceptual del mar de Dirac y la creación de antipartículas. Nota: Elaboración propia

Además de su célebre ecuación relativista, Paul Dirac realizó aportes que marcaron profundamente el rumbo de la física moderna. Fue uno de los fundadores de la electrodinámica cuántica, anticipó la posible existencia de monopolos magnéticos y desarrolló herramientas matemáticas que aún se utilizan en la teoría cuántica de campos. En 1933 recibió el Premio Nobel de Física, compartido con Erwin Schrodinger, en reconocimiento a su trabajo pionero.

Si bien la ecuación de Dirac ofrecía una solución teórica elegante, aún quedaba la gran incógnita: ¿Existían realmente esas antipartículas en la naturaleza? La respuesta a esta pregunta llegaría pocos años después de manera experimental y prácticamente accidental.

⁶ Un fermión es una partícula subatómica que tiene espín semientero, como es el caso del electrón y que a su vez obedece al principio de exclusión de Pauli, que impide que dos de estos ocupen un mismo estado cuántico de manera simultánea.

En Estados Unidos para el año 1930 Carl Anderson se encontraba terminando su doctorado en física en el Instituto Tecnológico de California y durante este proceso sus investigaciones se habían centrado en el estudio de los Rayos X, este interés no era particular de Anderson, sino que era un interés en común que existía para la época en la comunidad científica, puesto que ofrecía la posibilidad de observar fenómenos de partículas de altísima energía imposibles de reproducir en los laboratorios de la época. Parte de estos trabajos que realizó Anderson en los rayos cósmicos fueron en conjunto con su profesor, el físico Robert Andrews Millikan, quien destacó por medir experimentalmente la carga del electrón.

En agosto de 1932 Anderson por sugerencia del profesor Millikan y en un intento de estudiar a profundidad las partículas producidas por el choque de los rayos cósmicos primarios, (principalmente protones y núcleos de helio) con los átomos de la atmósfera, las cuales son llamadas partículas secundarias, realizó la toma de 1300 fotografías de las trayectorias de estas partículas dentro de una cámara de niebla⁷, al ser medidas estas trayectorias se podía obtener información de la masa, la carga y la energía de la partícula que la había trasado.

De ese conjunto de imágenes Anderson notó que 15 de las trazas correspondían a partículas cargadas positivamente, a razón de la dirección en que se movían debido a la interacción de su espín con el campo magnético externo de 15000 gauss (1.5 Tesla). Lo novedoso de estas trazas es que su curvatura era demasiado grande, por lo que pensar que se trataba de la trayectoria seguida por un protón, la cual era la única partícula positiva que se conocía hasta el momento, no era posible. Puesto que si fuese un protón que tiene una masa de 1.672×10^{-27} kg su curvatura debía ser más suave, ya que su trayectoria tendría un radio más grande, dada por la relación directamente proporcional que hay entre la masa y el radio de una partícula que se mueve en un campo magnético. Por lo que lo observado difería notoriamente de esta idea (Anderson, 1933).

De acuerdo con Anderson (1933) durante el tiempo posterior a este hallazgo, él y el grupo de investigadores del Laboratorio Norman Bridge siguieron tomando más fotografías y realizando comparaciones de estas trayectorias extrañas, con imágenes de las trayectorias formadas por electrones que se movían a altas y bajas velocidades. Finalmente, llegaron a la conclusión de que los valores de carga y masa de esta partícula, que hasta el momento era desconocida, no podían diferir significativamente de los valores correspondientes al electrón. A partir de este momento Anderson bautizó a estos electrones positivos, como positrones, comprobando así la predicción teórica realizada por Dirac.

⁷ La cámara de niebla es un equipo de laboratorio conformado por un cilindro corto con placas de vidrio en sus extremos, el cual contiene en su interior un gas saturado de vapor de agua. De esta manera, cuando una partícula ionizante atraviesa la cámara, ioniza las moléculas del gas a su paso, dejando así un rastro de gotas de agua que podía fotografiarse.

Anderson le hizo algunas modificaciones a la cámara de niebla, agregando un pistón que permitía que la presión al interior de la cámara disminuyera más rápidamente, además utilizó una mezcla de agua y alcohol para el gas saturado, que le permitía observar mejor las trayectorias que se formaban, y finalmente, agregó un electroimán que rodeaba la cámara de niebla y que sometía a las partículas a seguir una trayectoria circular.

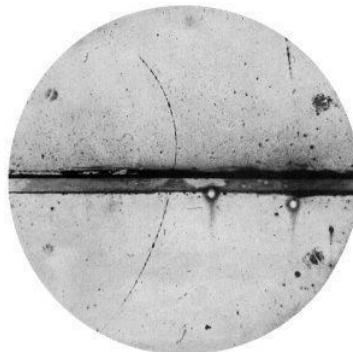


Figura 2. Trayectoria de positrones en una cámara de niebla. Nota: Imagen tomada de (Anderson, 1933)

La confirmación empírica de la ecuación de Dirac que daba cuenta de la existencia de esta nueva partícula fue un acontecimiento trascendental ya que era la primera vez que se podía observar en la naturaleza la existencia de una antipartícula, dando aliento de vida a la física de partículas que recién estaba surgiendo y abriendo la posibilidad de pensar en un mundo compuesto por un mellizo de la materia.

En 1936, apenas cuatro años después de sus observaciones Carl Anderson recibió el Premio Nobel de Física, compartido con Victor Hess quien descubrió los rayos cósmicos. Este reconocimiento simbolizó el hecho de que la física experimental y la física teórica podían converger de manera beneficiosa para entender mejor la realidad en que vivimos. Con el positrón, la antimateria se convirtió en un nuevo y atractivo terreno de investigación científica, abriendo la puerta a posteriores descubrimientos de otras antipartículas.

1.3 Cuando el positrón se vuelve herramienta: Una mirada tecnológica a las antipartículas.

Hasta este punto se ha presentado cómo se pasó de una predicción teórica de la existencia del positrón a un acercamiento real a la primera forma de antimateria. Una vez hecho público el hallazgo del positrón, la curiosidad de la comunidad científica se intensificó por comprender la naturaleza de esta antipartícula y su comportamiento físico.

A mediados del siglo XX, el estudio del positrón dejó de centrarse exclusivamente en su descripción teórica y comenzó a enfocarse en su comportamiento al interactuar con distintos materiales. Esto ocurrió tras identificarse que, al entrar en contacto con la materia, el positrón sufre un proceso de aniquilación con un electrón, en el cual se libera energía en forma de radiación. A partir de este momento, el positrón empezó a ser considerado como una herramienta potencial para el estudio de la materia (Selim, 2025).

Se reconoció su utilidad dentro de la espectroscopía, una técnica empleada desde los inicios del siglo XIX para analizar la composición de sistemas físicos a partir de la interacción entre la radiación y la materia. Inicialmente, la espectroscopía se utilizó para descomponer la luz blanca en sus diferentes longitudes de onda y, posteriormente para obtener información sobre la composición química del Sol, las estrellas y las nebulosas mediante el análisis de líneas espectrales de absorción y emisión (Kirchhoff & Bunsen, 1860). Con el avance de la física experimental, estas técnicas se extendieron al estudio de materiales, permitiendo acceder a información detallada sobre su estructura y composición interna.

Debe señalarse que el eje central del presente trabajo es el estudio de la espectroscopía, en particular la espectroscopía por aniquilación de positrones, la cual posee una capacidad única para revelar información detallada sobre los electrones del material debido a su alta sensibilidad electrónica. Esta característica permite detectar defectos y daños internos que resultan difíciles de identificar mediante otras técnicas, como los Rayos X o la microscopía electrónica. Con el tiempo, esta técnica se consolidó como una herramienta eficaz para el análisis de irregularidades estructurales en materiales (Bosnar et al., 2009).

Sin duda, la historia del positrón muestra cómo la antimateria lejos de permanecer en el terreno abstracto de la física teórica se transformó en un instrumento para conocer la estructura íntima de la materia. Este cambio de perspectiva marca el punto de partida del siguiente capítulo, donde la espectroscopía por aniquilación de positrones se representará como un puente entre la física fundamental y la ingeniería aplicada, lo que permite hacer un estudio sobre la fatiga de materiales, eje fundamental de este trabajo de grado.

Cabe recalcar que la mención de cada uno de los eventos descritos en este capítulo, no tienen como objetivo realizar un trabajo histórico riguroso, sino ofrecer una breve revisión histórica al lector que le permita tener un panorama general, sobre las condiciones científicas y los protagonistas que hicieron posible el avance conceptual de las antipartículas y mostrar cómo con el tiempo, dichas antipartículas dejaron de ser una mera predicción teórica, para convertirse en un recurso experimental.

Capítulo II

Cuando la antimateria revela la materia: la espectroscopía por aniquilación de positrones.

Al final del capítulo anterior se mostró como las antipartículas empezaron a ser utilizadas con fines experimentales con el objetivo de comprender como su uso puede dar información sobre el estado de un material. Ahora, en el presente capítulo se aborda la fundamentación física de la técnica de la espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS) por sus siglas en inglés, la cual es un eje central de la presente investigación, desde una perspectiva aplicada en la fatiga de materiales, centrándose en los procesos y fenómenos que intervienen en su funcionamiento y en su papel como método de caracterización de materiales.

2.1 El positrón como antipartícula: Propiedades físicas relevantes.

Antes de entrar en detalle sobre como el positrón se utiliza en la PAS, hay que detallar su naturaleza. A lo largo del capítulo anterior ya se dieron algunos detalles sobre sus propiedades físicas, pero estas se traerán de vuelta con el fin de puntualizarlas y condensarlas en un solo apartado.

Al igual que el electrón, el positrón también pertenece a la familia de los fermiones, presentando un espín semientero. Además de acuerdo con el teorema de Carga, Paridad espacial y reversión Temporal (CPT) donde se establece que las leyes fundamentales de la física son invariantes bajo estas transformaciones⁸, tanto su masa, tiempo de vida intrínseco y su relación giromagnética⁹ son las mismas que las del electrón. Por otro lado, su carga como ya se mencionó, en magnitud es la misma que la del electrón, pero positiva (Charlton & Humberston, 2001).

Según mencionan Charlton & Humberston (2001) el positrón en el vacío se considera teóricamente una partícula estable, ya que de manera experimental se ha podido mantener atrapado por un tiempo de hasta tres meses. Este resultado se fundamenta en los experimentos de Van Dyck et al. (1987), quienes lograron confinar un único positrón en una trampa de Penning¹⁰ durante 111 días. El tiempo de vida de un electrón se estima que ronda el valor de 4×10^{23} años, por lo que en consecuencia del teorema CPT, debe ser el mismo valor para el tiempo de vida del positrón. Por otro lado, el tiempo de vida del positrón en la mayoría de los materiales se posiciona entre un valor

⁸ Estas transformaciones son: conjugación de carga, la cual cambia cada partícula por su antipartícula correspondiente; paridad, al invertir el espacio, equivalente a un espejo; reversión temporal, que invierte el sentido del tiempo.

⁹ La relación giromagnética (γ) es una constante física que define la proporción entre el momento magnético de la partícula y su momento angular, esta proporción determina la sensibilidad con la que la partícula reacciona frente a un campo magnético externo.

¹⁰ Una trampa de Penning es un dispositivo que combina un campo magnético uniforme y un campo eléctrico cuadrupolar para confinar partículas cargadas en el vacío. El campo eléctrico mantiene a la partícula oscilando sobre el eje de simetría y el campo magnético obliga a la partícula a describir un movimiento de ciclotrón, logrando así un confinamiento estable (Van Dyck et al., 1987).

de 100 a 500 picosegundos (ps), variando sus valores si se trata de un metal, un semiconductor, un aislante o una vacancia¹¹ en el material (Selim, 2025).

Debido a estas equivalencias entre las propiedades del electrón y el positrón es que se garantiza que el comportamiento de esta antipartícula dentro de un entorno material pueda ser estudiado con las herramientas conceptuales establecidas desde la física del estado sólido y sobre todo, debido al valor positivo de su carga, que resulta esencial para que pueda ser usado como una sonda en la caracterización de materiales, ya que, al introducirse en el sólido, el positrón interactúa principalmente con los electrones del material mediante las fuerzas electromagnéticas (Charlton & Humberston, 2001). Esta interacción es la que va a definir la trayectoria, la pérdida de energía y la probabilidad de que el positrón se aniquile con un electrón del material.

Bajo este orden de ideas se hace notorio que el positrón no solo es una partícula extraña vinculada a la antimateria, sino que los estudios que se han realizado alrededor de su naturaleza han permitido definirla y caracterizarla de manera precisa. Razón que ha hecho posible extrapolar esta partícula del plano teórico al experimental, usándose como una sonda física que nos permite obtener información de la estructura interna de un material, a través de su uso en técnicas como la espectroscopía por aniquilación de positrones.

2.2 Aniquilación de la antimateria: Un encuentro entre mellizos.

Para entender el funcionamiento de la técnica PAS es necesario hacer primero una inmersión en lo que ocurre cuando una antipartícula se encuentra con su respectiva partícula, donde se da un proceso de aniquilación, fenómeno clave para el funcionamiento de esta técnica. Por ejemplo, cuando un positrón se encuentra con un electrón, estos dos se aniquilan, convirtiendo sus masas en energía y emitiendo esta en forma de rayos gamma¹². Esta energía liberada se puede describir al aplicar la ecuación de Einstein para la energía relativista de un cuerpo:

$$E = 2m_0c^2 + E(+p) + E(-e) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde $2m_0c^2$ es la energía en reposo del electrón ($-e$) y del positrón ($+p$), $E(+p)$ es la energía cinética del positrón y $E(-e)$ la energía cinética del electrón.

La energía mínima que se puede liberar durante el proceso de aniquilación entre un positrón y un electrón es principalmente la de sus masas en reposo, ya que a bajas energías la contribución

¹¹ Entiéndase una vacancia como un defecto puntual de la red cristalina que consiste en la ausencia de un átomo en una posición que normalmente debería estar ocupada, por lo que la densidad electrónica es menor respecto a la del resto del material.

¹² Los rayos gamma son un tipo de radiación electromagnética con una longitud de onda inferior a $10^{-11}m$, lo que los hace el tipo de luz más energética que existe.

energética debida el movimiento del electrón y el positrón es del orden de los meV , por lo tanto, el mayor aporte está dado por el primer término de la derecha en la Ec. 3, generando un pico energético esperado de 511 KeV como lo veremos más adelante. En ese caso, la energía liberada en el proceso de aniquilación está dada por:

$$E = 2m_0c^2$$

Donde m_0 es la masa en reposo de la partícula, en este caso la del electrón que es de 9.109×10^{-31} kg, mismo valor para la masa del positrón y c es la velocidad de propagación de la luz en el vacío, equivalente a $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$, obteniendo así que la energía para todo el sistema es de:

$$E = 2 \times 511 \text{ KeV} = 1022 \text{ KeV}$$

Como se mencionó anteriormente, esta energía liberada se da en forma de rayos gamma, los cuales deben conservar la energía y el momento total del sistema antes de la aniquilación. Si bien existen varias formas de aniquilación entre estas dos partículas, la más probable es aquella en que se tiene como resultado la emisión de dos rayos gamma (2γ) como se muestra en la Figura 3 (Charlton & Humberston, 2001), ya que un solo fotón como resultado no puede conservar de manera simultánea la energía y el momento si el sistema inicialmente se encontraba en reposo.

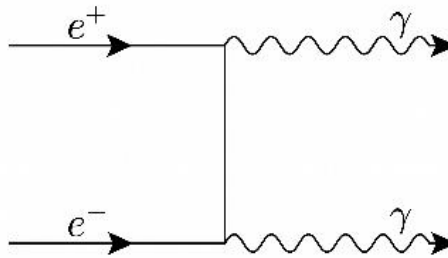


Figura 3. Diagrama de Feynman para la aniquilación electrón-positrón en dos fotones. Nota: Reproducido de Charlton & Humberston (2001). Positron Physics. Cambridge University Press.

Para este caso en particular, la energía resultante de la aniquilación se reparte entre los dos fotones:

$$E_{\gamma 1} = 511 \text{ KeV} ; E_{\gamma 2} = 511 \text{ KeV}$$

$$E_T = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} = 1022 \text{ KeV}$$

Y para que se conserve la cantidad de movimiento estos dos fotones saldrán disparados en direcciones opuestas, tal que:

$$p_{\gamma 1} = \frac{E}{c} = \frac{8.1981 \times 10^{-14} J}{3 \times 10^8 \frac{m}{s}} = 2.7327 \times 10^{-6} kg \frac{m}{s} = p_{\gamma 2}$$

$$p_T = p_{\gamma 1} - p_{\gamma 2} = 0$$

Las formas de aniquilación entre el positrón y el electrón van a depender del estado en que el positrón se encuentra antes del proceso de aniquilación. Estos estados pueden ser como: partícula libre, dando como resultado la emisión de dos rayos gamma 2γ , cómo un estado ligado¹³ a un defecto y como un estado ligado con un electrón, más conocido como átomo de positronio. Asimismo, cabe resaltar que, desde el punto de vista cuántico, este proceso de aniquilación es probabilístico y la ocurrencia de este se describe usando la sección eficaz de aniquilación, la cual depende de la velocidad relativa de las partículas y de la densidad electrónica del medio, lo que resalta el papel que tiene el material en la probabilidad de que se dé una aniquilación.

2.3 Interacción del positrón con la materia: De la implantación a la aniquilación.

A diferencia del caso establecido en el inciso anterior, cuando un positrón entra en contacto con un sólido, su aniquilación no está asegurada, ni es inmediata. Para que esta se dé, el positrón debe pasar por una serie de etapas que determinan si la aniquilación tendrá lugar, en qué condiciones se dará o si por el contrario, no se llevará a cabo. En las siguientes secciones se abordan cada una de esas etapas previas al proceso de aniquilación y a través de las cuales el positrón va modificando progresivamente su estado inicial.

2.3.1 Interacción con la superficie

En un momento inicial, hay una primera interacción del positrón con la superficie del sólido, donde se define si este se implantará en el material o si puede llegar a ser retrodispersado, es decir, desviado hacia el exterior del material tras interactuar con los átomos de la superficie.

La probabilidad de que los positrones sean retrodispersados depende de: la energía con la que inciden estos, el ángulo de incidencia con respecto a la normal de la superficie y el número atómico del material (Z) (Craig, 2018). Cuanto más grande sea (Z), más probabilidad de retrodispersión habrá, ya que este número representa la cantidad de protones que hay en los núcleos

¹³ El positrón como un estado ligado hace referencia a cuando este permanece asociado a un átomo, defecto tales como las vacancias o a un electrón, al encontrarse confinado en un pozo de potencial dado por un potencial coulombiano atractivo o por la polarización de la nube electrónica del átomo, que le impide separarse espontáneamente.

de los átomos del material y determina la carga positiva que tiene. Como el positrón tiene una carga positiva, experimenta una mayor fuerza de repulsión coulombiana al interactuar con núcleos con un alto número atómico.

Cabe aclarar que el proceso de implantación de los positrones dentro de un material depende del tipo de fuente que se utiliza para obtenerlos. Si bien existen varias fuentes de obtención de positrones, la elección de esta no se da de manera arbitraria y responde a factores tanto de utilidad, costo y oferta en el mercado. La más utilizada en los laboratorios es el isótopo radiactivo Sodio-22 ^{22}Na , y es también la que se usa como referencia a lo largo de este trabajo para abordar algunas de las explicaciones.

Entre las razones por las que el ^{22}Na es el candidato preferido a la hora de elegir una fuente de positrones es porque: tiene una vida media de 2.6 años, lo que significa que después de este tiempo la mitad de los átomos de este isótopo se habrán reducido, disminuyendo así su actividad radiactiva a la mitad. Esta vida media que posee es lo que lo hace perfecto para no tener que reemplazarlo constantemente, otra de las ventajas que ofrece es que posterior al decaimiento de este isótopo, en un tiempo de aproximadamente 10 picosegundos, se emite un fotón gamma (γ) que funciona como la señal de inicio para el detector (Krug et al., 2024).

En el uso de ^{22}Na los positrones que se emiten salen con un rango continuo de energías entre valores cercanos a 0, hasta 544 KeV que es la energía máxima que otorga esta fuente, por lo que no todos los positrones que se implantan en el material tienen la misma energía. Como resultado de esta diferencia energética se obtiene que la probabilidad de encontrar el positrón a cierta profundidad del material va decreciendo exponencialmente conforme más profundo se examina, a este respecto se volverá en el siguiente inciso.

2.3.2 Termalización

Posterior a haber ingresado al sólido, el positrón empieza a perder su energía cinética, la cual es del orden de los *KeV* o *MeV*, hasta reducirse al orden de los milielectronvoltios (*meV*). Esta pérdida energética va a depender del tipo de material y de la energía que posee el positrón (Maik Butterling, 2014).

Según Ramírez Tejerina (2024) entre los procesos más importantes mediante los cuales el positrón reduce su energía cinética se encuentran:

- Scattering con electrones de conducción: Los positrones presentan una pérdida de energía debido a las colisiones inelásticas que sufren con los electrones de la banda de conducción presentes en el material. Por estas colisiones inelásticas, el positrón va cediendo parte de su energía al medio, ocasionando procesos de ionizaciones y excitaciones electrónicas.
- Excitación de plasmones: Esta interacción es de tipo colectiva, aquí el positrón se desplaza por el sólido y si tiene la suficiente energía, transfiere parte de esta al

sistema electrónico del material, generando una oscilación colectiva de los electrones de conducción.

- Scattering con fonones: Este se da cuando el positrón ha perdido gran parte de su energía cinética y no tiene la capacidad de excitar electrones y plasmones, por lo que la energía restante que va a ceder se da mediante interacciones de tipo electrostáticas con las vibraciones de la red (fonones).

En este punto cuando el positrón ya se ha enfrentado al proceso de frenado y su energía está en el orden de los milielectronvoltios que a temperatura ambiente ronda los 40 meV , es que se considera que esta termalizado, es decir que su energía cinética se puede comparar con la energía térmica del material. A partir de este momento el comportamiento del positrón, su tiempo de vida y el tiempo en que se dé la aniquilación empieza a depender de sus interacciones con la red cristalina, donde puede quedar atrapado en vacancias, formar estados ligados con un electrón (átomo de positronio) o aniquilarse directamente con un electrón.

Un caso poco probable, pero existente es que el positrón se aniquile antes de haber alcanzado la termalización, este tipo de aniquilación se denomina “aniquilación in-flight” y como resultado los dos fotones emitidos no son de exactamente de 511 KeV cada uno. Debido a la energía cinética que posee el positrón, los fotones resultantes salen con energías desbalanceadas y no exactamente a 180° . Según se describe en Pérez Flores (2017) la razón por la que este caso es poco probable, de alrededor del 1% es debido a la sección eficaz de aniquilación en dos rayos gamma, calculada por Paul Dirac y la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_{2\gamma} = \frac{\pi r_0^2 c}{v}$$

En esta ecuación r_0 es el radio clásico del electrón, c la velocidad de la luz y v la velocidad relativa del positrón respecto al electrón. Debido a esta relación inversamente proporcional entre la velocidad relativa y la sección de eficacia, es que antes del positrón haber llegado a su punto de termalización, donde aún se mueve a una gran velocidad, la probabilidad de aniquilarse es muy pequeña. Por lo que el resultado que predomina es el proceso de frenado anteriormente descrito y por el cual el positrón va disminuyendo su energía cinética.

Como resultado del proceso de frenado, se establece una distribución estadística de profundidades a la cual los positrones alcanzan energía térmica. Esta distribución define el perfil de implantación, cuya forma depende de la energía inicial del positrón y de las propiedades físicas del material.

Según se menciona en Pérez Flores (2017) el perfil de implantación de los positrones dentro de un sólido para fuentes como la del isótopo ^{22}Na se puede describir de la siguiente manera:

$$P(z) = e^{(-\alpha_+ z)}$$

$$\alpha_+[cm^{-1}] = 17cm^2 \frac{\rho[gcm^{-3}]}{E_{max}^{1.43}[MeV]}$$

Donde z corresponde a la profundidad dentro del material, α es una relación obtenida de manera empírica a través de datos experimentales y representa el coeficiente de absorción para positrones; ρ corresponde a la densidad del material y E_{max} es la energía máxima que pueden llegar a tener algunos de los positrones dependiendo de la fuente que los emitió.

A continuación se muestran algunos datos sobre el perfil de implantación obtenidos por Brandt & Paulin (1977) en algunos metales, utilizando el isótopo de cobre-64, como fuente de positrones, con un máximo de energía de 0.65 MeV:

Tabla 1.

Coeficientes de absorción (α_+) y rangos medios (R_+) de implantación de positrones en metales seleccionados.

Metal	Z	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)	α_+ (cm^{-1})	R_+ (μm)
Magnesio (Mg)	12	1.74	48±1.28	198
Aluminio (Al)	13	2.70	72±2.0	128
Titanio (Ti)	22	4.54	150±9.0	77
Hierro (Fe)	26	7.92	250±20	40
Cobre (Cu)	29	8.92	303±20	39
Circonio (Zr)	40	6.53	210±20	53

Nota. Parte de la información fue tomada de Brandt & Paulin (1977). Se añadieron cálculos propios del rango medio de implantación (R_+) el cual tiene la siguiente relación: $R_+ = \frac{345}{\rho}$.

El propósito de la tabla 1 es observar como a medida que aumenta el número atómico y la densidad del material, el coeficiente de absorción tiende a crecer, mientras que el rango medio de penetración disminuye. Por ejemplo, para el caso del magnesio R_+ es de 198 micrómetros, mientras que para metales como el hierro que es mas denso, R_+ se reduce de manera significativa a un valor de 40 micrómetros. Esto evidencia que efectivamente existe una relación inversa entre la densidad del material y el rango de implantación de los positrones en este.

2.3.3 Difusión

Continuando con la descripción de las etapas previas a la aniquilación del positrón con el material, se encuentra la etapa de difusión. En esta etapa, el resultado final para el positrón se encuentra la aniquilación, ya sea como un estado libre, un estado ligado a un defecto o como un átomo de positronio.

Debido a que en este punto la energía cinética del positrón es del orden de los meV , su desplazamiento dentro del material es similar al movimiento Browniano¹⁴, pero dentro de un sólido cristalino. Conforme el positrón se mueve, va interactuando con la red, puede cambiar su dirección, avanzar o volverse a dispersar. Sin embargo, como se había mencionado anteriormente, el positrón dentro del material sufre procesos de repulsión coulombiana; por ello se mueve preferentemente por regiones intersticiales¹⁵, donde la densidad electrónica es relativamente menor. Si existen defectos como vacancias, estos actúan como sitios donde el positrón tiene mayor probabilidad de localizarse.

Durante esta etapa difusiva el positrón puede aniquilarse directamente con un electrón del material, lo que se denomina aniquilación como partícula libre, liberando dos rayos gamma 2γ de $511 KeV$ cada uno. En un cristal ideal donde la concentración de defectos es despreciable, este mecanismo de aniquilación es el dominante.

Este comportamiento difusivo puede describirse de manera cuantitativa mediante la longitud de difusión del positrón, como se reporta en Maik Butterling (2014).

$$L_+ = \sqrt{\frac{D_+}{c_d\mu_d + \frac{1}{\tau_b}}}$$

Donde D_+ es la constante de difusión, c_d la concentración de defectos, μ_d es el coeficiente específico de atrapamiento del material para un defecto en particular y τ_b es la vida media del positrón en el volumen del material en su estado libre antes de ser capturado o aniquilado. Los valores de las constantes presentadas anteriormente no son universales, sino que dependen de las propiedades específicas de cada material y de las condiciones experimentales, sin embargo a continuación se detallan algunos de los valores que pueden tomar:

La constante de difusión en metales es del orden de $1 cm^2 s^{-1}$, en el diamante puede variar entre $2 \pm 1 \frac{cm^2}{s}$ y $5 \pm 3 \frac{cm^2}{s}$, mientras que la concentración de defectos c_d no posee en valor fijo ya que es la variable que se busca determinar al estudiar un material y el coeficiente específico de atrapamiento μ_d es específico para cada tipo de defecto.

¹⁴ El movimiento Browniano es un desplazamiento aleatorio de partículas microscópicas dentro de un fluido, que está provocado por colisiones continuas con las moléculas del medio.

¹⁵ Una región intersticial es el espacio natural que hay entre los átomos de una red cristalina.

Esta longitud de difusión representa la distancia media característica que recorre el positrón desde que se termaliza hasta que finalmente se aniquila. En un material libre de defectos esta magnitud depende únicamente de la constante de difusión y del tiempo de vida en el volumen del material. Debido a la naturaleza difusiva de su movimiento y al tiempo de vida característico en el volumen, un positrón térmico puede realizar un número muy elevado de saltos microscópicos antes de aniquilarse, visitando del orden de 10^6 a 10^7 sitios de red. Ante la existencia de defectos, el atrapamiento reduce drásticamente la distancia que puede recorrer el positrón antes de aniquilarse.

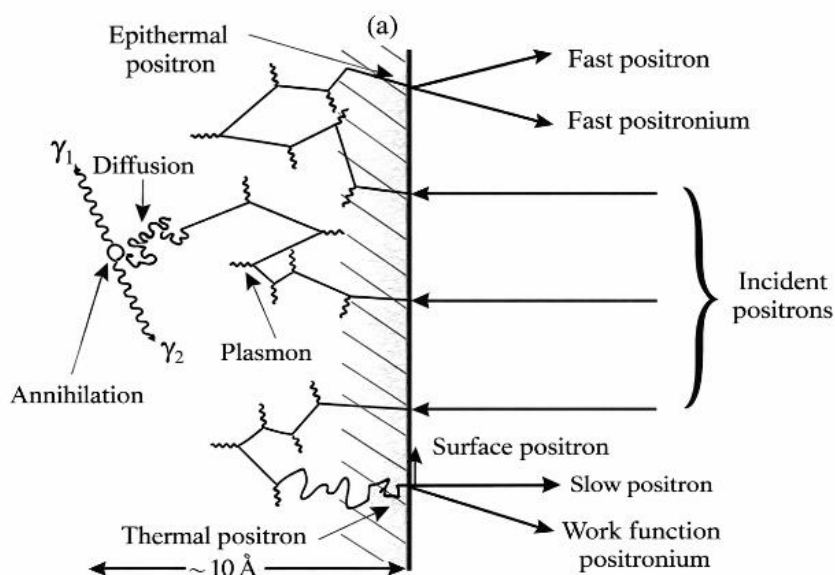


Figura 4. Interacciones de positrones en la superficie de un metal.

Nota: Reproducido de Charlton & Humberston (2001). Positron Physics. Cambridge University Press.

En la Figura 4 se muestra las diferentes interacciones que puede experimentar un positrón al incidir sobre la superficie de un metal. Al ingresar el positrón pierde energía mediante procesos como excitación de plasmones y colisiones, hasta termalizarse. Posteriormente, se difunde en el bulk del material, para finalmente aniquilarse con un electrón, emitiendo radiación en forma de dos fotones γ .

2.3.3.1 Captura por defectos (trapping)

Si la red cristalina en la que se mueve el positrón presenta defectos estructurales, como vacancias, dislocaciones o aglomerados de vacancias, estos actúan como centros de atrapamiento para el positrón. Este atrapamiento se da cuando el defecto genera un potencial efectivo suficientemente profundo como para producir un estado ligado para el positrón.

Este estado previo a la aniquilación del positrón es particularmente relevante para la identificación y caracterización de defectos en materiales, ya que la presencia y evolución de estos defectos tiene una estrecha relación con la fatiga de materiales. Cabe recordar, que la fatiga de materiales es uno de los aspectos centrales de esta investigación.

Cómo se muestra en Pérez Flores (2017) la probabilidad de que el positrón quede atrapado en un defecto en su etapa de difusión depende de la concentración de defectos presentes en el sólido. Matemáticamente, esta tasa de atrapamiento k se expresa de la siguiente manera:

$$k = \mu C$$

μ es el coeficiente de atrapamiento específico, el cual representa qué tan eficaz es un defecto para capturar positrones y depende del tipo de defecto y de la estructura electrónica del material. Si la concentración de defectos C aumenta, también aumenta la probabilidad de que un positrón que se difunde por el cristal se encuentre uno de estos y quede atrapado.

Los defectos que actúan como trampas se clasifican en trampas profundas y superficiales, su principal diferencia radica en la energía de ligadura del positrón. Para trampas profundas, la energía de ligadura es del orden de los electronvoltios (eV), lo que garantiza que el positrón quede confinado hasta que se dé el proceso de aniquilación. Por otro lado, las trampas superficiales (shallow traps) tienen energías de ligadura mucho menores, del orden de los milielectronvoltios (meV), por lo que cabe la posibilidad de que el positrón sea liberado nuevamente al material, este proceso se conoce como “detrapping”. Sin embargo, la probabilidad de que esto suceda es menor a la probabilidad de que el positrón sea atrapado (Maik Butterling, 2014).

Este proceso de atrapamiento tiene consecuencias directas en las propiedades de la aniquilación que se miden de manera experimental. En primer lugar, se observa el aumento del tiempo de vida del positrón. Como ya se mencionó al inicio de este segundo capítulo para que la aniquilación de un positrón se lleve a cabo, es fundamental la interacción con su antipartícula correspondiente, es decir, el electrón. Es por esto por lo que cuando el positrón queda atrapado en un defecto, donde hay una menor densidad electrónica, le toma más tiempo encontrar un electrón con el cual aniquilarse, lo que resulta en un tiempo de vida más largo, comparado al tiempo de vida que tiene en un material sin defectos.

Asimismo, existe una variación en los parámetros Doppler, Shape (S) y Wing (W), los cuales son herramientas de análisis utilizadas en la espectroscopía de ensanchamiento Doppler, la cual es una subtécnica de la espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS). Estos parámetros son utilizados para cuantificar la forma del pico de aniquilación centrado en 511 KeV (ver figura 9, pag 32), permitiendo extraer información sobre los defectos y la estructura electrónica de un material. Estos aspectos y sus implicaciones dentro de la técnica PAS, se amplían de manera detallada en secciones posteriores.

Desde este contexto, el positrón puede aniquilarse tanto en el volumen del material, caso que se mostró en el inciso inmediatamente anterior, como también desde un estado ligado a un defecto presente en la red cristalina del sólido. Aunque el atrapamiento en defectos aumenta el tiempo de vida del positrón, el proceso fundamental de aniquilación permanece intacto. Por lo que finalmente el positrón se aniquila con un electrón del material, produciendo la emisión característica de dos fotones gamma 2γ centrados en 511 KeV, emitidos en direcciones prácticamente opuestas que permiten conservar la energía y momento del sistema inicial.

2.3.3.2 Formación del positronio (Ps) y estados de aniquilación.

Continuando con la revisión de los posibles estados previos del positrón antes de su aniquilación, se tiene el estado ligado a un electrón, más conocido como átomo de positronio.

De acuerdo con lo señalado en Ramírez Tejerina (2024), el positronio fue postulado en 1934 por parte de Stjepan Mohorovičić, como un estado ligado estable, conformado por un electrón y un positrón. Stjepan realizó cálculos estimados del radio de este átomo, así como de sus líneas espectrales. Sin embargo, en 1945 Arthur Ruark contradijo a Stjepan al manifestar que no se trataba de un átomo estable, sino de uno inestable. Fue Arthur quien formalmente bautizó este átomo como átomo de positronio y encontró sus líneas espectrales a través de los rayos cósmicos en las nebulosas.

Para 1951 Deutsch de manera experimental encontró los tipos de positronio, como estado en singlete y en triplete (explicados en la siguiente página), al producir positronio en el gas Freón y en su artículo “Evidence for the formation of Positronium in Gases” hizo una descripción teórica y experimental de este átomo.

El átomo de positronio tiene una estructura similar al átomo de hidrógeno, como se muestra a continuación en la figura 5. A la izquierda de esta imagen se representa el átomo de positronio el cual está conformado por un electrón y positrón en estado ligado, mientras que al lado derecho se muestra el átomo de hidrógeno, donde el electrón se encuentra ligado al protón.

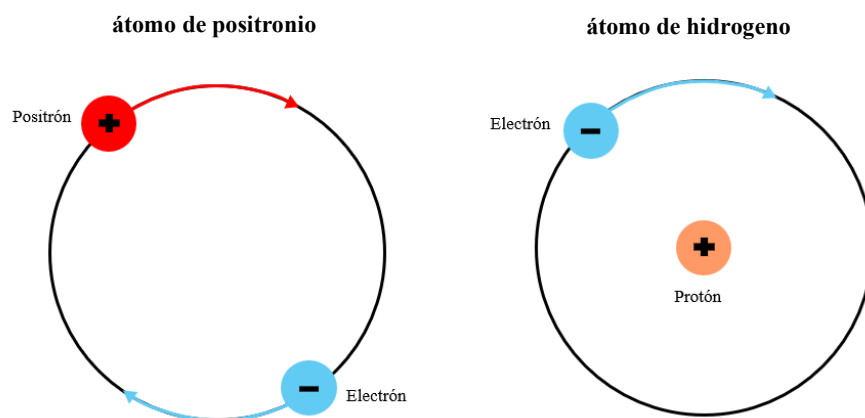


Figura 5. Comparación entre el átomo de positronio y el átomo de hidrógeno.

Nota: Elaboración propia

A diferencia del átomo de hidrógeno que es estable, el átomo de positronio es cuasiestable, es decir que si bien el electrón y el positrón forman un estado ligado con niveles de energía bien definidos, este estado no dura de manera indefinida, sino que por el contrario después de un tiempo establecido generalmente del orden de los nanosegundos y picosegundos, este átomo decae por la aniquilación positrón-electrón.

Asimismo, la masa y la energía del positronio son significativamente menores en comparación con las del átomo de hidrógeno. En el caso de la masa reducida, para el positronio se tiene $\mu = \frac{m_e}{2}$, donde m_e es la masa del electrón, mientras que para el átomo de hidrógeno es $\mu \approx m_e$. Esta diferencia en la masa reducida hace que el radio del átomo de positronio sea del doble del radio de Bohr del hidrógeno. En cuanto a la energía de ionización, el valor atribuido al átomo de positronio es de 6.8 eV , mientras que para el átomo de hidrógeno es de 13.6 eV (Charlton & Humberston, 2001).

Es importante señalar que la formación del átomo de positronio no se da en cualquier medio, debido a que esta formación está estrechamente relacionada con la densidad electrónica del material, por lo que su presencia suele percibirse en sólidos aislantes o materiales porosos como los polímeros. Y por el contrario en el bulk de metales y de semiconductores no se observa la presencia de estos átomos. Según se expone en Ramírez Tejerina (2024) para el positronio existen dos estados fundamentales los cuales dependen de la orientación relativa de los espines de las dos partículas, el electrón y el positrón, por un lado el para-positronio (p-Ps) y por el otro el orto-positronio (o-Ps).

- **Para-positronio (p-Ps, estado singlete):**

El para-positronio corresponde al estado en el que los espines del electrón y el positrón están antiparalelos, es decir uno hacia arriba ($1/2$) y el otro hacia abajo ($-1/2$). En este caso, debido a la configuración de los espines individuales, el espín total del sistema es cero $S = 0$ ($1/2 - 1/2$), lo que se denomina estado singlete. En este estado el positronio tiene una vida media de 125 picosegundos (ps) en el vacío.

La forma de aniquilación cuando se trata del para-positronio, al igual que en los casos ya mencionados con anterioridad, da como resultado la liberación de dos rayos gamma en direcciones opuestas y cada uno con una energía de 511 KeV .

- **Orto-positronio (o-Ps, estado triplete):**

El orto-positronio corresponde al estado en el que los espines del electrón y el positrón están paralelos, es decir ambos en la misma dirección, bien sea arriba o abajo. En este caso el espín total del sistema es uno $S = 1$ ($1/2 + 1/2$), lo que se denomina estado triplete.

Para este estado el tiempo de vida en el vacío es mayor, con un valor de aproximadamente 142 nanosegundos (ns) y de manera atípica al caso anterior, el resultado de su aniquilación es la liberación de tres rayos gamma que deben ser emitidos de manera coplanar y la energía que tenía el sistema antes de decaer se distribuye en los 3 fotones (ver figura 6).

Estadísticamente hablando la formación de (o-Ps) es tres veces más probable que la formación de (p-Ps). Sin embargo, existe un proceso físico llamado “pick-of” donde el positrón que hace parte del átomo de positronio se aniquila con un electrón del medio circundante en el que se mueve el átomo. Para que esta aniquilación se dé, el electrón del medio debe tener su espín configurado de manera antiparalela al espín del positrón del átomo. Cuando esto sucede el resultado de la aniquilación ya no son tres fotones, sino dos, como el caso convencional. Asimismo esto hace que el tiempo de vida del átomo de positronio se reduzca considerablemente, llegando a tiempos de vida de unos cuantos nanosegundos.

Se debe mencionar, que este proceso de pick-of es tan eficiente, que prácticamente suprime la posibilidad de que se dé la liberación de tres rayos gamma posterior a la aniquilación.

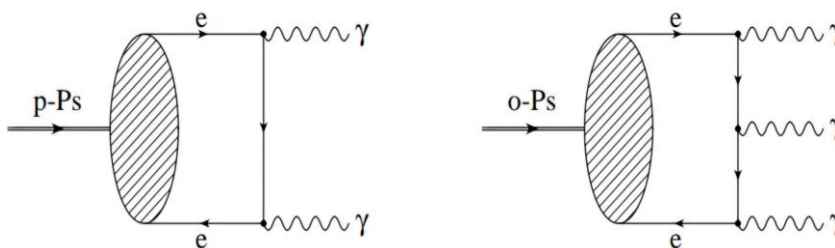


Figura 6. Diagramas de Feynman que muestran la aniquilación de para-positronio (p-Ps) en dos fotones y orto-positronio (o-Ps) en tres fotones. Nota. Reproducido de Czarnecki (1999). Positronium properties.

Esta descripción realizada sobre las etapas de interacción, difusión, atrapamiento y aniquilación del positrón en cada uno de sus posibles estados permite comprender el conjunto de fenómenos físicos que ocurren desde el ingreso del positrón al material hasta la emisión final de los fotones gamma de aniquilación. Sin embargo, más allá de su interés fundamental, estos procesos adquieren especial importancia porque dejan señales observables y que pueden ser medidas y registradas de manera experimental.

Propiedades como el tiempo de vida del positrón, su distribución en el material, la longitud de difusión y la distribución energética de los fotones emitidos, contienen información directa sobre la estructura electrónica del material y sobre la presencia de defectos en este.

El estudio de estas magnitudes constituye el fundamento de la espectroscopía por aniquilación de positrones, la cual es un conjunto de técnicas experimentales diseñadas para medir las señales emitidas durante la aniquilación y utilizarlas como herramientas de información que permiten realizar una caracterización microscópica de los materiales. Esto se abordará en el inciso

siguiente, haciendo una introducción al concepto de espectroscopía, se describirán sus principales subtécnicas, y las magnitudes físicas que pueden ser determinadas.

2.4 Principio físico de la espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS)

La espectroscopía por aniquilación de positrones PAS por sus siglas en inglés, es un conjunto de técnicas experimentales no destructivas, es decir que permiten estudiar un material a escalas atómicas sin provocar daños en su estructura durante el proceso de medición.

La base de su funcionamiento es la utilización del positrón como una sonda microscópica al ser introducido dentro de un material, donde como ya se mostró sufre un proceso de aniquilación, en el que como resultado se obtiene la emisión de radiación gamma, por medio de dos fotones. De este proceso, el tiempo, la variación energética y la dirección de emisión de estos dos fotones, brindan información sobre el entorno donde ocurrió la aniquilación (Pérez Flores, 2017).

2.4.1 Subtécnicas de la espectroscopía por aniquilación de positrones

La PAS no constituye una única técnica experimental capaz de analizar todas las propiedades de la radiación generada en la aniquilación. En realidad, se trata de un conjunto de métodos específicos que se aplican dependiendo de la característica que se desee estudiar. Sin embargo, teniendo en cuenta que en el presente trabajo la fatiga mecánica en materiales, especialmente en metales y aleaciones, representa un aspecto central, se hará énfasis en dos de las subtécnicas más relevantes para este tipo de análisis. La espectroscopía de tiempo de vida del positrón (PALS) y la espectroscopía de ensanchamiento Doppler (DBS), de las cuales se hablará a continuación.

Espectroscopía de tiempo de vida del positrón (PALS): En esta técnica se mide el intervalo de tiempo entre la emisión del positrón de la fuente y su aniquilación en el material. Como se mencionó en el inciso [2.3.1 \(Interacción con la superficie\)](#), una de las principales ventajas de usar como fuente de emisión de positrones el isótopo de Sodio-22 ^{22}Na , radica en que su canal de decaimiento predominante corresponde a la emisión β^+ , como se puede ver en la figura 7 con un 89.84% de probabilidad de decaimiento, en el cual, además de emitirse un positrón, el sistema evoluciona hacia un estado excitado de ^{22}Ne . Este estado se desexcita rápidamente emitiendo un fotón gamma de 1.2726 MeV , que se utiliza como señal de inicio en la medición, mientras que los dos fotones gamma emitidos en la aniquilación positrón-electrón son la señal de detención de la medición.

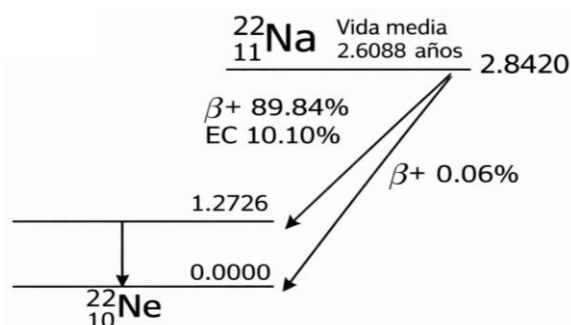


Figura 7. Esquema de desintegración del sodio 22. Nota: Adaptado de Pérez Flores (2017).

Debido a que la emisión de ese fotón de 1.2726 MeV se da casi de manera simultánea a la emisión del positrón es que se puede usar como señal de inicio y permite medir el tiempo de vida del positrón dentro del material. A continuación, se presenta el esquema general de un sistema experimental utilizado en la técnica PALS.

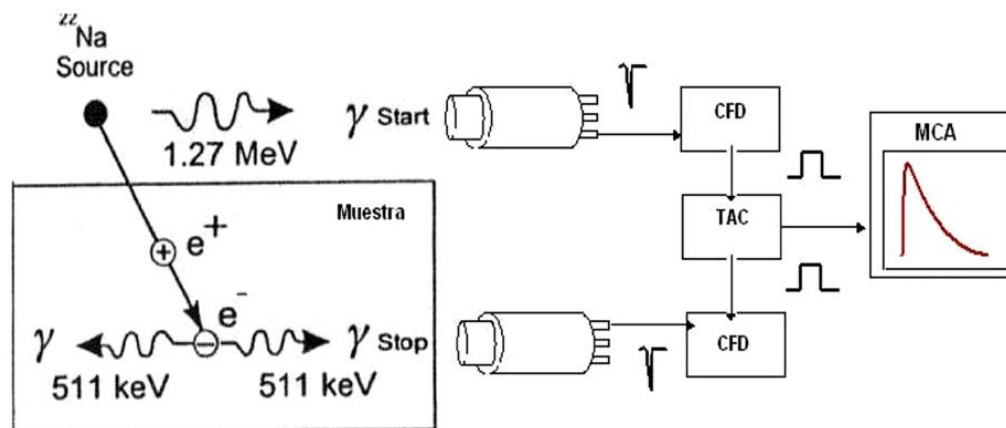


Figura 8. Esquema de un sistema experimental para la medición del tiempo de vida del positrón (PALS). Nota: Reproducido de Herranz (2006)

Como se observa en la Figura 8, el sistema experimental está compuesto por una fuente radiactiva de ^{22}Na , la muestra bajo estudio, detectores de radiación gamma y un sistema electrónico de procesamiento de señales. Todos los fotones emitidos durante el proceso son registrados por los detectores, siendo necesario seleccionar aquellos correspondientes a los intervalos de energía de interés, para esto las señales detectadas se procesan mediante los discriminadores de fracción constante (CFD), los cuales generan un pulso lógico solamente cuando la energía de la señal se encuentra dentro del rango establecido, que para la señal de inicio (start) se asocia a los fotones de 1272.6 KeV emitidos durante el decaimiento de ^{22}Na , mientras que la señal de parada (stop) corresponde a los fotones de 511 KeV producidos por la aniquilación positrón-electrón.

Los pulsos generados son enviados a un convertidor tiempo-amplitud (TAC), donde la diferencia temporal entre las señales de start y stop se transforma en una señal cuya amplitud es proporcional a ese intervalo de tiempo. Finalmente esta información se almacena y procesa mediante un analizador multicanal (MCA) conectado a un sistema de adquisición de datos, lo que permite construir el espectro completo de tiempos de vida del positrón en la muestra (Herranz, 2006).

Con el fin de ilustrar la forma en que se presentan experimentalmente los resultados de la espectroscopía por aniquilación de positrones, en la figura 9 se muestra un ejemplo de un espectro de tiempos de vida obtenido mediante la técnica PALS. Esta imagen ha sido tomada de un estudio previo reportado en la literatura Bosnar et al. (2009) y se incluye con fines ilustrativos, con el

objetivo de mostrar la apariencia típica de las distribuciones temporales registradas en este tipo de mediciones.

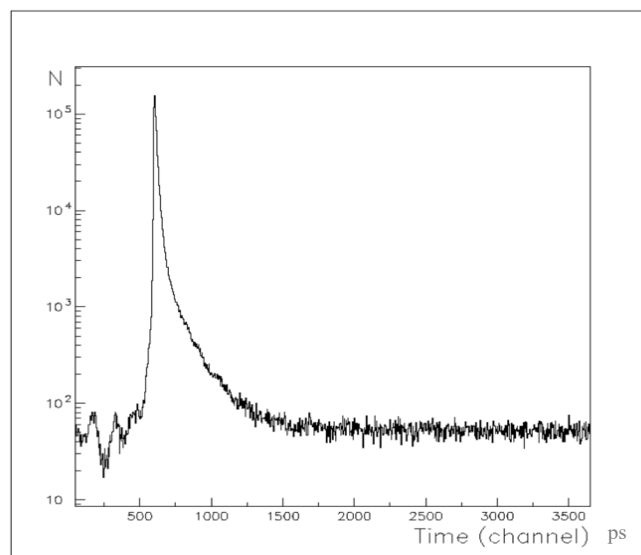


Figura 9. Espectro de tiempos de vida del positrón obtenido mediante espectroscopía PALS . Nota: Adaptado de Bosnar et al. (2009)

La distribución temporal mostrada en la figura 9 corresponde al espectro de tiempos de vida del positrón obtenido experimentalmente. En el pico que sobresale en la figura, en el tiempo de 750 ps aproximadamente, se observa una caída inicial bastante rápida, que está seguida de una región de decaimiento más lento, esta cola está ubicada entre los 1500 y 3500 ps, esto evidencia que el comportamiento no puede ser descrito mediante una única función exponencial, por lo que es necesario ajustar el espectro como una superposición de familias de curvas exponenciales, cuyos parámetros están asociados a diferentes procesos de aniquilación. De manera general el espectro puede expresarse como una suma de términos de la forma $I_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}$ donde τ_i representa los tiempos de vida característicos e I_i las intensidades relativas de cada componente. En la figura 9 dicha intensidad hace referencia a la tasa de positrones que se aniquilan en ese intervalo de tiempo τ_i .

Cada una de esas componentes tiene un significado físico, donde la que tiene un menor tiempo de vida está asociada a la aniquilación del positrón dentro del volumen del material (bulk), donde la densidad electrónica del material es alta, lo que incrementa la probabilidad de aniquilación, resultando en un tiempo de vida menor. En comparación, las componentes con tiempos de vida más largos se relacionan con positrones atrapados en defectos estructurales, donde hay menor densidad electrónica, lo que disminuye la probabilidad de aniquilación inmediata y por consiguiente el tiempo de vida del positrón aumenta. Estas contribuciones se manifiestan en el espectro como una prolongación o “cola” hacia los tiempos más grandes, para el caso de la figura 9, los tiempos mayores a 1500 ps.

Anteriormente se mostró que el aumento en el tiempo de vida del positrón dentro de un material, está directamente vinculado con la presencia de defectos en el bulk, debido a que en estas

zonas la densidad electrónica es menor y funcionan como una trampa, donde el positrón va a tardar más tiempo en encontrar un electrón para poderse aniquilar. Por lo tanto, la aparición de una cola en el espectro de vida obtenido mediante la PALS, permite concluir que en ese material que se está examinando hay presencia de defectos, como dislocaciones o vacancias (Pérez Flores, 2017).

Espectroscopía de ensanchamiento Doppler (DBS): En esta subtécnica de la espectroscopía por aniquilación de positrones, se busca medir las variaciones energéticas de los fotones gamma emitidos en la aniquilación del positrón con un electrón del material. En el inciso [2.2 \(Aniquilación de la antimateria: un encuentro entre mellizos\)](#) se estableció que el pico energético esperado es de 511 KeV, sin embargo este no es un valor fijo, ya que la energía emitida no va a depender solo de las masas en reposo de las dos partículas, sino también de la energía de movimiento que posee el electrón y el positrón, por lo que al generarse el espectro de energía de las aniquilaciones producidas en el material, habrá una ligera desviación del valor ideal (Pérez Flores, 2017).

La técnica DBS recibe su nombre del efecto Doppler porque se fundamenta en medir las variaciones en la energía de los fotones de aniquilación causadas por el movimiento del par electrón-positrón respecto al detector. El término hace referencia específica a como el momento lineal del electrón involucrado en la colisión provoca un desplazamiento en la frecuencia y energía de la radiación emitida respecto al sistema de referencia del laboratorio. Debido a que los electrones en el material poseen velocidades en diversas direcciones, estos desplazamientos individuales, unos hacia energías mayores (al azul) y otros hacia menores (al rojo) se acumulan para generar un ensanchamiento de la línea espectral alrededor del pico teórico de 511 KeV.

A continuación se presenta un esquema general de un sistema experimental utilizado en la técnica de ensanchamiento Doppler.

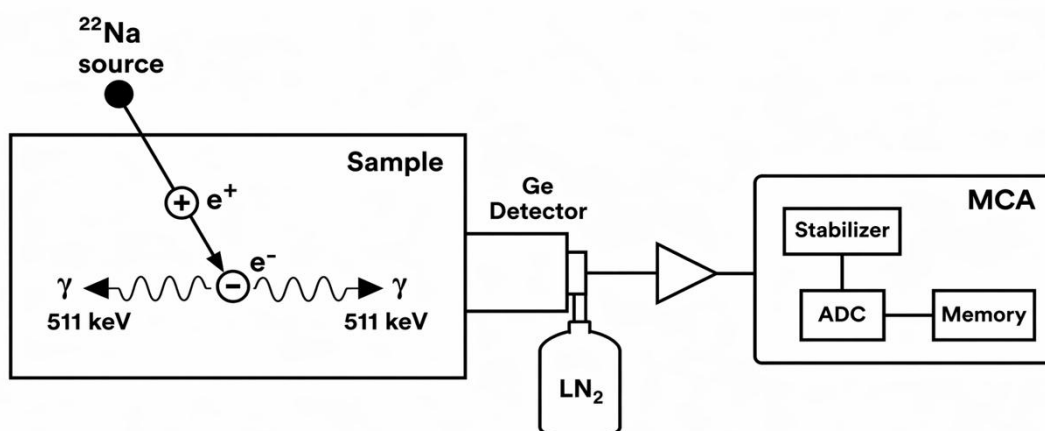


Figura 10. Esquema de un sistema experimental para la medición del ensanchamiento Doppler (DBS). Nota: Reproducido de Herranz (2006)

La figura 10 muestra el dispositivo experimental típico empleado en la espectroscopía de ensanchamiento Doppler, en el que una fuente de ^{22}Na emite positrones que se implantan en la muestra y tras su aniquilación con electrones del material, generan fotones gamma de aproximadamente 511 KeV. A diferencia de la subtécnica PALS mencionada anteriormente donde se busca medir el intervalo temporal entre dos eventos, en este caso el interés se centra en la distribución energética de dichos fotones. Para esto, la radiación de aniquilación es captada mediante un detector de germanio de alta pureza (Ge detector), cuya alta resolución permite registrar las pequeñas variaciones energéticas asociadas al efecto Doppler y para garantizar su correcto funcionamiento se mantiene a una baja temperatura mediante enfriamiento con nitrógeno líquido (LN_2).

La señal generada en el detector es enviada a un sistema electrónico de procesamiento, donde en primer lugar es amplificada para adecuar su amplitud, posteriormente pasa a un módulo de estabilización (Stabilizer) que garantiza la consistencia de la señal y luego a un convertidor analógico-digital (ADC), encargado de transformar los pulsos eléctricos en información digital. Finalmente, los datos son almacenados en la memoria del analizador multicanal (MCA), donde se construye el espectro de energía de los fotones de aniquilación (Herranz, 2006; Pérez Flores, 2017).

Con el fin de ilustrar la forma en que se presentan experimentalmente los resultados de la espectroscopía de ensanchamiento Doppler, en la figura 11 se muestra un ejemplo del espectro energético de la radiación de aniquilación, obtenido mediante la técnica (DBS). Esta imagen ha sido tomada de Herranz (2006) y se incluye con fines ilustrativos, con el objetivo de mostrar la apariencia típica de las distribuciones energéticas registradas en este tipo de mediciones.

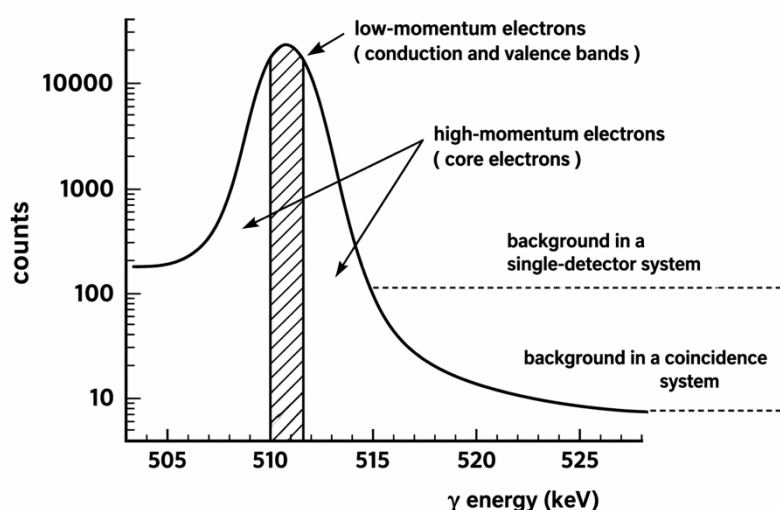


Figura 11. Espectro energético de la radiación de aniquilación obtenida con la espectroscopía de ensanchamiento Doppler (DBS). Nota: Reproducido de Herranz (2006)

La figura 11 muestra la distribución energética de los fotones gamma emitidos durante la aniquilación positrón-electrón, la cual está centrada en un pico de 511 KeV. La región central del

pico corresponde a la aniquilación con electrones de bajo momento, como los pertenecientes a las bandas de valencia y conducción, mientras que las regiones laterales del espectro se asocian a la aniquilación con electrones de momento más alto, es decir aquellos que pertenecen a capas más internas. Esto permite definir los parámetros Shape (S) y Wing (W), donde el primero S cuantifica la cantidad de eventos en la región central y el segundo W aquellos que suceden en los laterales del espectro (Selim, 2025) .

La interpretación de estos resultados está estrechamente relacionada con el modelo [trapping](#), ya que al positrón quedar confinado en una de las trampas profundas del material disminuye la probabilidad de que se aniquile con un electrón de capas interiores con un momento alto, y aumenta la probabilidad de aniquilación con electrones de valencia que tiene un momento más bajo. Este cambio se ve reflejado directamente en el espectro que se obtiene usando DBS, ya que al ser menor el momento de los electrones involucrados, el ensanchamiento Doppler se reduce, estrechándose hacia el pico esperado de 511 KeV. Como consecuencia existe un aumento en el parámetro Shape (S) y una disminución en el parámetro Wing (W).

Entonces si en el espectro energético de la radiación de aniquilación el parámetro W que cuantifica las aniquilaciones con electrones de mayor momento es menor y el pico energético es más estrecho, se puede concluir que existen defectos en el material analizado.

2.5 Sensibilidad de la PAS a defectos y su relación con la fatiga de materiales.

La espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS) presenta una serie de ventajas distintivas que la posicionan como una herramienta única frente a otros métodos de caracterización de materiales. Su principal fortaleza es el uso del positrón como una sonda atómica directa, que permite explorar la estructura interna del material desde una perspectiva microscópica, sin tener que depender de medidas indirectas de propiedades macroscópicas.

Además la PAS ofrece una alta sensibilidad a defectos de volumen abierto, siendo capaz de detectar vacancias individuales, dislocaciones y aglomerados de vacancias en concentraciones bajas, en un orden de 10^{-7} por átomo, lo que supera de manera significativa las capacidades de técnicas como la microscopía electrónica de transmisión (TEM), la cual no suele ser capaz de observar vacancias aisladas. Y es precisamente esa sensibilidad la que convierte a la PAS en una herramienta privilegiada para el estudio de defectos (Selim, 2025).

A ello se suma su carácter selectivo, propio de la naturaleza del positrón que debido a su carga positiva es repelido por los núcleos atómicos y tiende a localizarse en regiones con menor densidad de carga positivas. Por lo que una vez queda atrapado en estas regiones, el positrón permanece allí hasta su aniquilación, lo que garantiza que la información obtenida está directamente asociada al entorno del defecto y no a un promedio del material, como sucede en otras técnicas (Selim, 2025) .

Otra ventaja significativa es su carácter no destructivo, la PAS permite analizar materiales sin alterar o dañar su estructura interna, por lo que no requiere de procesos de preparación que protejan su estructura. Lo que resulta especialmente importante cuando se hacen análisis a componentes que están en servicio o que son de alto valor, donde es importante la preservación de la muestra. Esta técnica permite estudiar materiales desde capas superficiales del orden de nanómetros hasta regiones internas de varios micrómetros de profundidad, e incluso algunas de sus subtécnicas como (GiPS) permiten analizar muestras macroscópicas de varios centímetros de espesor (Selim, 2025).

En comparación con otras técnicas de caracterización, la PAS presenta ventajas claras. Métodos como la microscopía electrónica de transmisión no logra resolver defectos a escalas atómicas; la resistividad eléctrica constituye una medida indirecta que no permite distinguir entre distintos tipos de defectos y requiere condiciones controladas; los ultrasonidos carecen de sensibilidad a defectos a escala microscópica; y la difracción de rayos X está fuertemente influenciada por tensiones en la red cristalina, resultado de procesos a los que el material es sometido y que tienen como resultado el almacenamiento de energía elástica (Selim, 2025). Estas características hacen que la espectroscopía por aniquilación de positrones sea especialmente adecuada para el estudio de la fatiga de materiales, un fenómeno que se origina a partir de la degeneración y acumulación progresiva de defectos a escala microscópica, la fatiga comienza mucho antes de que se manifiesten grietas visibles o deformaciones macroscópicas, por lo que su detección temprana requiere técnicas capaces de identificar cambios sutiles en la microestructura del material. Entre las industrias en las que es de interés detectar la fatiga de materiales se encuentra: la metalurgia e industria de materiales, la industria energética y nuclear, donde se utiliza para estudiar el deterioro de materiales, como el acero de los recipientes de presión de los reactores que han sido activados por neutrones.

El desarrollo de sistemas experimentales transportables ha permitido que se extienda el uso de la PAS a condiciones reales de operación. Técnicas basadas en el análisis de la forma del pico energético de aniquilación permiten evaluar daño por fatiga en componentes estructurales sin necesidad de retirarlos de servicio. En conjunto estas capacidades posicionan a la PAS como una herramienta integral para el estudio de defectos y su relación con la fatiga de materiales. Este uso del positrón como sonda no solo tiene implicaciones técnicas sino que también plantea una nueva perspectiva sobre el papel de las antipartículas en la construcción del conocimiento físico, aspecto que será desarrollado en el capítulo siguiente.

Capítulo III

La espectroscopía por aniquilación de positrones y la transformación del concepto de antipartícula.

A lo largo de los capítulos anteriores se ha mostrado cómo el concepto de antipartícula emerge en el siglo XX, y particularmente como en el caso del positrón, este pasó de ser una predicción teórica a una entidad experimentalmente confirmada. Además, se abordaron los fundamentos físicos de su interacción con la materia y su uso dentro de la espectroscopía por aniquilación de positrones como herramienta de caracterización de materiales.

Sin embargo más allá de su origen y evolución en la historia y su formalización física, el concepto de antipartícula plantea algo más significativo y es que su significado no ha permanecido fijo, sino que se ha transformado en función del contexto en el que se estudia, por lo que de esta manera el positrón no solo puede entenderse como una entidad teórica de la mecánica cuántica relativista o como un fenómeno observable asociado a procesos de aniquilación, sino también como una herramienta experimental que permite acceder a información sobre la estructura microscópica de la materia.

Por lo tanto, el propósito de este capítulo es presentar esta transformación conceptual, mostrando como la espectroscopía por aniquilación de positrones permite reinterpretar el concepto de antipartícula a partir de su uso en la práctica experimental. Para esto se realizará un abordaje del positrón desde tres dimensiones: como entidad teórica, como un fenómeno observable y como instrumento de caracterización.

3.1 La antipartícula como entidad teórica.

Como se mostró anteriormente el concepto de antipartícula nació en el marco de la formulación de la teoría cuántica relativista del electrón, evento que constituyó uno de los desarrollos más importantes de la física del siglo XX. Aquí el positrón aparece inicialmente como una consecuencia directa de la estructura matemática de la teoría que buscaba resolver tensiones fundamentales entre dos grandes marcos conceptuales ya consolidados, la cuántica y la relatividad.

La ecuación propuesta por Paul Dirac para describir partículas de espín semientero en un régimen relativista, no solo permitió integrar los principios de la mecánica cuántica con la relatividad especial, sino que también introdujo una novedad conceptual en el momento y es la existencia de energías negativas, como resultado de su ecuación, las cuales resultaban problemáticas desde el punto de vista físico, porque no había una interpretación para estas. (Kragh, 2015).

La manera en que se intentaron interpretar estas soluciones, incluyó modelos que no prosperaron como el mar de Dirac, sin embargo en este proceso Paul Dirac llegó a una idea, que sería el inicio del descubrimiento de la antimateria. Dirac propuso interpretarlas como estados correspondientes a una nueva entidad, una partícula con la misma masa y espín del electrón, pero con carga opuesta, denominada por él como antielectrón. Siendo esta la razón por la que en un inicio el positrón aparece como una entidad cuya existencia está anclada al formalismo matemático

y que hasta el momento no tenía evidencia empírica que sustentara su existencia. Esto pone en evidencia una de las características de la física teórica del siglo XX, que fue la capacidad de sus teorías para anticipar la existencia de entidades que no han sido previamente observadas. Tal como lo señala Kragh (2007), este tipo de predicciones representan un cambio en la relación convencional entre teoría y experimento, donde la teoría deja de ser únicamente descriptiva para adquirir un carácter predictivo-generativo.

Hasta este punto el positrón debe su significado totalmente a la teoría que lo sacó a la luz, aun no es un objeto de medición, ni una entidad a la que se pueda acceder a través de la experiencia, sino una solución matemática a la que se dio una interpretación física, donde su realidad se encuentra mediada por criterios de coherencia y consistencia formal. Asimismo, propiedades como la masa, la carga o el espín de esta partícula tampoco han sido medidas, sino inferidas con ayuda de la teoría. Sin embargo, este enfoque centrado en los aspectos formales de la existencia del positrón presenta limitaciones, ya que aunque la teoría proporciona una descripción precisa y coherente de las propiedades del positrón, no ofrece por sí misma escenarios que permitan su detección o la medición de sus interacciones en sistemas físicos puntuales.

La existencia de la antipartícula permanece como una hipótesis teórica cuya validación depende de su vinculación con la experiencia, lo que hace parte de una de las tensiones de la física moderna, es decir, la distancia entre la capacidad predictiva de las teorías y su verificación experimental.

Cabe resaltar que como lo menciona Kragh (2015), la interpretación de las soluciones negativas de energía no fue inmediatamente aceptada por la comunidad científica, lo que muestra que el estatus ontológico de entidades como el positrón no es unívoco ni inmediato, sino que se construye de manera progresiva a través de la teoría, la interpretación y la evidencia. Por lo tanto en esta primera etapa el concepto de positrón es fundamentalmente abstracto, existe porque la teoría lo exige, no porque haya sido observado. Sin embargo, este carácter teórico en el que nace el concepto de antipartícula no lo limita, sino que abre la posibilidad de que el concepto evolucione, junto con su significado, evolución que se concreta cuando las predicciones teóricas comienzan a relacionarse con fenómenos que se pueden observar.

Logrando así que la antipartícula deje de ser exclusivamente formal y empiece a tener una dimensión empírica, sin abandonar la teoría original, sino ampliándola. El concepto se mantiene, pero también se define a partir de lo que se puede medir y observar experimentalmente.

3.2 La antipartícula como entidad experimental

El paso que tuvo el positrón de ser solo una entidad teórica a transformarse en un objeto experimental no puede entenderse como una simple confirmación obtenida de la predicción previa realizada por Dirac, sino como una transformación profunda de su significado como antipartícula.

En su origen el positrón pertenece exclusivamente al dominio del formalismo, pero unos años más tarde el positrón es detectado experimentalmente por Anderson (1933), lo que no solamente valida la predicción teórica, sino que introduce un nuevo significado, en el que el positrón deja de ser una entidad inferida y pasa a ser un fenómeno físico al cual se puede acceder a través de dispositivos experimentales. A partir de este momento, el concepto de antipartícula se desplaza desde el plano racional, al empírico.

Este desplazamiento puede analizarse a partir del enfoque operacionalista de Percy Bridgman, quien plantea que el significado de los conceptos físicos está determinado por las operaciones mediante las cuales estos son definidos (Chang, 2004; Hofer-Szabó, 2025), así el positrón no se comprende únicamente por su lugar en la ecuación, sino también por los procedimientos que permiten detectarlo: la observación de las trayectorias en las cámaras de niebla, la medición de radiación gamma producto de procesos de aniquilación o la identificación de señales en detectores. En palabras de Bridgman, un concepto físico es equivalente al conjunto de operaciones que lo constituyen (Chang, 2004).

Reducir esta transición que tiene el positrón a un simple cambio de métodos de medición resulta insuficiente ya que en realidad no solo relaciona lo que se puede observar sino como se integra en prácticas experimentales, que tienen como objetivo la producción de conocimiento (Muñoz Gil & Rivera Guerrero, 2023), siendo este el punto donde nace un elemento clave que suele quedar implícito, a pesar de ser fundamental para la comprensión de su concepto: su aplicabilidad. Para profundizar en esta idea, es pertinente considerar que la consolidación de un concepto científico no depende únicamente de su detectabilidad, sino de su capacidad para ser incorporado en prácticas experimentales que permitan intervenir sobre otros sistemas, por lo que la aplicabilidad del conocimiento se convierte en un elemento fundamental para comprender como un concepto adquiere especial relevancia dentro de la ciencia.

El planteamiento de Hacking (1983) desarrolla esta idea con mayor precisión, según este autor, la realidad de las entidades científicas no se fundamenta en la exactitud de las teorías que las describen, sino en la posibilidad de utilizarlas para producir efectos controlables en el mundo, lo que hace que el estatuto ontológico de una entidad se fortalezca en la medida en que esta puede ser manipulada experimentalmente. Y el caso del positrón ilustra de manera directa esta transformación, ya que si bien su existencia fue inicialmente inferida a partir de la ecuación de Dirac, su posicionamiento como entidad científica no se limita a su verificación experimental, sino que se refuerza cuando comienza a ser utilizado como herramienta en contextos experimentales.

La posibilidad de dirigir positrones, controlar su interacción con la materia y analizar los productos de su aniquilación convierte a esta antipartícula en un elemento activo en la práctica científica lo que resulta clave para entender el papel de la espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS). En esta técnica, el positrón no es simplemente observado, sino que se utiliza para explorar la estructura interna de los materiales, por ejemplo, en la espectroscopía de tiempo de vida del positrón (PALS), el comportamiento de esta partícula permite identificar defectos en la red cristalina, ya que su tiempo de aniquilación depende de la densidad electrónica del entorno, donde el positrón actúa como una sonda capaz de revelar información que no es accesible mediante otros métodos, lo que evidencia su valor como herramienta aplicada (Maik Butterling, 2014).

Desde esta perspectiva, la aplicabilidad del conocimiento no solo valida la existencia del positrón, sino que amplía su significado, ya que no se trata únicamente de una antipartícula predicha y observada, sino de una herramienta experimental que permite resolver problemas concretos, como el análisis de fatiga en materiales. Esta transición implica que el concepto de antipartícula adquiere una dimensión funcional, en la que su importancia radica en lo que permite hacer, más que en lo que representa teóricamente.

Esta idea se articula con la propuesta de Evandro Agazzi, quien manifiesta que los objetos científicos no se definen únicamente por su descripción teórica, sino por la capacidad de ser integrados en prácticas operativas (Muñoz Gil & Rivera Guerrero, 2023). Según menciona Muñoz Gil & Rivera Guerrero (2023) Evandro Agazzi sostiene que una entidad adquiere estatus científico cuando puede ser identificada de manera estable mediante procedimientos reproducibles, por lo que la aplicabilidad técnica y la reproducibilidad constituyen condiciones fundamentales para que una entidad sea reconocida como objeto de conocimiento.

Por su parte, Chang (2004) complementa esta interpretación al señalar que el conocimiento científico se construye mediante procesos de iteración epistémica, la cual es como un proceso de superación y mejoramiento de la misma ciencia. Para ilustrar esto Chang recupera una célebre comparación de Bohr:

Lavar los platos y el lenguaje pueden compararse en algunos aspectos. Tenemos agua sucia y toallas sucias pero al final conseguimos limpiar los platos y los vasos. Del mismo modo, tenemos términos poco claros y una lógica limitada de forma desconocida en su ámbito de aplicación, pero no obstante, conseguimos utilizarla para aclarar nuestra comprensión de la naturaleza. (Chang, 2004, p.220).

Hasta aquí se puede ver que la estabilidad de una entidad no depende de manera exclusiva a una teoría unificada, sino de la consistencia de los resultados obtenidos en diferentes contextos experimentales, así la robustez del concepto del positrón no proviene únicamente de su formulación teórica, sino de la repetibilidad y fiabilidad de los procedimientos que permiten utilizarlo (Muñoz Gil & Rivera Guerrero, 2023).

En conjunto estos enfoques permiten afirmar que la comprensión del concepto de antipartícula se profundiza cuando este se vincula con su aplicabilidad, en el caso, del positrón su paso de entidad teórica a herramienta experimental no solo redefine su estatus ontológico, sino que también evidencia cómo el conocimiento científico adquiere significado en la medida en que puede ser aplicado para intervenir el mundo. De este modo, la espectroscopía por aniquilación de positrones no solo constituye una técnica de análisis sino un escenario en que el concepto de antipartícula se materializa, se estabiliza y se vuelve relevante para la resolución de problemas reales.

3.3 El positrón como herramienta experimental: de entidad física a sonda microscópica

El paso del positrón desde una entidad experimental hacia una herramienta de investigación es una de las transformaciones más significativas en la evolución del concepto de antipartícula. En el inciso anterior se mostró cómo su existencia se consolida a partir de su detección y manipulación

experimental, pero aquí el cambio es más profundo, ya que el positrón deja de ser únicamente un objeto de estudio para convertirse en un instrumento que permite investigar la materia (Maik Butterling, 2014). Esto implica una reconfiguración de su significado, ya que su valor no reside únicamente en su existencia física, sino en su capacidad para generar conocimiento sobre otros sistemas.

En el marco de la espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS), el positrón se emplea como una sonda microscópica altamente sensible, capaz de explorar la estructura interna de los materiales, con un nivel de detalle que resulta inaccesible con el uso de otras técnicas (Maik Butterling, 2014; Pérez Flores, 2017). A diferencia de métodos que se basan en propiedades macroscópicas o en interacciones indirectas, la PAS se fundamenta en la interacción directa del positrón con los electrones del bulk del material, característica que le otorga una sensibilidad muy especial a variaciones locales en la densidad electrónica, lo que permite detectar defectos estructurales a escala atómica (Charlton & Humberston, 2001).

Del capítulo anterior se sabe que cuando un positrón es introducido en un sólido no se aniquila de manera inmediata, sino que atraviesa una serie de etapas. Inicialmente, pierde su energía cinética a través del proceso de termalización, al interactuar con electrones, fonones y excitaciones colectivas del material. De manera posterior, entra en un proceso de difusión en el que el positrón se desplaza por la red cristalina, explorando diferentes regiones del bulk, durante esta etapa el positrón puede quedar atrapado en defectos estructurales, como vacancias o dislocaciones, o bien aniquilarse directamente en el volumen del material. Cada una de estas posibilidades está asociada a condiciones específicas del entorno electrónico, lo que convierte al proceso de aniquilación en una fuente de información sobre la microestructura del sólido (Maik Butterling, 2014; Pérez Flores, 2017; Ramírez Tejerina, 2024).

El aspecto clave en este contexto es que las propiedades de la aniquilación son medibles experimentalmente, el tiempo de vida del positrón y la energía de los fotones emitidos contienen información directa sobre el entorno en el que ocurre la aniquilación. En particular, el tiempo de vida del positrón es sensible a la densidad electrónica local, en regiones con menor densidad, como las vacancias, el positrón tarda más en encontrar un electrón con el cual aniquilarse, lo que se traduce en un aumento de su tiempo de vida. De manera complementaria, el ensanchamiento Doppler del pico de aniquilación permite inferir el momento de los electrones involucrados en el proceso, proporcionando información adicional sobre la estructura electrónica del material y es esta capacidad de extraer información microscópica a partir de magnitudes medibles lo que convierte al positrón en una herramienta experimental de gran valor, lo que hace que su papel en la PAS no sea pasivo, sino activo. Este cambio de rol implica que el concepto de antipartícula adquiere una dimensión funcional, en la que su significado está ligado a su capacidad de operar como instrumento dentro de un sistema experimental.

Por lo anterior, el positrón deja de ser comprendido exclusivamente dentro del marco de la física de partículas y pasa a integrarse en el ámbito de la ciencia de materiales. En este nuevo contexto, su papel no consiste en ser descrito o explicado, sino en ser utilizado para intervenir en la realidad, así el positrón actúa como un mediador entre distintos niveles de la realidad física, permitiendo establecer una conexión entre fenómenos microscópicos, como la presencia de

defectos en la red cristalina de un material y propiedades macroscópicas de este, como su resistencia mecánica o su vida útil. Esa capacidad de mediación resulta clave para el fortalecimiento del concepto de antipartícula, ya que mientras en su formulación teórica el positrón aparece como una solución matemática, y en su validación experimental como una entidad observable, en su uso como herramienta adquiere un nuevo significado. Sin embargo, como en el caso anterior, esta nueva interpretación no sustituye a las anteriores, sino que las integra y las amplía, mostrando que el concepto de antipartícula no es estático, sino que evoluciona mediante procesos de iteración epistémica en función de los contextos en los que se emplea (Chang, 2004).

Ahora bien, aunque el estudio de la fatiga mecánica de materiales, mediante el uso de la espectroscopía por aniquilación de positrones fue desarrollado en el capítulo anterior, resulta pertinente retomar este fenómeno desde una perspectiva distinta. No se trata aquí de describir nuevamente los procesos físicos involucrados, sino de analizar lo que implica el hecho de que el positrón pueda ser utilizado para investigarlos. En efecto, la posibilidad de detectar defectos microscópicos en etapas tempranas del daño estructural mediante el uso de una antipartícula evidencia que el conocimiento físico no se limita a la explicación de la realidad, sino que se convierte en una herramienta para su intervención.

Esto es fundamental, porque introduce una dimensión que suele quedar implícita en la enseñanza de la física: la aplicabilidad del conocimiento (Sanmartí, 2002). En muchos contextos educativos los conceptos físicos se presentan como construcciones abstractas, desvinculadas de su uso práctico, lo que puede generar la percepción de que la física es un conjunto de teorías alejadas de la realidad cotidiana del estudiante (Caballero Freyte et al., 2014). Esta manera de presentar los conceptos físicos privilegia el formalismo matemático, pero deja en segundo plano el hecho de que dichos conceptos emergen y se consolidan gracias a la interacción con problemas concretos del mundo físico. Sin embargo, el caso del positrón muestra que esta percepción es incompleta, ya que evidencia que incluso los conceptos más abstractos pueden adquirir más sentido cuando se abordan desde sus contextos de aplicación.

Esta conexión entre teoría y aplicación no solo valida el conocimiento, sino que lo resignifica al mostrar que las entidades postuladas en marcos teóricos pueden convertirse en herramientas operativas dentro de la práctica científica. Mostrando que el conocimiento físico no se limita de manera exclusiva a describir el mundo, sino que también permite intervenir en él, ofreciendo soluciones a problemas que tienen implicaciones tecnológicas, industriales e incluso sociales.

Esto tiene consecuencias directas para el aprendizaje de los conceptos físicos, debido a que cuando un concepto se presenta únicamente en términos matemáticos, su comprensión puede verse limitada a la memorización de definiciones o ecuaciones, sin que se logre establecer una conexión con su relevancia dentro del mundo real como se menciona en Caballero Freyte et al. (2014). En cambio cuando se muestra como ese mismo concepto se utiliza en contextos aplicados, su significado se vuelve más accesible, más concreto y sobre todo, más significativo. En el caso del positrón, su aplicación en la espectroscopía permite visualizar de manera tangible su interacción con la materia, evidenciando que no se trata de una entidad abstracta aislada, sino de un elemento que participa activamente en procesos de medición y análisis.

Adicionalmente, esta vinculación entre teoría y aplicación favorece una comprensión más integrada del conocimiento, en la que las distintas dimensiones (teórica, experimental y aplicada) no se perciben como campos independientes, sino como dimensiones complementarias de un mismo concepto. El estudiante deja de ver la física como un conjunto de fórmulas desconectadas y comienza a entenderla como una herramienta para interpretar y actuar sobre el mundo.

La aplicabilidad del conocimiento actúa como un puente entre la abstracción teórica y la comprensión significativa, ver como un concepto opera en la práctica permite no solo entenderlo mejor, sino también reconocer su importancia dentro del sistema de conocimiento científico. Además introduce un componente motivacional relevante, ya que muestra que lo aprendido tiene un propósito y una utilidad concreta, por lo que el uso del positrón como sonda microscópica no solo enriquece su significado dentro de la física, sino que también facilita su apropiación conceptual en contextos de aprendizaje, al evidenciar su relevancia más allá del ámbito estrictamente teórico.

En resumen el uso del positrón como herramienta experimental en la espectroscopía por aniquilación de positrones no solo amplía las posibilidades de estudio de la materia, sino que redefine el significado del concepto de antipartícula al situarlo en un contexto de aplicación, lo que permite reconocer que el conocimiento físico adquiere su plena relevancia cuando se vincula con su capacidad de intervenir en el mundo, mostrando que la física no es únicamente una construcción teórica, sino una herramienta para comprender y transformar la realidad. En este sentido, la aplicabilidad no solo enriquece el conocimiento, sino que se convierte en una condición fundamental para su comprensión profunda y significativa.

3.4 Aplicabilidad del conocimiento y formación de docentes en física.

El análisis desarrollado a lo largo de este capítulo permite identificar que el concepto de antipartícula, lejos de ser una noción fija y acabada, se configura como una construcción dinámica en la que su significado se transforma en función de los contextos en los que es abordado. En particular, el caso del positrón evidencia un tránsito conceptual que va desde su formulación como entidad teórica, pasando por su consolidación como fenómeno experimental, hasta su utilización como herramienta aplicada en la espectroscopía por aniquilación de positrones, lo cual no solo ilustra la evolución de un concepto dentro de la física, sino que hace notorio que el conocimiento científico adquiere significado en la medida en que se vincula con prácticas concretas.

Uno de los elementos centrales que surge de este análisis es el papel de la aplicabilidad del conocimiento como base estructuradora en la comprensión conceptual, porque el hecho de que el positrón pueda ser utilizado como una sonda microscópica para estudiar la estructura interna de los materiales, evidencia que su relevancia no se limita a su existencia como objeto físico, sino que se amplía hacia su capacidad de ser integrado y utilizado en prácticas que permiten generar conocimiento sobre otros sistemas.

Esta transformación resulta particularmente significativa cuando se traslada al ámbito de la enseñanza de la física, ya que tradicionalmente los procesos educativos han tendido a privilegiar la dimensión teórica del conocimiento y si bien este enfoque es fundamental para la formación

disciplinar, puede resultar insuficiente si no se acompaña de una reflexión sobre la aplicabilidad de los conceptos. Bajo este orden de ideas, el presente trabajo adquiere una relevancia particular en el ámbito de la formación de docentes en física, ante la necesidad de replantear los modelos de capacitación para responder a las nuevas demandas de la enseñanza de las ciencias (Sanmartí, 2002). Más allá de ofrecer una revisión conceptual sobre las antipartículas, lo que se propone es un medio de acercamiento que permita a los docentes en formación comprender este tipo de conceptos desde una perspectiva más amplia, en la que se integren sus dimensiones teórica, experimental y de aplicación. Lo que busca favorecer una inmersión en aspectos relevantes de la física moderna, que no solo contribuya a su formación disciplinar, sino que también tenga un impacto en su futura práctica docente.

Este propósito de poder impactar en la práctica docente de los futuros maestros, nace de entender que el docente ocupa un lugar clave, ya que actúa como mediador entre el conocimiento científico y el estudiante, y su manera de comprender los conceptos influye directamente en la forma en que estos serán presentados a sus alumnos, por lo que si su formación se restringe a un tratamiento exclusivamente teórico de la física, es probable que reproduzca este mismo enfoque en el aula, perpetuando la idea de que la física es una disciplina abstracta y desconectada de la realidad (Sanmartí, 2002).

Por el contrario, cuando el docente en formación tiene la oportunidad de aproximarse a los conceptos desde su aplicabilidad; como el caso que se presenta en este trabajo para el positrón en la PAS, se generan condiciones más favorables para una enseñanza significativa. Comprender que el positrón no es solamente una solución matemática o una entidad observable, sino una herramienta que permite analizar problemas reales, ayuda a ampliar su perspectiva sobre el conocimiento físico y le proporciona elementos que pueden ser incorporados en su práctica pedagógica, así la aplicabilidad del conocimiento se convierte no solo en un recurso epistemológico, sino también en una herramienta didáctica.

Esta perspectiva resulta especialmente relevante en el contexto educativo colombiano, donde la enseñanza de la física continúa centrada en gran medida, en contenidos clásicos, lo cual discrepa con otros sistemas educativos en que la física moderna y contemporánea ha sido progresivamente incorporada en los currículos y de manera explícita, de acuerdo con Salgado Fino et al. (2021) en Colombia estos contenidos suelen ocupar un lugar volátil y en algunos casos inexistente, situación que no solo obstaculiza el acceso de los estudiantes a desarrollos fundamentales de la física, sino que también contribuye a una visión desactualizada de la disciplina.

La ausencia de estos contenidos en los currículos no implica que no puedan ser abordados, sino que plantea la necesidad de desarrollar estrategias que permitan su integración de manera accesible y significativa. Razón por la cual el enfoque propuesto en este trabajo ofrece una alternativa, al mostrar que es posible introducir conceptos de la física moderna a partir de su relación con aplicaciones concretas: como es el uso del positrón en la espectroscopía por aniquilación de positrones.

De igual manera, la incorporación de la aplicabilidad en la enseñanza contribuye a una comprensión más auténtica de la naturaleza de la ciencia, debido a que lejos de presentar los conceptos como entidades abstractas y acabadas, permite mostrar que el conocimiento científico

es el resultado de un proceso cambiante en el que las teorías, los experimentos y las aplicaciones se encuentran relacionados y esta perspectiva favorece una visión más crítica y reflexiva de la ciencia, que resulta fundamental en la formación de los estudiantes de cualquier nivel educativo.

Desde el punto de vista del aprendizaje, la articulación entre teoría y aplicación tiene implicaciones importantes. Cuando los conceptos se presentan únicamente en términos formales, su comprensión puede verse reducida, en cambio cuando se vincula con contextos reales, se facilita la construcción de significados más profundos, ya que permite que los estudiantes puedan establecer conexiones entre lo que aprenden y el mundo que los rodea. Además, esta conexión con la realidad introduce un componente motivacional, reconocer que los conceptos de la física tienen aplicaciones en ámbitos como la ingeniería, la industria o la tecnología contribuye a generar un mayor interés por la disciplina y favorece una actitud más activa hacia el aprendizaje (Romero Hoyos, 2011).

Es importante que el docente en formación y aquel que ya se encuentra en ejercicio comprenda esta conexión, ya que le permite diseñar experiencias de enseñanza que no solo transmitan conocimiento, sino que también despierten el interés en los estudiantes. Buitrago (2019) señala que la inclusión de contenidos de física moderna y contemporánea en la enseñanza adquiere una importancia particular en la formación, no se trata únicamente de actualizar los currículos, sino de ofrecer una visión más acorde con el desarrollo actual de la disciplina, en la que la física se presenta como un campo activo, que está en constante transformación y que tiene múltiples aplicaciones en distintos ámbitos. No obstante, para que esta incorporación se dé, es necesario que los docentes en formación cuenten con herramientas que les permitan abordar estos contenidos de manera comprensible y pedagógicamente significativa.

El enfoque desarrollado en este trabajo de grado responde a esta necesidad, propone una perspectiva integradora del concepto de antipartícula, donde se aborda su nacimiento en el campo de lo formal, la manera en que experimentalmente se convirtió en una entidad observable y como aspecto fundamental, como fue que el positrón se consolidó en una herramienta de estudio, que permite analizar y generar conocimiento sobre la estructura de la materia, mostrando que esta partícula, no solamente hace parte del modelo estándar de partículas que nos ayuda a comprender de qué manera está estructurado el universo, sino que tiene un uso en nuestra realidad, donde su significado se ve obligado a evolucionar, lo que lo hace no solo más accesible sino interesante.

Si bien en este trabajo no se propone una secuencia didáctica específica para la enseñanza del concepto de antipartícula, sí ofrece un marco conceptual del que se pueden rescatar elementos importantes que pueden ser abordados en el aula, para la enseñanza de este concepto.

En primer lugar está el hecho de reconocer que conceptos como este, que hace parte de la física moderna y contemporánea, no deben presentarse exclusivamente desde su formalismo matemático, ya que si bien es un aspecto fundamental para la disciplina, la enseñanza del mismo se ve enriquecida cuando se articula con los contextos donde tiene una aplicación. En este sentido el uso del positrón en la espectroscopía por aniquilación de positrones evidencia como un concepto altamente abstracto en la teoría puede adquirir significado a partir de su uso en problemas reales y brindar un acercamiento más comprensible de su naturaleza.

Desde una perspectiva didáctica, esto permite estructurar estrategias de enseñanza donde el concepto no se introduce simplemente como una definición aislada, sino como parte de un proceso que conecta distintas dimensiones de comprensión. Así, por ejemplo, el docente puede partir de una problemática concreta, introducir la herramienta que permite abordar dicha problemática y de manera posterior conectarla con su origen teórico, promoviendo un enfoque que favorece una comprensión integrada y significativa.

Para el docente esta perspectiva resulta valiosa porque amplía sus herramientas para abordar contenidos complejos y facilita la construcción que puede hacer de experiencias de aprendizaje más contextualizadas, que impacta de manera directa en la motivación de sus estudiantes, al hacer evidente la relevancia de los conceptos en su entorno. En consecuencia, el abordaje del concepto de antipartícula propuesto en este trabajo, no solo aporta en la comprensión epistemológica del mismo, sino que se convierte en una herramienta que puede ser usada por los docentes en formación para enriquecer su práctica pedagógica, contribuyendo a una enseñanza de la física más actualizada, significativa y conectada con el mundo real.

Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo de la investigación, las cuales se estructuran en relación con los objetivos planteados y que permiten evidenciar como el concepto de antipartícula, abordado desde la espectroscopía por aniquilación de positrones y su aplicación en la fatiga de materiales, supera su carácter teórico para adquirir significado en contextos experimentales, aplicados y formativos dentro de la enseñanza de la física.

La breve revisión histórica desarrollada permitió mostrar que el concepto de antipartícula no surgió como una construcción aislada, sino como una respuesta a la relación teórica entre la mecánica cuántica y la relatividad especial. Contexto en el cual, la ecuación de Dirac no solo resolvió un problema formal al integrar estos dos campos de estudio, sino que introdujo una predicción física verificable al interpretar las energías negativas, producto de la solución de su ecuación, es decir la existencia de la primera antipartícula: el positrón. La posterior confirmación experimental por parte de Carl Anderson, consolidó este concepto como una entidad real dentro del marco de la física de partículas. Este breve recorrido histórico muestra que el concepto de antipartícula se configura a partir de una dinámica entre teoría y experimento, sentando las bases para su posterior reinterpretación en contextos aplicados como la espectroscopía por aniquilación de positrones.

El abordaje de los fundamentos físicos de la espectroscopía por aniquilación de positrones (PAS) permitió establecer que esta técnica se sustenta en la interacción del positrón con la materia, particularmente en los procesos de termalización, difusión y aniquilación con los electrones del material. Estos procesos que se describen desde la física del estado sólido y la mecánica cuántica, determinan las magnitudes observables, tal como el tiempo de vida del positrón y el ensanchamiento Doppler, propiedades medidas en las técnicas PALS y DBS y las cuales están directamente relacionadas con la densidad electrónica y la presencia de posibles defectos estructurales presentes en el material que se está examinando. Así la PAS se consolida como una técnica altamente sensible y no destructiva para el estudio de la microestructura de los materiales, que permite detectar defectos a escala atómica.

El estudio de la fatiga de materiales mediante espectroscopía por aniquilación de positrones permitió establecer un abordaje complementario del concepto de antipartícula, donde el concepto de positrón no se queda solamente en sus etapas de entidad teórica y fenómeno experimental observable, sino que logra consolidarse como una herramienta de caracterización de materiales. De esta manera su capacidad para detectar defectos microscópicos asociados a procesos de fatiga, muestra la dimensión funcional del positrón, donde no solo se amplía su concepto a partir de su aplicabilidad en sistemas físicos reales, sino que desde una perspectiva didáctica, este enfoque permite que el concepto de antipartícula sea abordado más allá de su formalismo, articulando las dimensiones teórica, experimental y de aplicación a partir de problemáticas concretas. Por lo que se espera que favorezca una comprensión integrada y significativa, al mostrar su utilidad en contextos reales y su papel en la construcción de conocimiento, ofreciendo de esta manera a los docentes una base para diseñar experiencias de aprendizaje contextualizadas con los desarrollos actuales de la física.

El desarrollo de esta investigación permite afirmar que el concepto de antipartícula no es estático, sino que evoluciona en función de los contextos en los que se estudia. Desde su origen como solución teórica en la ecuación de Dirac, pasando por su validación experimental, hasta su consolidación como herramienta en la espectroscopía por aniquilación de positrones, el positrón ejemplifica como el conocimiento científico adquiere significado a través de su aplicabilidad. Por lo que el abordaje propuesto no solo contribuye a una comprensión integral del concepto, sino que también ofrece una perspectiva didáctica que permite articular la física moderna con contextos reales, quedando como sustento para que futuros licenciados se basen en el documento y puedan generar una implementación para el aula.

Referencias

- Aguilar Benítez, M. (2008). Antimateria, superconductividad, Big Bang, la Estación Espacial Internacional y los vuelos interplanetarios. *Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 102(1), 37–63. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=881988>
- Anderson, C. (1933). The Positive Electron. *Physical Review*, 43. <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRev.43.491>
- Bosnar, D., Frišić, I., Jerbić-Zorc, G., Makek, M., & Bosnar, S. (2009). Applications of Positron Annihilation Spectroscopy. *Department of Physics, Faculty of Science, University of Zagreb; Rudjer Bošković Institute*.
- Brandt, W., & Paulin, R. (1977). Positron implantation-profile effects in solids. *Physical Review B*, 15(5).
- Buitrago Gallego, A. M. (2019, September 4). ¿Es tiempo de enseñar física moderna en los colegios? El Mundo. <https://www.elmundo.com/noticia/-Es-tiempo-de-ensenar-fisica-moderna-en-los-colegios-/377511>
- Caballero Freyte, L. A., Ortega Carrascal, J., & Gutiérrez Galvis, Y. (2014). Estrategias pedagógicas para un aprendizaje significativo de la física. *Universidad de Manizales*, 11–29.
- Chang, H. (2004). *Inventing Temperature: Measurement And Scientific Progress*. Oxford University Press. <https://vdoc.pub/documents/inventing-temperature-measurement-and-scientific-progress-759cbeu8qc50>
- Charlton, M. ., & Humberston, J. W. . (2001). *Positron physics* (Primera). Cambridge University Press.
- Craig, E. (2018). *Positronium formation in Self-Standing Materials for Antimatter Experimentation*. Politecnico di Milano.
- Czarnecki, A. (1999). *Positronium properties*. <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9911455>
- Department for Education. (2015, May 6). *National curriculum in England: science programmes of study*. GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/publications/national-curriculum-in-england-science-programmes-of-study/national-curriculum-in-england-science-programmes-of-study>
- Duarte, J. (2024). *Análisis histórico del origen de la ecuación de Dirac, a partir de su relación con la estructura fina del hidrógeno* [Universidad Pedagógica Nacional]. <https://repositorio.upn.edu.co/server/api/core/bitstreams/0190e377-05d2-40da-b541-8a68b8ec763f/content>
- García Castañeda, M., & Ewert De-Geus, J. (2003). *Introducción a la Física Moderna* (Tercera Edición). Universidad Nacional de Colombia.
- Gato Rivera, B. (2020). La antimateria. *Revista Española de Física*, 34(3), 1–6.

- Hacking, I. (1983). *Representing an Intervening* (Sergio Martínez, Tran.). Cambridge University Press.
- Herranz, E. (2006). *Espectroscopía de aniquilación de positrones*. Universidad Complutense de Madrid.
- Herrera Corral, Gerardo. (2014). *El Higgs, el universo líquido y el Gran Colisionador de Hadrones* (primera). FCE - Fondo de Cultura Económica.
- Hofer-Szabó, G. (2025). *Operational equivalence and causal structure*. European Journal for Philosophy of Science 15 (2):1-30.
- Jaramillo Zapata, J. E., Arroyave Echavarría, J. E., & Higuera Giraldo, J. D. (2012). *Una aproximación al despertar de la enseñanza de la física en el nivel medio en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/22470>
- Kirchhoff, G., & Bunsen, R. (1860). Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. *Annalen Der Physik Und Chemie*, 110(6), 161–189. <http://www.ub.uni-heidelberg.de/archiv/15657>
- Kragh, H. (2007). *Generaciones cuánticas : una historia de la física en el siglo XX* (D. Duque Campayo, A. Granados Sanandrés, & M. Sangüesa Lazcano, Trans.). Akal.
- Kragh, H. (2015). La génesis de la teoría relativista de electrones de Dirac (M. Vásquez, Tran.). *Revista de Filosofía de La Universidad de Costa Rica*. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/filosofia/article/view/21341>
- Krug, L.-M., Cryssos, L., Bundesmann, J., Dittwald, A., Kourkafas, G., Denker, A., & Hugenschmidt, C. (2024). Proton Beam Based Production of Positron Emitters by Exploiting the $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ Reaction. *ArXiv Preprint ArXiv:2403.10200*.
- Kultusministerkonferenz. (2024). *Weiterentwickelte Bildungsstandards in den Naturwissenschaften für das Fach Physik (MSA)*. <https://www.iqb.hu-berlin.de/bista/WeiterentwicklungBiSta/Lernaufgaben/Lernaufgaben%20Phy->
- Maik Butterling. (2014). *Application of High-Energy Photons for Positron Annihilation Spectroscopy and Positronium Chemistry* [Doctoral thesis]. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Ministerio de Educación Nacional. (1998). Lineamientos curriculares para el área de ciencias naturales y educación ambiental. *Ministerio de Educación Nacional*.
- Ministry of Education Ontairo. (2008). *The Ontario Curriculum Grades 11 and 12*. www.edu.gov.on.ca.
- Muñoz Gil, L. P., & Rivera Guerrero, L. M. (2023). Reflexiones sobre la ciencia, la técnica y la tecnología en el pensamiento de Evandro Agazzi. *Prometeica*, (27), 147–157. <https://doi.org/10.34024/prometeica.2023.27.14871>

- Pérez Flores, M. (2017). *Estudio de la formación de defectos en materiales por la interacción con iones por medio de la técnica de espectroscopía de ensanchamiento Doppler de la radiación de aniquilación de positrones*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Planck, M. (1948). *Scientific autobiography and other papers*. Philosophical Library.
- Ramírez Tejerina, W. D. (2024). *Desarrollo y optimización de un sistema experimental para la Medición de la Vida Media del Positronio mediante PALS con Detectores LYSO-SiPM*. Universidad de Salamanca.
- Romero Hoyos, A. (2011). Las estrategias de aprendizaje y la física. *Vida Científica Boletín Científico de La Escuela Preparatoria*, 4(2).
<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n2/e3.html#nota0>
- Salamanca Quintana, J. E. (2024). *Una recontextualización histórica: Desde los orígenes de la mecánica cuántica hasta la predicción de las antipartículas* [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica Nacional].
<http://repositorio.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/20077/una%20recontextualizaci%c3%b3n%20hist%c3%b3rica.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Salgado Fino, R. J., Gavilanes Santander, A. E., & Muñoz Burbano, Z. E. (2021). Caracterización de la enseñanza de la física relativista, caso: Departamento de Nariño. *Revista Tecné, Episteme y Didaxis: TED. En Memoria Del IX Congreso Internacional Sobre Formación de Profesores de Ciencias*.
<https://revistas.upn.edu.co/index.php/TED/article/download/15509/10281/46351>
- Sánchez Sierra, D. A. (2024). *Generación de positrones en una tormenta eléctrica: una aproximación al proceso de desintegración beta (β^+)* [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica Nacional]. <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/19816>
- Sanmartí, N. (2002). Necesidades de formación del profesorado en función de las finalidades de la enseñanza de las ciencias. *Pensamiento Educativo: Revista de Investigación Educacional Latinoamericana*, ISSN-e 0717-1013, ISSN 0719-0409, Vol. 30, No. 1, 2002 (Ejemplar Dedicado a: Didáctica y Construcción Del Conocimiento...), Págs. 35-60, 30(1), 35–60.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9069822&info=resumen&idioma=ENG>
- Selim, F. A. (2025). Positron Annihilation Spectroscopy Applied to Materials Science and Engineering. *Solid State Phenomena*, 373, 99–114. <https://doi.org/10.4028/p-Z0mol1>
- Tomonaga, S. 'ichiro. (1997). *The story of spin* (O. Takeshi, Tran.). University of Chicago Press.
- Tsutsui, T. T., Silva, E. O., De Castro, A. S. M., & Andrade, F. M. (2025). The Dirac equation: historical context, comparisons with the Schrödinger and Klein-Gordon equations and elementary consequences. *Eur. J. Phys*, 46, 53001. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/adf9a5>
- Van Dyck, R. S., Schwinberg, P. B., & Dehmelt, H. G. (1987). New high-precision comparison of electron and positron g factors. *Physical Review Letters*, 59(1), 26–29.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.26>

Villegas Dianta, A. (2024). *Introducción al enfoque STEAM en educación*. AVD Aprendizaje Digital. <https://adrianvillegasd.com/introduccion-al-enfoque-steam-en-educacion/>