



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

UNA RECONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA

DESDE LOS ORÍGENES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA HASTA LA IDEA DE LAS
ANTIPARTÍCULAS DE PAUL DIRAC

Juan Estevan Salamanca Quintana

Línea de Profundización II

La Enseñanza de la Física y la Relación Física Matemática

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

2024

UNA RECONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA

DESDE LOS ORÍGENES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA HASTA LA IDEA DE LAS
ANTIPARTÍCULAS DE PAUL DIRAC

Juan Estevan Salamanca Quintana

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN FÍSICA

Asesor:

Fernando Isidro Espitia Castañeda

Línea de Profundización II

La Enseñanza de la Física y la Relación Física Matemática

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

"Es hora de transformar todo lo que has sido y eres. El momento ha llegado para enfrentar las batallas que se avecinan.... Tiempos desafiantes están por venir, y es crucial que te superes a ti mismo, que te conviertas en tu mejor versión. Este es el momento de influir en el mundo, de asegurarte de que tu voz sea escuchada. No te desilusiones, no te rindas. Esta es tu última oportunidad para destacar y hacer una diferencia. Aprovecha este momento para hacer que tu voz sea escuchada y tu presencia sea notada. No lo dejes pasar..."

Muse – Butterflies and Hurricanes

Agradecimientos

En esta sombría travesía intelectual, deseo plasmar mi más profundo reconocimiento a aquellos seres que, con su luminosidad, han disipado las densas nieblas que envolvían los oscuros pasadizos de mi existencia y han trazado la senda por la cual tránsito. Comienzo este elogio con el sagrado vínculo familiar: mi madre, Liliana, cuyo incansable esfuerzo ha sido una antorcha perpetua, siempre alumbrando mi sendero con su amor y sacrificio; mis abuelos, venerables faros que, con su sabiduría ancestral, han iluminado mi vida y cuyos recuerdos, como prismas de luz, han moldeado mi ser en una amalgama de experiencia y conocimiento. A mi padre, Edilberto, cuya presencia ha sido una columna esencial en el edificio de mi educación, sin cuyo empeño no estaría yo en este punto de mi travesía. Mi hermana, a pesar de los desencuentros propios de la infancia, ha sido el sostén inquebrantable en las turbulencias del camino.

A mis tías, maternas guardianas de mi crecimiento, les extiendo mi más sincero agradecimiento por su amor desinteresado y su constante guía en los caminos de la vida. A mi prima, hermana en espíritu, por su inquebrantable complicidad y afecto que han sido baluartes en cada estadio de mi devenir.

A mis queridos hijos gatunos, cuyas miradas enigmáticas y silencios elocuentes avivaron la llama de mi espíritu con su lealtad inquebrantable, siendo fieles compañeros que, con su misteriosa presencia, me permitieron proseguir en esta travesía por la existencia.

Agradezco a mi mentor Fernando, cuyas palabras sabias se erigieron como faros en medio de la tormenta de la incertidumbre, iluminando el vasto océano del saber con su guía infalible. Sus consejos resonaron como ecos de antiguos conjuros, revelando los secretos más ocultos del universo y desafiando los límites de mi entendimiento, como si fueran versos de un poema etéreo que danzan en la mente. A la profesora Sandra Ávila, cuya pasión por la enseñanza fueron el cimiento sobre el cual construí mi conocimiento. Su dedicación incansable y su capacidad para inspirar han dejado una marca indeleble en mi trayectoria académica.

A mis colegas de penumbra, Leonardo y Alexandra, les expreso mi más profundo agradecimiento por su compañía en este viaje de descubrimiento. Juntos hemos explorado los recónditos más oscuros de la mente, sumergiéndonos en el abismo del conocimiento y compartiendo el peso de los trabajos complicados como alquimistas modernos que buscan el elixir de la verdad. A cada uno de ellos les estoy agradecido por este tiempo compartido, un breve pero significativo parpadeo en la vastedad del cosmos.

En los recovecos de la noche y en la luminosidad del día, elevo mi gratitud hacia mi fiel compañera del alma, María (Mardy Bum), cuyo amor ha sido el refugio en las tormentas del estudio, una luz radiante que disipa las sombras del cansancio y la desesperación. Su ayuda incondicional guió la culminación de este trabajo. Desde lo más profundo de mi ser, te agradezco por ser mi luz en la oscuridad y mi compañera en este viaje efímero pero trascendental que llamamos vida.

Tabla de contenido

<i>Introducción</i>	1
<i>Descripción del problema</i>	3
<i>Objetivos</i>	5
<i>Objetivo general</i>	5
<i>Objetivos Específicos</i>	5
<i>Antecedentes</i>	6
<i>Capítulo 1. Explorando el Nuevo Horizonte del Conocimiento: Desde los Avances de Pauli hasta las Dos Grandes Interpretaciones</i>	7
1.1 <i>La Síntesis de la Dualidad y el Camino Hacia las Mecánicas Cuánticas</i>	19
1.2 <i>Trazando la Ruta Cuántica: Los Senderos Revelados por Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger</i>	21
1.2.1. <i>Werner Heisenberg</i>	21
1.2.2. <i>Erwin Schrödinger</i>	26
1.2.3 <i>Fundamentos Cuánticos: La Interpretación Probabilística de Max Born y la Teoría de Transformación de Paul Dirac con el Principio de Incertidumbre</i>	31
<i>Capítulo 2. Dirac en el Tejido Cuántico: Impacto y Avances en la Teoría Fundamental</i>	37
2.1 <i>Ecuación De Los Muchos Padres</i>	37
2.2. <i>Girando en la Incertidumbre: Desafíos del Espín en las Mecánicas Cuánticas</i>	39
2.3. <i>Siguiendo las Huellas de Dirac: Un Viaje Hacia la Ecuación Fundamental</i>	42
2.4. <i>La Sinfonía de Paul Dirac</i>	47
<i>Capítulo 3. Luz y Oscuridad en la Cuántica: Perspectivas Inspiradas por Dirac</i>	56
<i>Conclusiones</i>	87
<i>Bibliografía</i>	89
<i>Anexos</i>	98
1. <i>Correspondencia de Bohr- Dirac</i>	98

Introducción

La historia de la física cuántica es un fascinante viaje a través de las cumbres y profundidades del pensamiento humano, donde la realidad desafía constantemente nuestras intuiciones más arraigadas. En este trabajo, nos sumergimos en este apasionante trayecto, un sendero sinuoso que atraviesa los misterios del cosmos, donde las líneas que lo componen fueron inspiradas por el enfoque divulgativo pero riguroso de José Eldestein, un maestro cuya pluma es pincel y cuyas palabras son pigmentos que pintan los lienzos de la comprensión, especialmente en su obra "Antimateria, Magia y Poesía".

Por su parte, Sergi Cortiñas, en su artículo titulado "Un Recorrido por la Historia del Libro de Divulgación Científica", nos ilumina con una verdad esencial: "por divulgación de la ciencia hay que entender el proceso por el cual se hace llegar a un público no especializado y necesariamente amplio el saber producido por especialistas en una disciplina científica". Así, explorar el contexto histórico que envolvió a los diversos autores que contribuyeron a la concepción de la antipartícula proporciona una perspectiva divulgativa. Esta aproximación nos permite adentrarnos en el proceso de conceptualización sin la necesidad de recurrir a una matematización desprovista de contexto (Rovira, 2006).

Desde los primeros atisbos de la mecánica cuántica, con sus ondas y partículas danzantes, hasta las sorprendentes ideas sobre las antipartículas de Paul Dirac, exploramos cómo los grandes pensadores de la física, guiados por la curiosidad y la búsqueda incansable de la verdad, han transformado nuestra comprensión del universo.

Nos sumergimos en los desafíos titánicos y los triunfos luminosos de los científicos cuyas huellas son estelas brillantes en el firmamento del saber. Descubriendo que las epístolas¹ críticas que se enviaban dentro de la comunidad científica no solo actuaron como jueces, sino que también sirvieron como guías para orientar al científico hacia el sendero correcto. Asimismo, se explorará el lado humano de los grandes íconos de la física, quienes, a pesar de parecer divinidades del Olimpo, también padecieron la angustia y la incertidumbre en su anhelo de alcanzar el conocimiento supremo. En este viaje, el tejido de la humanidad se entrelaza con los hilos del saber, revelando una complejidad sublime que nos invita a contemplar la grandeza y la fragilidad de la mente humana en su búsqueda eterna de comprensión.

La presente investigación se estructura en tres etapas fundamentales. En primer lugar, se describe y se aborda la urgencia de una nueva vanguardia intelectual para enfrentar las problemáticas inherentes a la teoría cuántica. En este contexto, se realiza un análisis histórico exhaustivo que traza las principales contribuciones que catalizaron su desarrollo. En segunda instancia, se examina el impacto del surgimiento de la mecánica cuántica en las formulaciones teóricas elaboradas por Paul Dirac, particularmente en lo relativo a la génesis de la ecuación que lleva su nombre. Por último, se brinda un estudio de la interpretación de las

¹ Aunque las cartas encontradas en el trabajo han experimentado algunas modificaciones para alinearse mejor con el texto, el propósito de la carta permanece invariable.

soluciones de energía negativa propuestas por Dirac en su ecuación, profundizando en su significado físico y sus implicaciones teóricas subyacentes.

Finalmente, en este trabajo se llevó a cabo una recontextualización histórica con el propósito de profundizar en el desarrollo de la teoría tratada. Se abordaron los aportes individuales de los autores relevantes y su contribución al corpus teórico, así como las circunstancias históricas que rodearon la gestación de dicha teoría y las interrogantes fundamentales que abordó. En consonancia con este enfoque histórico, se recurrió a la consulta de textos originales que surgieron en el contexto de la mecánica cuántica, lo que permitió una comprensión más completa y fiel de los fundamentos y el contexto de la disciplina. Esta aproximación proporcionó una base sólida para el análisis crítico y la interpretación de los resultados obtenidos, enriqueciendo así el rigor académico y la profundidad conceptual del trabajo de investigación.

Descripción del problema

La brecha entre la física clásica y su contraparte cuántica es un abismo que desafía nuestra comprensión y asombra nuestra razón. Estas dos concepciones del universo parecen residir en realidades divergentes, como si fueran universos paralelos. La primera se arraiga en lo tangible, en lo palpable, en la acción misma. Se establece sobre los pilares de la causalidad, donde cada evento encuentra su origen en una cadena de sucesos predecibles. En su seno, el determinismo se alza como ley suprema, dictando el devenir del cosmos con una certeza casi implacable.

Por otro lado, la física cuántica nos adentra en un reino inexplorado para los sentidos, donde solo las abstracciones matemáticas se atreven a trazar sus contornos. Allí, lo observable se desvanece ante funciones de onda que danzan en la penumbra de la probabilidad. Conceptos familiares como posición y velocidad, que alguna vez se contaron con números, se disuelven en el mundo matemático, transformándose en matrices, en operadores, en entidades de una pureza abstracta inigualable. En vez de la certeza inquebrantable del determinismo, nos hallamos ante el abismo del azar absoluto, donde la incertidumbre es la única constante (Omnès, 2020).

En este cruce de caminos entre lo tangible y lo abstracto, entre la certeza y la incertidumbre, emergen cuestiones que desafían nuestra comprensión más profunda del universo y de nosotros mismos. ¿Qué significa realmente la realidad en un mundo donde la certeza se desvanece ante el azar? ¿Cómo podemos reconciliar la aparente dicotomía entre lo observable y lo abstracto, entre lo determinista y lo aleatorio?

Pero, estas preguntas no se limitan a un ámbito meramente disciplinar, sino que trascienden hacia un terreno pedagógico. Los maestros nos vemos desafiados, a cuestiones relacionadas con: ¿cómo podemos enseñar este segundo universo? Es de esta forma que nos enfrentamos a uno de los retos más significativos de la enseñanza: la brecha entre el aula y la vida misma, particularmente en el ámbito universitario. Tornar más armónicos estos desafíos implica no solo transmitir conocimientos teóricos, sino también cultivar habilidades prácticas y una comprensión integral del mundo que nos rodea.

El problema se presenta ante nosotros con una multiplicidad de soluciones, cada una más diversa y compleja que la anterior. Sin embargo, la solución histórica se alza magnífica, como un faro en la tormenta del conocimiento, forjada no por un individuo aislado, sino moldeada por el devenir de una época y los ilustres representantes del espíritu humano que en ella habitan (Galili, 2007).

Como bien expresó Heisenberg en sus conferencias sobre el desarrollo de la física, retomando las palabras de Max Planck: "En la historia de la ciencia, un nuevo concepto nunca surge en su forma completa y final como en el antiguo mito griego, pues Atenea surgió de la cabeza de Zeus". La narrativa de la física no es meramente una sucesión de descubrimientos y observaciones experimentales seguidas de su traducción matemática; es, en esencia, una epopeya de conceptos (Heisenberg, 1975). Es así como la historia brinda una alternativa complementaria que impregna de naturalidad el proceso educativo.

En este proceso educativo se ha identificado un fenómeno conocido como recapitulación, estableciendo una analogía entre el desarrollo individual del conocimiento (ontogénesis) y el progreso del conocimiento colectivo en el ámbito científico (filogenia). Este enfoque permite a los educadores anticipar y abordar los posibles malentendidos de los estudiantes al examinar los hitos históricos de las ciencias, revelando los fundamentos epistemológicos de la disciplina (Cárdenas, 2016). Sin embargo, al realizar una revisión del repositorio de la universidad, se encuentra escaso material relacionado con el abordaje histórico de la idea de antimateria y, por ende, de antipartículas.

En este entramado, la propuesta presentada por Ayala (2006) adquiere una notable relevancia. Al enriquecer el tejido pedagógico con la hebra de la historia y la evolución de los conceptos físicos, los maestros de ciencias trascienden los límites de la mera enseñanza de teorías y fórmulas. Se adentran en el contexto histórico en el que surgieron dichos conceptos y los desafíos que condujeron a su formulación. La historia de la ciencia, impregnada de luchas titánicas, denuncias incendiarias y ciclos perpetuos de renacimiento, han moldeado nuestro entendimiento del mundo (Ayala, 2006). A partir de errores que han conducido al descubrimiento de verdades y de evidencias que han sido desacreditadas con el tiempo, han surgido nuevas teorías y descubrimientos (De & Ciencias, 2007).

La comprensión de esta evolución histórica de la disciplina permite a los estudiantes adquirir una visión más completa y profunda sobre cómo las teorías científicas se aplican en la resolución de problemas tanto cotidianos como sociales (Ayala, 2017). En última instancia, este entendimiento fortalece su capacidad para contextualizar el conocimiento científico en el tejido de la experiencia humana y en los desafíos del mundo contemporáneo.

Simultáneamente, en el ámbito de la formación de profesores, se reconoce cada vez más la importancia de comprender la historia de la ciencia. En Colombia, García-Martínez (2009) ha investigado sobre este tema, resaltando su relevancia en la formación continua de los docentes en el país. Según sus hallazgos, la historia de la ciencia proporciona una base fundamental para el crecimiento profesional de los maestros. No se trata solo de conocer los eventos pasados en la disciplina, sino de reflexionar sobre cómo se origina y se transmite el conocimiento. Los profesores de ciencias que poseen un conocimiento sólido de la historia de su campo pueden desarrollar una comprensión más profunda y crítica de la ciencia en sí (Lucía & Morales, s.f.). Esto les permite contextualizar los avances científicos, entender mejor la evolución de las teorías y adoptar un enfoque más informado y reflexivo en su enseñanza.

En este tenor, el presente estudio se sumerge en uno de los conceptos más subyugantes de la física cuántica: la antimateria. La existencia de la antimateria fue vislumbrada por Dirac en 1931, surgiendo de las profundidades de las propiedades formales de la ecuación relativista del electrón que había dado forma en 1928, fundamentándose en argumentos mayormente teóricos. La predicción de la antimateria por parte de Dirac, y su posterior despliegue hacia la teoría cuántica de campos relativistas locales, constituyen un episodio histórico rico en matices y significados (Pashby, 2012).

Sin embargo, la aprehensión cabal de la antimateria y su función en la física contemporánea presenta desafíos. Aunque la teoría de Dirac representó un paso crucial, la comprensión plena de la naturaleza y el comportamiento de las antipartículas ha necesitado un constante diálogo entre la teoría y la experimentación. Además, la antimateria sigue siendo un campo de estudio activo y en evolución, con implicaciones profundas para nuestra percepción del universo en su nivel más elemental.

En seguimiento a lo expuesto anteriormente, resulta fundamental que los futuros docentes de la Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional, en particular los estudiantes inscritos en los cursos de Mecánica Cuántica I y II, presten especial atención a los conceptos de la física contemporánea. Dado a que, los licenciados en física como profesionales activos en la sociedad, deben mantenerse actualizados respecto a las teorías modernas, ya que esto enriquece su comprensión del universo y los fenómenos que lo caracterizan.

Uno de estos conceptos es el de antipartícula, el cual ha sido identificado como una temática que **no** ha recibido la debida atención en los contenidos programáticos de los cursos mencionados. Además, en dichos contenidos, se ha observado un escaso tratamiento de las cuestiones históricas que contextualizan y facilitan la comprensión de los fenómenos físicos y los conceptos que de ellos se desprenden.

Teniendo en cuenta la descripción del problema, y los factores que intervienen, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo realizar una aproximación al concepto de Antipartícula a través de una recontextualización histórica, desde los inicios de la Mecánica Cuántica hasta la idea establecida por Paul Dirac?

Objetivos

Objetivo general

Realizar una recontextualización histórica que permita identificar los principales hitos, teorías y descubrimientos que dieron forma a la idea de antipartícula propuesta por Paul Dirac, con el fin de acercar a los estudiantes de la licenciatura física a dicho concepto.

Objetivos Específicos

1. Describir, de manera sucinta, el progreso histórico y las contribuciones de los científicos más relevantes que impulsaron el avance de la teoría cuántica, incluyendo la formulación de las dos interpretaciones fundamentales de la mecánica cuántica.

2. Contextualizar como el surgimiento de la mecánica cuántica repercutió en las consideraciones hechas por Paul Dirac para la construcción de la ecuación que lleva su nombre.
3. Interpretar las soluciones de energía negativa propuestas por Paul Dirac en su ecuación, explorando su significado físico e implicaciones teóricas.

Antecedentes

Para la construcción del presente trabajo de grado, se realizó una búsqueda de antecedentes que soportaran la investigación, sin embargo, cabe resaltar que el material encontrado en diferentes repositorios, presentan gran escases relacionada con la temática central del documento, por consiguiente a continuación se relacionan los escritos que estuvieron más acordes con la presente investigación:

- *Los Estudios Histórico-Críticos En La Formación De Licenciados En Física Y Ciencias Naturales: El Caso De La Estructura De La Materia De Roger Boscovich*, John Alexander Acosta Poveda, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá , 2015: Este trabajo de grado aportó en la investigación, debido a que se enfoca en cinco ejes principales, los cuales se centran en la importancia de los estudios histórico-críticos en la enseñanza de las ciencias, la recontextualización de saberes en las ciencias y los criterios para realizar un estudio histórico-crítico, entre otros aspectos.
- *Caracterización De Los Procesos De Recontextualización De Saberes En Física*, Julio Andrés Bermúdez Ortiz, Oscar Robeiro Hernández Panchana, Yeferson Alexis Ruiz Marín, Universidad De Antioquia, Medellín, 2018: En este trabajo se muestra el proceso de recontextualización de saberes científicos enfocados en el área de física. El cual fue una guía para poder establecer una recontextualización adecuada.
- *The Dirac equation and its interpretations*, Mário Bacelar Valente, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España, 2020: En este artículo se presenta una reseña histórica de la formulación de la ecuación de onda relativista de un electrón, conocida como ecuación de Dirac, así como los desafíos de interpretación que surgieron desde sus inicios. Este trabajo contribuyó en la comprensión de como la ecuación de Dirac repercute en la idea de antipartícula.

Capítulo 1. Explorando el Nuevo Horizonte del Conocimiento: Desde los Avances de Pauli hasta las Dos Grandes Interpretaciones

El cierre de la "era pionera y heroica" de la revolución cuántica marcó un punto crucial en la trayectoria del conocimiento humano. Aquel verano memorable de 1928, en una conferencia en Alemania, Paul Dirac presentó su nueva teoría que, sin saberlo aún, abriría las puertas hacia una dimensión completamente desconocida de la física. Las palabras pronunciadas por Dirac, aunque dotadas de elegante matemática, predecían una energía negativa, una perspectiva que en aquel entonces desafiaba los cimientos mismos de la realidad física. La aparente paradoja que emergió de sus ecuaciones parecía desafiar toda lógica y sentido común, sembrando la confusión en el escenario científico.

En medio de esta consternación, Werner Heisenberg, otro pilar de la revolución cuántica, compartió con Wolfgang Pauli sus pensamientos sobre la situación. Con pesar en su voz, Heisenberg lamentó que el capítulo más triste de la física moderna podría ser la teoría propuesta por Dirac. Pauli, en un reflejo del mismo desaliento, llegó incluso a contemplar abandonar el campo que tanto había influido en su vida. Curiosamente, años atrás, en una ocasión de desánimo, Pauli había jugado con la idea de abandonar la física para emprender una carrera en el mundo del cine como comediante. Aunque en ese momento solo fue un pensamiento fugaz, esta vez la gravedad del asunto parecía impulsarlo hacia un retiro definitivo. Con un giro irónico del destino, Pauli abandonó sus investigaciones en torno a la mecánica cuántica y optó por dar rienda suelta a su creatividad literaria, inmortalizando sus pensamientos en las páginas de una novela utópica (Bolles, 2004).

Es con este telón de fondo que entramos a finales de la década de los 20, un período en el que nombres venerables en el mundo de la física se encontraban cuestionando la teoría de Dirac, una teoría que no solo desafiaba la lógica convencional, sino que también traía consigo el potencial de alterar profundamente la forma en que entendíamos la naturaleza y los fenómenos que la componen. No obstante, para apreciar por completo las motivaciones detrás del escrutinio llevado a cabo por las mentes brillantes de esa época, es imperativo retroceder en el tiempo y recontextualizar las décadas precedentes, iniciando con los avances que propiciaron el surgimiento de la teoría cuántica.

Estos años de efervescencia científica y especulación teórica sentaron las bases para lo que más tarde se conocería como la revolución cuántica, creando un contexto propicio para el florecimiento de conceptos aún más audaces, como el intrigante mundo de las antipartículas.

En el monumental año de 1905, conocido como el "annus mirabilis" de la física, el joven prodigio Albert Einstein (1879-1955), de tan solo 26 años, irrumpió en la escena científica con una serie de publicaciones que cambiarían el mundo para siempre. El 30 de junio de ese año, publicó su tercer artículo, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", en el cual presentó la teoría de la relatividad especial, inaugurando una nueva era en la comprensión del universo.

Ese mismo año marcó el amanecer de la teoría cuántica. Max Planck (1858-1947), enfrentando la "catástrofe ultravioleta", postuló que la energía se emite en cuantos discretos, transformando la física. Einstein expandió esta idea para explicar el efecto fotoeléctrico, integrando la teoría cuántica y la relatividad en un brillante tejido de conocimiento.

La primera década del siglo XX fue un campo de batalla teórico, con científicos como Hendrik Lorentz (1853-1928), Paul Ehrenfest (1880-1933) y Niels Bohr (1885-1962) empujando los límites del conocimiento. Inspirado por Ernest Rutherford (1871-1937), Bohr desarrolló un modelo atómico con electrones orbitando el núcleo como planetas alrededor del Sol, desafiando la física clásica al introducir órbitas cuantizadas permitidas.

Arnold Sommerfeld avanzó estas ideas, introduciendo órbitas elípticas y aplicando la relatividad de Einstein para explicar la estructura fina del espectro del hidrógeno. Sus teorías, validadas experimentalmente, cimentaron la teoría cuántica como una disciplina fundamental.

En su estado naciente, la teoría cuántica fue una sinfonía de descubrimientos, marcada por la estructura fina del espectro del hidrógeno, el efecto Zeeman y las innovaciones de Sommerfeld. Estos avances prepararon el terreno para la revolución de la mecánica cuántica en las décadas siguientes, con figuras como Bohr y Sommerfeld guiando a la ciencia hacia nuevas cimas de comprensión.

Pese a ello, se encontraron varias anomalías. Entre los años 1920 y 1924, un coro de físicos se alzó para abordar los diferentes enigmas con ardor. Finalmente, en 1924, cuando las incoherencias experimentales se sumaron como sombras a la escena y la inquietud se posó en el corazón de la pequeña comunidad de físicos atómicos, varios de ellos llegaron a la conclusión de que la teoría de Bohr-Sommerfeld estaba destinada a desvanecerse en el telón de la historia, dejando espacio para el nacimiento de nuevas melodías científicas que habrían de componerse en el futuro. Sin embargo, para comprender plenamente este desenlace, es necesario explorar en detalle el desarrollo que condujo a esta conclusión.

En el desarrollo de estas innovadoras sinfonías científicas, varios actores de relevancia incontestable desempeñaron un papel trascendental. Entre estos notables protagonistas, destacaron los líderes de tres instituciones de renombre mundial: Max Born (1882-1970), Niels Bohr (1885-1962) y Arnold Sommerfeld (1868-1951). A pesar de que Born incursionó en el campo de la teoría atómica relativamente tarde, en 1921, al unirse a la comunidad académica en Gotinga, la cual posteriormente se convertiría en el epicentro global de la teoría cuántica, su contribución fue de vital importancia². Por su parte, Bohr fundó su propio instituto en Copenhague en el mismo año, y finalmente, Sommerfeld estableció el suyo en Múnich. Fue en estos distinguidos centros de investigación donde estos ilustres pensadores requirieron de una nueva vanguardia

² Hasta tal punto llegó su distinguido aporte que en el año 1954 le fue otorgado el Premio Nobel en reconocimiento a sus significativas contribuciones a la teoría cuántica, siendo él también el artífice de la acuñación del término "mecánica cuántica" en el año 1924.

intelectual para explorar y cartografiar el territorio anómalo e inexplorado que Bohr y Sommerfeld habían delineado previamente.

Cabe destacar que Sommerfeld, además de su fecunda obra científica que perduraría en el tiempo, cultivaba la costumbre de brindar conferencias magistrales y, de manera distintiva, involucraba a sus discípulos desde el umbral de sus carreras en las investigaciones de vanguardia de la época (Carretero, 2014). En este contexto inicial, Sommerfeld facilitó el encuentro de Pauli en 1918 con los desafiantes enigmas planteados por los datos de espectroscopía en el marco de la teoría cuántica.

No es redundante señalar que Pauli, ya versado en la teoría de la relatividad, había profundizado sus conocimientos previos, lo que le permitió preparar el correspondiente capítulo dedicado a la relatividad einsteniana para su célebre *Encyclopadie der mathematischen Wissenschaft* (“Enciclopedia de las Ciencias Matemáticas”), publicada en 1921. De manera concomitante, el talento de Pauli comenzó a manifestarse a través de la publicación de sus investigaciones en el ámbito de la teoría cuántica durante esos mismos años (Pais, 2000).

En el mismo rincón del tiempo, específicamente en el año 1920, Arnold Sommerfeld abrió las puertas de su venerado instituto a un joven prodigio de la física, Werner Heisenberg. En ese preciso momento, Wolfgang Pauli se encontraba en su quinto semestre en la universidad de Múnich y ejercía el papel de segundo asistente de Sommerfeld. Desde el instante mismo de su llegada, Sommerfeld sometió a Heisenberg a una exhaustiva evaluación de conocimientos, y al mismo tiempo, se forjó el primer encuentro entre Heisenberg y Pauli. Fue entonces cuando Sommerfeld planteó a Heisenberg un desafío que, en aquellos tiempos, parecía insuperable: el misterio del efecto Zeeman anómalo³, problema sobre el que ya había discutido en repetidas ocasiones con Pauli.

En un acto de deslumbrante genialidad, Heisenberg, trazó un camino en diciembre de ese mismo año, replicando con fidelidad los enigmáticos datos del efecto Zeeman anómalo. Sin embargo, el entusiasmo inicial de Sommerfeld se moderó al percatarse de que Heisenberg, para describir dicho efecto, había empleado números cuánticos fraccionarios, en una época en la que solo se consideraban válidos los números enteros en el ámbito de la teoría cuántica.

Por otro confín del saber, en febrero de 1921, Alfred Landé (1888-1976) compartió sus investigaciones con Niels Bohr. Presentó estas como basadas en la observación empírica en lugar de en cimientos teóricos sólidos. Landé describió su trabajo de la siguiente manera:

³ En el año de 1896, el ilustre Pieter Zeeman realizó un descubrimiento que trascendió las fronteras del conocimiento de su época: al someter las líneas espectrales de un átomo a la influencia de un campo magnético, observó que dichas líneas se fragmentaban en distintas partes. No obstante, el hallazgo no se limitó a esta observación inicial. El fenómeno, conocido como el efecto Zeeman, se bifurca en dos manifestaciones notables: el efecto Zeeman normal y el efecto Zeeman anómalo. En el primero de estos efectos, las líneas espectrales correspondientes a una transición atómica se descomponen en tres componentes distintivas al exponerse a un campo magnético externo. En contraste, el efecto Zeeman anómalo revela una complejidad mayor, en la cual las líneas espectrales se fragmentan en más de tres componentes, desafiando y enriqueciendo nuestra comprensión del espectro atómico.

"En relación con las complejas manifestaciones del efecto Zeeman, he identificado algunas reglas empíricas (uso de números fraccionarios) que trascienden las recopilaciones previas de Sommerfeld en las páginas de Annalen der Physik, y que permiten efectuar predicciones sobre el espectro del Neón. Sin embargo, el significado subyacente de estas reglas me resulta completamente incomprensible" (Kragh, 2012).

En aquel tiempo, Landé no ofreció una interpretación definida de su teoría; solo más tarde se revelaría como el guardián de un misterio, el factor "g", el cual describía la orientación del impulso intrínseco de una partícula frente al abrazo de un campo magnético externo.

Tanto Werner Heisenberg como Alfred Landé demostraron una profunda habilidad en la manipulación de conceptos numéricos en el curso de sus investigaciones. A pesar de la inicial falta de un significado claro y de un modelo que respaldara los números cuánticos semienteros, estos números se revelaron como herramientas funcionales en sus manos, como los alquimistas modernos que tejían un arte capaz de aportar un destello de orden en el caos de las líneas observadas.

En este mismo contexto, Wolfgang Pauli, en una sinfonía científica armoniosa junto a Heisenberg y Landé, presentó contribuciones de indudable relevancia para la época, constituyendo una obra singular para su tesis doctoral. Su enfoque se centró en el estudio de la molécula diatómica ionizada de hidrógeno, la cual está compuesta por dos protones y un electrón. Pauli realizó meticulosos cálculos de los momentos magnéticos, una propiedad intrínseca de los átomos que tiene un impacto directo en su respuesta ante campos magnéticos externos, así como de los momentos cuadrupolares eléctricos⁴, los cuales están íntimamente relacionados con la distribución de carga en átomos o moléculas (Pauli, 1960).

El aspecto más notable de su tesis doctoral fue su audaz esfuerzo por superar las limitaciones de la teoría atómica de Bohr y Sommerfeld. A pesar de las incertidumbres predominantes en ese momento, Pauli se embarcó en la tarea de calcular y analizar diversas órbitas electrónicas con un enfoque riguroso, evaluando minuciosamente su estabilidad y derivando los valores de energía y dimensiones correspondientes al estado fundamental de dichas órbitas. Pauli estaba convencido de que solo él poseía la capacidad para llevar a cabo tal hazaña matemática (Carretero, 2014).

El enfoque analítico del ion H_2^+ no se restringió a una suposición arbitraria de una órbita electrónica específica. En cambio, se llevó a cabo una exploración minuciosa de todas las posibles trayectorias mecánicas concebibles. Con meticulosidad y precisión, el científico aplicó principios universales en su investigación. Entre estos principios, resaltaba un nuevo criterio de estabilidad: las órbitas electrónicas debían ser compatibles con los fundamentos de la mecánica celeste (Kragh, 2012).

⁴ Los "Cuadrupolos eléctricos" aluden a la distribución de carga eléctrica que crea un campo eléctrico más complejo que un dipolo eléctrico. Puesto que un dipolo eléctrico implica dos cargas opuestas separadas, un momento cuadrupolar eléctrico implica la presencia de dos pares de cargas opuestas con orientaciones específicas. Esto resulta en un campo eléctrico más complicado.

Pero en este teatro de la ciencia Karl F. Niessen (1895-1967), un físico independiente en los Países Bajos obtuvo resultados similares lo que refuerza la validez de los hallazgos de Pauli (Carretero, 2014). A pesar de la excelencia y relevancia retrospectiva de este trabajo, la discrepancia con los resultados experimentales no se consideró en ese momento como una señal de crisis en la teoría cuántica existente. Entre 1922 y 1924, el modelo Pauli-Niessen no atrajo mucha atención, y la discrepancia con los experimentos se interpretó como una debilidad en la teoría cuántica predominante de la época (Kragh, 2020).

En palabras de Heisenberg, *"Wolfgang se desafió a sí mismo con uno de los problemas más intrincados. Su deseo era explorar si la teoría de Bohr y las condiciones cuánticas de Bohr-Sommerfeld podían, en un acto de magia, converger hacia los resultados experimentales correctos en sistemas complejos..."* (Carretero, 2014).

Posteriormente, Pauli tomó la decisión de unirse al eminente profesor Max Born en calidad de asistente, lo que marcó un giro significativo en su trayectoria profesional. Juntos, se embarcaron en un ambicioso proyecto que buscaba explorar a fondo la aplicación de los principios de la mecánica celeste a la teoría cuántica del átomo. Esta colaboración conjunta, culminó en la creación de un extenso artículo centrado en los métodos de perturbación⁵ dentro del contexto de la teoría cuántica.

A pesar de los esfuerzos de Born y Pauli, su tentativa de abordar el átomo de helio no alcanzó los resultados deseados y no llegó a una conclusión exitosa. A pesar de este revés, la colaboración entre Pauli y Born marcó un punto de inflexión en la carrera de Pauli y sentó las bases para futuros avances notables en la teoría cuántica, los cuales se detallarán más adelante.

El punto culminante de la carrera de Wolfgang Pauli se manifestó cuando tuvo el privilegio de asistir a una serie de conferencias impartidas por el eminente Niels Bohr. En estas conferencias, realizadas en 1922, Bohr examinó detalladamente el estado de la teoría cuántica y los desafíos relacionados con la interpretación de la vasta cantidad de evidencia experimental acumulada hasta entonces. Además, compartió sus investigaciones teóricas sobre el Sistema Periódico de los Elementos, subrayando que el principal enigma radicaba en explicar por qué todos los electrones de un átomo no se encontraban confinados en la capa más interna, un desafío que cuestionaba los fundamentos de la mecánica clásica.

Pero, la mecánica clásica no podía ofrecer una explicación convincente para este fenómeno. Pauli posteriormente describió este encuentro como un punto de inflexión en su vida, afirmando que *"una nueva fase de mi vida comenzó cuando conocí a Bohr personalmente por primera vez"* (Pauli, 1946). En el transcurso de esta reunión en Gotinga, Bohr extendió una generosa invitación a Pauli para que se uniera a su instituto en Copenhague durante un año, con el propósito de colaborar en la preparación de trabajos para su publicación en alemán.

⁵ Los métodos de perturbación se utilizan en el ámbito de la física para aproximar soluciones en sistemas complejos

Pauli aceptó la invitación y en octubre de 1922 se trasladó a Copenhague. En ese momento, Bohr ya había concluido el primero de una serie de trabajos planeados sobre "la aplicación de la teoría cuántica a la estructura atómica" (Kragh 2012). En este artículo, Bohr abordó de manera magistral los fundamentos clásicos de la microfísica, enfatizando que *"toda descripción de procesos naturales debe basarse en ideas que hayan sido introducidas y definidas por la teoría clásica"* (Pais, 1991).

Durante su estancia en Copenhague, Wolfgang Pauli produjo tres publicaciones de índole diversa. En este trabajo se centra en su contribución a un tratado sobre el efecto Zeeman anómalo, un problema que representaba un desafío significativo para los físicos de la época y que se convirtió en una verdadera obsesión para Pauli en los años posteriores.

En ese periodo, se había observado que las divisiones anómalas en el espectro de cualquier átomo exhibían regularidades de una belleza y simplicidad inigualables cuando se sometían a un campo magnético externo. Sin embargo, esta elegancia permanecía envuelta en un velo de misterio, dado que las suposiciones generales sobre el electrón, ya bajo la óptica de la teoría clásica o de la teoría cuántica, conducían invariablemente a un modesto triplete.

En la búsqueda profunda de este enigma, Wolfgang Pauli navegaba en un océano de inaccesibilidad. Como se mencionó antes, tanto Landé como Heisenberg habían llegado a la conclusión de que solo introduciendo valores semienteros para los números cuánticos que describían las órbitas electrónicas y las líneas espectrales, se podían replicar las observaciones experimentales (Forman, 1970). Pero Pauli, el poeta de la física, no encontraba la armonía en esta sinfonía y desestimaba esta danza cuántica, que consideraba *"puramente formal"*, *"carente de novedad física"*, un vals *"feo"* y *"monstruoso"*. Llegando a decir a Bohr *"Me siento profundamente insultado por ellos"*. Y afirmando que: *"Heisenberg es muy poco filosófico"* (Heilbron, 1983).

Conforme a la perspectiva de Pauli, los valores semienteros generaron una dicotomía entre los eruditos, dividiendo a los académicos en dos enfoques discernibles. Por un lado, algunos investigadores abordaron cuestiones fundamentales utilizando números cuánticos semienteros como un primer intento, recurriendo a valores cuánticos enteros en un segundo intento en caso de discrepancia con los resultados experimentales. Por otro lado, otros optaron por la aproximación inversa, resolviendo problemas inicialmente con valores cuánticos enteros y, en caso de ser necesario, recurriendo a valores semienteros para la resolución adecuada de las evidencias experimentales. Este discernimiento en las estrategias adoptadas evidencia la complejidad inherente a la interpretación y aplicación de los valores semienteros en el ámbito de la física cuántica en este momento, así como la diversidad de enfoques que emergieron dentro de la comunidad académica al abordar esta cuestión.

En 1923, los conocedores del campo anhelaban de una vez por todas develar el auténtico misterio latente en los átomos, oculto en los intrincados patrones Zeeman de las líneas multiplete, los cuales conduciría al verdadero mecanismo subyacente en los átomos. Fue entonces que Niels Bohr y Wolfgang Pauli se unieron

en una colaboración teórica basada en números cuánticos enteros. Aunque esta sinfonía proporcionó material suficiente para una nota enviada a la "Zeitschrift für Physik", lamentablemente no concordaba con las evidencias experimentales.

Este desencuentro llevó a Pauli a un abismo de desconcierto en la cálida brisa de junio de 1923, cuando, como un amante despechado, escribía a Sommerfeld, expresando su insondable desasosiego: "*No lo conseguí, simplemente no pude alcanzar la sintonía. Hasta ahora, he estado completamente extraviado*" (Carretero, 2014).

En aquel momento de incompreensión, Pauli vagaba sin rumbo por las encantadoras calles de Copenhague, como un poeta errante. Un amigo se acercó, notando su tristeza, y le dijo: "*Pareces muy desdichado*". A lo que Pauli, respondió encolerizado: "*¿Cómo puede uno encontrar la felicidad cuando está inmerso en el enigma del efecto Zeeman anómalo?*" (Enz, 2013).

A pesar de los desafíos y las sombras que caracterizaban su trayectoria, Wolfgang Pauli, impulsado por la musa de la ciencia, inició la investigación del efecto Paschen-Back, logrando posteriormente un avance significativo en este campo. Pauli llevó a cabo la creación de tablas basadas en meticulosas mediciones realizadas por Back en relación con este fenómeno y, posteriormente, desarrolló una expresión analítica que describía de manera precisa los resultados obtenidos. Este esfuerzo, se reveló como un elemento esencial en la búsqueda del enigmático principio de exclusión (Pauli, 2013).

Durante su discurso inaugural como Privatdozent en la Universidad de Hamburgo, Pauli se sumergió en el sistema periódico de los elementos. A pesar de su dedicación incansable, al recibir el Premio Nobel en 1945, reconoció con humildad que aún no había alcanzado la nota más alta en su búsqueda, ya que, en ese momento, el rompecabezas de las capas electrónicas aún conservaba muchos de sus secretos ocultos. Aun así, Pauli tenía la certeza de que existía una conexión más profunda entre este enigma y la teoría de los multipletes (efecto Zeeman), esperando ser descubierta. Por lo tanto, determinó embarcarse en un viaje crítico, enfocándose en el sutil y complejo baile de los dobletes en los espectros de los elementos alcalinos (Pauli, 1947).

En ese instante, el modelo ampliamente aceptado para explicar el misterioso efecto Zeeman se tejía a partir de un acoplamiento predeterminado entre los momentos angulares de los electrones de valencia y un misterioso momento angular en el núcleo. Sin embargo, en la plasmación de su artículo sobre el efecto Zeeman, Pauli, experimentó una revelación. En un instante análogo al clímax poético, discernió la necesidad de rechazar la teoría vigente, tildada de cómica y errónea, y en su lugar, abrazar la hipótesis de una nueva propiedad teórico-cuántica del electrón, a la que llamó "*ambivalencia sin descripción clásica*" (Pauli, 2013). De esta manera, Pauli afrontó los dogmas de su tiempo, emulando a un visionario que desafía las convenciones líricas, marcando un hito significativo en la evolución del entendimiento científico del fenómeno en cuestión distanciándose de la convicción de Heisenberg de que el núcleo dictaba los patrones

del espectro Zeeman. En cambio, abrazó la filosofía de que los secretos atómicos yacían en los brazos esquivos de los electrones de valencia, quienes, como poetas de la materia, susurraban verdades no reveladas.

En su empeño por sustentar esta perspectiva, Pauli, al estilo de un cantautor en busca de inspiración, se embarcó en una compañía de cálculos minuciosos. Los resultados de estas investigaciones detalladas revelaron que, bajo la premisa del núcleo magnético, la división Zeeman estaba intrínsecamente vinculada a un factor de corrección asociado con la energía total del átomo. No obstante, Landé, al corroborar estos cálculos incluso en el talio ($Z = 81$), constató que dicho efecto no existía. Esto condujo a Pauli a la conclusión de que los momentos angulares atómicos eran atribuibles exclusivamente a los electrones de valencia. En consecuencia, parecía existir una 'rotación oculta', la cual, no se originaba en el núcleo, sino en el propio electrón de valencia.

En su afán por validar sus descubrimientos, Pauli mantuvo una comunicación rica y fructífera con Landé, buscando orientación en su travesía intelectual. De manera recurrente, Pauli se dirigía a Landé en busca de guía, solicitándole verificar los recientes hallazgos del Instituto de Física de Tubinga, donde las mediciones precisas de los efectos Zeeman se entrelazaban con el misterio de la ciencia (Heilbron, 1983).

Fue en este escenario donde, gracias a las meticulosas mediciones, Pauli descifró las palabras de la naturaleza que habían permanecido ocultas en el corazón de la materia. Al señalar la carencia de momento magnético en la capa K (primer nivel de energía) y desacreditar la teoría del núcleo como un verso sin fundamentos sólidos, Pauli reveló que el supuesto momento del núcleo no solo poseía valores semienteros, sino que también carecía de una existencia substancial.

Dos semanas después, en una carta fechada en noviembre de 1924, Pauli compartió con Landé su visión revolucionaria sobre los átomos de elementos alcalinos. En su perspectiva, un intrigante "electrón óptico" era el artífice de la estructura compleja y del peculiar efecto Zeeman detectado en los espectros. A diferencia de las creencias arraigadas en relación con los gases nobles y otros elementos (Heilbron, 1983). De esta manera, Pauli llegó a la conclusión de que la causa de la complejidad no residía en el acoplamiento, sino más bien en el electrón de valencia, que hasta entonces había logrado eludir cualquier sospecha. Pauli descubrió que el electrón de valencia tenía un papel central en este enigma al afirmar: *"De manera enigmática y no mecanicista, el electrón de valencia de un átomo alcalino puede moverse en dos estados con la misma característica (k), pero con momentos angulares diferentes"* (Heilbron, 1983).

Esta revelación desbarató todos los cálculos de energía de los estados estacionarios y ridiculizó las concepciones previas de órbitas (Enz, 2010). La exposición de Pauli marcó un momento de claridad, similar al desenlace poético, donde las palabras de la naturaleza emergieron de las sombras en el corazón de la materia.

Poco tiempo después, Pauli se dirigió a Niels Bohr, enviándole una carta que incluía su manuscrito sobre el principio de exclusión. En esta comunicación, Pauli rechazó categóricamente la suposición de que un núcleo atómico pudiera tener un momento magnético con el doble del valor clásico. Este argumentó que

esta suposición era completamente incomprensible y ajena a la teoría cuántica, chocando con su intuición física. En cambio, atribuyó este comportamiento enigmático al electrón de valencia, en lugar del núcleo, y declaró: *"La misma ambigüedad, que no puede ser descrita de manera clásica y que da lugar a la estructura doblete, es también la causa del efecto Zeeman anómalo"* (Enz, 2010). En ese momento, Pauli reconocía cierta incertidumbre sobre la validez de su nuevo sistema de números cuánticos, manifestando a Bohr:

"Creo que lo que estoy haciendo aquí no es una tontería mayor que la interpretación existente hasta ahora de la estructura compleja. Mi 'tontería' está relacionada con la que ha sido aceptada hasta este momento" (Straumann, 2009).

En el contexto histórico que aquí se presenta, es posible observar el discernimiento de Wolfgang Pauli, quien posteriormente expresaría:

"Cuando era joven, creía que era el mejor físico formal de mi tiempo. Pensaba que era un revolucionario. Cuando los grandes problemas llegasen, yo los resolvería y escribiría acerca de ellos. Los grandes problemas llegaron y pasaron de largo. Fueron otros los que los resolvieron y escribieron sobre ellos. Yo aún era un clásico y no un revolucionario como pensaba" (Carretero, 2014).

En medio de esta encrucijada histórica, irrumpe la figura de Edmund Stoner (1899-1968), un candidato doctoral de Cambridge, caracterizado por su timidez y dudas personales, lo cual le hacía parecer insignificante ante la imponente figura de su mentor, Ernest Rutherford. Con el tiempo, Stoner abandonaría la física experimental para adentrarse en el terreno de la física teórica. Durante su trayectoria, Stoner demostró estar atento a las contribuciones de destacados colegas, como Sommerfeld, cuyo libro "Atombau" figuraba entre sus referencias fundamentales. También seguía de cerca los trabajos de Alfred Landé y había estado explorando la obra de Niels Bohr.

En mayo de 1924, el físico Stoner quien se encontraba en Cambridge, se sumergió en la lectura de trabajos de Bohr, Sommerfeld y Louis Víctor de Broglie (1892-1987), experimentó una revelación teórica trascendental en relación con la distribución de electrones en átomos. Paralelamente, en una colaboración con De Broglie y Alexandre Henri Georges Dauvillier (1892-1979), amalgamando la rica confluencia de la teoría de rayos X y la estructura atómica, presentaron una propuesta de distribución electrónica en los niveles K(1), L(2), M(3), N(4), O(5), P(6), Q(7), que resonaba con los bordes de absorción⁶ observados en sus experimentos (Heilbron, 1983). Este enfoque innovador también abordó la deducción del comportamiento de los electrones desde argumentos termodinámicos, utilizando un anillo de electrones asociado con el nivel energético.

⁶ Los "bordes de absorción" constituyen un fenómeno intrínsecamente vinculado a las transiciones electrónicas en los materiales. La absorción ocurre cuando la longitud de onda de la radiación incidente coincide con la energía necesaria para llevar a los electrones a estados de energía superiores. En este marco, De Broglie y Dauvillier encontraron transiciones electrónicas (Cambios de energía) particulares en el material objeto de estudio que coincidían con energías o niveles de energía específicos.

En evidente contraste con las concepciones francesas, Stoner rechazó la simetría arbitraria y postuló un sistema más simple y simétrico. Su teoría, a diferencia de otras corrientes de pensamiento contemporáneas, no requería ajustes ad hoc⁷ para determinar las poblaciones de los grupos de electrones, limitándose a asignar únicamente un electrón en cada uno de las orbitas.

Stoner avanzó significativamente en su descripción al asignar dos electrones a cada órbita, superando así la concepción anterior de asignar solo uno. En sus propias palabras: "*En la clasificación adoptada, emerge la característica notable de que el número de electrones en cada nivel completo es igual al doble de la suma de los números cuánticos internos asignados...*" (Heilbron, 1983). Esta afirmación se convirtió en una regla fundamental.

Según Stoner, en una órbita de nivel n , debería haber $2n^2$ electrones. Para ilustrar este principio, consideremos ejemplos concretos: para $n=1$, existe una única órbita con una capacidad de hasta dos electrones; para $n=2$, se cuentan cuatro órbitas con una capacidad de hasta ocho electrones; y para $n=3$, se disponen nueve órbitas con una capacidad de hasta dieciocho electrones.

En ausencia de Rutherford, quien se encontraba fuera de Cambridge, Stoner dejó consignada una nota detallada sobre su descubrimiento. Posteriormente, compartió sus ideas con Ralph Fowler (1889-1944), ya mentor de Paul Dirac, quien lo alentó a redactar un artículo al respecto y enviarlo a la prestigiosa revista *Philosophical Magazine*. Siguiendo el consejo de Fowler, Stoner presentó su artículo en julio, logrando su publicación en el número de octubre de 1924.

Lastimosamente a veces, la mente alberga secretos que se resisten a ser expresados, y así le sucedió a Stoner con el principio de exclusión. Aunque lo conocía, las palabras adecuadas se le escapaban, sumiéndolo en una melancolía silenciosa. Su carga era guardar en la punta de la lengua un conocimiento inalcanzable, mientras el mundo seguía su curso, ajeno a su lucha.

Sin embargo, Niels Bohr, con la sensibilidad de un poeta, elogió la clasificación de Stoner por su "*belleza y simplicidad formal*" (Kragh, 2012), como un verso perfecto en una carta dirigida a Dirk Coster (1889-1950) quien se destacaba en el campo de la espectroscopia de rayos X y el sistema periódico de los elementos. A pesar de esta apreciación, la belleza y simplicidad de la propuesta no lograron conquistar el corazón de Bohr.

El artículo de Stoner actuó como un eco en el viento, resonando en el alma de Pauli, inspirándolo a desarrollar sus ideas sobre una teoría del sistema periódico. En una carta dirigida a Niels Bohr, Pauli confesó:

⁷ Este término se refiere a una solución diseñada o creada específicamente para abordar una pregunta o problema particular.

"Estoy realmente emocionado por el artículo de Stoner. Cuanto más lo leo, más se apodera de mí. Fue una idea de una inteligencia sublime unir el número de electrones en los subgrupos cerrados con el número de términos Zeeman en los espectros de los alcalinos" (Heilbron, 1983).

En ese mismo contexto, se gestó el estudio del efecto Zeeman, que, como un poema en dos estrofas, se plasmó en dos artículos significativos. El primero, completado en diciembre de 1924, contenía la crítica a los intentos previos de interpretar el efecto. El segundo, apenas seis semanas después, sostenía lo que Paul Dirac bautizaría como el "principio de exclusión de Pauli" en 1926.

Este primer artículo que ya se ha mencionado, trata de una crítica de los intentos de otros de interpretar el efecto. En este segundo artículo, presentado para su publicación el 16 de enero de 1925 y titulado *Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren* ("Sobre la conexión entre la completitud de los grupos de electrones en un átomo y la estructura compleja de los espectros") que posteriormente se publicó en la revista "Zeitschrift für Physik" el 21 de marzo de 1925. Es el punto donde se erige Pauli como un arquitecto de la comprensión cuántica, guiado por la luz emanada del artículo de Stoner, una luz que no solo ilumina, sino que también acaricia con matices románticos el fascinante tejido conceptual que se despliega ante nosotros.

En este tapiz de ideas, Pauli llega a la conclusión de que el electrón, en su singularidad, debe poseer una 'bipolaridad' no clásica caracterizada por un número cuántico semientero. La disposición estratificada de las capas electrónicas en los átomos, junto con la organización sistemática que revela la tabla periódica de los elementos, evidencian la limitación de cada órbita para contener únicamente dos electrones, dando lugar a una simetría poética en el espectro de interacciones cuánticas de la materia. En sus propias palabras, escribe:

"Nunca puede haber dos o más electrones equivalentes en el átomo... Si hay un electrón presente en el átomo, para el cual estos números cuánticos tienen valores definidos, entonces este estado está 'ocupado'." (Pais, 2000)

Es precisamente Wolfgang Pauli quien, al confrontar el enigma del efecto Zeeman anómalo, emerge como el artífice de una solución innovadora. Pauli propone postulados que se relacionan directamente con la nueva propiedad cuántica del electrón, extendiendo su aplicabilidad a todos los electrones atómicos, no limitándose únicamente a los de valencia. En este contexto, introduce un nuevo número cuántico con una peculiaridad única: solo puede adoptar valores semienteros, específicamente $\pm \frac{1}{2}$.

Así, emerge el principio de exclusión de Pauli como una obra maestra conceptual que yace como un faro solitario en el vasto océano de la física cuántica. La danza de las partículas subatómicas se envuelve en un velo de misterio, donde la luz de este principio ilumina las sombras profundas de la realidad cuántica.

En la penumbra de su estudio, Pauli no pudo proporcionar ninguna explicación formal para la regla y no tuvo más remedio que argumentar que parecía *'ofrecerse automáticamente de manera natural'*. Cuando

en diciembre de 1924 envió una copia del manuscrito de un artículo describiendo sus resultados a Bohr y Heisenberg en Copenhague, recibió una respuesta exuberante, aunque mordaz, de Heisenberg:

"Soy el que más se regocija por ello, no solo porque llevas el engaño a una altura inimaginable (introduciendo electrones individuales con 4 grados de libertad) y, de esta manera, has roto todos los récords existentes hasta ahora, de los cuales me has insultado. Más en general, triunfo porque tú también has regresado con la cabeza baja a la tierra de los pedantes formalistas..." (Baggott & Baggott, 2011)

Aunque el origen del principio de exclusión de Pauli en la aún evasiva mecánica cuántica del átomo permanecía difuso, este principio arrojaba luz sobre una característica crucial de los átomos con múltiples electrones: su mera existencia. Los modelos atómicos anteriores no ofrecían una explicación sobre por qué los electrones no colapsaban hacia la órbita de menor energía (la capa electrónica más cercana al núcleo).

Aunque Pauli no estaba seguro de su significado físico, él mismo comprendió estas dificultades de manera profunda y no consideró su perspectiva como definitiva. En medio de la incertidumbre cuántica, su principio de exclusión se erigió como un faro en la penumbra que se ha enunciado.

Tan alto era su criterio que muchos años después, en su conferencia del premio Nobel, señaló:

"Ya en mi trabajo original mencioné la circunstancia de que era incapaz de dar una razón lógica para el principio de exclusión o para deducirlo a partir de consideraciones más generales. Siempre tuve el sentimiento, y aún lo tengo hoy, de que esto era una clara deficiencia." (Pauli, 1947)

Sin embargo, el principio de exclusión permite que los átomos complejos de varios electrones existan en el patrón descrito por la tabla periódica. Este fenómeno engendra la existencia de una maravillosa diversidad de elementos y desencadena una sinfonía de posibles combinaciones químicas, dando origen a toda sustancia material, ya sea dotada de vida o inanimada. Este logro, aunque fantástico, insta a reflexionar: ¿por qué únicamente dos electrones por órbita?

En este punto, se torna necesario abordar la cuestión desde una perspectiva física y es aquí donde la mente de Pauli, aunque próxima a la idea del espín, se ve limitada en cierta medida. Sorprendentemente, no logra dar ese paso crucial, siendo él mismo víctima de sus agudos poderes críticos. En su intento, se abstiene de introducir un concepto completamente desvinculado del mundo clásico, revelando una cautela que le impide adentrarse en terrenos desconocidos.

Tanto era su criterio que le informo a Landé por tarjeta postal que tenía la intención de visitar Tubinga el 9 de enero. Esto porque solo estaba especialmente interesado en discutir el principio de exclusión y tratar de encontrar algún dato espectroscópico entre la extensa colección de Landé que pudiera contradecirlo. Para sumergirse en el origen y desarrollo del concepto de espín, el lector puede dirigirse al anexo 2.

1.1 La Síntesis de la Dualidad y el Camino Hacia las Mecánicas Cuánticas

Continuando con el problema de la radiación, esta se manifestaba entonces de manera aguda, ya que se acumulaban pruebas a favor de la hipótesis cuántica de la luz de Einstein, mencionada a principio del presente escrito. El propio Einstein había empleado su hipótesis para esbozar pronósticos sobre el efecto fotoeléctrico, predicciones que hallaron confirmación en los experimentos llevados a cabo por el erudito físico estadounidense Robert Millikan (1868-1953) en 1915.

La categoría de las 'partículas' de luz ascendió aún más, especialmente tras la revelación de Arthur Compton (1892-1962) en 1923, apuntando hacia la noción de que los pulsos de rayos X monocromáticos se comportan como partículas, ostentando momentos y energía acordes a la antiquísima hipótesis cuántica para la luz. Simultáneamente, Peter Debye (1884-1966) en Zúrich evidenció de forma independiente que los cuantos de luz podían 'rebotar' en electrones, dando lugar a un cambio consecuente (y predecible) en sus frecuencias. Estos experimentos sugerían que la luz está compuesta por partículas con momentos dirigidos, semejantes a diminutos proyectiles.

El trascendental hallazgo de Compton suscitó profunda inquietud en Copenhague, donde Bohr experimentaba una incómoda discordancia con los cuantos de luz einstenianos. La preferencia residía en concebir la cuantización como una emanación de la estructura atómica, manteniendo la elegante descripción clásica de las ondas de Maxwell para la radiación electromagnética. Así, Bohr y Kramers optaron por desarrollar una perspectiva insinuada por John Slater en una teoría de radiación no fotónica (Kragh, 2012).

La teoría Bohr-Kramers-Slater de 1924 se erigía sobre la noción de "osciladores virtuales" y la suposición de que la energía se conservaba únicamente de manera estadística en los caminos entre átomos y radiación. Bohr y sus colaboradores, abandonando no solo la rigidez de la conservación de la energía sino también argumentando que los procesos radiactivos escapaban a la descripción causal en tiempo y espacio (Ron, 2001).

Tal era la envergadura de esta disidencia que Joseph John Thomson, en un tono jocoso, comparó las teorías ondulatoria y corpuscular como *"la batalla entre un tigre y un tiburón. Cada uno de estos animales es el más poderoso en su ámbito, pero inútil en el ámbito del otro"* (Navarro & Vives, 2013). En esta lucha titánica de conceptos, surgió la necesidad de un aliado, alguien que pudiera vislumbrar más allá de las aparentes contradicciones y fusionar los opuestos en una nueva síntesis.

Louis de Broglie, un estudiante de historia y derecho en la Universidad de París, emergió como este aliado, imbuido de una curiosidad inquebrantable y una mente ávida por desentrañar los misterios del universo cuántico. Inspirado por los debates de las Conferencias de Solvay⁸, preparados para su publicación

⁸ Los Congresos Solvay, gestados por Ernest Solvay (1838-1922), florecieron como un jardín de pensamiento científico en Bélgica. Científicos europeos, como peregrinos de la sabiduría, se congregaban para sumergirse en las aguas profundas de la física. Las reuniones,

por su hermano Maurice, se embarcó en la odisea de comprender las partículas cuánticas, enigmáticas creaciones de Planck y Einstein (Rosa, 2021).

Para de Broglie, la conexión entre onda y partícula resultaba tan natural que se convirtió en el pilar fundamental de su primer escrito sobre la radiación del cuerpo negro. En esta obra, abordó la radiación como una entidad compuesta por cuantos de luz, o 'átomos de luz', dotados de una masa infinitesimal. En escritos posteriores, demostró cómo los efectos de interferencia de la radiación surgían de la consideración de una 'aglomeración de átomos de luz' (Mehra, 1987).

Un año después, de Broglie despliega su genialidad al publicar tres notas consecutivas sobre el esquivo problema cuántico: en la primera, establece una conexión entre partículas masivas relativistas y un fenómeno ondulatorio; en la segunda, demuestra que este fenómeno puede interpretarse como una onda de fase que guía la propagación de la partícula; y, finalmente, en la tercera, aplicando el principio de óptica de Fermat a la onda de fase asociada con un electrón, explica la génesis de la cuantización de las órbitas electrónicas, como postulada en la teoría de la estructura atómica de Bohr-Sommerfeld (Mehra, 1987).

Las reflexiones meticulosamente concebidas de Louis de Broglie, elaboradas con minuciosidad, alcanzan su apogeo en la presentación solemne de su tesis doctoral ante el comité académico de la Universidad de París el 25 de noviembre de 1924. Titulada "Recherches Sur La Théorie Des Quanta" ("Investigaciones sobre la teoría de los cuantos"), esta obra maestra fue admirada incluso por el propio Einstein, quien quedó cautivado por su profundidad conceptual. Posteriormente, la inmortalidad aguardaría a esta obra en las páginas de las *Annales of Physique* a principios de 1925, consolidando así su posición como un monumento intelectual que arroja luz sobre los rincones oscuros de la mecánica cuántica.

El paradigma cuántico, marcado por la llegada del trabajo pionero de Bohr-Kramers-Slater, experimentó una trascendental bifurcación con la contribución más reciente de De Broglie. A pesar de la inicial prevalencia de la teoría de Bohr-Kramers-Slater, su fundamentación defectuosa quedó expuesta en la primavera de 1925, cuando Walther Bothe (1891-1957) y Hans Geiger (1882-1945) demostraron su incompatibilidad con los experimentos contemporáneos. Aunque efímera, la controversia que envolvía a esta teoría no se desvaneció fácilmente, dejando una huella perdurable que modelaría de manera significativa el pensamiento subsiguiente de Heisenberg (Kragh, 2012).

En el rastro dejado por Louis de Broglie, su propuesta postula la validación experimental como piedra angular, explorando la posibilidad de que cuerpos materiales experimentaran el fenómeno de la difracción. Este esfuerzo culmina en 1927, cuando Clinton Davisson (1881-1958) y Lester Germer (1896-1971) llevaron a cabo un experimento crucial al dirigir haces de electrones hacia un cristal de níquel. La observación meticulosa de los patrones de difracción revela una sorprendente consistencia con el comportamiento ondulatorio de los electrones, proporcionando una validación empírica concluyente para la teoría de De

encantadas por eruditos diversos, se convertían en festines intelectuales donde las fronteras del conocimiento se desdibujaban. A lo largo de los años, estos congresos han sido faros de luz en el vasto océano del conocimiento científico, guiando hacia nuevas comprensiones.

Broglie (Ron, 2001). No obstante, a pesar de su validación unos meses atrás en 1926, el hilo iniciado por Louis de Broglie sigue su curso, guiando a un profesor de la Universidad de Zúrich, Erwin Schrödinger (1887-1961), hacia la publicación de un trabajo revolucionario.

1.2 Trazando la Ruta Cuántica: Los Senderos Revelados por Werner Heisenberg y Erwin

Schrödinger

1.2.1. Werner Heisenberg

Heisenberg, a la temprana edad de 23 años, emprendió un trascendental viaje hacia Copenhague en el ocaso del año 1924, buscando refugio en el seno del conocimiento cuántico. Su mente, ya fecunda en pensamientos y reflexiones, había dado a luz una docena de tratados sobre la teoría cuántica, en su mayoría sobre los difíciles problemas del helio y el efecto Zeeman anómalo.

Al arribar a Dinamarca, Heisenberg se encontró con el ya publicado artículo de Bohr-Kramers-Slater, aunque la refutación experimental aún no había sido presentada. En retrospectiva, Heisenberg recuerda este periodo, señalando: *"Recuerdo que antes incluso de que se llevara a cabo el experimento de Bothe-Geiger, Bohr intuía el desenlace final, comprendiendo que esta conservación estadística no constituía el meollo del asunto"* (Cassidy, 1993) de igual forma señaló, las notas de Kramers sobre la dispersión: *"Sentí la atracción de la idea de emplear osciladores armónicos en conexión con el modelo atómico"* (Pais, 1991).

Fue así como en colaboración con Kramers, Heisenberg exploró la noción de considerar al átomo como un conjunto de osciladores virtuales, caracterizados por las frecuencias presentes en las transiciones atómicas. Posteriormente, Heisenberg reflexiona sobre esta colaboración, expresando:

"Sentíamos que habíamos dado un paso crucial para comprender el espíritu de la nueva mecánica. Si bien todos éramos conscientes de la existencia de una mecánica subyacente desconocida, percibíamos que nos encaminábamos en la dirección correcta. Casi sin percatarnos, estábamos introduciendo la mecánica de matrices en este punto del desarrollo" (Pais, 1991).

En el contexto específico del trabajo conjunto con Kramers sobre dispersión, este último se dedicó a la formulación de una teoría cuántica completa de la dispersión. A pesar de contar con ayuda de la mecánica orbital para abordar las complejidades de las órbitas electrónicas, Kramers logró desarrollar la mayor parte de su teoría y realizar cálculos sustanciales antes de regresar a Copenhague a fines de septiembre de 1924. Fue en ese preciso instante cuando reanudó su colaboración con Heisenberg, uniendo sus fuerzas una vez más.

Mientras Kramers se aventuraba en el enigma desde una perspectiva física, Heisenberg aplicaba su distintivo enfoque matemático, abordando el problema con un completo arsenal matemático. Heisenberg, al evocar aquellos días, expresaría:

"...Tras discusiones con Born, nos llevó a la conclusión de que yo debería intentar adivinar las amplitudes e intensidades correctas del hidrógeno a partir de las correspondientes fórmulas de la teoría clásica... Pero al profundizar, resultó que el problema era demasiado intrincado, al menos para mis habilidades matemáticas, por lo cual busqué sistemas mecánicos más sencillos en los que dicho método prometiera mayor éxito. Al mismo tiempo, tenía la sensación de que debía renunciar a cualquier descripción de las órbitas electrónicas, incluso debía reprimir conscientemente tal idea..." (Ron, 2001)

Esto no solo resultó en una contribución significativa a la teoría de dispersión, sino que también ha marcado un avance significativo desde la física de modelos atómicos mecánicos hacia el análisis del comportamiento de las cantidades observables. Este cambio paradigmático sentó las bases del progreso de Heisenberg hacia la mecánica cuántica. En sus propias palabras, Heisenberg subrayó la necesidad de desprenderse de los modelos intuitivos, proclamando este principio como rector en todo trabajo futuro.

La concepción original y nueva de la mecánica cuántica, concebida por Heisenberg, se materializó mediante un proceso evolutivo compuesto por tres fases fundamentales. En una primera instancia, Heisenberg llevó a cabo una reinterpretación innovadora de las ecuaciones de la cinemática clásica en el espacio-tiempo. Esta reinterpretación se tradujo en la formulación de expresiones no clásicas dentro del marco de la mecánica cuántica, valiéndose de las propiedades observables de la radiación emanada por osciladores atómicos virtuales, específicamente los saltos o transiciones entre órbitas que se manifestaban en forma de líneas espectrales.

El modelo concebido por Heisenberg en esta etapa se caracterizaba por su alta abstracción, consistiendo en una serie infinita, conocida como la serie de Fourier. Cada término de esta serie representaba un oscilador armónico identificado por una amplitud y una frecuencia específicas. Posteriormente, elevó el criterio positivista de observabilidad⁹ de todas las magnitudes a un postulado fundamental de la teoría, estableciendo así una base sólida para su construcción teórica.

En la fase final de su obra pionera, llevó a cabo la eliminación de las órbitas mecánicas, sustituyéndolas por una tabla infinita de símbolos o términos en la serie de Fourier. Esta tabla se organizó en columnas y filas, donde cada término representaba una transición cuántica desde un estado inicial hacia un estado final (Cassidy, 1993)

⁹ Esto establece que únicamente son admisibles las afirmaciones referentes a entidades o fenómenos que resulten directa o indirectamente observables o medibles. De acuerdo con esta perspectiva, solo aquello que pueda ser contemplado de algún modo, ya sea por medio de la experiencia sensorial directa o mediante instrumentación de medición, puede ser legitimado como objeto de estudio dentro del ámbito científico.

Sumergido en la profundidad de su visión, pensaba en cómo calcular las intensidades de las líneas espectrales que vemos en un espectro. Lo que hizo fue tomar cada salto de energía individual entre los estados de un átomo y asignarle un número llamado amplitud. Luego, multiplicó todas estas amplitudes para encontrar la intensidad total de una línea espectral.

Básicamente, estaba buscando cómo las "fuerzas" de cada salto de energía se sumaban para formar la intensidad final de una línea de luz. Esto le ayudó a entender mejor cómo se comportaban los átomos en el mundo cuántico y cómo generaban las líneas de luz que observamos en experimentos.

Sin embargo, a pesar de la aparente armonía en este planteamiento, Heisenberg se encontraba en la encrucijada de la certeza y la duda. Aún no estaba seguro de haber alcanzado la solución anhelada por la comunidad científica, o si, en cambio, se enfrentaba a una elocuente farsa. La razón residía en la necesidad de asumir una peculiar propiedad vinculada al producto de dos magnitudes: una propiedad ciertamente insólita, ya que el producto no cumplía con la propiedad conmutativa. En otras palabras, el resultado final se hallaba sujeto al orden de los operadores¹⁰ en el producto (Faus, 2017).

En este panorama, Heisenberg contemplaba inicialmente este resultado como una posible falla o error intrínseco a la teoría, algo que requeriría ser resuelto, y que, en su singularidad, le resultaba ajeno. A pesar de la extrañeza que permeaba esta propiedad peculiar, no vaciló en plasmar sus reflexiones, cálculos y hallazgos en un manuscrito. Con valentía, lo compartió con Born, solicitándole que, si encontraba consonancia con su contenido, procediera a su publicación.

Born, intrigado por la innovadora regla de multiplicación de Heisenberg, pronto identificó su conexión con conceptos matemáticos familiares, específicamente matrices no conmutativas. Convencido de la validez de la propuesta de Heisenberg, remitió el artículo a la revista *Zeitschrift für Physik*, que lo publicó en septiembre de 1925 (Faus, 2017).

En la atmósfera académica de Gotinga, Born pronto discernió la trascendencia de la teoría de Heisenberg, explorándola y expandiéndola junto a Pascual Jordán (1902-1980) en un extenso artículo. Este dúo erudito reinterpretó cualquier variable o función de la mecánica clásica como una matriz cuántica correspondiente, encontrando el análogo matricial de prácticamente todas las ecuaciones anteriores (Cassidy, 1993). Validaron la relación fundamental de conmutación entre momento y posición:

$$pq - qp = (\hbar/2\pi i)\mathbf{1}$$

Siendo $\mathbf{1}$ la matriz unidad (Kragh, 2020). Con la certeza de que el cálculo matricial estaba diseñado para la mecánica cuántica, los avances se sucedieron con celeridad.

¹⁰ Este concepto, se entiende como las herramientas que representan observables físicos, como la posición, el momento lineal, la energía, el espín, entre otros.

En septiembre, Born y Jordan enviaron su obra a Heisenberg, quien ya se encontraba en Copenhague. Trabajando a distancia, colaboraron para completar la formulación rigurosa de la nueva mecánica. El resultado fue el artículo titulado "Sobre la mecánica cuántica II," enviado en noviembre de 1925, firmado por Born, Heisenberg y Jordán. Este documento, conocido como el "Dreimannerarbeit" (trabajo de los tres hombres), se erigió como el tratado fundamental de la naciente teoría cuántica, presentando los postulados iniciales que establecían la existencia de estados estacionarios de energía en los átomos y los saltos cuánticos acompañados de emisión o absorción de luz. Los autores se referían a su teoría como "la verdadera teoría del discontinuo" (Faus, 2017).

La formulación matemática expedita de las ideas físicas propuestas por Heisenberg en su artículo sobre la reformulación cuántico-teórica de las relaciones cinemáticas y mecánicas asombró a la mayoría de los físicos que habían dedicado años al estudio de la teoría atómica. Aun así, la difusión más amplia de la mecánica de matrices se vio estrecha por la dificultad de manejar sus métodos matemáticos para calcular las propiedades de los sistemas atómicos. Un avance significativo se materializó gracias a Wolfgang Pauli, quien calculó los términos de energía del átomo de hidrógeno a finales de octubre de 1925. (Mehra & Rechenberg, 1982).

En el ámbito académico, el destino unió a mentes brillantes y visionarias. Tal fue el caso cuando una copia del artículo de Heisenberg encontró su camino hacia las manos del eminente físico inglés, Ralph Fowler. En un acto desprovisto de titubeos, entregó la mencionada copia a su joven discípulo, Paul Dirac, un alquimista del pensamiento con apenas 23 años de edad.

Dirac no quedó impresionado por el artículo; sin embargo, una semana después de recibirlo, comprendió su significado. El supuesto eslabón más endeble de la nueva teoría, según el propio Heisenberg, emergió como la joya filosófica en la mente de Dirac. Este, versado en los arcanos de la mecánica clásica con el formalismo de Hamilton, reconocía la existencia de variables y magnitudes que desafiaban la obediencia a la ley conmutativa. El joven sabio, versado en los arcanos de la mecánica clásica con el formalismo de Hamilton, reconocía la existencia de variables y magnitudes que desafiaban la obediencia a la ley conmutativa.

En el proceso de una indagación intensiva, Dirac, como un poeta del álgebra, discernió analogías entre la regla de multiplicación heisenbergiana y las elucubraciones matemáticas del teórico francés Siméon Poisson, tejidas en el tapiz de 1809. En un breve pero profundo ejercicio matemático, Dirac demostró la conservación de la energía dentro de su teoría cuántica, estableciendo que cuando un electrón transita entre niveles de energía, emite un fotón cuya energía es la diferencia entre estos niveles. Este enfoque matemático prefiguraba la capacidad de la teoría cuántica para reproducir los logros de Niels Bohr sin recurrir a la hipótesis de órbitas electrónicas, las cuales concebían a los electrones como si estuvieran destinados a una órbita fatal hacia el núcleo atómico (Baggott & Baggott, 2011). Para Dirac, el uso de metáforas visuales resultaba ineficaz, enfatizando que las partículas cuánticas solo podían ser caracterizadas mediante el preciso y peculiar lenguaje de la matemática simbólica

A comienzos de noviembre, Dirac, fusionando la precisión de su mente científica con el arte de la expresión, bautizó su obra con un título de gran envergadura: 'Las Ecuaciones Fundamentales de la Mecánica Cuántica'. Envió una versión manuscrita de su artículo, describiendo estos resultados, a Werner Heisenberg. En un irónico giro del destino, descubrió que sus revelaciones ya habían sido desentrañadas por Max Born y Pascual Jordán. La desilusión se insinuó en su alma, pero como un visionario cuántico, Dirac persistió.

En un giro cruel del destino, mientras se encontraba en este estado de ánimo, Dirac recibió una carta de dos páginas de Heisenberg el 23 de noviembre, en la que marcaba el inicio de una amistad que perduraría por cincuenta años. Con gracia, Heisenberg elogió el "hermoso trabajo" de Dirac y afirmó que *"no puede haber duda de que todos sus resultados son correctos, en la medida en que se cree en la nueva teoría"*(Farmelo, 2009).

Así, muchos de los resultados descubiertos de forma independiente por Born, Heisenberg y Jordan fueron previamente obtenidos por Dirac, cuya versión algebraica de la mecánica cuántica sería reconocida como el álgebra de números q .

Frente a estas dos perspectivas, la comunidad de físicos se mostraba dubitativa, sumida en un devenir de criptismo conceptual. Tanto fue así, que optaron por adentrarse en el reino de la mecánica matricial de Heisenberg, enfrentándose a obstáculos insospechados. Estos desafíos eran tan pronunciados que muchos se veían desconcertados, revelando un desconocimiento generalizado respecto a la naturaleza misma de una matriz. Un ejemplo palpable de este desconcierto lo encontramos en las palabras de Einstein dirigidas a su amigo Michele Angelo Besso (1873-1955):

"El resultado teórico reciente más interesante es la teoría de los estados cuánticos de Heisenberg, Born y Jordan. Una verdadera tabla mágica de multiplicar, donde matrices infinitas reemplazan las coordenadas cartesianas. Es ingeniosa en extremo y, gracias a su enorme complejidad, está lo suficientemente protegida contra refutaciones" (Carretero, 2013).

El esfuerzo intelectual de Dirac también se veía envuelto en una nebulosa de complejidad para sus contemporáneos. John Slater, expresaba su perplejidad de la siguiente manera:

"Existen dos tipos de físicos teóricos. El primero consiste en gente como yo, prosaica y pragmática, que siempre intenta escribir o hablar de la forma más comprensible posible. El segundo está formado por 'magos' que mueven sus manos como si estuvieran sacando un conejo de la chistera (como Dirac), y que no se encuentran satisfechos a no ser que lleguen a revestir sus escritos y explicaciones con un marcado carácter místico" (Carretero, 2013).

La evolución de la mecánica cuántica no se limitó únicamente a las formulaciones de Heisenberg y Dirac, sino que también contempló la contribución significativa de Erwin Schrödinger.

1.2.2. Erwin Schrödinger

En los albores de su carrera, Schrödinger no se sumergía en las aguas turbulentas de la teoría cuántica o la recién acuñada "mecánica cuántica"; su enfoque se extendía con esmero hacia áreas como la termodinámica, la teoría del color y la relatividad general. Como devoto seguidor de la obra de Einstein, el destino entrelazó sus caminos en octubre de 1925 a través de un pie de nota en uno de los recientes escritos de Einstein. En ella, se mencionaba una "contribución muy notable" de De Broglie.

La mente curiosa de Schrödinger se vio intrigada, llevándolo a adquirir la tesis de De Broglie sobre las ondas asociadas al movimiento de partículas libres. Este acto seminal, registrado en el presente escrito, revela el punto de inflexión en el viaje intelectual de Schrödinger. Inspirado por las ondas de De Broglie, se propuso extender su lenguaje a partículas ligadas.

Los coloquios quincenales en la Universidad de Zúrich proporcionaron el escenario propicio para la transformación de las ideas de Schrödinger. Fue en este contexto donde Peter Debye (1884-1966) instó al físico con estas palabras perspicaces: *"Ahora, usted no está trabajando en nada de importancia. No entiendo todo este asunto de De Broglie. Léalo. A ver si puede dar una charla interesante"* (Laserna, 2012). El magistral seminario tuvo lugar el 23 de noviembre.

La disertación de Schrödinger sobre la tesis de De Broglie resultó ser extraordinariamente memorable, como recordó más de medio siglo después uno de los espectadores, Felix Bloch (1905-1983):

"...En uno de los siguientes coloquios, Schrödinger expuso una explicación elegante y diáfana de cómo De Broglie asociaba una onda a una partícula y cómo se podían derivar las reglas de cuantización de Niels Bohr y Sommerfeld exigiendo que un número entero de ondas se ajustara a lo largo de una órbita estacionaria. Al concluir, Debye comentó de manera casual que esa forma de expresarse era bastante infantil. Como discípulo de Sommerfeld, había internalizado que, para abordar adecuadamente las ondas, se requería una ecuación de onda. Aunque sonaba trivial y no parecía causar un gran impacto, Schrödinger evidentemente había reflexionado más profundamente sobre la idea." (Bloch, 1976)

Fue durante las vacaciones navideñas de 1925, en un fin de semana clandestino en las montañas suizas (Arosa) con una amante, que Schrödinger descubrió una ecuación que describía el comportamiento de los cuantos de materia en términos de sus ondas asociadas, aplicando luego la teoría en una serie de deslumbrantes artículos (Farmelo, 2009).

La primera formulación de Schrödinger de una ecuación de onda para partículas se fundamentó completamente en la teoría relativista presentada en la tesis de De Broglie. La prueba crucial para cualquier teoría residiría en su aplicación al problema del átomo de hidrógeno. A nivel no relativista, al menos debía ser capaz de reproducir los resultados de la antigua teoría cuántica de Bohr para los niveles de energía y los números cuánticos (Schrödinger, 1987).

Cuando Schrödinger logró finalmente resolver la ecuación relativista, descubrió que, aunque proporcionaba una fórmula para la estructura fina, no replicaba el espectro correcto. Fue entonces cuando la primera comunicación sobre 'Cuantización como un Problema de Autovalores', fue recibida por los Annalen el martes 27 de enero de 1926. Menos de tres semanas habían transcurrido desde el retorno de Erwin de Arosa. En ese breve lapso, mantuvo consultas frecuentes con Hermann Weyl (1885-1955), quien desempeñó un papel crucial al asistir en la resolución de la ecuación diferencial para los armónicos esféricos, las cuales son funciones matemáticas que dependen de dos ángulos θ y φ (Moore, 1994).

El análisis emprendido por Schrödinger partió de la conocida ecuación de onda clásica, que establece las relaciones espaciales y temporales de cualquier forma de onda descrita mediante una función representada comúnmente por el símbolo ψ (psi). Inicialmente, optó por trabajar con la variante independiente del tiempo de la ecuación de onda, apropiada para la descripción de ondas estacionarias en contraposición a las viajeras. En esta ecuación clásica, sustituyó las conexiones entre la masa de la partícula, específicamente el momento y la frecuencia de la onda deducidas de las ideas de Broglie.

Schrödinger intuyó que, para extraer soluciones sublimes de la ecuación de onda, era necesario formular suposiciones acerca de la configuración de la función de onda del electrón, es decir, la representación matemática del electrón en forma de onda. Debía restringir el conjunto de funciones aceptables a aquellas de un solo valor, finitas y continuas, evitando los abismos del infinito y las discontinuidades abruptas. En este proceso, Schrödinger buscaba explorar territorios matemáticos y físicos hasta entonces inexplorados, desafiando los límites convencionales para desentrañar la esencia cuántica del electrón.

Expresó la función de onda del electrón en un sistema de coordenadas más apropiado para el problema de movimiento en un campo electrostático esférico, es decir, coordenadas polares esféricas. Este sistema consta de la distancia, r , entre el electrón y el núcleo, un ángulo θ (theta) y un segundo ángulo φ (phi). Descubrió que podía descomponer la función de onda en dos funciones separadas: una "radial" dependiente solo de r , y una angular o "armónico esférico" que depende solo de los ángulos θ y φ . El resultado fue una serie de ecuaciones diferenciales sumamente complejas, cuya resolución fue facilitada por la colaboración de Weyl (Moore, 1994).

Restringiendo las propiedades de la función de onda tridimensional del electrón alrededor del núcleo central, emergió de manera natural y directa un patrón muy específico de posibles soluciones de la ecuación de onda. Schrödinger reveló que las soluciones para la función radial dependen de dos números enteros, equivalentes al número cuántico principal n y al número cuántico l (número cuántico azimutal). Las soluciones para la función angular dependen de l y m (número cuántico magnético). Las energías de las diversas soluciones, a su vez, dependen del cuadrado del número cuántico principal, reproduciendo así la fórmula de Balmer¹¹.

¹¹ Esta fórmula, se utiliza para calcular las longitudes de onda de las líneas espectrales específicas que aparecen en el espectro de emisión del átomo de hidrógeno

En la derivación de Schrödinger, el único *ansatz*¹² se refería a las restricciones que había impuesto sobre la forma de la función de onda del electrón. Todo lo demás: los números cuánticos, sus interrelaciones, los niveles de energía del hidrógeno, la fórmula de Balmer, era el resultado de una lógica matemática irresistible.

Y fue así como Schrödinger envió un artículo describiendo sus resultados. En esta obra, el erudito austro-irlandés delineó con agudeza conceptual que los números cuánticos, originalmente introducidos de manera *ad hoc* por Bohr y Sommerfeld, emergen con una naturalidad que equipara a los enteros que especifican el número de nodos en una cuerda vibrante.

Este artículo, trascendental en la historia de la física del siglo XX, ha sido unánimemente reconocido como una de las cimas intelectuales de la disciplina. En palabras posteriores de Dirac, se señala con énfasis que esta obra abarca gran parte de la física y, en principio, la totalidad de la química. Para el año 1960, se habían registrado más de 100,000 trabajos fundamentados en la aplicación de la ecuación de Schrödinger, evidenciando la extraordinaria influencia de esta herramienta matemática.

Desde su génesis, la ecuación fue acogida como un instrumento matemático de extraordinario poder para abordar problemáticas inherentes a la estructura de la materia. Sin embargo, desde los primeros estadios, la comunidad científica se inquietó, reflexionó y debatió sobre la interpretación que esta teoría podría ofrecer acerca de la naturaleza intrínseca del universo físico. J. Robert Oppenheimer, con perspicacia, expresó años después la dualidad inherente a la teoría cuántica:

"Presentada ante nosotros está esta teoría de notable belleza, acaso una de las más perfectas, precisas y encantadoras que la mente humana ha desentrañado. Aunque contamos con pruebas externas, y más sustancialmente con pruebas internas, de su alcance finito, nos advierte de manera intrínseca: 'No me consideres de manera absoluta, poseo una conexión con un ámbito del cual no hablas cuando te refieres a mí'" (Moore, 1994).

Cuatro semanas después de la publicación del primer artículo, el 23 de febrero, los *Annalen* recibieron el segundo capítulo de la serie titulada 'Cuantización como un Problema de Autovalores'. Este compendio se adentra con meticulosidad en la analógica hamiltoniana que entreteje la mecánica y la óptica, desentrañando una nueva formulación de la ecuación de onda. Asimismo, ofrece un minucioso análisis de las relaciones entre las corrientes de la mecánica geométrica y ondulatoria, culminando en aplicaciones de la ecuación de onda al oscilador armónico y a la molécula diatómica.

En este segundo artículo, Schrödinger presenta una comparación detallada entre la mecánica y la óptica de una manera elegante y magistral, aunque de forma informal. Su trabajo es considerado una obra

¹² En el ámbito científico y matemático este término se usa para referirse a una suposición inicial o aproximación que se hace en el proceso de resolver un problema.

maestra en la exposición científica, lo que probablemente le haya proporcionado a Schrödinger una sensación de satisfacción bien merecida.

No obstante, se percibe la necesidad de una teoría clásica de las ondas de materia que desempeñe en mecánica un papel similar al de la teoría de Maxwell en la óptica electromagnética. Schrödinger astutamente señala que:

"Hoy día, sabemos, de hecho, que nuestra mecánica clásica yerra en dimensiones ínfimas de la trayectoria y ante curvaturas descomunales. Esta falencia guarda similitud con la de la óptica geométrica, convirtiéndose en una empresa de búsqueda hacia una mecánica ondulatoria mediante una evolución más profunda de la analogía hamiltoniana" (Moore, 1994).

El artículo tercero, recibido por Annalen el 10 de mayo, emerge como un vasto tratado sobre la teoría de perturbaciones y su inherente aplicación al efecto Stark en las líneas de Balmer. En este complejo entramado de 53 páginas, Schrödinger se adentra en la imperiosa necesidad de soluciones aproximadas ante aquellas coyunturas donde las ecuaciones diferenciales se resisten a ofrecer soluciones exactas. Las formulaciones de Epstein para los desplazamientos Stark, emanadas de la teoría mecánica de ondas, atestiguan la pericia de Schrödinger en contribuir al entendimiento cuántico.

Para Schrödinger, el apogeo de la mecánica de ondas suponía una oportunidad de reintegrar elementos trascendentales de la mecánica clásica en el lienzo cuántico. Ahora se abocaba a sustituir los saltos cuánticos discontinuos entre órbitas electrónicas insospechables por una representación más clásica y estéticamente cautivadora de transiciones suaves y continuas entre las funciones de onda estacionarias del sistema.

No obstante, la exuberante acogida hacia la mecánica de ondas no logró erradicar el escepticismo subyacente entre los jóvenes físicos, quienes observaban con desconfianza cualquier intento de resucitar los conceptos clásicos en el contexto de la nueva teoría. Al inicio, a Dirac le resultaba molesta la teoría de Schrödinger, resentía incluso la idea de suspender el trabajo en la nueva mecánica cuántica y comenzar de nuevo (Farmelo, 2009).

En aquel periodo, Schrödinger, inmerso en la vorágine de descubrimientos, apenas hallaba tiempo para inmiscuirse en una reflexión profunda sobre las implicaciones de su función de onda. Así, sus interpretaciones emergían no solo desde la perspectiva de un físico vienés, sino también desde los confines de su filosofía intrínseca.

En sus primeras concepciones, visualizaba la función ψ como una perturbación tangible, una onda de materia danzando en el espacio, un eco de las ondas electromagnéticas en la teoría de Maxwell. No obstante, abandonó prontamente esta danza material al no poder concebir la interacción con las ondas electromagnéticas en los rituales de emisión y absorción radiante. Se sumergió, entonces, en una 'interpretación electromagnética', donde ψ se erigía como la medida de la densidad de carga eléctrica. En este

universo conceptual, el electrón dejaba de ser una partícula puntual para transformarse en una extensa danza de carga negativa.

Contemplando el átomo de hidrógeno, este paradigma sugería que, al someter al átomo a un campo electromagnético oscilante, las distribuciones de carga de todas sus auto funciones se entrelazaban en una sinfonía de excitaciones simultáneas. Aunque el 'caso de resonancia', donde la absorción de luz se manifestaba a una frecuencia específica, escapaba a su cuantificación, Schrödinger intuía que dichas frecuencias surgirían como combinaciones exquisitas de las auto funciones del átomo. Así, el proceso de absorción o emisión de luz se revelaba como un ballet suave y continuo, despojado de los bruscos saltos cuánticos que delineaban la teoría de Bohr.

En el lapso de seis meses, desde enero hasta junio de 1926, Erwin Schrödinger forjó una sinfonía de seis ensayos altamente creativos, dando luz a la novedosa mecánica de ondas, concebida en lo que Weyl describió como un 'tardío y erótico estallido en su vida'. Entre estas composiciones destacaba un artículo en el cual Schrödinger develó la equivalencia matemática entre la mecánica de matrices y la mecánica de ondas. En el teatro clásico de la mecánica, el momento (p) de una partícula se revela mediante la multiplicación de su masa por la velocidad, mientras que, en la mecánica de ondas, esta expresión se transmuta en un operador diferencial.

A pesar de que entre Schrödinger y Heisenberg no prevalecían sentimientos personales adversos, sus críticas hacia las interpretaciones mutuas de la mecánica cuántica fueron inclementes. Si bien en los textos impresos estas críticas adoptaban una tonalidad diplomática, en las cartas personales, los auténticos sentimientos se desplegaban sin tapujos. Schrödinger experimentaba la carencia de un modelo pictórico en la mecánica de matrices, como un obstáculo insalvable para la aplicación de ésta a nuevos enigmas. En una carta a Lorentz, expresó que *"la discrepancia de frecuencia en el modelo de Bohr parece ser... algo monstruoso y me gustaría caracterizar la excitación de la luz de una manera realmente casi inconcebible"* (Moore, 1994).

El 8 de junio, Heisenberg compartió con Pauli y posteriormente con Dirac su aversión hacia la parte física de la teoría de Schrödinger:

"Cuanto más reflexiono sobre la parte física de la teoría de Schrödinger, más repugnante la encuentro. Lo que Schrödinger escribe sobre la visualización de su teoría probablemente no sea del todo correcto. En otras palabras, es basura". (Farmelo, 2009)

Schrödinger respondió con la misma ferocidad, desestimando las arcanas matemáticas de la teoría de Heisenberg y ridiculizando la noción de saltos cuánticos. El primer encuentro entre estos dos titanes se materializó en un seminario abarrotado en Múnich, un mes después, marcando el inicio de una disputa larga y acrimoniosa que resonaría en las anales de la física cuántica como un oscuro drama gótico de egos enfrentados.

1.2.3 Fundamentos Cuánticos: La Interpretación Probabilística de Max Born y la Teoría de Transformación de Paul Dirac con el Principio de Incertidumbre

No obstante, a pesar del ingenio de Schrödinger, su modelo ondulatorio de la materia no lograba superar ciertas dificultades. En el año 1926, Schrödinger planteó la idea de que la función de onda, expresada como el producto $\psi\psi^*$ (donde ψ^* representa el complejo conjugado de ψ), podría concebirse como una suerte de función de peso eléctrico, cuya densidad de carga estaba representada por $\psi\psi$. Según esta concepción, el electrón dejaba de ser una partícula localizada con precisión para ser dispersado en el espacio (Kragh, 2020). Schrödinger, aunque había contemplado esta posibilidad, se enfrentó a la realidad de que los estados de paquetes de ondas no eran sostenibles a menos que sus dimensiones fueran considerablemente mayores que las longitudes de onda que los componían.

En este dilema, nuevamente el físico holandés Hendrik Lorentz argumentaba que un paquete de ondas de electrones no podría mantenerse unido, sino que se dispersaría, desvaneciéndose rápidamente en la nada a medida que sus ondas constituyentes se separaban. Surgieron dudas en la mente de Schrödinger, quien se enfrentaba a fenómenos problemáticos como el efecto fotoeléctrico, difíciles de conciliar con su modelo de transiciones suaves y continuas entre estados estables de ondas (Baggott & Baggott, 2011).

Fue en este punto donde la contribución de Max Born se destacó una vez más. Born, uno de los pioneros de la mecánica matricial, al observar la nueva mecánica de ondas, reconoció de inmediato la utilidad del enfoque de Schrödinger y se mostró inicialmente encantado por su intento de restaurar una descripción espacio-temporal clásica a la mecánica cuántica. No obstante, quedó consternado por el esfuerzo de Schrödinger por eliminar los saltos cuánticos (Ballentine, 1970).

Born inició entonces una exploración minuciosa de los problemas relacionados con la naturaleza de las interacciones entre partículas cuánticas, como electrones y átomos. Tanto la mecánica de matrices como la mecánica de ondas habían demostrado, al menos parcialmente, su éxito al proporcionar un marco comprensible para las órbitas estables de los electrones en los átomos y prever las posiciones e intensidades de las líneas espectrales. Estas teorías, aunque abordaban la estructura, permanecían impotentes frente a las cuestiones cruciales de las transiciones, los enigmáticos saltos cuánticos entre las estructuras (Pais, 1982).

Born, se propuso forjar una teoría cuántica que abrazara las colisiones entre electrones y átomos, anhelando que este viaje le condujera a tejer una comprensión más amplia sobre la danza íntima entre la radiación, personificada en cuantos de luz, y la materia. Anhelaba crear una teoría que integrara los saltos cuánticos en la mecánica ondulatoria de Schrödinger, dejando atrás la mecánica de matrices, que resultaba inadecuada para describir las complejidades de las colisiones cuánticas.

Heisenberg había esculpido su teoría para describir estados estacionarios, las órbitas estables, y prever las líneas espectrales; no obstante, su estructura rígida no se plegaba con facilidad a las colisiones. La mecánica de ondas, sin embargo, se reveló como la arcilla maleable que Born moldearía con destreza. En su

artículo, titulado 'Mecánica Cuántica de Fenómenos de Colisión', presentado en la revista *Zeitschrift für Physik* en junio de 1926, Born sembró las bases de una reinterpretación radical de las funciones de onda.

En su estudio sobre las colisiones entre partículas diminutas como electrones y átomos Born imaginó un escenario donde una onda plana se encuentra con un átomo vibrante, cuya frecuencia está determinada por su estado. Esta interacción resulta en una mezcla compleja entre la onda y el átomo, seguida de su separación, con la onda dispersándose en varias direcciones como consecuencia de la colisión. Este fenómeno guarda semejanza con el choque entre dos bolas de billar, donde las masas, velocidades y direcciones anteriores al impacto permiten predecir la trayectoria posterior de ambas. A pesar de que, Born evidenció que, en el ámbito de la teoría ondulatoria, esta capacidad predictiva se desvanece. La relación entre la fuerza del impacto y la dirección del movimiento tras la colisión ya no sigue un patrón tan directo. (Born, 1969).

En la teoría de ondas de la luz, la relación entre la amplitud de la onda y la intensidad lumínica estaba grabada en la piedra del entendimiento. Schrödinger, en sus escritos, había esbozado una conexión entre el cuadrado del módulo de la amplitud de la función de onda y la densidad de carga eléctrica a través de una 'hipótesis heurística'. No obstante, fue Born quien emitió una declaración audaz que revolucionaría el campo: las funciones de onda no eran meros constructos matemáticos, sino artífices de probabilidades, desvelando su capacidad para representar la probabilidad de dispersión de una onda electrónica en direcciones específicas. Como expresó de manera contundente:

"... solo es posible una interpretación, [la función de onda] da la probabilidad de que el electrón, partiendo desde [una dirección inicial específica], sea desviado hacia [una dirección final específica]". En la pieza científica en cuestión, Born, en un apresurado ejercicio intelectual, añadió una nota al pie de página que esclarecía: "Una consideración más detallada revela que la probabilidad está directamente relacionada con el cuadrado de [la función de onda]" (Born, 1926).

En las palabras apresuradamente plasmadas de Born en su artículo, se alineaba con la sugerencia de Einstein de un *Gespensterfeld*, un 'campo fantasma', delineador de las probabilidades que guiaban el camino de los cuantos de luz. Así, Born rechazó las interpretaciones literales de Schrödinger, abrazando la función de onda como la medida misma de la probabilidad en la danza caótica de las transiciones cuánticas, como las colisiones que deslumbraban la esencia de la materia (Born, 1969).

Cuando Born se erigió como orador en una reunión de la Asociación Británica en Oxford, Inglaterra, en agosto de 1926, su comprensión alcanzó su plenitud. En esta conferencia, Born estableció, por primera vez, una nítida distinción entre las probabilidades estadísticas de la física clásica y las probabilidades cuánticas, intrínsecas a las funciones de onda. Escribió:

"En la dinámica clásica, el conocimiento del estado de un sistema cerrado (la posición y velocidad de todas sus partículas) en cualquier instante determina inequívocamente el movimiento futuro del sistema; esa es la forma que toma el principio de causalidad en física... Pero además de estas leyes causales, la física clásica siempre utilizó ciertas consideraciones estadísticas. De hecho,

la aparición de probabilidades estaba justificada por el hecho de que el estado inicial nunca se conocía exactamente; mientras esto fuera así, los métodos estadísticos podrían ser adoptados, más o menos provisionalmente..." (Born, 1969)

La mecánica cuántica ofrecía una receta para discernir los diversos resultados potenciales de una transición y establecer sus probabilidades relativas. Aplicar la receta era, en muchos aspectos, anunciar la causa de la transición. Pese a todo, nada en la teoría permitía prever cuál de los múltiples resultados posibles se materializaría en realidad. Tras establecer la causa y el abanico de posibles resultados, el efecto real parecía entregarse por completo al azar.

La preocupación caló hondo en algunos físicos. Schrödinger, en una carta a Wilhelm Wien (1864-1928), no se dejó convencer por los argumentos de Born:

"Hoy ya no me gusta asumir, como hace Born, que un proceso individual de este tipo sea 'absolutamente aleatorio', es decir, completamente indeterminado. Ya no creo hoy que esta concepción (que defendí con tanto entusiasmo hace cuatro años) logré mucho. A partir de una separata de la última obra de Born en la Zeitschr.f.Phys., sé más o menos cómo piensa en las cosas: las ondas deben estar estrictamente determinadas causalmente a través de leyes de campo; las funciones de onda, por otro lado, solo tienen el significado de probabilidades para los movimientos reales de partículas de luz o materiales. Creo que Born pasa por alto que —si uno pudiera tener esta vista completamente desarrollada— dependería del gusto del observador cuál ahora quisiera considerar como real, la partícula o el campo guía. Ciertamente no hay criterio para la realidad si no se quiere decir: lo real es solo el complejo de impresiones sensoriales, todo lo demás son solo imágenes." (Moore, 1994).

Born reconoció su deuda de inspiración al Gespensterfeld de Einstein en una carta fechada el 30 de noviembre de 1926. En su respuesta, Einstein resumió las dudas que lo embargaban:

"La mecánica cuántica es muy impresionante. Pero una voz en mi interior me dice que aún no es la real. La teoría produce mucho pero apenas nos acerca al secreto del Anciano. En todo caso, estoy convencido de que Él no juega a los dados." (Einstein, 1971).

Einstein, cuyo genio e intuición habían erigido los pilares de la nueva teoría cuántica, se transformaba rápidamente en uno de sus críticos más vehementes.

La perplejidad de Born ante la reacción de Einstein marcó el inicio de un ferviente debate acerca de la naturaleza cuántica de la realidad, un diálogo que se desplegaría en el vasto escenario de la microfísica. La interpretación de Born, prontamente abrazada y elaborada por mentes como las de Pauli, Jordán y Dirac, desempeñó un papel crucial al introducir de manera explícita un elemento de probabilidad irredimible en el tejido mismo de la realidad subatómica. Este cambio de perspectiva no alteraba la primacía de las leyes causales en la física, sino que investía a dichas leyes con un matiz distinto.

No obstante, en el trasfondo de la animada dialéctica entre Schrödinger y Heisenberg, emergió un episodio emblemático el 21 de julio de 1926. En este encuentro, Schrödinger, distante de la camaradería de Born y Heisenberg, se vio inmerso en una invitación de Sommerfeld y Wilhelm Wien para ofrecer un seminario sobre su innovadora mecánica ondulatoria. Heisenberg, audaz en su intento, planteó interrogantes acerca de fenómenos intrínsecamente corpusculares, tales como el efecto fotoeléctrico y la cuantización en el horno de Planck. Schrödinger, en un estado de desconcierto, carecía de respuestas para las inquisitivas indagaciones de Heisenberg. Sin embargo, la intervención providencial de Wien, asumiendo el papel de moderador, logró contener las objeciones, e incluso lanzó a Heisenberg: *"Mire, joven, el profesor Schrödinger seguramente aclarará estas cuestiones en su momento. Lo que debe comprender es que ahora todo ese disparate de los saltos cuánticos se ha acabado"* (Faus, 2017).

Este episodio adquiere relevancia al destacar que, a pesar de las similitudes en los resultados arrojados por ambas teorías, estas carecían de una conexión intrínseca. La comunidad científica abogaba por un esquema unificador que amalgamara las diversas formulaciones de la mecánica cuántica, integrando la interpretación probabilística de la función de onda y su relación con los operadores matriciales.

En ese contexto, Bohr extendió una invitación a Schrödinger para debatir la interpretación de la mecánica cuántica en Copenhague. Mientras estos dos se enfrascaban en debates intensos sobre la continuidad y discontinuidad en el ámbito atómico, un silencioso Dirac trabajaba en un artículo destinado a disolver toda controversia. Aunque Dirac no caracterizaba sus ideas como 'filosóficas', su reformulación de los principios fundamentales de la mecánica cuántica permeó el pensamiento filosófico de sus contemporáneos.

Dirac gestó un formalismo matemático donde variables cuánticas continuas y discontinuas coexistían de manera simétrica. Incorporó las discontinuidades evidenciadas por los saltos cuánticos en una abstracta "teoría de la transformación" que finalmente concilió las matemáticas divergentes pero equivalentes de las mecánicas de onda y de matrices. Esta teoría, intrínsecamente matemática, proporcionaba una receta para transformar de un conjunto de variables conjugadas a otro, estableciendo así un vínculo matemático entre los símbolos del familiar mundo clásico del laboratorio y los símbolos del extraño mundo cuántico del átomo (Dirac, 1927).

El dilema intrínseco entre continuidad y discontinuidad ha evolucionado hacia una elección pragmática fundamentada en la conveniencia matemática, discerniendo qué variables específicas podrían optimizar el cálculo en problemáticas determinadas de la física atómica. En este proceso, el dilema, al abordarse desde esta perspectiva, ha dejado de ser un asunto de gravedad filosófica.

El trascendental trabajo de Dirac, junto con los esfuerzos independientes de Jordan, quienes abrazaron esta teoría mediante caminos distintos pero convergentes, persuadieron a su colega de Copenhague, Heisenberg, de que la nueva teoría de transformación constituía una formulación "matemáticamente bastante cerrada" de la mecánica cuántica. Dirac, ya desde noviembre de 1926, sostenía ante Heisenberg que todas las

aplicaciones físicas actuales y futuras de la Mecánica Cuántica se ajustaban a esta nueva perspectiva (Cassidy, 2010).

En el desarrollo de su teoría de transformación, Dirac introdujo una innovación formal, la función: $\delta(\text{delta})$ ¹³, que con el tiempo se ha erigido como una herramienta esencial en el entramado de la física moderna.

Aun así, la física de Dirac planteaba un desafío en cuanto a la trayectoria observada de una partícula supuesta. Heisenberg, percatándose de que ni los paquetes de ondas de Schrödinger ni sus propias partículas cuánticas eran suficientes para describir el camino observado de una partícula en un laboratorio, vislumbró la necesidad de un análisis profundo de los conceptos de posición y velocidad (Cassidy, 1993).

Heisenberg, al emprender su análisis desde la noción de posición, propuso que la clarificación de lo que se entiende por 'posición de un objeto' requiere la descripción de un experimento que permita medir dicha cantidad o magnitud. Este enfoque, inspirado por la idea de Einstein sobre la simultaneidad, buscaba solventar las dificultades inherentes a la física atómica.

El experimento mental del microscopio de rayos gamma, concebido por Heisenberg desde 1924, se erigió como una pieza central en su argumentación. No obstante, el desafío residía en la interacción del electrón con el dispositivo de medición, donde la mecánica cuántica dictaba cambios en la dirección y el momento del electrón, imponiendo limitaciones fundamentales a la precisión simultánea de estas magnitudes (Jammer, 1966).

Heisenberg, reflexionando sobre una carta de Pauli, concluyó que no tiene sentido hablar de la posición de una partícula con velocidad fija, pero aceptar posiciones y velocidades menos precisas sí adquiere significado.

Fue así como el 22 de marzo de 1927, el ilustre Werner Heisenberg desplegó ante el escrutinio de la comunidad científica su magnum opus, un pergamino intelectual titulado "Sobre el contenido perceptual de la cinemática y la mecánica cuántica teórica", enviado desde las entrañas de Copenhague hacia las páginas de la venerable revista *Zeitschrift für Physik*. En este manuscrito de 27 páginas, tejido con la finura de un poema cósmico, Heisenberg dejó entrever la joya más reluciente y trascendental de su odisea física: la formulación del principio de incertidumbre, o más sugestivamente, la danza incesante de la indeterminación en el vasto escenario de la mecánica cuántica.

¹³ La utilidad de esta función en el ámbito de la física es de suma relevancia, ya que proporciona un medio efectivo para expresar magnitudes singulares en un punto particular como límite de magnitudes continuas. Su aplicabilidad abarca diversas áreas del conocimiento, destacando su uso en la representación de la distribución de densidad de una masa unitaria concentrada en un punto específico. En el contexto de la mecánica cuántica, esta función es fundamental para la representación de estados de partículas localizadas en un punto preciso del espacio (Andino et al., 2019).

Este acto sin igual, engarzado con el principio de complementariedad¹⁴ de Bohr y la interpretación estadística de la función de onda de Schrödinger por Born, tejieron un tapiz conceptual que se conoce como la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. Una explicación que, como las olas del mar, alteró fundamentalmente nuestra comprensión de la naturaleza y nuestra conexión intrínseca con ella.

La incertidumbre y la interpretación de Copenhague, aunque controvertidas, marcaron el final de una profunda transformación en la física que no se ha igualado desde entonces; ninguna teoría alternativa ha demostrado ser tan exitosa o ampliamente aplicable a los fenómenos a escala atómica como la mecánica cuántica y sus extensiones y refinamientos desde su conclusión en la interpretación de Copenhague de 1927.

Apenas dos semanas después de revelar el principio de incertidumbre, Heisenberg, en una sinfonía de palabras dirigidas a oídos no confinados por los límites del álgebra y las ecuaciones, compartió su visión con el mundo. En su resumen perspicaz, sugirió que la esencia de una teoría física se revela no tanto en su formulación matemática, sino en los nuevos conceptos que suscita. Hasta entonces, las mecánicas newtonianas y la electrodinámica maxwelliana reinaban como cimientos inquebrantables, sosteniendo la estructura de la física. Conceptos como fuerza, masa, espacio y tiempo absoluto, procesos continuos, causalidad, y una realidad objetiva eran dogmas incuestionables, independientes del observador.

La misma brecha entre el microcosmos atómico y el laboratorio cotidiano se manifiesta en los conceptos mismos de la mecánica cuántica. Los electrones, pequeñas partículas de danza etérea, desafían las descripciones cotidianas de posición, velocidad y trayectoria. Heisenberg, en un susurro filosófico, nos revela que los electrones no son "anschaulich"¹⁵, en el sentido convencional. Aquí, en el reino de lo subatómico, la física se enfrenta a la paradoja. La observación y la medición, una vez cuestiones marginales, se tornan protagonistas centrales en el escenario cuántico, convirtiéndose en la argamasa que une los conceptos matemáticos con las realidades observadas (Cassidy, 1993).

Antes, podíamos describir el movimiento de un electrón mediante su posición y velocidad. Pero ahora, en el caleidoscopio de la mecánica cuántica, Heisenberg nos invita a un dilema poético. La posición precisa de un electrón, si intentamos medirla con la lupa de la certeza, se desvanece en las sombras de la incertidumbre. Cuanto más nítida es la posición, más difusa se vuelve la velocidad, y viceversa. Este juego cósmico de escondite, la sinfonía de la incertidumbre es el principio de Heisenberg, una danza eterna entre lo medible y lo inalcanzable.

¹⁴ El principio de complementariedad es una extensión de principio de incertidumbre, argumentado que la medición de dos propiedades complementarias (por ejemplo, la dualidad onda partícula) no se pueden obtener de manera simultánea y con extrema precisión, así que, si se mide la propiedad ondulatoria no es posible obtener a la vez características corpusculares.

¹⁵ Denominado en alemán, este término se refiere a algo intuitivo, comprensible o visualizable según el sentido convencional.

Capítulo 2. Dirac en el Tejido Cuántico: Impacto y Avances en la Teoría Fundamental

En el intricado tapiz de la mecánica cuántica, cuya recapitulación ha sido continua, emerge un paisaje de fondo fascinante en el vasto escenario de la física. En medio de su maravilla inherente, yace un vacío de conocimiento que debe ser abordado para completar este lienzo. Se hace referencia específicamente a la introducción del concepto de espín en las interpretaciones de la mecánica cuántica, así como a la expansión de esta teoría hacia los dominios de la relatividad.

Desde esta perspectiva, emergen en escena dos grupos de eruditos, cada uno impulsado por el afán de desentrañar los misterios y de una vez por todas completar este cuadro. Pese a ello, este lienzo no es completado, hasta que Dirac da sus primeras pinceladas y logra terminarlo.

2.1 Ecuación De Los Muchos Padres

Algunos audaces exploradores del conocimiento se aventuraron por el sendero de la relatividad, persiguiendo la integración de la teoría con los principios relativistas sin adentrarse en las complejidades del espín. Este viaje, que nos transporta a los albores de 1926, como ha sido documentado previamente. Schrödinger en el apogeo de su creatividad, se sumergió en la confección de la formulación ondulatoria de la mecánica cuántica, con la conciencia aguda de la necesidad de incorporar consideraciones relativistas en su odisea intelectual. De hecho, la primera ecuación cuántica de ondas que obtuvo incorporaba efectos relativistas, manifestando una armoniosa consonancia con la expresión clásica de la energía relativista. Aun así, Schrödinger, con la meticulosidad que lo caracterizaba, optó por la prudencia científica al no hacer pública dicha ecuación y al percatarse de su incapacidad para reproducir el resultado de Sommerfeld concerniente a la constante de estructura fina. Con una determinación inquebrantable, Schrödinger perseveró, dedicando meses de arduo trabajo en la búsqueda de una solución que, aunque momentáneamente eludía su comprensión, no escapaba a su incansable esfuerzo por desentrañar los misterios del universo.

Entre los primeros en inscribir la ecuación de onda relativista en el papiro de la ciencia, se encuentra el físico sueco, de apenas 31 años: Oskar Klein.

Klein, un discípulo precoz de Bohr y un colaborador íntimo en la primera luz de los años veinte (1921-1922) imbuido de una ferviente curiosidad, comenzó a vislumbrar los entrelazados hilos que conectan partículas, ondas y cuantos. Sin embargo, al igual que sucedió con Edmund Stoner, las barreras lingüísticas, nerviosismos y timideces obstruyeron su avance. Como Klein mismo relataría décadas después, 1963:

"Persistía esta noción en mi mente mientras me dedicaba a trabajos más prematuros, pero me inquietaba que pudiese resultar demasiado fantástico para ser considerado algo serio. Por ende, apenas lo mencionaba. Sabía que Bohr se encontraba inmerso en múltiples ocupaciones, por lo que temía molestarlo. Este pensamiento rondaba mi mente en Gotinga en 1922, y cuando regresé... se lo

compartí a él [Bohr], pero su respuesta indicaba una falta de comprensión de mis planteamientos. Por lo tanto, opté por no importunarlo más" (Kragh, 1984).

El tiempo y la determinación llevaron a Klein a destilar sus pensamientos en un trabajo que amalgamaba la teoría cuántica con la relatividad en un marco de cinco dimensiones (cuatro espaciales y una temporal), publicado en la revista *Zeitschrift für Physik* a finales de abril en 1926. Esta obra presentaba la novedosa idea sobre una teoría unificada de los fenómenos electromagnéticos y gravitacionales, expresada en términos de una extensión en cinco dimensiones de la teoría de la relatividad de Einstein.

Aunque su propuesta era tan armoniosa como novedosa, apenas atrajo el escrutinio adecuado. Según recuerda Klein, el advenimiento de la teoría de Dirac marcó el ocaso de la quinta dimensión en el escenario de la mecánica cuántica:

"En ese momento, me pareció que la teoría de cinco dimensiones carecía de sustento, y la abandoné. Recuerdo en la primavera de '28, después de regresar de Cambridge, que Pauli estaba en Copenhague y lo invitamos a cenar. Brindamos con una botella de vino por la defunción de la quinta dimensión" (Kragh, 1984).

El trabajo pionero de Klein se erigió como un faro en la búsqueda de la unificación de la mecánica cuántica y la relatividad, desvelando la primera ecuación cuántica relativista, la cual concordaba con la formulación previamente desarrollada por el físico austríaco. En los meses subsiguientes, varios científicos destacados, entre ellos Vladímir Fock (1898-1974), Théophile de Donder (1872-1957), L. de Broglie, Walter Gordon (1893-1939), exploraron este nuevo marco teórico.

Pese a ello, para este trabajo no se profundizará en la ecuación de Klein-Gordon. Solo se destaca su incapacidad para integrar correctamente los principios de la relatividad y cómo esto condujo a la resolución posterior de Dirac. Se recomienda la lectura de "Equation with the many fathers: The Klein–Gordon equation in 1926" de Helge Kragh para una comprensión más amplia.

Pese a lo anterior, se destaca que la ecuación resultante, posteriormente denominada ecuación Klein-Gordon (KG), se alzó como protagonista indiscutible, atrayendo a los pensadores con un canto seductor que resonaba en los corredores del conocimiento, particularmente entre aquellos que se dejaban encantar por los misterios de la mecánica ondulatoria, como la tejida magistralmente por Schrödinger.

Al emerger con una simetría tan exquisita que evocaba los trazos de una obra de arte, la teoría KG abrazaba con gracia la invarianza de Lorentz, a pesar de ello la teoría KG reveló tener un alcance limitado en comparación con la mecánica cuántica ondulatoria convencional.

El dilema esencial de la ecuación KG yacía en la interpretación de su densidad de probabilidad. Mientras que, en la ecuación de Schrödinger, la densidad de probabilidad según la interpretación de Born se revela como el cuadrado del módulo de la función de onda, emanando una luminosidad positiva, en la

ecuación KG esta magnitud podía fluctuar entre valores positivos, negativos o incluso nulos. Este resultado se debe a la singularidad de la ecuación KG, que incluye una derivada de segundo orden en el tiempo, tal como se ve en la ecuación 1. Otro problema significativo era la falta de consideración hacia la nueva propiedad del espín, lo cual constituía una limitación importante en su aplicación teórica. Por último, la presencia de soluciones con energías negativas planteaba interrogantes fundamentales respecto a la interpretación física de la teoría.

$$-\hbar^2 c^2 \nabla^2 + m^2 c^4 = -\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

Donde el operador ∇^2 (Laplaciano) es:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2)$$

2.2. Girando en la Incertidumbre: Desafíos del Espín en las Mecánicas Cuánticas

Tal como se ha narrado, Pauli, en un gesto de rendición filosófica, acepto y abrazo la idea Goudsmit y Uhlenbeck del espín a principios del marzo de 1926. En esos mismos días prístinos, Schrödinger publicó su inaugural artículo sobre la mecánica ondulatoria, provocando en Pauli un arrebatado de entusiasmo, y acogió con fervor la obra de su compañero que incluso escribió a Jordán el 12 de abril de 1926, declarando con reverencia: *"Siento que este artículo [de Schrödinger] debe ser contado entre las publicaciones más importantes recientes"* (Enz, 2013)

Inmediatamente, Pauli se sumergió en la tarea de desentrañar la relación entre la teoría ondulatoria y la de matrices, con la tenacidad de un explorador en busca del tesoro más codiciado. Con determinación inquebrantable, logró demostrar su equivalencia, pero no publicó su demostración, pues Schrödinger, con su pluma magistral, ya había dado a luz su artículo sobre el tema.

Dado que las teorías cuánticas ya estaban arraigadas en el panorama científico, varios esfuerzos se desplegaron en un intento de relacionarlas con el espín, un concepto que añadía una nueva capa de complejidad al entendimiento de la naturaleza subatómica. Los primeros en buscar integrar el espín en la estructura conceptual de la teoría cuántica emergente, fue claramente su creador Heisenberg con la ayuda de Jordán. Estos lograron dar cuenta de la estructura fina del hidrógeno al agregar al Hamiltoniano habitual, un término que explicaba mejor cómo se comporta el hidrógeno a velocidades cercanas a la de la luz (corrección relativista) y, por otro lado, añadieron otro término relacionado con un aspecto del electrón: espín (Hendry, 1984). A pesar de su importancia, la teoría presentaba deficiencias conceptuales significativas. La primera es que cuando intentaron incorporar la relatividad, lo hicieron como una corrección inicial, lo que significa que no lo integraron completamente. Esto resultó en una aproximación que no podía explicar totalmente todos los fenómenos que observamos en la naturaleza. Además, el efecto del espín se añadía de manera ad hoc, sin una fundamentación conceptual sólida.

Es así como Heisenberg se dio cuenta que una teoría verdaderamente satisfactoria no solo debería ser capaz de explicar los fenómenos de doblete, sino también deducirlos a partir de los principios fundamentales de la relatividad y la mecánica cuántica. Este ideal aún no se había realizado en su totalidad, y la búsqueda de una teoría unificada que incorporara todos estos aspectos continuaba siendo el objetivo primordial de la comunidad científica.

Otros que intervinieron en este vehemente trabajo fueron: Llewellyn Hilleth Thomas¹⁶ (1903-1992) quien en 1927 en un primer intento describir relativistamente el movimiento del electrón en rotación. Le siguieron inmediatamente un artículo de Jacob Frenkel (1884-1954) y, después de algunos meses, uno de Charles Galton Darwin (1887-1962), nieto del Gran Charles Darwin, ambos dirigidos al mismo objetivo. Cada uno aportando su perspicacia única al problema. Todos estos intentos sufrían de un defecto común: la hipótesis del espín siempre era impuesta externamente, ad hoc, y no surgía directamente de los supuestos de la teoría misma. Esto sucediéndole al mismo Pauli que en su incesante búsqueda del entendimiento profundo de los misterios cuánticos, regresó aproximadamente un año después a la conexión entre la mecánica ondulatoria y el espín, imbuido de una ferviente voluntad por incorporar este último en la teoría y, al mismo tiempo, proponer una generalización relativista. Su travesía por esta senda se vio entorpecida, no por falta de ímpetu, sino por la intrínseca complejidad que caracteriza el entrelazamiento de estas ideas (La Teana, 2005).

En este contexto, se evidencia la paradoja que Pauli nuevamente enfrentó, manifestada en su perplejidad ante la tarea de integrar el espín en el marco de la mecánica ondulatoria sin incurrir en discordancias fundamentales. De hecho, su afán perfeccionista, lo condujo a una encrucijada donde la solución no se vislumbraba con claridad. Esto se manifestaba cuando fue obligado por la imposición de las circunstancias a optar por una salida que, si bien resolvía momentáneamente la disyuntiva, dejaba entrever la sombra de una insatisfacción latente. La publicación de un artículo en el cual el espín se introducía ad hoc, revela la tensión entre el deseo de progreso y la aceptación de un compromiso que, si bien proporcionaba una vía de escape, distaba de ser la culminación anhelada.

El estudio llevado a cabo por Pauli representó un avance significativo en la comprensión de la naturaleza cuántica de las partículas, al considerar una función de onda de Schrödinger que no solo depende de las coordenadas espaciales, sino también tenía en cuenta los valores del espín.

Este enfoque resulta fundamental, dado que la componente del espín de una partícula, en cualquier dirección, solo puede adquirir dos valores distintos, $\pm \hbar/2$. Esta función de onda se descompone en dos partes, cada una asociada a uno de los posibles valores de espín. A través de un meticuloso análisis, Pauli derivó un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento energético de la partícula, culminando en la formulación de las conocidas matrices de Pauli.

¹⁶ Este autor fue tratado en el anexo 2 y tuvo un apogeo en el desarrollo de la interpretación física del espín.

A pesar de los esfuerzos analíticos realizados por Darwin y Pauli, la teoría subyacente no lograba proporcionar una concordancia completa con la estructura fina de manera satisfactoria para todos los propósitos prácticos. Esta falta de congruencia puede ser atribuida a dos razones principales: en primer lugar, la metodología empleada aún mantenía ciertas suposiciones ad hoc, lo que implicaba una limitación inherente en su aplicabilidad; en segundo lugar, la concordancia alcanzada no podía extrapolarse más allá de una aproximación de primer orden, lo que dejaba sin resolver ciertos aspectos fundamentales de los fenómenos observados.

Pese a todo, en este trabajo no se llevará a cabo un desarrollo completo y detallado de cómo Pauli llegó a sus matrices, dado que no es el objetivo del escrito. Para una mayor contextualización, se puede recurrir al siguiente recurso: Fierz, M., & Weisskopf, V. F. (1960). "Theoretical Physics in the Twentieth Century: A Memorial Volume to Wolfgang Pauli".

Las problemáticas inherentes a la reconciliación de la mecánica cuántica con la relatividad, conjugadas con la inserción del espín en el tejido de la mecánica cuántica, fueron abordadas mediante una singular solución: una única ecuación forjada por una única mente. Paul Adrien Maurice Dirac inscribió su legado en los anales de la historia científica el 2 de enero de 1928, al presentar al mundo su obra maestra.

En el esfuerzo por comprender y superar los límites del conocimiento, esta recontextualización emprende una senda divergente con respecto a la exposición de Fierz y Weisskopf, así como lo relata Arnold Sommerfeld en su obra "Wave-Mechanics", publicada en Londres en 1930. En esta obra, ellos expresan que: *"De esta manera, Pauli allanó el camino para la teoría relativista del electrón y de átomos similares al hidrógeno, que debemos a Dirac (1928)"* (Fierz & Weisskopf, 1960).

Más allá de esta consideración, se destaca el hecho de que Pauli abrió el camino por el cual se introdujo y encontró lugar la solución final de Dirac. Como Van der Waerden resaltó en "Theoretical Physics in the Twentieth Century": *"El paso de una a dos componentes [realizado por Pauli] es grande, mientras que el paso de dos a cuatro componentes [realizado por Dirac] es pequeño"* (Fierz & Weisskopf, 1960).

Asimismo, según Sommerfeld: *"el descubrimiento de la ecuación de Pauli fue un paso importante que condujo al reconocimiento de la verdadera naturaleza del electrón, es decir, la ecuación de Dirac"* (Sommerfeld, 1930).

No obstante, en esta labor de recontextualización, se adentra en los análisis de Graham Farmelo, cuya obra "The Strangest Man", una biografía magistral de Dirac, nos señala nuevas sendas de reflexión. En sus páginas, se desvela cómo Dirac y Pauli, de manera independiente, hallaron vías para describir el esquivo concepto del espín del electrón (Farmelo, 2009).

Al igual que Helge Kragh, en su obra "The Genesis of Dirac's Relativistic Theory of Electrons" de 1981, destaca que la ruta histórica que condujo a la teoría de Dirac no estuvo tan estrechamente vinculada a las ideas de Pauli como afirma la narrativa convencional. Dirac no siguió un camino que partiera directamente

de las teorías de Pauli; más bien, guiado por su filosofía general de la ciencia, anhelaba erigir su teoría sobre cimientos de principios generales, en lugar de basarse en un modelo preestablecido del electrón (Kragh, 1981).

Este argumento se ve reforzado al examinar la entrevista realizada por Thomas Kuhn (1922-1996) en el trabajo Oral History Interview with P.A.M. Dirac, llevado a cabo el 1 de abril de 1962 y el 7 de mayo de 1963. En la entrevista, Kuhn plantea:

“Kuhn: ¿Recuerdas en qué momento te diste cuenta de repente de que el espín emergía, de que estabas introduciendo variables adicionales?”

Dirac: Bueno, uno ya lo tenía no relativistamente antes de eso. Surgió simplemente jugando con las ecuaciones en lugar de intentar introducir las ideas físicas correctas. Gran parte de mi trabajo consiste en simplemente jugar con ecuaciones y ver qué dan. ... No creo que esto se aplique tanto a otros físicos; creo que es una peculiaridad mía que me gusta jugar con ecuaciones, buscando simplemente relaciones matemáticas hermosas que quizás no tengan ningún significado físico en absoluto. A veces lo tienen” (Kuhn, 1963).

2.3. Siguiendo las Huellas de Dirac: Un Viaje Hacia la Ecuación Fundamental

A partir de los cimientos previamente establecidos, este tramo del estudio se sumerge en la exploración de la filosofía inherente a Dirac, cuya singularidad reclama atención exclusiva. Se adentrará en el sendero arduo que transitó, entre las sombras y la incertidumbre, hasta alcanzar la cima de su ecuación.

Al llegar a este hito, se desvelan nuevos enigmas que se alzan imponentes, como testigos silenciosos de la complejidad intrínseca de la realidad. Es así como el peregrinar de Dirac, marcado por la tragedia y la belleza de la búsqueda, continúa enfrentando las olas tumultuosas del misterio cósmico.

La búsqueda de la síntesis entre la mecánica cuántica y la relatividad especial ha sido una odisea intelectual que ha desafiado a los más destacados pensadores de la física. En este entramado de ideas y visiones, múltiples mentes brillantes han convergido desde diversas trincheras, desde los confines de Múnich hasta las majestuosas torres intelectuales de Gotinga y Copenhague, entre otros bastiones del pensamiento.

Al contrario, como en todo gran enigma, la solución ha resultado esquiva. A pesar de los esfuerzos desplegados desde múltiples perspectivas, la incógnita del espín persistía, inquietante e inalcanzable. No obstante, en medio de este torbellino de ideas, algunos físicos, en vez de confrontar directamente el enigma, se sumergían en otras profundidades igualmente conectadas con la teoría cuántica. Entre ellos, destaca nuestro protagonista, quien en los albores de 1927 se encontraba inmerso en una indagación sobre el comportamiento de la luz al ser dispersada por un átomo, una odisea intelectual que lo condujo al umbral del agotamiento y a conclusiones elusivas.

En este escenario, Robert Oppenheimer, compañero de Dirac en las venerables tierras de Gotinga, donde la semilla de una improbable amistad fue sembrada. Era conocedor del trabajo de Dirac, Oppenheimer expresaría posteriormente su desconcierto ante la aparente renuencia de Dirac a avanzar en el desarrollo de la teoría cuántica. Dirac, fiel a su espíritu inquisitivo, anhelaba tomarse un respiro antes de abordar el enigma del espín (Farmelo, 2009).

Después de su pausa reflexiva, Dirac se encaminó hacia Cambridge, pero sus pensamientos y esfuerzos estaban ahora concentrados en un propósito singular: fusionar la teoría cuántica con la sagrada geometría de la relatividad einsteniana. Como se ha discernido, las teorías cuánticas de Heisenberg y Schrödinger mostraban deficiencias al no concordar con la teoría especial de la relatividad. En este desafío, se disputaba el honor de ser **el primero** en desentrañar la teoría que, como una melodía cósmica, armonizara las discordancias aparentes y revelara la sinfonía subyacente del universo.

A pesar de su prolija productividad y originalidad la mayoría de sus resultados también habían sido obtenidos por otros físicos que, más a menudo, habían publicado sus trabajos un poco antes que Dirac, quien no podía ignorar la sombra alargada que proyectaban sobre él figuras como Heisenberg y otros titanes teóricos de la Alemania contemporánea. Sentía, en el núcleo de su ser intelectual, la urgencia de producir una teoría que no solo fuera profunda, sino verdaderamente novedosa; una teoría que resonara en la eternidad del pensamiento humano.

En sus primeros trabajos, Dirac se enfrentó al desafío de integrar la mecánica cuántica con los fenómenos observados en los experimentos de Compton. En su inicial incursión en este campo, omitió referencias a la incipiente mecánica ondulatoria de Schrödinger, y, por ende, no intentó articular una ecuación de onda que abrazara las tenues sutilezas de la relatividad. Fue en su segundo abordaje del efecto Compton cuando Dirac se aventuró por los caminos peligrosos de la relatividad, aunque para entonces, el tema ya había sido objeto de escrutinio por parte de otros físicos eminentes (Kojevnikov, 2002).

Su genio no solo le permitió reproducir con precisión el cambio en la longitud de onda de la radiación dispersada, tal como lo había explicado Compton al considerar el proceso como una colisión elástica entre el fotón incidente y el electrón del blanco de grafito. Además, pudo discernir la intensidad de dicho fenómeno, descubriendo matices que escapaban a la percepción inicial de Compton en 1923. En efecto, al verificar sus predicciones, notó una discrepancia significativa en los datos de Compton, señalando que esta discordancia *"sugería que la magnitud absoluta de los valores de Compton era aproximadamente un 25% demasiado pequeña"* (Carretero, 2013).

La acogida de la comunidad científica hacia su trabajo, publicado a finales de abril de 1926, fue efusiva. Su estilo expositivo, marcado por una concisión casi críptica y un lenguaje matemático denso, constituía una barrera para muchos de sus contemporáneos. Incluso el mismísimo Einstein, durante su visita a Ehrenfest en Leiden en el otoño de 1926, se encontró con dificultades para descifrar los mensajes codificados en los escritos de Dirac. En una carta dirigida al propio Dirac, Ehrenfest expresó:

"Einstein está actualmente en Leiden (hasta el 9 de octubre). En los pocos días que nos quedan, él, Uhlenbeck y yo estamos luchando juntos durante horas estudiando tu trabajo, porque Einstein está ansioso por entenderlo. Pero estamos encontrando algunas dificultades, que, debido a que la presentación es tan breve, parece que somos absolutamente incapaces de superar." (Kragh, 1990).

Otro trabajo de Dirac fue realizado en el transcurso del año 1926, un período fecundo en el ámbito de la física cuántica, donde las ondas cuánticas ya habían capturado la imaginación de muchos pioneros en el campo. Dirac adoptó una posición pragmática y abrazó la nueva mecánica ondulatoria como un instrumento de resolución. En un acto casi poético, Dirac destiló su comprensión en un tratado titulado "Sobre la teoría de la mecánica cuántica", donde por primera vez aplicó la teoría ondulatoria a sistemas de partículas idénticas¹⁷.

Con una valentía que desafía las convenciones, extendió audazmente su análisis a sistemas de partículas idénticas, aventurándose en el estudio de un gas de moléculas, pensando que su comportamiento era similar al de los electrones, usando funciones matemáticas específicas. Usó métodos estadísticos para entender cómo se distribuye la energía en estas moléculas. A través de un meticuloso análisis estadístico, logró discernir la distribución energética de las moléculas, al tiempo que delineó la naturaleza de los fotones como combinaciones simétricas, desentrañando así una complejidad inherente a la radiación (Kojevnikov, 2002).

Dirac, extendió osadamente su análisis a sistemas de partículas idénticas, arrojando luz sobre el insondable abismo de la simetría y la exclusión. Como un alquimista moderno, erró en su suposición al equiparar la danza de las moléculas con la de los electrones, esgrimiendo funciones de onda antisimétricas. En esta danza de lo microscópico, Dirac desplegó los velos de la estadística, revelando la distribución energética de las partículas y desentrañando el misterio simétrico de los fotones, esas criaturas de luz que danzan en el éter del universo¹⁸ (Belloni, 1994).

Es de notar que, en marcado contraste con la naturaleza de los electrones, los fotones, según el análisis de Dirac, exhiben un comportamiento claramente gregario, desafiando el principio de exclusión de Pauli al tender a ocupar un estado común. Esta descripción de partículas en términos de combinaciones simétricas allanó el camino para lo que luego se conocería como la estadística de Bose-Einstein.

Sin embargo, en este etéreo viaje de descubrimiento, Dirac se encontró con la sombra de otro genio, Enrico Fermi (1901-1954), quien gentilmente se lo expreso en la siguiente carta:

¹⁷ En el contexto abordado, el término hace referencia a partículas elementales que son indistinguibles entre sí. Esto implica que, al menos de manera individual, no pueden ser diferenciadas unas de otras mediante ninguna propiedad observable.

¹⁸ Para una comprensión más profunda del tema abordado en este trabajo, se recomienda consultar el artículo "On Fermi's route to Fermi-Dirac statistics" escrito por Belloni, L. en 1994. Este estudio proporciona una perspectiva detallada sobre el camino trazado por Fermi hacia las estadísticas Fermi-Dirac, ofreciendo un análisis exhaustivo de sus contribuciones y el contexto histórico en el que se desarrollaron.

"En su reciente trabajo ha desarrollado una teoría del gas ideal basándose en el principio de exclusión de Pauli. Quisiera llamar su atención sobre un trabajo similar que publiqué a comienzos de 1926" (Kragh, 1990).

En un gesto de humildad, Dirac reconoció su olvido, su breve eclipse de atención hacia el trabajo de Fermi, demostrando que incluso los más grandes de entre nosotros pueden verse empequeñecidos por la vastedad del universo del conocimiento.

A pesar de su mayor abstracción en comparación con el enfoque de Fermi, la perspectiva de Dirac emerge como una herramienta notablemente más poderosa. A través de la manipulación de funciones simétricas y antisimétricas, Dirac arribó simultáneamente a ambas estadísticas cuánticas. Esta proeza parece diluir la pertinencia de la carta emitida por Fermi, como bien sugiere Belloni (1994). En consonancia con la historia de la ciencia, se observa que, una vez más, otros físicos adelantaron a Dirac en la resolución del dilema. No obstante, este hecho no menguó la relevancia ni la recepción de su trabajo dentro de la comunidad científica. De hecho, su contribución fue acogida con entusiasmo y reconocimiento. A partir de ese punto, el análisis estadístico de sistemas de muchas partículas, particularmente de electrones, se erigió bajo el estandarte de la "estadística de Fermi-Dirac". Fue en el año 1947 que Dirac, por iniciativa propia, acuñó los términos "fermiones" y "bosones" para designar a las partículas que obedecen las estadísticas de Fermi-Dirac y Bose-Einstein, respectivamente.

A pesar de todo lo anterior durante las alborotadas semanas iniciales del trimestre de 1927, Dirac se sumergió en la profundidad del problema de fusionar la teoría cuántica con la relatividad, sin que los frutos de su labor germinaran. Es así que, al llegar a fines de octubre, decidió concederse un respiro, un momento de pausa que lo condujo, por vez primera, a ocupar un asiento en la mesa magna de los eruditos de la física reunidos en la Conferencia Solvay, cuyas huestes se congregaban en la ciudad de Bruselas.

Esta asamblea, erigida con la noble intención de congregar a una selecta constelación de mentes preclaras, alrededor de una veintena de los más excelsos físicos del orbe, con el propósito de reflexionar sobre los enigmas y dilemas que la teoría cuántica insinuaba en el tapiz de la realidad.

En aquel año de 1927, Einstein, aún en su pleno apogeo, se alzaba como una figura eminente, aunque no coronada en el reino de la física. Atravesaba el umbral de la mediana edad, conservando su carisma y humildad, pero evidenciando un matiz de brusquedad y desencanto. En su búsqueda solitaria de una teoría unificada que fundiera la gravedad con el electromagnetismo, se resistía a abrazar la incertidumbre inherente a la mecánica cuántica, prefiriendo las seguras sendas de la física clásica.

La Conferencia Solvay se estableció como un monumento en el templo de la física, donde los titanes del pensamiento chocaron como estrellas en el firmamento. Fue en este foro donde Einstein, por primera vez en público, expresó su discrepancia con la mecánica cuántica, aunque no consiguió menoscabar la confianza de Bohr y sus jóvenes colegas. Bohr, defensor feroz del principio de incertidumbre de Heisenberg, resistió

con la tenacidad del espíritu ante los embates de Einstein. La mayoría de los presentes hallábase fascinada por el duelo intelectual entre ambos titanes.

Para Dirac, sin embargo, aquellos debates eran solo un murmullo lejano en el vasto silencio del universo. Como el observador solitario en un extenso paisaje, contemplaba las disputas con indiferencia. Como diría tiempo después:

"He escuchado sus argumentos, mas no me he alineado con ninguno, principalmente porque no me suscitan mayor interés... Consideré que la esencia del quehacer de un físico matemático radicaba en obtener las ecuaciones correctas, dejando la interpretación de dichas ecuaciones en un plano de importancia secundaria" (Farmelo, 2009).

Durante la Conferencia Solvay, Dirac ofreció una exposición sobre su reciente concepción teórica concerniente al campo de la luz. Inmediatamente después de su disertación, en un intervalo fugaz previo al comienzo de otra conferencia, Niels Bohr indagó sobre el nuevo rumbo de la mente de Dirac, este expuso su anhelo por una teoría cuántica relativista del electrón. Bohr en su desconcierto, evoco: *"Pero Klein ya ha resuelto este problema"*(Dirac, 1978).

La conferencia comenzó antes de que Dirac tuviera la oportunidad de replicar, y así, la interrogante quedó suspendida en el éter del discurso, donde encontró residencia; Bohr y Dirac no lograron retomar el hilo de su diálogo antes de que la conferencia se disolviera en las corrientes del tiempo. Fueron necesarios tres meses más para que Bohr reconociera su yerro, cuando la deslumbrante resolución de Dirac al problema llegó a su conocimiento.

Más tarde, en un acto de introspección científica, Dirac reflexionaría:

"...Trate de esbozar a Bohr mi insatisfacción con la solución propuesta por Klein, anhelando respaldarla con argumentos sustanciales, pero mis esfuerzos se vieron truncados por el inoportuno inicio de la siguiente conferencia, interrumpiendo así nuestra conversación. Pero más bien me abrió los ojos al hecho de que muchos físicos estaban bastante complacientes con una teoría que implicaba una partida radical de las leyes básicas de la mecánica cuántica, y no sentían la necesidad de mantenerse fieles a estas leyes básicas de la manera en que yo lo sentía." (Dirac, 1978)

Al retornar de Bruselas a Cambridge, se sumergió todo el mes de noviembre inmerso en la penumbra de su estudio. Allí, entre las estrechas paredes que alojaban únicamente un modesto escritorio plegable, de aquellos que evocan la infancia escolar, una silla de simple factura, un fogón de carbón y un "sofá muy antiguo", según lo describió algún visitante afortunado (Crowther, 1881). Dirac encontró el santuario propicio para sus indagaciones científicas. Cambridge, con su ambiente favorable, le brindó el lienzo perfecto para la danza de su mente. Allí, podía entregarse a su labor sin distracciones mundanas, sumergido en la danza sutil de las ideas, sólo interrumpido por las modestas exigencias de la vida académica: conferencias, seminarios y las peregrinaciones a la biblioteca.

En aquel momento, Dirac estaba íntimamente familiarizado con la teoría del espín, incluyendo sus aplicaciones en el análisis de espectros. En sus apuntes de conferencias, señalaba también las limitaciones de esta teoría, reconociendo su incapacidad para armonizar más allá del primer orden con la fórmula de la estructura fina de Sommerfeld (Kragh, 1990). Aunque atormentado por las cuestiones del espín, Dirac no se aventuraba aún en la búsqueda de una teoría más satisfactoria. La concepción de una ecuación de onda relativista le preocupaba, mas no vinculaba aún este problema con el concepto del espín. Al contrario, Dirac creía que su teoría aún no concebida describiría una partícula exenta de espín, supuestamente el más simple de los entes físicos: solo después de que se erigiera la teoría para esta hipotética partícula esperaba integrar el concepto del espín.

Conscientemente, Dirac reconocía la imposibilidad de deducir la ecuación desde los primeros principios de las teorías cuánticas, entendiendo que solo podría vislumbrarla a través de una conjetura afortunada. En todo caso, lo que podía hacer era delimitar las posibilidades, estableciendo los atributos que debía ostentar la ecuación y las cualidades que debía encarnar. En vez de enzarzarse en la manipulación de ecuaciones preexistentes, adoptó una perspectiva más elevada, tratando de desentrañar los principios subyacentes de la teoría que anhelaba, antes de plasmar sus visiones en el idioma matemático.

Como era su costumbre, Dirac trabajaba en solitario, en casi absoluto secreto. Hallaba en este aislamiento el terreno más fértil para su creatividad y rara vez compartiendo sus cavilaciones con otras mentes ávidas de conocimiento. Nevill Francis Mott (1905-1996) quien en aquel entonces mantenía una estrecha relación con Dirac, recordaba que:

"Todos los descubrimientos de Dirac simplemente se me presentaban y allí estaban. Nunca lo escuché hablar de ellos, ni lo vi discutirlos con nadie. Simplemente, emergían de la nebulosa del pensamiento" (Kragh, 1990).

2.4. La Sinfonía de Paul Dirac

En su célebre artículo de 1928, planteó una cuestión que refleja su profundo cuestionamiento filosófico: *"La pregunta sigue siendo por qué la Naturaleza debería haber elegido este modelo particular para el electrón en lugar de estar satisfecha con una carga puntual"* (Dirac, 1928a). En consecuencia, abordó la concepción del electrón como una carga puntual.

El punto de partida de la indagación de Dirac radicaba en la expectativa de que la interpretación de la teoría cuántica relativista debería ser tan general como la de su contraparte no relativista. Es decir, aspiraba a que los principios fundamentales de la teoría cuántica se aplicaran de manera consistente tanto a partículas diminutas como a aquellas que se movían a velocidades próximas a la de la luz.

En su mente, la relatividad y la mecánica cuántica no eran meras abstracciones matemáticas, sino las claves que desbloquearían los misterios del universo. En armonía con su visión holística de la física, se dejó

guiar por dos imperativos de invarianza: en primer lugar, las propiedades espaciotemporales de la ecuación debían adecuarse a la teoría de la relatividad; y, en segundo lugar, las propiedades cuánticas deberían transformarse según su teoría de la transformación de la mecánica cuántica. Esto implicaba que las características cuánticas de la ecuación, como la conservación de la probabilidad, debían regirse por las leyes estándar de la mecánica cuántica (Moyer, 1981).

Dirac identificó que este último requisito invalidaba la teoría de Klein-Gordon, ya que una ecuación de onda cuadrática en la derivada temporal no garantizaba una interpretación clara de la probabilidad, un aspecto crucial en la mecánica cuántica. Aquí, en este cruce de caminos, Dirac tomó una decisión audaz: la ecuación de onda debía ser **lineal** para que la probabilidad emergiera con claridad (Dirac, 1928a).

Sin embargo, se encontró con obstáculos matemáticos derivados del operador de raíz cuadrada: que parecía generar una ecuación diferencial de orden infinito. Esto no solo representaba un desafío desde el punto de vista matemático, sino también desde la perspectiva de la relatividad, ya que la simetría entre la energía y el momento no se preservaba de manera adecuada según la invarianza de Lorentz.

$$H^2 = p^2 c^2 + m_o^2 c^4 \quad (3)$$

$$H = c\sqrt{p^2 + m_o^2 c^2} \quad (3.1)$$

En el contexto de la ecuación 3 y 3.1 presentada, donde H representa el hamiltoniano relativista, c la velocidad de la luz, p el momento lineal y m_o la masa en reposo.

En el trasfondo del enigma, germina en la inquietud creativa de Dirac: ¿Podría la raíz cuadrada representada en la ecuación 3.1 ser dispuesta de manera distinta? Dirac, en su anhelo de resolver tal enigma, vislumbró la posibilidad de dotar a la raíz cuadrada de una linealidad singular, un giro conceptual que trasciende las fronteras del convencionalismo matemático. Contempló la noción de que, mediante esta metamorfosis algebraica, podría desentrañarse el dilema que lo aquejaba, iluminando así los senderos ocultos del conocimiento. Ante este enigma, muchos habrían buscado refugio en la sabiduría colectiva de los eruditos, invocando el auxilio de los eminentes algebraistas germanos. Sin embargo, Dirac no era un espíritu que se inclinara ante la súplica del conocimiento ajeno. Con el temple de un verdadero buscador del saber, resolvió confrontar el desafío a su manera, inmiscuyéndose en el laberinto de las matemáticas con una determinación impertérrita. *"Jugando con las matemáticas"* (Farmelo, 2009), así lo expresó, en una alusión a la danza de la mente con los números, encontró el camino hacia la solución, elevándose sobre los límites convencionales del pensamiento y revelando, una vez más, el poder de la mente humana para trascender las fronteras de lo conocido.

En el devenir de la exploración científica, surge una revelación que trasciende los límites del mero cálculo y penetra en las profundidades del pensamiento filosófico. Tal es el caso que se presenta ante nosotros, donde la mente inquisitiva de Dirac, como narra Kragh (1990), se enfrenta a la incógnita de una identidad aparentemente simple pero profundamente significativa:

$$\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2} = \sigma_1 p_1 + \sigma_2 p_2 + \sigma_3 p_3 \quad (4)$$

donde p_1, p_2 y p_3 son los componentes del momento lineal, una representación de la energía de una partícula en términos de su momento lineal, en el contexto de la relatividad especial. Por otro lado, σ_1, σ_2 y σ_3 denotan las matrices de Pauli (Pero en ese momento no se tenía una interpretación). Esta ecuación emerge como parte del intento de Dirac por hallar una descripción relativista del electrón. La forma radical en el lado izquierdo encapsula la energía total de la partícula en función de su momento, mientras que, en el lado derecho, los términos delimitan la contribución de cada componente del momento a la energía total, elaborada en forma lineal¹⁹.

Esta ecuación, en su inicial esbozo, resultó ser incompleta, al no incorporar un término que abordara la masa, dejando así su aplicabilidad al electrón nula. Ante este desafío, Dirac se vio compelido a someter la ecuación a una reevaluación profunda.

La posibilidad de generalizarla a cuatro cuadrados, en lugar de tres, sugeriría una solución más viable, permitiendo una linealización deseada para capturar completamente los efectos relativistas:

$$\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + (m_0 c)^2} = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 + \alpha_3 p_3 + \alpha_4 m_0 c \quad (5)$$

Sin embargo, en la travesía intelectual de Dirac, una pregunta asalta su mente: ¿existen coeficientes que, al elevar al cuadrado ambos lados de la ecuación, exijan que los cuadrados de las alfas sean unitarios y sus términos cruzados sean nulos, para preservar la equidad? Este cuestionamiento desemboca en un conjunto de condiciones imperativas:

$$\begin{aligned} \alpha_\mu \alpha_\nu + \alpha_\nu \alpha_\mu &= 0 \quad (\mu \neq \nu) \\ \alpha_\mu^2 &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Dirac, en su viaje hacia la verdad, se enfrenta a la necesidad imperiosa de reconciliar su ecuación cuántica con la expresión relativista de la energía. En este desafío, emerge un hito fundamental al descubrir que los coeficientes introducidos deben obedecer a reglas no conmutativas y, al mismo tiempo, deben retornar a la identidad al ser elevados al cuadrado. Aquí, la filosofía se entrelaza con las matemáticas, y Dirac, en su intrépido viaje hacia la verdad que se ha relatado, recuerda el trabajo Heisenberg, lo que implicaría la mecánica matricial. Interpretando los coeficientes α como matrices.

¹⁹ En la búsqueda de la simplicidad en la complejidad, Paul Dirac exploró las profundidades de la física cuántica. En su viaje, anhelaba la armonía matemática, la transformación del hamiltoniano de segundo orden en uno de primer orden. En este deambular entre ecuaciones, encontró en la raíz cuadrada un reflejo de la belleza pura.

No obstante, es este descubrimiento no disipó por completo las sombras del enigma. La misteriosa hermeticidad²⁰ del Hamiltoniano insinuaba que estas matrices debían también ser portadoras de la luz de la hermeticidad. Dirac, consciente de que un conjunto de condiciones similares es satisfecho por las matrices de espín. Parece que en su camino hacia la verdad, Dirac y Pauli han tropezado con el mismo hallazgo de manera independiente, como sugiere la cita: "*Creo que obtuve estas (matrices) independientemente de Pauli, y posiblemente Pauli también las obtuvo independientemente de mí*" (Pais et al., 2005).

Más tarde Dirac recordaría que el propósito principal:

"No estaba interesado en incorporar el espín del electrón en la ecuación de onda, ni siquiera contemplaba la pregunta. No utilicé el trabajo de Pauli. El enfoque principal de mi investigación era desarrollar una teoría relativista consistente con mi interpretación física general y la teoría de transformación. Por lo tanto, fue una gran sorpresa para mí cuando más tarde descubrí que el caso más simple sí involucraba el espín" (Pais et al., 2005).

Ya con ello y en su búsqueda constante de una ecuación de onda relativista que armonice con la densidad de probabilidad positiva, Dirac se ve compelido a enfrentar una verdad inevitable: la imposibilidad de añadir una cuarta matriz a las tres de Pauli y las suyas propias. Este veredicto, aunque preconizado por los sabios matemáticos de la era, revela una realidad inquebrantable: para matrices cuadradas de dimensión $N \times N$, el número máximo de matrices hermíticas e independientes, que anticonmutan entre sí, está dado por $N^2 - 1$. Así, Dirac exploró la posibilidad de tomar $\alpha_1 = \sigma_1$ y buscó un candidato para α_4 , de dimensión 2×2 , sin embargo, se vio enfrentado a la dura realidad de que dicho candidato no existe. Es en este punto donde se hace patente que trabajar con matrices 2×2 simplemente no sería suficiente para dar cuenta de la complejidad inherente a la realidad física que buscamos modelar.

Dirac persistió en su exploración de las matrices, explorando y jugando. Como él mismo expresaría con una serenidad característica tiempo después:

"Me llevó bastante tiempo ... antes de darme cuenta de que no había necesidad de ceñirse a cantidades, las cuales pueden representarse mediante matrices con solo dos filas y columnas. ¿Por qué no ir a cuatro filas y columnas?" (Moyer, 1981).

Con esta semilla de pensamiento arraigada en su mente, Dirac trazaría en su artículo el siguiente esbozo conceptual:

"Ahora debemos encontrar cuatro matrices α que satisfagan las condiciones. Hacemos uso de las matrices que Pauli introdujo para describir las tres componentes del momento angular de espín. Estas matrices tienen justo las propiedades que requerimos para nuestros α (alfas). Sin embargo, no podemos

²⁰ Esta propiedad garantiza que los valores propios de tal operador, aquellos que encarnan las energías intrínsecas del sistema, se manifiesten en la plenitud de su realidad.

simplemente tomar los α 's como tres, porque entonces no sería posible encontrar el cuarto (α_4). Debemos extender las alfas diagonalmente para incluir dos filas y columnas más, de modo que podamos introducir otras tres matrices, p_1, p_2, p_3 , de la misma forma que $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, pero refiriéndose a filas y columnas diferentes".

Con esta epifanía, Dirac logró vislumbrar las piezas del puzzle cósmico, una sinfonía matemática que armonizaba con la danza de las partículas subatómicas. Las cuatro matrices que emergieron de su mente inquisitiva, como pétalos de una flor cósmica, revelaron la estructura oculta del universo en su esencia más fundamental, conocidas desde entonces como las matrices de Dirac²¹:

$$\alpha_1 = \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Con esta elegante linealización, Dirac superó el obstáculo inicial. La formulación de la ecuación de onda para un electrón libre adquirió una simplicidad relativa, como lo demuestran las ecuaciones que guiaron directamente hacia la ecuación de Dirac, de esta forma transformó un problema físico en uno matemático, y la lógica matemática lo llevó a aceptar el uso de matrices 4×4 como coeficientes. Esto, a su vez, implicó la aceptación de una función de onda de cuatro componentes $\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4)$. Aunque audaz, esta propuesta carecía de justificación física para las dos componentes adicionales (Kojevnikov, 2020). Que más adelante se hará un análisis.

Dirac, en su incansable búsqueda, de la verdad oculta tras los velos del universo, se adentró en un viaje intelectual que desafiaba tanto las convenciones establecidas como las fronteras mismas del conocimiento humano. Con la determinación de un navegante solitario en el vasto océano del pensamiento, probó ecuación tras ecuación, desechando cada enigma que no se ajustaba a los delicados equilibrios de sus principios teóricos o a las realidades palpables reveladas por la experimentación.

Pese a ello, no fue sino hasta el ocaso de noviembre o los primeros fulgores de diciembre de 1927 que su mente fecunda engendró una ecuación de singular promesa, cuya consistencia abrazaba tanto la relatividad especial como la mecánica cuántica en un armonioso y novedoso matrimonio.

Esta ecuación, lejos de las formas familiares que habían habitado las mentes de los teóricos que se han descrito hasta este momento, describía al electrón no como una mera onda de Schrödinger, sino como una danza de cuatro partes entrelazadas.

La elegancia formal de la ecuación, aunque innegablemente atractiva, se volvía irrelevante si no se traducía en predicciones coherentes con la naturaleza del electrón y las interacciones que se han nombrado

²¹ En su artículo, Dirac despliega un universo de matrices y tratamientos matemáticos, donde la elegancia de sus ecuaciones se entrelaza con la profundidad de su pensamiento. Se invita al lector a consultarlo.

(efecto Zeeman y Paschen-Back) (Dirac, 1928b). Así, se planteó la cuestión fundamental ¿qué revelaba la ecuación acerca del espín del electrón y su campo magnético?

Así, Dirac se enfrentó al desafío de demostrar su lógica, su conformidad tanto con los dictados de la razón como con las leyes empíricas que gobiernan nuestro mundo. Forjada con los más puros principios de la mecánica cuántica, la ecuación de Dirac logró pasar la rigurosa prueba de la invariancia de Lorentz, cumpliendo así con los requisitos formales establecidos por los maestros de la teoría.

Pero ¿qué de su aplicación en la áspera realidad experimental? Para poner a prueba su poder predictivo, no bastaba un electrón en libertad; debía interactuar con su entorno, con un campo electromagnético. Dirac, consciente de esta necesidad, sometió su ecuación a un riguroso escrutinio experimental, examinando su capacidad para describir el comportamiento de un electrón inmerso en un campo electromagnético. Esto requería ciertas manipulaciones matemáticas, como la sustitución de algunas cantidades por otras, utilizando un Hamiltoniano específico. Después de algunas manipulaciones matemáticas, Dirac pudo reformular su ecuación original en una forma más útil para la descripción de partículas subatómicas en campos electromagnéticos.²²

Uno de los hallazgos más trascendentes de esta odisea intelectual fue la anticipación, en palabras del propio Dirac: "Este momento magnético es justo el asumido en el modelo de electrón de espín" (es decir, en la teoría de Pauli).

Sin recurrir al espín como una verdad previa, Dirac lo dedujo de los cimientos mismos sobre los cuales su ecuación fue erigida. Este triunfo, monumental y sorprendente, reveló una profunda sinfonía entre la mente humana y los secretos del universo.

Su ecuación, en su esencia, pintaba un retrato familiar del electrón, aquel intrépido vagabundo del mundo subatómico que desafía nuestra comprensión. Más aún, su mera existencia proclamaba la obsolescencia de añadir el espín como suplemento a la descripción cuántica estándar de la partícula. La ecuación, en su majestuosidad, sugería que, si los teóricos no hubiese previamente teorizado el espín, estas propiedades podrían haber sido profetizadas utilizando los fundamentos de la relatividad especial y la mecánica cuántica (Farmelo, 2010).

La ecuación era "dolorosamente hermosa", como la describió más tarde el físico teórico Frank Wilczek (nacido en 1953) diría: *"al igual que las ecuaciones de la relatividad general de Einstein, la ecuación de Dirac era universal pero fundamentalmente simple; nada en ella podía cambiarse sin destruir su poder"* (Baer et al., 2003).

²² Este segmento se encuentra exhaustivamente desarrollado en el artículo seminal de Paul Dirac de 1928, "The Quantum Theory of the Electron".

La conclusión de Dirac se basó en su confianza en el poder del razonamiento matemático en el ámbito de la física. De hecho, la teoría de Dirac sobre el electrón ejemplifica de manera elocuente lo que Wigner ha denominado *"la efectividad irrazonable de las matemáticas en las ciencias naturales"* (Kragh, 1990).

Si Dirac hubiera seguido una lógica empirista, no habría introducido términos "metafísicos" como las matrices 4×4 . Como reconoció Darwin al comparar el trabajo de Dirac con el suyo propio:

"El éxito de Dirac en encontrar las ecuaciones precisas muestra la gran superioridad del principio sobre el método empírico anterior".

Años después, Dirac reflexionaba sobre su proceso:

"Mirando hacia atrás, me resulta extraño que me costase tanto tiempo resolver un aspecto tan elemental" (Farmelo, 2009).

En el fervor de su éxtasis, una sombra de temor se deslizaba furtivamente por su ser, pues su teoría, en sus albores, yacía estéril, sin engendrar ni un solo resultado tangible, sin esclarecer ningún fenómeno experimental que no hubiera sido ya abrazado por las teorías predecesoras. En su artículo, Dirac demostró que, en su primera interacción, la nueva teoría conducía a niveles de energía para el átomo de hidrógeno que concordaban con las concepciones establecidas por Darwin y Pauli; delineando así la fórmula aproximada de la estructura fina. Sin embargo, renunció a avanzar más, a adentrarse a buscar una solución exacta que, con suerte, revelara la fórmula precisa de la estructura fina. En su memoria, ni siquiera intentó desentrañar una solución exacta, sino que se contentó con una aproximación inicial:

"Tenía miedo de que quizás no salieran bien [las correcciones de orden superior]. Tal vez toda la base de la idea tendría que ser abandonada si resultaba que no estaba bien en los órdenes superiores, y simplemente no podía enfrentar esa perspectiva. Así que escribí apresuradamente un artículo dando el primer orden de aproximación y mostrando que era preciso; al menos, teníamos acuerdo entre la teoría y el experimento. De esa manera estaba consolidando una cantidad limitada de éxito que sería algo en lo que uno podría apoyarse independientemente de lo que el futuro deparara. Uno teme mucho la necesidad de algún éxito consolidado en circunstancias como esa, y estaba muy apurado por publicar esta primera aproximación antes de que pudiera ocurrir algo que lograra echar por tierra todo el asunto" (Kragh, 1990).

Dirac era consciente de la encarnizada competencia que se desataba en la búsqueda de la correcta ecuación relativista del espín. Sabía que otros eruditos de la física también exploraban senderos similares, lo cual avivaba en su interior una llama de determinación motivada, quizás, por el vértigo de la incertidumbre ante el porvenir. No quería ser vencido en la carrera, un destino que ya había experimentado varias veces como se ha mencionado.

Solo al acercarse el momento de su partida hacia Bristol, en las brumas de las vacaciones de Navidad, que Dirac rompió su letargo intelectual y se encontró con su camarada, Charles Darwin. En donde las palabras fluyeron como ríos desbordados, llevando consigo la revelación que había permanecido oculta en las sombras de la mente de Dirac.

Fue entonces, en el día de San Esteban, cuando la pluma de Darwin trazó palabras que resonarían en los anales del conocimiento humano. En una carta larga y reflexiva dirigida a Bohr, Darwin compartió la luz que emanaba del genio de Dirac: "*[Dirac] ahora posee un sistema de ecuaciones completamente nuevo para el electrón, capaz de desentrañar el enigma del espín en todas sus manifestaciones, y parece ser 'la cosa'*"(Farmelo, 2009).

Fue así como Bohr, descubrió que su creencia previa - aquella afirmación hecha en la Conferencia de Solvay, de que el dilema de la ecuación relativista para el electrón ya había sido resuelto - se desmoronaba ante la magnificencia del descubrimiento de Dirac.

La revelación de la nueva ecuación de Dirac se difundió como el susurro de los dioses en los corredores del cosmos cuántico, ondeando entre las mentes brillantes impregnados de su esencia antes incluso de su proclamación formal. Como Hermes, Fowler asumió el rol de mensajero de la sabiduría, llevando consigo el mensaje a las venerables páginas de los Proceedings de la Royal Society. La recepción fue un estallido de júbilo colectivo, una oda a la mente iluminada de Dirac

La respuesta fue una ola de entusiasmo. Leon Rosenfeld (1904-1974), cuya mente se sumergía en las profundidades del pensamiento junto a Born en Gotinga, recordó que la deducción del espín era considerada como un prodigio. La sensación colectiva era de asombro, una sensación de que Dirac había tejido más allá de lo que los límites de lo esperado permitían. *¡Hacer física de esa manera no se hacía!* La ecuación de Dirac fue prontamente consagrada como una epifanía, un verdadero acto de magia en el dominio del pensamiento humano (Farmelo, 2009).

Desde las tierras de Leipzig, Heisenberg, con su mente afilada como una espada de Damocles, buscaba desentrañar los misterios ocultos en los pliegues de la ecuación de Dirac, escribiéndole:

"Admiro enormemente tu último trabajo sobre el espín. Tengo algunas preguntas, especialmente: ¿obienes la fórmula de Sommerfeld en todas las aproximaciones? Entonces: ¿cuáles son las corrientes en tu teoría del electrón?" (Kragh, 1990).

En las dos semanas posteriores a la presentación de su artículo desde las tierras de Hamburgo, Walter Gordon alzó la voz para comunicar a Dirac el fruto de sus propias indagaciones, revelando cómo había derivado la fórmula exacta de la estructura fina a partir de la nueva ecuación. Este mensaje de camaradería intelectual se convirtió en la respuesta a la pregunta de Heisenberg.

Posteriormente, Darwin entre tanto, no pudo sino rendirse ante el genio de Dirac, aunque confesó encontrar la teoría del maestro inglés tan compleja como un enigma sin descifrar. Para él, la comprensión solo llegaba al transcribirla en términos más convencionales, como si la mente humana, aún asombrada, necesitara del velo de lo familiar para penetrar en los abismos de lo desconocido.

El triunfo de Dirac se alzaba sobre las ruinas de la antigua teoría cuántica, desafiando las leyes establecidas con la majestuosidad de un coloso. La fórmula de Sommerfeld, un eco del pasado resonaba en perfecta armonía con la visión de Dirac, como si los hilos del destino hubieran tejido un tapiz que conectaba los misterios del pasado con las revelaciones del presente. La pregunta, etérea y evocadora, se alzaba en el horizonte del pensamiento: ¿cómo podía la antigua teoría de Bohr, desprovista de cualquier noción de espín, arrojar luz sobre los mismos misterios que la teoría de Dirac? Pero esta pregunta, más que un desafío, se erigía como una joya de la curiosidad histórica, una pregunta que acariciaba la mente de los físicos sin perturbar su serenidad.

En el vasto teatro de la física, de aquel entonces, varias mentes intentaban forjar una teoría del espín relativista. Entre los protagonistas de esta narrativa científica, destacaron nombres como el de Hendrik Kramers, cuyo esfuerzo en Utrecht emergió con una descripción cuántica aproximada de un electrón en rotación relativa. Como un poeta de los números, Kramers tejía una ecuación de onda de segundo orden que, al final del acto, se reveló como un ballet de simetría con la majestuosa ecuación de Dirac. Pero cuando se enteró de la teoría de Dirac, quedó profundamente decepcionado, y este sentimiento evolucionó hacia una continua frustración con respecto a la física de Dirac.

En paralelo, en los salones de Gotinga, resonaban los ecos de Eugene Wigner y Pascual Jordan, cuyas miradas se perdían en los pliegues del espacio-tiempo, en la búsqueda de una extensión que abrazara la relatividad en la teoría del espín de Pauli. Aunque sus escritos nunca encontraron la luz de la publicación. En el recuerdo de Jordan, resonaba una confesión melancólica: *"Hubiera sido mejor haber encontrado la ecuación, pero la derivación es tan hermosa y la ecuación tan concisa que debemos estar felices de tenerla"*. No obstante, al presenciar cómo su rival se alzaba con el premio, Jordan se sumió en una profunda depresión.

Mientras tanto, en los rincones de Leningrado, Yakov Frenkel, Dmitri Iwanenko y Lev Landau se sumergían en el abismo de los cálculos tensoriales, persiguiendo sombras de teorías que, si bien compartían ecos con la obra maestra de Dirac, carecían de la misma sublime belleza y sorprendente simplicidad.

En el rincón más íntimo de la historia, se escribe un relato de inevitabilidad: la ecuación de Dirac, una sinfonía del pensamiento, una danza de símbolos que dan forma al universo. Dirac, en su humildad, reconoció que si él no hubiera levantado el velo que ocultaba la ecuación del electrón, Kramers habría sido el artífice, un recordatorio de que, en el teatro de la ciencia, cada descubrimiento aguarda su momento en el escenario de la eternidad (Kragh, 1990).

Un mes transcurrido desde la fulgurante revelación de su primer tratado acerca del electrón relativista, Dirac, se sumerge nuevamente en el océano insondable del conocimiento científico, trazando un camino

intrépido hacia las profundidades del universo subatómico. Demostró teoremas de conservación, calculó reglas de selección y valores propios de desdoblamiento Zeeman y paschen back (Kragh, 1981).

En una carta dirigida a Jordan, Dirac develó los frutos de su diligente labor, en la que los principales resultados afloraron como estrellas en una noche estrellada, brillando con intensidad y revelando la majestuosidad de su descubrimiento. Con una maestría sin comparación, concluyó que todos los fenómenos de doblote, como caprichosas danzas cósmicas, hallaban su morada en las profundidades de su ecuación, tejida con el hilo de la razón y el telar de la inspiración.

Capítulo 3. Luz y Oscuridad en la Cuántica: Perspectivas Inspiradas por Dirac

En el océano del conocimiento humano, inmerso en las profundidades del tiempo y el espacio, los términos que dan forma a nuestro entendimiento del universo a menudo han sido concebidos en las profundidades de la especulación y la ilusión. Entre estos términos, se alza majestuosa la antimateria, una musa de la imaginación que encontró sus primeros ecos en las palabras del ilustre físico Arthur Schuster (1851-1934) en el año de 1898. Donde publicaría sus ideas en las páginas de Nature nombrado "Potential Matter. A holiday dream. "

Con la pluma de un poeta y la mente de un filósofo, inscribió un testimonio de especulación audaz. En el caleidoscopio de su imaginación, vislumbró un cosmos dual, donde la materia y la antimateria danzaban en una sinfonía cósmica. En su prosa, pintó un paisaje de mundos gemelos, separados por el abismo de la antigravedad, donde los elementos familiares se reflejaban en un espejo cósmico, ocultando su verdadera naturaleza hasta el momento del encuentro.

Y así, como la brisa que acaricia la piel, el sueño de Schuster se desvanece ante la mirada austera de la ciencia, que demanda rigurosidad y prudencia. Al final de su epopeya intelectual, Schuster, como un navegante que regresa a puerto seguro, reconoce la necesidad de recoger las velas del sueño y anclar en la realidad, aunque la pregunta persista en el eco de sus palabras: ¿Acaso los sueños, en su éter inmaterial, alguna vez se hacen realidad? (Schuster, 1898).

Sin embargo, esta visión, tejida con los hilos dorados de la imaginación, no era sino un destello fugaz en el vasto firmamento del conocimiento. La antimateria de Schuster, una quimera relacionada más con la danza de la antigravedad que con los sutiles matices de las cargas eléctricas, no compartía sino el nombre con el concepto posteriormente delineado por las manos de la ciencia moderna. Como los versos de un poema olvidado, esta especulación inocente se desvaneció en el tiempo, dejando tras de sí el eco lejano de un sueño no realizado.

Retomando los últimos avances paradigmáticos trazados por Dirac en sus emblemáticos trabajos, se adentra en un reino de fascinación y desconcierto, donde la teoría del electrón, tejida con los hilos de la relatividad, despliega un aura de misterio y revelación. La teoría diraquiana del electrón, cual crisol

alquímico, transformó la faz de nuestra comprensión del universo, confiriendo a la ecuación relativista una vida propia, repleta de sorpresas y sutilezas insondables que el mismo Dirac apenas esbozaba en su creación.

Entre las sombras y las luces que habitan en el alma del universo, emergen dos metáforas entrelazadas: la magia y la enfermedad, Oppenheimer, en su prodigiosa elocuencia, no titubeó al conjurar ambas imágenes en una yuxtaposición estrecha (Moyer, 1981). La magia se insinuaba en la generación casi mística de propiedades electrónicas a partir de consideraciones formales, mientras que la enfermedad se infiltraba en la perturbadora predicción de propiedades aún no observadas.

La magia se observa, con las palabras de John Van Vleck las cuales resuenan como un eco en el vasto abismo de la comprensión humana. Comparando la explicación de Dirac sobre el espín del electrón con el acto mágico de extraer conejos de un sombrero de seda. Y en la estela de su genio, John Slater, compañero de Van Vleck en Harvard, alabó la capacidad intuitiva de Dirac como única en su género, insinuando la manifestación de un poder que trascendía las fronteras del entendimiento científico (Farmelo, 2009).

Aunque en sus albores la teoría parecía despojada de un poder predictivo concreto, pronto se reveló fructífera para los alquimistas experimentales. En Cambridge, en septiembre de 1928, Klein y Nishina informaron sobre su uso de la "dinámica relativista más racional de Dirac" para calcular la intensidad y polarización de la dispersión de Compton. Sus resultados concordaron con experimentos "mejor que" los cálculos previos de Dirac y Gordon quienes desentrañaron los secretos de la dispersión relativista bajo la mirada atenta de la ecuación de Dirac, en una danza cósmica de partículas y energías. El resultado, conocido como la fórmula de dispersión de Klein-Nishina²³, llamó aún más la atención sobre la extrañeza intrínseca de la teoría de Dirac, ya que dependía crucialmente tanto de energías positivas como negativas (Klein & Nishina, 1929).

Pero como en todo relato épico, la enfermedad acecha en los oscuros recovecos del descubrimiento. Heisenberg, en su lamento filosófico, teme que la belleza cautivadora de la ecuación pueda estar velando un error fatal. En su desgarradora correspondencia con Bohr, fechada el 31 de marzo de 1928, Heisenberg confiesa:

"He admirado mucho las obras de Dirac; pero encuentro muy perturbador que una teoría aparentemente tan completa como la de Dirac muestre efectos tan terribles como transiciones de energía positiva a negativa" (Bohr, 1985).

Dirac, en su sabiduría, había señalado ya en su primer artículo la anomalía que se escondía en las profundidades de la teoría:

²³ La dispersión Klein-Nishina desempeñó un papel de vital importancia en el tejido mismo de la ecuación de Dirac. Hoy, se erige como una guía indispensable en la física de partículas y la astrofísica. Desde la dispersión de rayos X hasta la creación de pares electrón-positrón, esta distribución nos permite desentrañar los misterios más profundos de la naturaleza.

"...algunas de las soluciones de la ecuación de onda son paquetes de ondas que se mueven de la manera en que una partícula de carga $-e$ se movería en la teoría clásica, mientras que otras son paquetes de ondas que se mueven de la manera en que una partícula de carga $+e$ se movería clásicamente. Para esta segunda clase de soluciones, W [Energía] tiene un valor negativo. Se supera la dificultad en la teoría clásica al excluir arbitrariamente aquellas soluciones que tienen un W negativo..." (Dirac, 1928a).

En perfecta sincronía, Dirac emprendió una serie de viajes a diversos centros académicos, donde disertó acerca de su nueva teoría. Durante la primavera y el verano de 1928, sus travesías lo llevaron a Copenhague, Leiden, Leipzig y por último Gotinga. Fue en Leipzig donde coincidió con Heisenberg en junio, quien acababa de ser designado profesor en dicha universidad, y con quien sostuvo encendidas discusiones que reverberaban en las brumas del pensamiento.

En su coloquio, Dirac advirtió que sus soluciones con la carga positiva no podían ser simplemente desechadas. Contrariamente, el develamiento de una solución aún se erguía como un horizonte lejano: al término de su alocución, aludió brevemente a "las inherentes dificultades en la teoría presente, que aún se encuentran veladas en misterio", admitiendo también que: *"Si sustituimos la carga $-e$ en lugar de $+e$ en la ecuación de onda, deberíamos, como consecuencia del cambio en la naturaleza misma del problema físico, obtener una ecuación de onda substancialmente distinta, aunque en la realidad no se obtiene nada que sea realmente nuevo"* (Dirac, 1928a). Surgió entonces la posibilidad de que el conjunto de soluciones pudiera dividirse en dos categorías, una para cada polaridad de la carga electrónica. Sin embargo, esta concepción solo sería viable en ausencia de transiciones entre ambos grupos.

Lamentablemente, Dirac ya se hallaba consciente de esta limitación, como lo expresó en su obra:

*"Esta tarea no es factible en el contexto de la teoría cuántica, dado que, en términos generales, cualquier perturbación provocará transiciones desde estados con energía positiva a estados con energía negativa. Una transmutación de tal índole se manifestaría experimentalmente como si el electrón, de forma abrupta, alterara su carga de negativa a positiva, un fenómeno que hasta el momento no ha sido observado. Por ende, la auténtica ecuación de onda relativista deberá concebirse de tal modo que sus soluciones se bifurquen en dos conjuntos inconexos, referidos respectivamente a la carga negativa y a la positiva. En el presente estudio, nos limitaremos a abordar la superación de la primera de estas vicisitudes. **La teoría subsiguiente sigue siendo meramente una aproximación**, aunque aparenta ser lo suficientemente robusta como para dar cuenta de todos los fenómenos de dualidad sin necesidad de conjeturas arbitrarias"* (Dirac, 1928a).

Dirac concluyó su artículo con el sentimiento de que sería necesario un cambio importante en la perspectiva para solucionar este problema, y lo conectó con la metafísica del espacio y el tiempo. *'Parece que este problema solo puede resolverse mediante un cambio fundamental en nuestra idea anterior, y tal vez esté relacionado con la diferencia entre el pasado y el futuro'*(Dirac, 1928a).

Heisenberg, en diversos escritos, plasmó la honda frustración que le suscitaba la ecuación de Dirac. En una misiva dirigida a Jordan, señaló: *"Dirac ha traspasado los umbrales de nuestra esfera y ha encabezado coloquios sobre su teoría emergente; no obstante, se ha revelado impotente para desentrañar las intrincadas dificultades que la aquejan"* (Carretero, 2013). En su mente, la absurda predicción de la ecuación, que sugiere la posibilidad de una energía negativa para un electrón libre, atormentaba las fronteras de la comprensión. Esto constituía una clara evidencia de la enfermedad inherente a la ecuación.

En sus letras dirigidas a Bohr, Heisenberg nuevamente expuso su desconcierto: *"Contemplo con desasosiego la situación presente, tan inverosímil y desoladora, que me ha conducido a explorar otros dominios [en el intento de comprender el magnetismo]"* (Carretero, 2013). Un mes más tarde, sumido en una melancolía aún más profunda, Heisenberg confesaba a Pauli: *"El capítulo más triste de la física moderna es y sigue siendo la teoría de Dirac"* (Bolles, 2004). Dirac, consciente de las justas críticas de Heisenberg, cargaba sobre sus hombros la responsabilidad de demostrar que su teoría era algo más que una ilusión encantadora.

Fue así como, el 24 de julio de 1928, Dirac, en su correspondencia con Klein, dejó plasmada su lucha interna: *"Mis intentos por resolver el dilema +e han sido en vano. Heisenberg sostiene que este problema no hallará solución hasta que se forje una teoría que abarque tanto al protón como al electrón"* (Pais, 1986).

Después de concluir su estancia en Gotinga, Paul Dirac optó por embarcarse en un viaje hacia la Unión Soviética. Dos meses de existencia que amalgamaban el deber intelectual de impartir conferencias con el deleite de permitirse momentos de asueto.

En ese año efervescente, donde la poesía de Robert Bridges danzaba en armonía con las disonancias vanguardistas de la música de Arnold Schönberg, y las formas audaces del nuevo arte de Pablo Picasso. De estas formas las universidades europeas se convertían en templos consagrados al culto de la belleza en todas sus manifestaciones. A pesar de ello Dirac no encontraba armonía con tal percepción. Para él, la belleza trascendía el mero espectáculo del arte y la naturaleza. Había vislumbrado su esencia en las ecuaciones de Einstein para la teoría general de la relatividad y ahora, poseía una ecuación propia, no menos significativa en su aporte a la estética científica.

Pero los juicios estéticos, tan profundos y sublimes como pudieran ser, se desvanecen ante la fría mirada de la ciencia si no se alinean con los dictámenes del experimento. A menos que alguien pudiese desentrañar el significado intrínseco de las soluciones de energía negativa a la ecuación de Dirac, esta se hallaría destinada a languidecer en la memoria colectiva como una efímera moda científica, desprovista de trascendencia.

En el crepúsculo del otoño de 1928, Dirac retornó a los pasillos de Cambridge, donde durante seis meses que se extendieron como las hojas que dan paso al invierno, Dirac se sumergió en la tarea monumental de plasmar sus pensamientos en papel, dando forma a lo que con el tiempo sería el epicentro de su legado: su tratado sobre la teoría cuántica (Carretero, 2013).

Fue entonces que, en el torrente de su labor, surcaron nuevas corrientes de indagación en torno a la ecuación que lleva su nombre, arrojando una amalgama de perplejidades sobre el entendimiento ya establecido. Si bien la ecuación para un electrón libre propuesta por Dirac, en su esplendor inicial, parecía otorgar el privilegio de considerar por separado las soluciones de energía positiva y negativa, la inclusión de interacciones en el Hamiltoniano dio paso a una danza de transmutaciones energéticas, donde lo positivo se deslizaba en las fauces de lo negativo, y viceversa (Klein, 1929).

Esta complicación fue trazada con claridad por Klein publicada en marzo de 1928, en lo que se conocería como el "paradigma de Klein". Este delineó que las soluciones de energía negativa no podían ser despreciadas, su presencia inscrita en los anales del comportamiento cuántico con una tinta inicialmente calificada como patológica.

En su trabajo Klein resaltaba la imperativa necesidad de continuidad en el límite entre dos regiones del espacio imponía condiciones restrictivas sobre las ondas que eran transmitidas y reflejadas, garantizando así la adecuada normalización de la densidad de corriente. Sin embargo, esta exigencia planteaba una interrogante crucial: ¿qué proporción de la onda incidente se transmite o refleja conforme a las predicciones emanadas de la Ecuación de Dirac?

Fue Klein quien, mediante una minuciosa exploración, corroboró que, bajo la influencia de un potencial suficientemente intenso, que excedía la energía total del electrón, la función de onda transmitida no seguía un perfil de decaimiento exponencial, como sugeriría la formulación schrödingeriana (Winter, 1959).

Asimismo, el estudio de las probabilidades de transmisión y reflexión evidenciaba un fenómeno desconcertante: un flujo reflejado mayor al flujo inicialmente incidente (Klein, 1929). Este resultado, enigmático en su esencia, encuentra su raíz en la coexistencia de una transmisión de flujo asociada a una carga opuesta a la del electrón incidente; en otras palabras, la onda transmitida se encuentra intrínsecamente vinculada a soluciones energéticas negativas.

En paralelo, Hermann Weyl, con su pluma meticulosa, se encontraba en las brumosas tierras de Princeton, Nueva Jersey, donde trazaría durante el plácido mayo de 1929 senderos audaces en su obra "Elektron und Gravitation. I." Un opúsculo destinado a tejer los hilos sutiles que entrelazan la relatividad general, la mecánica cuántica y la teoría del campo electromagnético, alentando así la búsqueda ferviente de una unificación conceptual.

El autor, en su incansable deambular por el extenso universo del conocimiento, escruta con ojo avizor las aristas entretejidas de la teoría general de la relatividad y las ecuaciones cuánticas de campo que delinean el danzar del electrón giratorio, adentrándose en la oscuridad conceptual para iluminar los misterios de la masa, la invarianza de calibración y el paralelismo remoto. De manera peculiar, Weyl diserta sobre las potenciales modificaciones de la venerada teoría de Dirac, cuya sombra aún se proyecta en las cumbres de la física.

Con astucia matemática y perspicacia conceptual, Weyl señala la imperiosa necesidad de incorporar al campo de ondas asociado al electrón, el campo de ondas del protón en la formulación teórica, en aras de preservar la simetría y la coherencia en el tapiz conceptual que se entreteje. En el espejo de la analogía y la simetría, vislumbramos la inevitable presencia de un campo de ondas para el protón, reflejando la belleza intrínseca de la armonía cósmica. Consecuentemente, ante la necesidad de coherencia y simetría respecto a las partículas elementales constituyentes de la materia, se infiere que uno de los pares de componentes de la magnitud debe albergar en su seno tanto al electrón como al protón (Weyl, 1929).

En este abismo de conocimiento, Dirac mantenía una postura expectante ante los embates de la realidad. En el oscuro abismo de la incertidumbre, anhelaba resolver los enigmas que se le presentaban, aunque en aquellos momentos, los registros de Dirac no revelan indicio alguno de que considerara plausible la interpretación física de las soluciones $+e$ antes del trabajo de Weyl, ni tampoco la paradoja de Klein. En un gesto de introspección, Dirac decidió apartarse temporalmente y emprendió un viaje hacia la Universidad de Wisconsin en Madison, Estados Unidos en 1929. Este viaje marcó su primer encuentro con el continente americano, un territorio nuevo para su mente inquisitiva.

Heisenberg, quien también se encontraba en América y estaba al tanto del viaje de Dirac, le dirigió una carta en marzo del mismo año:

"Dado que entonces no estamos a más de 200 millas de distancia el uno del otro, me gustaría establecer la conexión entre nosotros. ¿Podrías ser tan amable de escribirme si puedo visitarte algún fin de semana, digamos el 6 o el 13 de abril? Entonces estaría interesado en escuchar tu opinión sobre el trabajo de Weyl. Weyl piensa tener la solución de la dificultad de $\pm e$... Antes de irme de Alemania..." (Heisenberg, 2013).

A pesar de todo, la colaboración científica esperada entre Heisenberg y Dirac en Estados Unidos no floreció como se anticipaba. Si bien se encontraron en múltiples ocasiones, tanto en Chicago como en Wisconsin, su tiempo juntos se vio mayormente dedicado a excursiones por las Montañas Rocosas. Mientras Heisenberg impartía apasionadamente conferencias en la Universidad de Chicago sobre "Los Principios Físicos de la Teoría Cuántica", difundiendo así el "espíritu de Copenhague", Dirac también compartía su saber mediante conferencias sobre mecánica cuántica en Madison, presentando incluso un curso muy similar a las líneas de su posterior y renombrado libro "Los Principios de la Mecánica Cuántica". (Heisenberg, 2004)

Durante este periodo estadounidense de Dirac, brotaron numerosas anécdotas, una de ellas fue: tras finalizar un seminario, Dirac fue interpelado por el moderador, quien invitó a la audiencia a plantear preguntas o dudas. En un instante, un individuo se puso de pie y expresó: "Profesor Dirac, no entiendo la ecuación que ha plasmado en la pizarra". Ante este cuestionamiento, Dirac guardó un sepulcral silencio, sumiendo el ambiente en una incómoda tensión. Solo tras la insistencia del moderador, que urgía a una respuesta, Dirac enigmáticamente señaló: "No fue una pregunta, fue un simple comentario" (Carretero, 2013).

Tras un extenso periplo que abarcó desde su travesía por América hasta su incursión en Japón, Dirac retornó a los recintos académicos de Cambridge en octubre de 1929 imbuido en el impulso ferviente de abordar una interpretación física que, a su parecer, dilucidaría las inquietudes inherentes a las soluciones positivas y negativas.

Pero, como los dioses del Olimpo desafiando a los titanes, con su incomparable sabiduría y prestigio, Bohr envió una epístola a Dirac el 24 de noviembre de 1929, señalando las sombras que aún acechaban en el horizonte conceptual. En dicha correspondencia, Bohr, atento a las reflexiones de Oskar Klein, planteó las disyuntivas que avizoraba y manifestó sus inquietudes respecto a la eventual necesidad de una revolución conceptual para solventarlas.

Su carta fue:

"Por parte de [George] Gámov me enteré de que ahora estás de vuelta en Inglaterra nuevamente y que has avanzado en el dominio de las dificultades hasta ahora no resueltas en tu teoría del electrón. Como aún no hemos escuchado detalles al respecto, Klein y yo estaríamos muy agradecidos si fueras tan amable de contarnos algo sobre tus puntos de vista actuales."

Asimismo, Bohr agregó:

"Las dificultades en la mecánica cuántica relativista podrían estar quizás relacionadas con las dificultades aparentemente fundamentales en lo que respecta a la conservación de la energía en la desintegración de los rayos gamma y el interior de las estrellas. Mi opinión es que las dificultades en tu teoría (de 1928) podrían decirse que revelan un contraste entre las demandas de conservación de energía y momento por un lado, y la conservación de las partículas individuales por otro lado." (Moyer, 1981).

Se puede observar que la visión de Bohr se estaba refiriendo a su interpretación recientemente anunciada de la mecánica cuántica, la complementariedad.

La respuesta de Dirac, teñida con la tinta de la erudición y la audacia, digna de ser memorizada, fue una respuesta diligente, delineando su nuevo enfoque ante el desafío planteado. Estas correspondencias marcaron un punto crucial, ya que gran parte del artículo se fundamenta en las ideas intercambiadas con Bohr. Para un acercamiento más profundo de este diálogo intelectual, se invita a revisar la colección completa de cartas en el anexo 3.

En la apacible pero enrarecida atmósfera Bohr, inmerso en la contemplación de las profundidades del campo eléctrico, recibió la epístola de Dirac con una mezcla de fascinación y desconfianza. La respuesta de este último, a pesar de su enigmática sugerencia, no logró aplacar las inquietudes de Bohr, quien compartió su perplejidad con el joven Hendrick Casimir (1909-2000) en Copenhague, argumentando que la sugerencia de Dirac sobre la divergencia del campo eléctrico tendría que ser infinita por lo cual era absurda. Bohr expresó sus reservas también a Heisenberg, quien una vez más manifestó sus objeciones:

"Considero que su nueva teoría se aparta demasiado de cualquier correspondencia con las leyes clásicas, así como con las evidencias experimentales" (Carretero, 2013).

La divulgación pública de la teoría de Dirac, trascendió las fronteras de la formalidad académica para florecer en los canales informales de la comunidad científica. Una conferencia repartida en París a finales de 1929, celebrada con la pompa del escenario intelectual, representó un hito en la exposición inicial de las características esenciales de la teoría, aunque fue la carta dirigida a Bohr la que sembró las semillas de conocimiento en terrenos más íntimos y receptivos.

La difusión inicial, a partir de la carta de Dirac a Bohr, seguida por las narraciones de primera mano de Gámov en Cambridge, encapsula la fluidez del intercambio científico en aquellos tiempos, que compartieron con sus colegas alemanes y rusos. Heisenberg, Jordan y Pauli conocieron la teoría a principios de diciembre, al igual que Ivanenko, Frenkel, Igor Tamm (1895-1971) y Fock (Kragh, 1990).

Dirac, como se muestra, imbuido de una diligencia sin par, remitió gran parte de su disquisición al respecto de los agujeros a dos eminentes intelectos: Niels Bohr y Oskar Klein. A pesar de las objeciones, Dirac decidió presentar su interpretación ante la augusta Royal Society el 6 de diciembre del mencionado año. Posteriormente, en un acto de sinergia académica, compartió sus reflexiones en el Instituto Henri Poincaré a mediados de ese mismo mes.

Este opúsculo, titulado "A Theory of Electrons and Protons", marca el cénit de una meticulosa travesía intelectual donde Dirac comenzó a transformar dudas en conocimiento. Para este apartado se va a realizar un análisis al artículo, dado que contiene las ideas principales que envió a Bohr.

El artículo arranca exponiendo la teoría cuántica de la relatividad, delineando el trajinar de un electrón en el crisol de un campo electromagnético dado. Aunque dicha teoría logra predecir con éxito las propiedades del espín del electrón, aún acarrea una disyuntiva seria, indicando la necesidad imperiosa de una alteración fundamental antes de que pueda ser considerada una descripción precisa de la naturaleza. Además de las deseadas soluciones donde la energía cinética del electrón es positiva, surgen un número igual de soluciones no deseadas con energía cinética negativa para el electrón, "que parecen carecer de significado físico alguno" (Dirac, 1930).

Estas entidades emergen debido a que el Hamiltoniano relativista clásico correspondiente es cuadrático (nombrado en la sección 2.4), cuya ineludible presencia se entiende, pues las perturbaciones de los campos externos deben propiciar transiciones hacia estos estados de energía negativa. Más aún, "en la teoría cuántica precisa donde el campo electromagnético también está sujeto a leyes cuánticas, pueden tener lugar transiciones en las cuales la energía del electrón cambia de un valor positivo a uno negativo incluso en ausencia de cualquier campo externo." Por ello no se podría afirmar "que solo las primeras tienen un significado físico (como se hizo realmente cuando la teoría se aplicó para determinar los niveles de energía del átomo de hidrógeno)". "Por lo tanto, no podemos ignorar los estados de energía negativa sin dar lugar a la ambigüedad en la interpretación de la teoría."

Dirac se enfrentó sin titubeos al desafío de demostrar que, conforme a la ecuación de onda relativista, "un electrón con energía negativa se mueve en un campo externo como si llevara una carga positiva". Este hallazgo, en palabras del propio Dirac, sembró semillas de conjeturas acerca de una posible vinculación entre el electrón de energía negativa y el protón o núcleo de hidrógeno. Sin embargo, sumirse en la simplista suposición de que un electrón de energía negativa es, de facto, un protón, conduce irremediablemente a enigmas irresolubles²⁴.

En primer lugar, tal postura desafía la ley de conservación de la carga eléctrica, pues una transición de un electrón de un estado de energía positiva a uno de energía negativa se interpretaría como la metamorfosis de un electrón en un protón, un acto que contradice las leyes fundamentales de la física, asociadas a la conservación de la masa.

Además, aunque un electrón de energía negativa se comporte en un campo externo como si portara una carga positiva, este fenómeno no exime la necesidad de considerar la conservación del momento, que revela que el campo resultante debe corresponder a una carga negativa.

Por último, la existencia misma de un electrón de energía negativa plantea una paradoja insuperable: al desplazarse a mayor velocidad, su energía decrece, y solo al absorber energía puede ser detenido. Hasta la fecha, ninguna observación ha corroborado la existencia de partículas con tal naturaleza (Dirac, 1930).

En su afán por resolver estas contradicciones inherentes, Dirac advirtió que la solución yacía en la adopción de nuevas perspectivas, trascendiendo los límites de los paradigmas vigentes. En el devenir de la investigación, se atisba un sendero iluminado por la audacia de cuestionar lo arraigado y vislumbrar lo inexplorado.

En consonancia con las reflexiones expresadas en la carta dirigida a Bohr, en su magistral tratado, se esboza la Solución de la Dificultad de la Energía Negativa. Aquí, al exponer la naturaleza de los estados más estables de un electrón, caracterizados por su energía negativa y una velocidad vertiginosa. Surgiendo entonces la noción de un vacío cuántico, una morada en la que se congregan infinitos electrones, cada uno danzando en su propio compás de energía negativa²⁵. La irrupción del principio de exclusión de Pauli se establece como un guardián inflexible, impidiendo que más de un electrón colinde en un mismo estado.

Este escenario plantea un dilema intrigante: ¿cómo es posible que, con la potencial abundancia de electrones en el universo, nunca se haya observado su estabilidad en los estados más bajos de energía?

²⁴ Se podría afirmar que, en este punto, Dirac estaba familiarizado con la labor de Weyl, quizás por la carta de Heisenberg. No obstante, optó por no considerarla de manera literal.

²⁵ En el crepúsculo de 1934, Dirac esculpió una metáfora sublime, por la cual se conoce actualmente: los 'electrones de energía negativa de distribución uniforme'. Como Tales, evocó el vacío como un mar, donde cada partícula era una burbuja en su danza cósmica. Un protón, como una burbuja en el mar, y un electrón, como una gota de rocío en el aire.

Dirac nos invita a adentrarnos en la contemplación de un cosmos habitado por electrones, donde los estados yacen ya ocupados, salvo algunos rezagados, inmersos en un océano de baja velocidad. Es aquí, en este rincón de la teoría, donde la poesía de la ciencia se manifiesta en su esplendor. Pues si la uniformidad reinara soberana, serían invisibles a nuestros ojos, enmascarados por la perfecta armonía. Solo las pequeñas disonancias, las anomalías que surgen de aquellos estados desocupados de energía negativa, nos serían reveladas. Tal como ocurre en el laboratorio.

Dirac nos incita una vez más a examinar la naturaleza de estas pequeñas disonancias, sugiriendo que, si algunos estados de energía negativa permanecen deshabitados, dichos vacíos, o "huecos", podrían manifestarse como entidades tangibles y observables: "Solo las pequeñas desviaciones de la uniformidad exacta, provocadas por algunos de los estados de energía negativa no ocupados, podemos esperar observar".²⁶

En su artículo, Dirac explora estos huecos, equiparándolos a los niveles de rayos X en un átomo densamente poblado por electrones. Donde menciona:

"...Según la teoría habitual de los niveles de rayos X, el hueco que se forma cuando se elimina uno de los electrones internos del átomo se puede describir como una órbita y se representa como la órbita del electrón que falta antes de que fuera eliminado. Esta descripción puede justificarse por la mecánica cuántica, siempre que la órbita se considere, no en el sentido de Bohr, sino como algo representable, aparte del espín, por una función de onda tridimensional. Por lo tanto, el hueco o vacante en una región que de otro modo está saturada de electrones es más o menos lo mismo que un solo electrón en una región que de otro modo está desprovista de ellos.

En el caso de los rayos X, los huecos deben contarse como cosas de energía negativa, ya que para hacer que uno de ellos desaparezca (es decir, para llenarlo), se debe agregar a él un electrón ordinario de energía positiva. Sin embargo, lo contrario se aplica para los huecos en nuestra distribución de electrones de energía negativa. Estos huecos serán cosas de energía positiva y, por lo tanto, en este aspecto serán como partículas ordinarias. Además, el movimiento de uno de estos huecos en un campo electromagnético externo será el mismo que el del electrón de energía negativa que lo llenaría, y por lo tanto corresponderá a su posesión de una carga $-e$. Por lo tanto, nos lleva a la suposición de que los huecos en la distribución de electrones de energía negativa son los protones. Cuando un electrón de energía positiva cae en un hueco y lo llena, tenemos un electrón y un protón desapareciendo juntos con emisión de radiación " (Dirac, 1930).

²⁶ La revelación de la teoría de los huecos, atribuida a la prodigiosa mente de Dirac cuyo ingenio parece haberse deslizado en los dominios de lo inconsciente, donde las musas de la inspiración tejían sus hilos. Según la leyenda que mientras la noche envolvía su mente en sueños, las semillas de una idea florecían en su ser.

Sin embargo, más allá de la superficialidad de las anécdotas, la génesis de la teoría de los huecos de Dirac encuentra raíces profundas en el suelo fértil de la analogía y la contemplación filosófica. Dirac encontró la clave de su audaz teoría. Cuando fundió los conceptos de la teoría de los rayos X y la teoría atómica química en el crisol de su mente, destilando el elixir del conocimiento. Otra fuente de inspiración puede haber sido la teoría de la radiación de Dirac de 1927. En esta teoría, la absorción y emisión de fotones se representaba como ocurriendo en relación con un estado no observable de fotones de energía cero.

Por analogía, cada partícula elemental, cada electrón, ocupa un lugar específico, como los asientos en un teatro repleto de espectadores. Cada asiento, por tanto, simboliza la órbita o nivel de energía que el electrón ocupa dentro de su átomo correspondiente. Pero ¿qué ocurre cuando un asiento queda vacío por la retirada de uno de los presentes?

Este vacío, esta ausencia repentina, es mucho más que un simple espacio sin ocupar. En el marco conceptual de la teoría de los niveles de rayos X, este hueco adquiere entidad propia, una entidad que desafía la noción convencional de lo material. Se funda como una forma conceptualmente tangible, una "vacante" que ostenta propiedades y energías inherentes, a pesar de la carencia de una presencia física que lo colme.

La mecánica cuántica, con su enrevesada amalgama de dualidad onda-partícula y probabilidades intrínsecas, nos brinda el instrumento conceptual para visualizar este fenómeno. El hueco, este vacío cuántico, se representa no como una mera órbita en el sentido clásico postulado por Bohr, sino como una "función de onda tridimensional", una entidad matemática que describe la probabilidad de encontrar una partícula en un punto del espacio.

Es en el ámbito de los rayos X donde estos huecos adquieren relevancia crucial. Se les atribuye una peculiaridad notable: una energía de signo negativo. Esta característica implica que, para "llenar" está vacante cuántica, se requiere la incorporación de una partícula con energía de signo opuesto, en este caso, un electrón con energía positiva.

Sin embargo, el escenario se torna aún más intrincado cuando consideramos los electrones de energía negativa. En este contexto, los huecos adquieren una polaridad energética positiva, equiparándolos en cierto modo a las partículas ordinarias. Es más, su comportamiento en un campo electromagnético externo semeja el movimiento de una carga eléctrica negativa, como si el hueco se viera poblado por un electrón de energía negativa, completando así el cuadro de su dualidad.

En este tenor, Dirac postula: *"Por lo tanto, nos lleva a la suposición de que los huecos en la distribución de electrones de energía negativa son los protones"*²⁷ (Dirac, 1930). Así, cuando un electrón de energía positiva "desciende" para ocupar uno de estos huecos, se desencadena un acontecimiento de considerable trascendencia. Es como si, en un acto de danza cósmica, un electrón y un protón desaparecieran simultáneamente, desatando una cascada de radiación en el proceso.

Pese a ello, en medio de esta elocuente propuesta, Dirac se enfrenta a una dificultad de índole teórica. Se plantea la cuestión de la densidad infinita de electrones de energía negativa, implicada por la teoría previa de la relación entre electrones y protones:

²⁷ En aquel periodo, los protones representaban las únicas entidades cargadas positivamente reconocidas. De tal modo, resultaba lógico explorar la posibilidad de que los agujeros hipotéticos fueran identificados como protones.

"...Esta densidad infinita, de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell aplicadas de manera ordinaria, daría lugar a un campo eléctrico infinito, y esto se ha presentado como una objeción a la teoría. Esta objeción puede superarse fácilmente mediante una reinterpretación de las ecuaciones de Maxwell. Un vacío perfecto debe considerarse como una región del espacio en la que todos los estados de energía negativa y ninguno de los estados de energía positiva están ocupados. La distribución de electrones en tal región no debe producir ningún campo. Solo las desviaciones de esta distribución de vacío deben producir un campo según las ecuaciones de Maxwell" (Dirac, 1930).

En este contexto, Dirac señala que esta concepción permite superar las dificultades previamente planteadas. Destaca audazmente la elegancia de esta suposición, "al reducir la necesidad de postular dos tipos fundamentales de partículas, como lo eran el electrón y el protón, a solo uno". La imponente simplicidad de este enfoque radica en que la tendencia natural de las partículas a alcanzar sus estados de energía más bajos conlleva que todas las manifestaciones distintivas de la naturaleza posean energía positiva.

A pesar de esta progresión teórica, Dirac plantea una última interrogante trascendental:

"¿Puede la teoría actual explicar la significativa asimetría entre electrones y protones, evidenciada por sus diferentes masas y la capacidad de los protones para formar núcleos atómicos más pesados?... Es evidente que la teoría de agujeros es consistente con un tratamiento simétrico de ambas partículas... Pese a todo, dicha simetría no es matemáticamente perfecta cuando se tiene en cuenta la interacción entre los electrones y los protones... Las consecuencias de esta asimetría no son fáciles de calcular en el contexto relativista, pero esperamos que sea posible encontrar una explicación de las diferentes masas del protón y electrón " (Dirac, 1930).

En cierta medida, aguarda que la discrepancia en las masas entre el electrón y el protón encuentre su explicación en una "teoría más perfecta" de las interacciones, quizás arraigada en el cálculo de Eddington de la constante de estructura fina (la cual es abordada en el anexo 1). Esta proposición se apoya en la sagacidad de reconocer que los estados de energía negativa ostentan un papel preponderante en el fenómeno de dispersión, tal como fue preludiado por el ilustre erudito Ivar Waller (1898-1991). En su visión profética, Waller anticipó la aparición de la dispersión anómala de rayos X al comunicar a Dirac que: *"en algunos casos prácticos importantes casi toda la dispersión proviene de estados intermedios con energía negativa para el electrón"* (Moyer, 1981).

En este devenir es importante reflexionar sobre el razonamiento subyacente a la propuesta de Paul Dirac de identificar los huecos en su teoría con los protones, a pesar de ser plenamente consciente de las considerables dificultades interpretativas que este enfoque acarrea. En aquella era, se reconocía la disparidad entre el electrón y el protón, una discrepancia que se cifraba en aproximadamente 2000 veces la magnitud del electrón.

Como se ha observado, parece que Dirac articuló esta aspiración filosófica en términos más concretos. Optó por integrar su teoría de los huecos con entidades ya conocidas, evitando la postulación de nuevas

partículas elementales cuya existencia carecía de respaldo empírico en aquel momento. El contexto de la física de partículas de la época era conservador, mostrándose reacio a aceptar nuevas incorporaciones al elenco elemental. La prudencia de Dirac al no introducir una partícula no observada podría haber estado condicionada por restricciones sociológicas, modeladas por los paradigmas vigentes en aquel tiempo.

Paul Dirac, al aludir a este ideal como "*el sueño de los filósofos*" (Kragh, 2016), evoca un concepto que trasciende las fronteras del conocimiento científico para adentrarse en el ámbito de la imaginación y la especulación metafísica. Fue en la nonagésima novena reunión de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, en Bristol, del 3 al 10 de septiembre de 1930, donde Dirac delineó su visión. En su disertación, destacó el atractivo intrínseco de la perspectiva unitaria:

"Siempre ha sido el sueño de los filósofos que toda la materia esté construida a partir de un tipo fundamental de partícula, por lo que no es del todo satisfactorio tener dos en nuestra teoría, el electrón y el protón. Sin embargo, hay razones para creer que el electrón y el protón realmente no son independientes, sino solo dos manifestaciones de una sola clase elemental de partícula. Esta conexión entre el electrón y el protón es, de hecho, bastante forzada por consideraciones generales sobre la simetría entre la carga eléctrica positiva y negativa, que nos impide construir una teoría de los electrones cargados negativamente sin incluir también los protones cargados positivamente" (Kragh, 1990).

En el ocaso de su artículo Dirac aplicó su teoría con notable destreza en el ámbito de la dispersión. Una aplicación fundamental de sus ideas consiste en abordar el problema de la dispersión de la radiación por un electrón, ya sea libre o ligado. Según la formulación teórica presentada, un proceso de dispersión se conceptualiza como una secuencia de transiciones dobles. Primero, implica la absorción de un fotón, con el electrón transicionando simultáneamente a un estado determinado. Posteriormente, se produce una emisión, con el electrón pasando a su estado final. Este proceso también puede desarrollarse en el orden inverso, es decir, emisión seguida de absorción.

Dirac sostuvo que, conforme a la teoría expuesta en el presente documento, no se espera que un electrón de energía positiva realice ocasionalmente una transición cuántica para llenar un agujero, especialmente bajo circunstancias en las que ambas partículas se aniquilarían. Este escenario hipotético fue analizado con detalle por Dirac en su artículo de marzo de 1930 titulado "On the Annihilation of Electrons and Protons", donde también demostró que la teoría del agujero es compatible con la fórmula de Klein-Nishina.

Concluyendo este intrigante análisis, el artículo científico de Dirac fue finalmente publicado el 1 de enero de 1930. Más de cuatro décadas después, Dirac reflexionaría sobre este proceso, recordando que la concepción de los vacíos no fue tan ardua una vez que se alcanzó la comprensión adecuada de lo que se requería, encontrando una analogía cercana en la teoría química asociada a los electrones en el nivel de valencia. Al destacar esta analogía en su discurso en París, Dirac ilustró cómo el vacío en un nivel de energía,

definido por la ausencia de un electrón, podría ser concebido como una entidad física ordinaria, revelando así una nueva dimensión en la comprensión de los fundamentos de la naturaleza.

A pesar de los velos de incertidumbre y de asimetría que caracterizan el artículo, la nueva magia concebida por Dirac fue acogida con fervor. Su destello inaugural captó rápidamente la atención; un eco resonante reverberó incluso en las páginas impresas del boletín de noticias diario del Servicio de Ciencias de Washington DC, que, bajo el fulgor del titular: "Nueva teoría del espacio lo llena con falta de energía", En este contexto informativo, se refleja el elogio encumbrado del Dr. Dirac por parte de Sir Oliver Lodge²⁸ (1851-1940), quien profirió que: "Cuando se desarrolle esta teoría, probablemente nos llevará en la dirección que deseamos seguir" (Moyer, 1981).

Dirac, por su parte, recibió con satisfacción este reconocimiento público, preservando cuidadosamente dicho testimonio en su archivo personal. Aun así, su correspondencia revela un panorama mixto, permeado por la admiración y la incertidumbre, en un eco similar al dilema epistémico que caracterizaba las disquisiciones de Bohr. En este contexto, las interacciones epistolares que le llegaban a Dirac adquieren particular relevancia.

Heisenberg le escribió una carta antes que se publicara su artículo:

"Querido Dirac:

Muchas gracias por tu carta. Me enteré de tu nuevo artículo hace ya algunos días por Landau (a través de Gámov). Creo que entiendo la idea de tu nuevo artículo; ciertamente es un gran avance. Pero aún no puedo ver cómo se determinará la relación de las masas... Se puede esperar que todas estas dificultades sean resueltas mediante un cálculo directo de la interacción..." (Wright, 2016)

En un giro que ilustra el dinamismo intelectual de la época, Heisenberg pronto compartió nuevos insights (percepciones) desde su ámbito en Leipzig el 16 de enero:

Querido Dirac:

"Muchas gracias por la reimpresión de tu nuevo artículo. He calculado un poco sobre el efecto de la interacción de los electrones en tu teoría. [...] Se puede demostrar que el electrón y el protón adquieren la misma masa" (Wright, 2016).

Esto ya lo sabía Dirac pues esperaba una teoría más perfecta, aun así, Heisenberg había ido más lejos: *'es posible en principio construir interacciones, en las que el electrón y el protón adquieran una masa diferente'* (Wright, 2016). La intuición de Dirac sobre la inclusión de las interacciones podría haber sido correcta. Pero la euforia inicial pronto se vio empañada por la llegada de desafíos adicionales, reflejando la

²⁸ Sir Oliver Lodge fue uno de los físicos británicos más prominentes de la era anterior. Quizás estaba viendo en la teoría de Dirac un renacimiento de las teorías del éter, que él había defendido. Dirac disfrutó lo suficiente del informe como para conservarlo en sus documentos

complejidad inherente a la empresa científica y la necesidad constante de exploración y confrontación con nuevas incógnitas.

Vladimir Fock enunció diferentes objeciones, nuevamente expresando una mezcla de admiración y precaución. Escribiendo el 12 de febrero, comenzó:

"¡Querido Dr. Dirac!

Le agradezco sinceramente por la copia de su último artículo. Lo leí con el mayor interés, pero no puedo decir que haya quedado completamente convencido por su teoría.

Permítame comunicarle algunas dudas que surgieron en esta conexión.

En primer lugar: ¿Puede el principio de exclusión de Pauli aplicarse a un conjunto continuo de estados? Siempre he pensado que solo puede aplicarse a un conjunto innumerable de estados, ya que en la formulación de este principio parece ser necesario enumerar los estados. Porque si los estados pueden diferir entre sí por una cantidad infinitamente pequeña, nunca se puede afirmar que todos los estados en una región de valores propios, por pequeña que sea, estén ocupados. Sin embargo, en su teoría, usted aplica el principio de exclusión a todos los estados, tanto continuos como discontinuos.

En segundo lugar: Un número infinito de electrones de energía negativa por unidad de volumen implica una densidad de masa negativa infinita en todo el mundo. Esto debe tener consecuencias astronómicas y podría entrar en conflicto con la teoría general de la relatividad" (Dirac et al., 1993).

La crítica inaugural de Fock, con su agudeza insigne, embistió el meollo de la teoría diraciana. El principio de exclusión de Pauli, Fue esta prescripción la que facultó a Dirac la erigida construcción de su panoplia infinita de electrones de energía negativa. Estos ocupan todos los estados de energía negativa, forzando a algunos electrones a residir en estados de energía positiva, evitando de esta forma un colapso universal hacia un estado único o casi idéntico, que dejaría una carencia de "vacíos" definidos con propiedades equiparables a las de las partículas.

La respuesta de Dirac a Fock, plasmada en una carta cuya autenticidad ha quedado relegada al misterio y la especulación, vislumbra una estrategia ingeniosa para lidiar con las conjeturas planteadas. Se postula la división del espacio vacío en compartimentos infranqueables, concebidos para imponer las condiciones límite requeridas para la aplicación efectiva del principio de Pauli. Pese a todo, la escasez de documentación exhaustiva, como señala Wright (2016), relega estas elucubraciones al dominio de la conjetura, ya que las misivas enviadas por Dirac han permanecido esquivas al escrutinio de la erudición contemporánea. A pesar de ello, se divisa cómo Dirac erigía un bastión en la defensa de su cosmovisión, aun a riesgo de enmarañar su propia narrativa.

El fatídico 14 de febrero marca otro hito en la travesía hacia la claridad, donde la enfermedad intrínseca de la ecuación de Dirac se manifiesta con crudeza. Robert Oppenheimer, en su estampa en *Physical Review* titulada "On the Theory of Electrons and Protons", entreteje las vicisitudes inherentes. Una, entre muchas, yace en la incapacidad de la teoría diraciana para esclarecer la intrincada danza de la luz con las partículas subatómicas. Pero, la crítica reside en el cálculo de Oppenheimer, quien postuló que si los agujeros de Dirac fuesen protones, estos se aniquilarían con electrones en un lapso medio de vida de 10^{-10} segundos, contradiciendo así la estabilidad observable de la materia, puesto que implicaría una intrínseca inestabilidad: *"Difícilmente deberíamos esperar que ningún estado de energía negativa permanezca vacío... [y deberíamos] volver a la suposición de dos partículas elementales independientes de cargas opuestas"* (Oppenheimer, 1930).

En última instancia, si todos los estados de energía negativa se encontraban ocupados, parecería poco plausible que la cantidad de protones en el universo fuese igual a la de electrones. Además, la partícula de carga positiva postulada por Dirac podría aniquilarse con un electrón, dando lugar a la emisión de dos fotones, lo que tornaría al átomo de hidrógeno intrínsecamente inestable. A partir de estas consideraciones, Oppenheimer pronosticó que: *"si los electrones ocupaban estados de energía negativa, entonces los protones también deberían hacerlo"* (Oppenheimer, 1930).

A Dirac no le gustaba la teoría de Oppenheimer. Rompía con la vista unitaria que Dirac encontraba tan atractiva: uno quisiera, si es posible, preservar la conexión entre el protón y el electrón, a pesar de las dificultades que conlleva, ya que explica de una manera muy satisfactoria el hecho de que el electrón y el protón tienen cargas iguales en magnitud y opuestas en signo.

Igor Tamm, compañero de excursiones y amigo íntimo de Dirac, expresó el 3 de marzo de 1930 una preocupación similar respecto a la teoría diraciana: la longevidad de un átomo. Los átomos simples, como el hidrógeno, exhiben una estabilidad notable. No obstante, en la teoría de Dirac, existe la posibilidad de aniquilación mutua entre electrones y protones (el electrón llenando el agujero), lo que conllevaría a la emisión de radiación (Wright, 2016).

Dirac, en su eterna búsqueda por comprender las complejidades de su teoría, optó por desafiar las objeciones de sus colegas, haciendo oídos sordos a las voces establecidas en el ámbito científico. Su preocupación, inmersa en las profundidades de la mecánica cuántica, se reflejaba en su obra seminal, fechada el 26 de marzo, donde señalaba con agudeza la disparidad notoria entre las masas del protón y del electrón como una piedra angular en la edificación teórica vigente. En sus propias palabras:

"La gran diferencia entre las masas del protón y del electrón forma una dificultad no resuelta en la teoría existente. Esta gran diferencia parece estar conectada con la interacción entre electrones, pero nuestras ideas actuales sobre la interacción son inadecuadas para explicarla" (Dirac, 1930b).

Mediante una exploración matemática emblemática de su estilo, Dirac llegó a una expresión que delineaba la probabilidad de aniquilación electrón-protón, aduciendo:

"No podemos conferir una interpretación numérica precisa a nuestro resultado, pues desconocemos si la masa inherente a la expresión alude al electrón o al protón. En cualquier caso, el resultado alcanzado sobrepasa considerablemente nuestra capacidad de explicar la estabilidad de los electrones y protones" (Dirac, 1930b).

Sin embargo, Dirac no se resignó al manto de la duda, sino que desafió al destino con palabras que resonaban como ecos en una cripta olvidada:

"Hemos de inferir que la interacción entre el electrón y el protón debe reducir significativamente el área de colisión... Posiblemente, para energías sumamente elevadas, la precisión de este estudio será tangible cuando la masa adopte el valor adecuado"(Dirac, 1930b).

El intercambio epistolar entre los eminentes físicos Paul Dirac y figuras de renombre como Dmitri Ivanenko y Victor Ambarzumian (1908-1996), emerge como un fascinante filón de indagación que arroja luz sobre la intrincada urdimbre de concepciones que impregna el ámbito de la física teórica. En fecha memorable, el 6 de mayo de 1930, Ivanenko vertió ante Dirac reflexiones de índole profunda sobre la naturaleza misma del espacio y el tiempo. Posteriormente, en una misiva fechada el 16 de mayo del mismo año, ambos eruditos propusieron una audaz aplicación de dichas reflexiones para abordar el enigma de la radiactividad beta, uno de los enigmas más desconcertantes de la época.

Los físicos rusos postulaban que en el proceso beta se suscitaba una transición singular, en la cual un electrón, portador de energía negativa, mutaba hacia un estado de energía positiva. De esta manera, concebían la emergencia de un electrón beta observado en conjunción con un protón, engendrado en el seno del núcleo. Esta concepción no solo desentrañaba los misterios de la radiactividad beta, sino que también planteaba cuestiones profundas acerca de la cuantificación del espacio mismo (Wright, 2016).

Posteriormente, Dirac debatió estos puntos con Heisenberg, quien junto a Pauli estaba inmerso en el desarrollo y culminación de su electrodinámica cuántica. La sinergia entre las ideas de Heisenberg y Dirac no fructificó en el marco de la teoría de Dirac. Durante este bienio, las nociones primigenias de espacio, tiempo y vacío se hallaban en un estado de efervescente disputa dentro del ámbito de la física.

Durante varios meses, Dirac perseveró en su interpretación del protón como un vacío en el vasto océano de electrones imbuidos de energía negativa. No obstante, consciente de la escasa adhesión a su visión entre sus pares, también reconocía la incredulidad que rodeaba sus postulados.

En medio de esta travesía intelectual, emergió la figura crítica de Pauli, un titán cuyas palabras se han erigido como axiomas incuestionables en los círculos más internos de la física cuántica como ha sido descrito. Él, con la maestría de un orfebre de la mente, acuñó lo que sería recordado como el "segundo principio de Pauli" expresó contundentemente que toda teoría propuesta por un físico debería aplicarse inmediatamente al propio autor; así, la aniquilación se perfilaba inexorable para Dirac (Kragh, 1990).

En los albores del otoño de 1930, durante un encuentro en Odessa, Tamm compartió con Dirac las palabras de Pauli, quien había sometido a rigurosa prueba la teoría de los protones y afirmaba con un rigor matemático que la esencia misma de la teoría de Dirac tropezaba con la inmutable igualdad de masas entre electrón y protón, un equilibrio que ningún vaivén de partículas podía deshacer.

Sin embargo, el argumento que obró un cambio radical en el pensamiento de Dirac emergió en noviembre de 1930, cuando Weyl, en su obra "Gruppentheorie und Quantenmechanik", adoptó una nueva postura con respecto a los protones. En palabras cautivadoras, Weyl expresó:

"Por seductora que pueda parecer esta idea inicialmente, ciertamente es insostenible sin introducir modificaciones profundas... De hecho, según la teoría de los huecos, la masa del protón debería equipararse a la del electrón; además... esta hipótesis conduce a la esencial equivalencia entre la electricidad positiva y negativa en todas las circunstancias... La disparidad entre ambos tipos de electricidad parece ocultar un secreto de la Naturaleza que se encuentra más allá incluso de la disimilitud entre pasado y futuro... Temo que las nubes que acechan esta esfera del conocimiento converjan para desencadenar una nueva crisis en la física cuántica." (Weyl, 1967).

Con estas reflexiones resonando en su mente, Dirac se vio compelido a replantear sus concepciones, abriéndose así un nuevo horizonte de interrogantes y posibilidades en la frontera de la física cuántica.

El intrincado tapiz del pensamiento científico, tejido con hilos de lógica e intuición, da lugar a figuras que, como faros en la noche, iluminan senderos insospechados hacia la verdad. El argumento presentado por Hermann Weyl, imbuido de una sensibilidad que resonaba con las preferencias metodológicas de Dirac, adquirió una importancia crucial en este contexto.

A lo largo de diversas reflexiones, Dirac reconoció la importancia de su orientación inicial hacia la correcta identificación del electrón positivo, en virtud de la simetría atractiva que dicha elección conferiría entre las masas del electrón y el hueco. En retrospectiva, reveló que su primer impulso se inclinaba hacia lo que posteriormente se demostró ser el candidato apropiado. En sus propias palabras, expresó: *"Realmente sentí que [la masa del hueco] debería ser la misma [que la masa del electrón] pero no me gustaba admitirlo a mí mismo"* (Kragh, 1990). Esta confesión subraya la compleja dinámica entre intuición y evidencia empírica en el proceso de formulación teórica.

La adopción inicial de protones como huecos, a pesar del reconocimiento de las dificultades inherentes a esta noción, refleja una tentativa por encauzar la teoría hacia una estructura coherente, aunque retrospectivamente fue considerada por Dirac como "bastante débil". Este recorrido introspectivo resalta la interacción entre el poder del razonamiento matemático puro y la influencia de las observaciones experimentales en la construcción de modelos teóricos.

Si Dirac hubiera sido fiel únicamente al poder del razonamiento matemático puro y no se hubiera dejado llevar por lo que se conocía empíricamente, habría postulado inmediatamente el electrón positivo. De

hecho, eso fue lo que hizo Weyl, aunque solo implícitamente. En varias ocasiones, Dirac atribuyó este éxito de Weyl a su enfoque matemático de la física. Este era un enfoque que Dirac recomendaba firmemente:

"Weyl era un matemático. No era un físico en absoluto. Solo se preocupaba por las consecuencias matemáticas de una idea, trabajando en lo que se puede deducir de las diversas simetrías. Y este enfoque matemático llevó directamente a la conclusión de que los huecos deberían tener la misma masa que los electrones. Weyl... no hizo ningún comentario sobre las implicaciones físicas de su afirmación. Quizás realmente no le importaba cuáles fueran las implicaciones físicas. Solo le preocupaba lograr matemáticas consistentes"(Kragh, 1990).

En los albores de 1931, la mente brillante de Dirac se vio inmersa en un proceso de introspección científica, donde las olas de la incertidumbre chocaban contra los acantilados de su intelecto. Abandonó su abrazo con la teoría unitaria del electrón y protón, aunque en su corazón persistía una fe inquebrantable en la vigencia de la teoría general de los agujeros. Así, el 29 de mayo de aquel año, Dirac inscribió en el tapiz de la ciencia su obra "Quantised Singularities in the Electromagnetic Field". Este escrito, con su mirada fija en el horizonte de la comprensión, se propuso desentrañar una nueva idea, comparable en muchos aspectos con la anterior concepción sobre las energías negativas.

Dirac anhelaba explorar las profundidades del universo microscópico, no en busca de electrones y protones, sino de la esencia misma de la carga eléctrica mínima. Su mente se aventuraba por los senderos desconocidos, buscando elaborar una teoría de monopolos magnéticos, la cual buscaba establecer la existencia de partículas magnéticas, esos misteriosos guardianes de la simetría cósmica.

En los primeros compases de su odisea intelectual, Dirac se vio compelido a reinterpretar el enigma de los huecos. Como él mismo expresó:

*"...Entonces surge la pregunta sobre la interpretación física de los estados de energía negativa, que según este punto de vista realmente existen. Deberíamos esperar que la distribución uniformemente llena de estados de energía negativa sea completamente no observable para nosotros, pero un estado no ocupado de estos estados, al ser algo excepcional, debería hacer sentir su presencia como una especie de agujero. Se demostró que uno de estos agujeros nos parecería una partícula con una energía y una carga positivas, y se sugirió que esta partícula debería identificarse con un protón. Sin embargo, investigaciones posteriores han demostrado que esta partícula necesariamente tiene la misma masa que un electrón y también que, si choca con un electrón, las dos tendrán una oportunidad de aniquilarse mutuamente mucho mayor de lo que sería consistente con la estabilidad conocida de la materia. Por lo tanto, parece que debemos abandonar la identificación de los agujeros con protones y debemos encontrar alguna otra interpretación para ellos. Siguiendo a Oppenheimer, podemos asumir que en el mundo tal como lo conocemos, todos, y no solo casi todos, de los estados de energía negativa para los electrones están ocupados. **Un agujero, si existiera, sería un nuevo tipo de partícula**, desconocida para la física experimental, que tendría la misma masa y carga opuesta a un electrón. **Podríamos llamar a tal partícula un antielectrón**. No deberíamos esperar encontrar*

ninguno de ellos en la naturaleza, debido a su rápida tasa de recombinación con electrones, pero si pudieran producirse experimentalmente en alto vacío, serían bastante estables y susceptibles a la observación..." (Dirac, 1931).

Y aún más allá, en las fronteras de lo concebible, Dirac se aventura hacia el abismo de lo desconocido, llegando argumentar:

"Los protones en la vista anterior están completamente desconectados de los electrones. Presumiblemente, los protones tendrán sus propios estados de energía negativa, todos los cuales normalmente están ocupados, y uno no ocupado aparecerá como un antiprotón..." (Dirac, 1931).

Esta audaz proposición desafía la lógica establecida, dejando a la teoría actual incapaz de explicar las diferencias entre electrones y protones.

Según esta nueva visión, los protones no estaban, como sugería Oppenheimer, relacionados con los electrones. Adoptar esta postura no fue fácil para Dirac, porque implicaba una despedida de la teoría unitaria. Lamentaba que *"Esta audaz proposición desafía la lógica establecida, dejando a la teoría actual incapaz de explicar las diferencias entre electrones y protones"*(Dirac, 1931), y solo aceptaba esto como un hecho contingente a regañadientes. Pues Dirac siguió la lógica de Sherlock Holmes: 'Cuando hayas eliminado todo lo que es imposible, entonces lo que quede, por improbable que parezca, debe ser la verdad' (Farmelo, 2009).

En su búsqueda de respuestas, Dirac vislumbró un camino iluminado por la tenue luz de la experimentación. La colisión de fotones de ultra energía ofrecía la promesa de revelar los secretos más profundos del universo.

Dirac, ajeno a su propia fortuna, ignoraba que la clave para desentrañar el misterio yacía en las páginas del New York Times. En aquellos relatos se hablaba sobre los rayos cósmicos, la voz de la verdad susurraba entre líneas, esperando ser escuchada.

Los rayos cósmicos, heraldos de la energía suprema que atraviesa el firmamento, se alzaban como mensajeros de los dioses en el lienzo cósmico. Millikan, con su teoría envuelta en el manto de lo divino, contemplaba los rayos cósmicos como los lamentos de los átomos nacientes, las señales de un universo en gestación (Farmelo, 2009).

En este contexto, Dirac debió vislumbrar la conexión entre los rayos cósmicos de alta energía y la posibilidad de engendrar anti-electrones en su colisión con las partículas terrestres. Su atención parecía desviarse de este fenómeno celestial, quizás influenciado por el ethos científico predominante en el Laboratorio Cavendish durante aquella época efervescente de los años veinte, donde los rayos cósmicos no ocupaban el centro del escenario científico.

Durante el transcurso del primer semestre de 1931, la vida de Dirac se entrelazó con la de Tamm, quien lo visitó en Cambridge, brindándole un vistazo a los hábitos del ilustre físico más allá de los confines de la ciencia. Dirac, peculiarmente interesado en los asuntos educativos y económicos de la Unión Soviética, compartió inquietudes mientras se sumergía en largas caminatas (Farmelo, 2009).

El segundo semestre de aquel año vio a Dirac embarcarse en un viaje hacia Estados Unidos en busca de unas vacaciones de senderismo y un merecido periodo sabático en Princeton. Sin embargo, su presencia no pasó desapercibida, pues se vio instado a impartir conferencias, al igual que Wolfgang Pauli. Ambos, destinados a presentar lo que equivalía a una profecía de nuevas partículas: Pauli, al neutrino²⁹, y Dirac, al antielectrón, aunque la verdadera razón de Dirac para hablar fue por su último artículo, el monopolio magnético.

De hecho, en una carta a Van Vleck enviada el 2 de octubre, reveló su diálogo con Pauli sobre neutrones y polos magnéticos. Siguiendo este intercambio de ideas entre mentes prominentes siempre ha servido como catalizador para el progreso científico. En un encuentro casual entre dos gigantes intelectuales, Wolfgang Pauli y Isidor Rabi (1898-1988), durante una velada en un restaurante chino en la vibrante ciudad de Nueva York, surgió un diálogo revelador. En medio de una discusión sobre la hipótesis de los neutrinos, Pauli expresó con audacia: *"Creo que seré más inteligente que Dirac. No creo que lo publique"* (Moyer, 1981). Este comentario, aparentemente casual, destaca la intrincada naturaleza de las relaciones científicas y las dinámicas de competencia intelectual.

En octubre de 1931, Dirac cautivó a su audiencia con una serie de conferencias sobre mecánica cuántica en el Instituto de Estudios Avanzados en Princeton, Nueva Jersey. En este magno evento, Dirac esbozó tres aspectos fundamentales. Primero, manifestó su percepción estética sobre la aproximación en la física³⁰. Segundo, plasmó su visión sobre el vacío de fotones, trascendiendo la esencia de los electrones.

²⁹La génesis de las grandes revelaciones científicas a menudo se encuentra envuelta en el manto de la incertidumbre como se ha venido observando, iluminada por la audacia de aquellos dispuestos a desafiar los límites del conocimiento establecido. En el crisol de una carta privada, dirigida a una confluencia de mentes eruditas en el campo de la radioactividad, Pauli tejía los hilos de la especulación en torno a una partícula aún no vislumbrada por el ojo humano, pero sí palpable en las telarañas de la mente. En ese sagrado espacio del intercambio intelectual, Pauli sugirió, con la cautela del que pone sobre la mesa un tesoro frágil, que una partícula adicional podría ser la clave para desentrañar el misterio de la conservación de la energía en los núcleos radiactivos. ¿Acaso podía existir una danza invisible entre electrones y esta hipotética partícula, una danza cuyos pasos eran la misma esencia del universo manifestada en energía fluctuante?

El dilema que atormentaba las mentes de los sabios era la disparidad en las energías de los electrones emitidos por dichos núcleos, una sinfonía disonante en el concierto de la física. ¿Cómo podía reconciliarse esta variabilidad con la sacrosanta ley de la conservación? Pauli, en un acto de audacia intelectual, propuso una explicación que resonaba en las profundidades del pensamiento: en cada acto de desintegración radiactiva, un compañero invisible, una sombra del electrón, emergía del abismo cuántico para compartir su carga de energía. Esta partícula, concebida en la desesperación de la mente que anhela la armonía en el caos, debía ser tan etérea como el susurro del viento entre las hojas, tan ligera como la pluma que danza en el aire. Pauli vislumbró una realidad donde la nueva partícula carecía de carga eléctrica, donde su espín se entrelazaba con el del electrón en una danza cósmica, y donde su masa, apenas perceptible, dotaba de sustancia a la teoría.

³⁰ En abril de 1931, Paul Dirac compartió con John Van Vleck una reflexión sobre la física teórica de su tiempo. Mencionó que Niels Bohr estaba abogando por la idea de que las debilidades de la teoría cuántica relativista se encontraban donde se esperaba, desde una perspectiva filosófica general. Dirac, por su parte, estaba elaborando su propia visión, publicada en septiembre del mismo año. En su enunciado, Dirac propuso un enfoque ambicioso: emplear las matemáticas puras para mejorar y generalizar el formalismo matemático de la física teórica. Cada avance, sugirió, debería ser seguido por el intento de interpretar las nuevas características matemáticas en términos de fenómenos físicos concretos. Gran parte de su metodología se ha hecho evidente a lo largo del escrito.

Por último, esbozó sucintamente su innovadora teoría de los anti-electrones, subrayando la simetría masa-masa entre el electrón y su antipartícula, un postulado aparentemente ineludible en el marco teórico propuesto:

"Un anti-electrón debería tener la misma masa que un electrón y esto parece ser inevitable; preferiríamos obtener una masa mucho mayor para identificar los anti-electrones con los protones, pero esto no parece funcionar incluso si tenemos en cuenta una interacción de Coulomb. ... Esta idea de los anti-electrones no parece ser capaz de ser probada experimentalmente en este momento; podría resolverse mediante experimentos si pudiéramos obtener dos haces de radiación de alta frecuencia de una intensidad lo suficientemente grande y dejar que interactúen"(Moyer, 1981).

En el cierre de sus disertaciones en Princeton, Dirac rozó de manera tangencial su teoría relativista del electrón. Las energías negativas, emergentes como sombras en la trama cósmica delineada por la mente prodigiosa de Dirac, continuaban siendo un motivo de inquietud en los círculos científicos.

En el firmamento del pensamiento, Schrödinger, forjó una teoría alternativa donde las energías negativas quedaban veladas, eclipsadas por la luz de una nueva concepción. Su ecuación, sutil danza matemática, encontraba armonía con la de Dirac en los campos libres (libres de campos magnéticos), pero desviaba su curso en presencia de campos. Aunque lograba recrear la fina estructura del hidrógeno y otros logros de la teoría diraciana, su propuesta fue relegada al olvido. La ecuación de onda, ajena a la danza del tiempo de Lorentz, fue desechada como una melodía disonante en el concierto relativista (Wright, 2016).

En el eco de las discusiones académicas, algunas de las objeciones a la teoría de Dirac reposaban sobre fundamentos filosóficos. "A menudo se escucha a la gente decir que la electrificación negativa no observable del mundo, producida por los electrones de energía negativa, es una noción metafísica", escribió Tamm a Dirac, trazando paralelismos entre el enigma de la energía negativa y el etéreo éter de Lorentz, inalcanzable para los sentidos, pero palpable para la mente inquisitiva (Kragh, 1990).

En los bulliciosos pasillos del Instituto de Copenhague, donde la mente humana se aventura en los territorios más íntimos de la realidad subatómica, la genialidad de los científicos se mezclaba con la jovialidad de la imaginación. En medio de estos intercambios intelectuales, surgió una curiosa denominación para los electrones de energía negativa de Dirac: los "electrones burro", un epíteto sugerido con gracia por Gámov: "¡porque los electrones de energía negativa, como los burros, se moverían más lentamente cuanto más se les empujara!"(Kragh, 1990).

En aquel abril de 1932, en el décimo aniversario del Instituto de Copenhague, el espíritu de la reflexión se fusionó con la creatividad teatral en una conferencia memorable. Las mentes más preclaras de la época, tales como: Pauli, Klein, Heisenberg, Dirac, Bohr y entre otros, se reunieron para reinterpretar la epopeya de Fausto de Goethe, inyectando vida en sus versos con la esencia misma de la física teórica. En esta inusitada puesta en escena, las teorías de Dirac se convirtieron en actores en un drama cósmico, donde los agujeros y los monopolos magnéticos tejían un escenario de incertidumbre y asombro.

Se representaba al monopolio, como un personaje singular en el firmamento de la física, fue tratado con una mezcla de curiosidad y respeto, como un antiguo sabio que susurra secretos cósmicos en los oídos de la humanidad. En cambio, la teoría del agujero de Dirac, con sus enigmas y misterios, fue representada con un toque de excentricidad, retratada como una nota bizarra en el concierto de la razón (Farmelo, 2009).

Entre los luminarios de la física, uno destacaba por su escepticismo: Niels Bohr. En sus cartas a Dirac, se revela su profunda inquietud ante las fronteras de la mecánica cuántica relativista. Para Bohr, la resolución de estas paradojas no podía encontrarse en los confines conocidos del espacio y el tiempo; exigía una reevaluación radical de nuestros conceptos fundamentales, un quiebre con las leyes establecidas que desafiaba incluso la sagrada conservación de la energía en el reino de lo atómico.

Entre los pétalos del tiempo, en el ocaso de 1931 y el primer susurro de 1932, Dirac se encontraba entre viajes, en una danza simbiótica con Rusia, inmerso en la forja de una teoría que hoy en día roba la atención de la física, la electrodinámica cuántica. No obstante, en aquellos momentos, su construcción era una odisea, una sinfonía de campos que buscaba deshacer las discrepancias entre las teorías de Heisenberg y Pauli. Esta narrativa pertenece a un relato tan asombroso, que no puede ser relegado aquí con tal indiferencia.

Continuando el hilo de la historia, Dirac yacía en Crimea Rusia. En ese periodo del tiempo de 1932 apenas los físicos consideraban seriamente la teoría del agujero propuesta por él, y escasos siquiera tenían un conocimiento rudimentario de su predicción del anti-electrón. Sin embargo, ignoraba que la historia del anti-electrón estaba a punto de llegar a su culminación, más rápidamente de lo que jamás se había atrevido a creer posible.

En Caltech, en medio de un reposo estival que abrazaba a muchos científicos, Carl Anderson (1905-1991), un joven experimentador de brillantez incandescente, bajo la tutela de Milikan, perseveraba en los recovecos de los rayos cósmicos dentro de su cámara de niebla. Al cierre del primer día de agosto, un lunes, su único tesoro de aquellos experimentos recientes eran fotografías en blanco y negro. Capturar esas imágenes era una tarea colmada de esfuerzo: en la mayoría de los casos, los destellos cósmicos se negaban a dejar rastro. Pese a ello, la fortuna sonrió al día siguiente.

Anderson consiguió capturar la esencia de una sola huella, apenas cinco centímetros de longitud, casi etérea como un hilo de aurora. La densidad de burbujas que la rodeaba insinuaba la presencia de un electrón, más la curvatura de su camino sugería lo opuesto: una partícula cargada positivamente. Así, no podía ser un electrón. Aunque aún incrédulo ante sus propios ojos, Anderson pasó horas asegurándose de que su magnetismo no se hubiera desviado por el capricho de algún bromista. Convencido de que no era víctima de una broma cósmica, su espíritu se inflamó de júbilo, aunque una brisa gélida de pavor enfrió su éxtasis: ¿era este hallazgo real o un capricho de la incomprensión? Para afianzar la existencia del electrón positivo, Anderson necesitaba más evidencia, más al final del mes solo había hallado otros dos ejemplos de estas pistas inusuales, ninguno tan claro como el primero. Millikan, en su eterno escepticismo, permanecía incólume ante la evidencia presentada (Farmelo, 2010).

El alma de Anderson, embargada por la incertidumbre, se debatía entre la revelación y la oscuridad. En su obra magistral de conservadurismo científico, titulada "The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives" publicada en la revista Science el 1 de septiembre de 1932, dejó entrever la verdad velada tras la cortina de lo desconocido. Una frase, como una estrella solitaria en la vastedad del universo, iluminó el camino hacia una nueva comprensión: "*Parece necesario recurrir a una partícula cargada positivamente con una masa comparable a la de un electrón*"³¹ (Anderson, 1932).

El eco de su descubrimiento apenas reverberó en los confines del universo científico, relegado al silencio de la indiferencia. Incluso Millikan, el gigante de la ciencia de su tiempo, desestimó el hallazgo como un mero sinsentido, mostrando escaso interés en su divulgación. Inicialmente, Anderson interpretó las trayectorias como protones o incluso electrones en dirección opuesta, adhiriéndose al paradigma de investigación de Millikan. No obstante, en un segundo acto de su narrativa científica, plasmado en marzo de 1933, Anderson renunció a la rigidez conservadora y propuso la existencia de un electrón dotado de carga positiva, bautizando así al "positrón", término que pronto sería acogido por la comunidad científica.

Pese a todo lo anterior, como en toda narrativa científica, el drama se desenvuelve en los bastidores, donde las mentes inquietas y los corazones apasionados dan vida a las ideas. En este telón de fondo, Rudolph Langer emergió como un protagonista inesperado, un héroe silencioso cuya comprensión trascendía lo convencional. Langer era un colega de Anderson y imbuido de una curiosidad insaciable, se sumerge en el trabajo de Dirac sobre el anti-electrón. Identificó conexiones entre las observaciones de Anderson y las teorías de Dirac, concluyendo acertadamente que Anderson había identificado el anti-electrón postulado por Dirac (Kragh, 1990).

Por aquel momento la revista Science con la publicación de Anderson resonó como una melodía apenas susurrada en el viento cósmico. Sin embargo, en el vasto mar del conocimiento, las olas del reconocimiento tardaron en llegar a las orillas del entendimiento. Ni Dirac ni sus eruditos compañeros parecían haber captado el mensaje en aquel momento efímero.

Pero en la orilla opuesta del saber, Patrick Blackett (1897-1974) y el erudito italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993), con ojos que ven más allá de la superficie de las cosas, obtuvieron gracias a sus experimentos con cámaras de niebla, una evidencia adicional de la existencia del positrón y su relación con la teoría de Dirac. La interpretación de Blackett de las trayectorias observadas como resultado de la producción de pares (electrón-positrón), en concordancia con la teoría de Dirac, consolidó aún más la validez de este descubrimiento (Leone & Robotti, 2008).

El momento culminante de este viaje científico llegó cuando Blackett y Occhialini presentaron ante sus colegas las imágenes más claras jamás capturadas de los rayos cósmicos. Entre la audiencia, el propio

³¹ Anderson en aquel momento no mencionó la teoría de Dirac. Esto es desconcertante porque acababa de tomar un curso de mecánica cuántica avanzada impartido por Robert Oppenheimer, uno de los admiradores más influyentes de Dirac y un experto en su teoría de los huecos.

Dirac presenciaba el fruto de su teoría. A pesar de las sombras del escepticismo que se alzaban entre sus colegas, quienes, cautivos de sus propias dudas, no estaban dispuestos a aceptar la posibilidad de nuevas revelaciones. En su artículo seminal, Blackett y Occhialini rindieron homenaje a las valiosas discusiones mantenidas con Dirac, reconociendo la contribución crucial de este pionero de la física teórica. Citando los cálculos meticulosos realizados por Dirac, revelaron:

"Hasta ahora no parece haber evidencia en contra de su validez, y a su favor está el hecho de que predice un tiempo de vida para el electrón positivo lo suficientemente largo como para ser observado en la cámara de niebla, pero lo suficientemente corto como para explicar por qué no había sido descubierto por otros métodos" (Carretero, 2013).

En el trascendental episodio en el que Dirac fue notificado sobre la validación del trabajo de Anderson conforme a los postulados de Blackett y Occhialini, se desplegó un compendio de emociones que resonaron en las profundidades de su ser científico y filosófico. Aunque la mera existencia del positrón en el tejido mismo de la realidad cósmica sería suficiente para infundir regocijo en el corazón de cualquier investigador, para Dirac, la magnificencia de este acontecimiento trascendía lo meramente empírico.

En la narrativa de Dirac, la esencia de la victoria no residía tanto en la manifestación material del positrón, sino más bien en la glorificación de sus ideas teóricas, las cuales, como fantasmas en la noche, habían acechado las fronteras del conocimiento científico. Este diálogo revelador con Thomas Kuhn, registrado en los anales del año 1963, esclarece el alma misma del científico como un pensador profundamente inmerso en las aguas turbias de su teoría.

"Kuhn: ¿Fue [el descubrimiento del positrón] una gran reivindicación?"

Dirac: Sí.

Kuhn: ¿Ese tipo de evento genera una gran emoción y satisfacción inmediata?"

Dirac: No creo que genere tanta satisfacción como hacer que las ecuaciones encajen" (Kuhn, 1963).

La identificación de estas partículas con los anti-electrones de la teoría de los agujeros de Dirac fue inicialmente objeto de resistencia, un desafío al orden establecido que dejó en suspenso las mentes inquietas de los físicos. Pero, la predicción pronto se tornó en una suerte de vindicación, como un verso poético que halla su melodía en el pentagrama del cosmos, una afirmación luminosa que despejó las brumas del desconcierto y abrió nuevos caminos en el vasto jardín de la comprensión.

Entre los destellos de reconocimiento, las letras de felicitación fluyeron como ríos de admiración de las plumas de Tamm e Ivanenko hacia la morada de Dirac. Pues Tamm enviaría:

"tu predicción de la existencia del [positrón] [...] parecía tan extravagante y totalmente nueva que tú mismo no te atreviste a aferrarte a ella y preferiste abandonar la teoría" (Farmelo, 2009).

En respuesta, Edwin Kemble (1889-1984), en un tono impregnado de reverencia, alzó su voz para acoger el descubrimiento del positrón como un canto de confirmación, una sinfonía que armonizaba con las estructuras más íntimas de la teoría de Dirac.

"Todos hemos sido testigos de la conmoción que ha provocado la confirmación del descubrimiento del electrón positivo, así como del eco original de las palabras de Anderson. Este hallazgo, al igual que el río que encuentra su cauce, parece fluir con menos turbulencia en el lecho de la física teórica que el descubrimiento del neutrón. Y yo, en mi humilde percepción, juzgo que, al confirmar la teoría de Dirac sobre los estados de energía positiva y negativa, este acontecimiento parece destinado a disipar en gran medida las sombras que oscurecían la formulación relativista de la mecánica cuántica" (Kragh, 1990).

Sin embargo, en los albores de esta controversia, la percepción de Kemble se alzaba solitaria en la penumbra del escepticismo. La teoría oscura de Dirac, que concebía al anti-electrón, no encontraba eco unánime entre los titanes de la física. En aquellos días de incertidumbre, el firmamento de la ciencia estaba teñido de escepticismo y la duda se erguía como una sombra ominosa sobre las mentes de los eruditos.

Bohr, con su séquito de discípulos inquietos, contemplaba con reticencia el hallazgo del positrón, sin querer conceder a Dirac la laureada vindicación que éste anhelaba. Ante la evidencia empírica que abogaba por la existencia del positrón, Bohr proclamó en un arrebato de incredulidad: *"¡Aunque todo esto resultara verídico, hay una verdad que permanece inmutable: no guarda relación alguna con la teoría de los abismos de Dirac!"* (Kragh, 1990).

Pauli, por su parte, insistía en diferenciar la partícula de Anderson-Blackett del hipotético agujero de la teoría de Dirac. En mayo de 1933, le expresó a Dirac: *"No encuentro credibilidad en tu concepción de los 'agujeros', incluso si se demostrara la existencia del 'anti-electrón'"* (Kragh, 1990). En aquel momento, Pauli sostenía que el descubrimiento del positrón respaldaba la hipótesis de la existencia de un neutrino. *"Si tanto el electrón positivo como el negativo coexisten"*, comunicó a Blackett, *"no resulta del todo fantástico suponer la existencia de una partícula neutral compuesta por ambos"* (Moyer, 1981).

El profundo desdén de Pauli hacia la teoría de los abismos se reflejaba en su correspondencia y en sus escritos eruditos. En compañía del físico francés Jacques Solomon (1908-1942), Pauli se avocó a erigir un puente entre la teoría de Dirac y la relatividad general, sin la presencia perturbadora de los electrones de energía negativa. En su influyente revisión del manual de mecánica cuántica en 1933, justo antes de que Anderson anunciara su descubrimiento, Pauli desgranó una crítica mordaz hacia la teoría de los abismos. La enigmática problemática de las energías negativas afirmaba Pauli, *"permanece ineludible, insoslayable ante cualquier intento de solución sencilla"*. Descartaba las conjeturas de Dirac y Oppenheimer sobre las antipartículas con una argumentación contundente:

"La ausencia palpable de tales partículas nos conduciría de regreso a un estado primigenio singular, donde solo una clase de partículas existiría. Esta noción resulta insatisfactoria, pues las leyes naturales en esta teoría claman por una simetría estricta entre electrones y anti-electrones. De este modo, los fotones

gamma, en número no menor a dos, deben, para preservar las leyes de conservación de energía y momento, metamorfosearse espontáneamente en un electrón y un anti-electrón. Por tanto, no consideramos que esta hipótesis deba ser tomada con seriedad" (Kragh, 1990).

El escepticismo de Pauli se aferraba a las sombras incluso después de que el fulgor del positrón iluminara el oscuro firmamento de la física. En aquellos sombríos años de 1933-4, mientras él y Victor Weisskopf (1908-2002) tejían con esmero una versión oscura de la teoría cuántica de campos, arrancada de los retorcidos pasillos de la mente de Klein-Gordon para las partículas sin espín, conscientemente la urdían como un tapiz, una alternativa al torbellino que encerraba a su viejo rival, la teoría de Dirac del electrón danzante.

Pauli anhelaba que esta nueva creación desencadenara una revolución, una liberación de las cadenas que ataban las mentes a los oscuros vericuetos de Dirac. Con Weisskopf a su lado, desenterraron los misterios del éter cuántico, demostrando que la "creación de pares", la "aniquilación" y las "antipartículas" podían forjarse sin la necesidad de abrazar la oscura noción de un vacío habitado por entidades de energía negativa, un abismo nombrado sarcásticamente como "*Anti-Dirac*", en palabras de Dittrich (2015), como el papel antagonico de Pauli y Weisskopf contra Dirac.

Mas, en la danza cósmica de las partículas, la elegante teoría de Pauli-Weisskopf, hilada con hebras de sombra, no trataba de los electrones y positrones, sino de entidades hipotéticas, sin espíritu, de espín cero, y, por tanto, no era una sombra adecuada para el brillo de la teoría de Dirac. En esos días aciagos, Oppenheimer y Wendell Furry (1907-1984) también desterraron las sombras de las anti-partículas, demostrando que podían ser conjuradas dentro del enredo de la teoría cuántica de campos, sin invocar el mar de Dirac, un océano de partículas invisibles, envuelto en el manto de la negatividad (Moyer, 1981).

Pese a las reticencias que ensombrecían la aceptación del electrón positivo de Anderson-Blackett como el anhelado anti-electrón de Dirac, su identificación fue corroborada con vigor durante 1933. En un epistolario cargado de urgencia y especulación, Rudolf Peierls (1907-1955), en el ocaso de la calma que precedió a la tormenta del conflicto mundial, dirigió sus palabras a Hans Bethe, quien, en una danza con la historia, buscaba refugio de las sombras nazis: "*Los electrones positivos, sin duda, encuentran su génesis en el baile cósmico entre un fotón y el núcleo, un suceso que, según la óptica de Dirac, se inscribe como el efecto fotoeléctrico que trasciende desde el espectro de energía negativa hacia el positivo*" (Kragh, 1990). Tres semanas después, Peierls reportó que había abandonado su investigación sobre la teoría de los metales para adentrarse en el estudio del positrón: "*Recientemente... he estado reflexionando sobre los agujeros de Dirac = electrones de Blackett. Tal vez esta teoría de Dirac posea un fundamento plausible dentro de ciertas aproximaciones*" (Kragh, 1990).

Aunque el tiempo desdibuja los contornos de la memoria y la palabra "predicción" puede parecer un tanto audaz, es imperativo adentrarse en el discurso de la historia. La mente de Dirac germinaba la semilla del positrón, y desde 1933 resonaban sus palabras en los ámbitos públicos, algunos críticos alzaron la voz

argumentando que el término "predicción" se erguía demasiado alto para su hazaña. Incluso Blackett, en 1969, dejó plasmado en tinta que "Dirac casi, pero no del todo, predijo el positrón", vocablos que, posiblemente, resonaron con un eco incómodo en el corazón del ilustre físico, si acaso llegó a leerlos. Sin embargo, el cónclave de sabios contemporáneos abraza la idea de que el rol de Dirac en vislumbrar la existencia del positrón constituye uno de los más sobresalientes hitos en el ámbito científico. En el año 2002, poco después del centenario del nacimiento de Dirac, el físico teórico Kurt Gottfried (1929-2022) elevó la voz aún más alto:

"La física ha engendrado otras predicciones audaces, las cuales han sido posteriormente confirmadas por la experimentación. Pero la predicción de la antimateria por parte de Dirac es singular en su esencia, pues fue concebida únicamente por la fe en la pureza teórica, sin ningún indicio de datos, y aun así reveló una profunda y universal propiedad de la naturaleza" (Farmelo, 2010).

En 1933, Dirac yacía en la cúspide de su esplendor, habiendo recibido múltiples galardones en años precedentes, pero en aquel año recibió la más alta distinción en el santuario de la ciencia. En medio del trimestre otoñal en Cambridge, el jueves 9 de noviembre, la voz del auriga del reconocimiento científico resonó en los oídos de Dirac, como un eco de Estocolmo, informándole que compartiría el Premio Nobel de Física de 1933 con Schrödinger por "el descubrimiento de nuevas y fecundas formas de teoría atómica". A pesar de las palpitations nerviosas ante la inevitable embestida de la prensa, Dirac se halló en la encrucijada de considerar el rechazo de tal honor, hasta que, asesorado por la voz sabia de Rutherford, comprendió que *"un rechazo engendrará más publicidad"* (Farmelo, 2010).

La primera nota de felicitación que arribó al refugio de Dirac fue un telegrama procedente de Bohr. Y en un gesto de sentimentalismo perdonable, Dirac respondió:

"Siento que todas mis ideas más profundas han sido acariciadas y moldeadas por las conversaciones que he sostenido contigo, más que con cualquier otro ser. Aunque esta influencia no emane con claridad meridiana en mis escritos, ella preside el arduo camino de todas mis empresas investigativas" (Farmelo, 2009).

A pesar de su inicial renuencia a aceptar tal distinción, Dirac finalmente acudió a la ceremonia de entrega en Estocolmo el 12 de diciembre, acompañado de su madre. En su discurso, dedicó la mayor parte de sus veinte minutos de exposición a "La teoría de los electrones y positrones", detallando cómo la conjunción entre la mecánica cuántica y la relatividad había permitido la predicción del positrón. Por primera vez, hizo referencia a su especulación sobre el positrón como una predicción, y enfatizó con una confianza poco común otra de sus especulaciones: *"la posible existencia de protones negativos"* (Dirac, 1933).

Con una seguridad que sorprendía, señaló la aparente simetría entre la carga positiva y negativa, sugiriendo que el universo podría estar compuesto por cantidades equitativas de materia y antimateria. Planteó:

"Debemos considerar que es un accidente que la Tierra (y presumiblemente todo el sistema solar), contenga una preponderancia de electrones negativos y protones positivos. Es bastante posible que para algunas de las estrellas sea al revés, estas estrellas estén compuestas principalmente de positrones y protones negativos. De hecho, puede haber la mitad de las estrellas de cada tipo"(Dirac, 1933).

Este enfoque visionario de Dirac evoca inevitablemente la imagen previamente trazada por Arthur Schuster, quien también exploró la noción de un cosmos dual, habitado por materia y antimateria en proporciones equitativas. Sin embargo, la pregunta persiste: ¿era la visión de Dirac meramente especulativa, o acaso anticipaba fenómenos aún por descubrir? La audiencia presente en aquella histórica ceremonia ciertamente se vio compelida a reflexionar sobre esta incógnita, confrontada por la confluencia entre la audacia de la especulación científica.

Las ideas físicas impregnadas en la teoría de agujeros de Dirac, como un torrente de pensamiento que atraviesa la vastedad del conocimiento humano, han desatado no solo interrogantes y críticas, sino también una revelación profunda sobre la naturaleza misma del universo que habitamos. En la actualidad, los positrones han dejado atrás el manto de maravilla para convertirse en herramientas, herramientas que trazan la constelación de la existencia humana con destellos de radiante comprensión. Entre estas herramientas, destaca la capacidad de sondear el santuario de la mente en acción, a través de las exploraciones PET (tomografía por emisión de positrones), esa danza de positrones y electrones que desvelan los secretos más íntimos del cerebro (Salamanca, 2023). ¿Acaso no es poesía pura el camino que siguen los positrones hasta tu cabeza? Surgiendo de la inyección de moléculas que llevan consigo el fuego radiactivo de la transformación, los positrones emprenden su viaje efímero, encontrando su destino en el abrazo fugaz con un electrón, generando la luz de la comprensión que trasciende las fronteras de la materia (Baer & Belyaev, 2003).

Pero no es solo en los recovecos de la mente donde los positrones despliegan su magia. En el vasto cosmos de la física fundamental, su presencia es una sinfonía de posibilidades. Elevados a altas energías, convergen con sus contrapartes electrónicas en una danza cósmica de aniquilación, dando origen a la pura esencia de la energía. Es en este altar de partículas que se ha erigido el progreso de la física fundamental en el último medio siglo, donde los aceleradores de partículas son los puentes que conectan mundos. Y entre estos, el colisionador LEP (Gran colisionador de electrones y positrones) en el CERN, cuyo eco se propaga más allá de las fronteras de Ginebra, como un cántico de conocimiento en el firmamento.

Y así, en un eterno ciclo de retroalimentación, las raíces de estas maravillas se entrelazan con los estudios de átomos pesados, fertilizando el terreno de la física del estado sólido. En este reino de electrones y vacíos, donde la materia se convierte en poesía cuántica, surgen los diodos y transistores, tejidos con la astucia de quien moldea el barro de la creación. Y en esta danza de luz y sombra, los electrones y los agujeros se entrelazan en un baile de aniquilación, dando origen a los pilares de la tecnología moderna, como los LED's y los láseres de estado sólido, cuyos destellos son la melodía que acaricia nuestra era digital (Baer & Belyaev, 2003).

Quien diría que cuando Paul Dirac y Robert Oppenheimer forjaron una amistad en Gotinga, la fascinación de este último por la poesía sería motivo de desconcierto para el primero. "¿Por qué perder el tiempo con esas bazofias?" podrían haber sido las palabras que brotaron de los labios de Dirac, en un intento de comprender la pasión de su compañero por el arte de las palabras.

Y en un giro de los acontecimientos, Dirac, ahora postrado ante la grandeza de su propia creación y fascinación a ella, ya no era quien criticaba, sino quien recibía las críticas.

La teoría de Dirac, aunque inicialmente se erigió como una luminaria en el firmamento de la física cuántica, pronto se vio sometida al inquisitivo escrutinio de la comunidad científica. Como es inherente al devenir de la ciencia, la minuciosidad y el desapego a prejuicios revelaron las grietas en su estructura. Los desafíos surgieron, como nubes oscuras en el cielo estrellado, al intentar adentrarse en cálculos más precisos y complejos, donde numerosas partículas y sus correspondientes antipartículas, mostraban resultados que se volvían absurdos, clamando por una teoría más abarcadora, más sublime (Gomberoff & Edelstein, 2021).

Y así, como un coloso emergiendo del ocaso, la electrodinámica cuántica surgió, forjada en la fragua de mentes brillantes como la de Dirac, pero también acariciada por la pluma de otros titanes del pensamiento, entre ellos el célebre físico estadounidense Richard Feynman (1918-1988). Si Dirac era el silencioso poeta de la simetría y la armonía, Feynman era el bufón cósmico, el juglar de la física, con su extroversión chispeante, su humor excéntrico y su seducción irresistible.

Como diría Freeman Dyson (1923-2020) unos de los padres de la electrodinámica cuántica: "*Feynman era a Dirac lo que un electrón a su antipartícula*" (Gomberoff & Edelstein, 2021).

En el continuo tejido de la historia científica, en 1986, Feynman, impartió la primera conferencia en memoria de Paul Dirac, con el corazón cargado de admiración, se alzó en la tribuna para honrar a su ídolo. Como las estrellas en el firmamento, Dirac iluminó el camino de Feynman desde las sombras de la incertidumbre hacia la claridad de la comprensión.

En esta conferencia proclamó:

"Cuando era joven, Dirac era mi héroe. Logró un avance, un nuevo método para hacer física. Tuvo el coraje de simplemente adivinar la forma de una ecuación, la ecuación que ahora llamamos la ecuación de Dirac, y luego intentar interpretarla. Maxwell en su época obtuvo sus ecuaciones, pero solo en una enorme masa de 'engranajes' y demás... Tuve que aceptar la invitación, después de todo él fue mi héroe todo el tiempo, y es algo maravilloso encontrarme dando una conferencia en su honor." (Feynman & Weinberg, 1987).

Como un tejedor de sueños, Feynman heredó el legado de Dirac, enhebrando la trama del universo con hebras de pensamiento intrépido. En su obra maestra, "The Theory of Positrons" (1949), tejió una nueva interpretación, impregnada de magia y audacia, quizás similar a la de Dirac. Para él, no existían las energías negativas, sino la fascinante noción de electrones que danzaban hacia atrás en el tiempo. En este juego de

espejos cósmicos, llevar energía y carga negativa al pasado era equivalente a proyectarlas hacia un futuro incierto, desafiando las fronteras del tiempo y el espacio (Feynman, 1949).

La conexión entre ambas historias es innegable, y este trabajo recién concluido podría ser el punto de partida para explorar un nuevo capítulo. Las posibilidades son infinitas, y el futuro aguarda con ansias la continuación de esta fascinante narrativa.

Conclusiones

- Teniendo en cuenta la propuesta de la profesora María Mercedes Ayala y su recomendación sobre la importancia de incorporar la historia y evolución de los conceptos físicos en la enseñanza de las ciencias, es esencial que los maestros no se limiten a impartir teorías y fórmulas, sino que también presenten el contexto histórico y los problemas que llevaron a su creación. Este enfoque histórico y divulgativo no solo atrae a los especialistas del campo, sino también a estudiantes de educación media y de los primeros semestres universitarios, facilitando así el acercamiento y la comprensión de conceptos complejos, como el de antipartícula. De este modo, se fomenta una educación más accesible. Entender el progreso científico desde una perspectiva histórica permite apreciar no solo los descubrimientos y teorías individuales, sino también la secuencia y el contexto en que ocurrieron, ofreciendo una visión más completa y coherente del avance científico.
- La contextualización llevada a cabo destaca el profundo impacto que tuvo el surgimiento de la mecánica cuántica en las consideraciones de Dirac al formular su famosa ecuación. Este estudio revela cómo las nuevas perspectivas y comprensiones teóricas planteadas por la mecánica cuántica influyeron directamente en el enfoque de Dirac para abordar la descripción de las partículas fundamentales y sus propiedades. La mecánica cuántica, al introducir conceptos revolucionarios como la dualidad onda-partícula y la incertidumbre inherente a la naturaleza de las partículas subatómicas, desafiaba las concepciones clásicas de la física y demandaba un marco teórico completamente nuevo. En este contexto de cambio de visión, Dirac emergió como un visionario que no solo comprendió la necesidad de adaptarse a estas nuevas ideas, sino que también las abrazó y las integró magistralmente en su trabajo. Su ecuación, que incorpora la relatividad especial y la mecánica cuántica, representa un hito crucial en la historia de la física, al proporcionar una descripción aproximada y elegante de las partículas elementales, pese a ello, dicha ecuación presentaba ciertas anomalías en la descripción física de los fenómenos.
- Desde un enfoque teórico e histórico, la ecuación de Dirac destaca por haber establecido un marco coherente con la mecánica cuántica y relatividad especial. El análisis de las soluciones de energía negativa en la ecuación de Dirac ha revelado su significado físico subyacente y sus implicaciones teóricas, desafiando las concepciones preexistentes sobre la naturaleza de la materia. Estas soluciones, inicialmente desconcertantes y criticadas por la comunidad científica de la época, han llevado a la predicción audaz de la existencia de antipartículas, una idea que, redefinió nuestro panorama científico, se corroboró experimentalmente y ha transformado nuestra comprensión de la naturaleza fundamental de la materia y la antimateria.
- Tras una revisión de los antecedentes del trabajo y durante su desarrollo, se ha observado una notable escasez de investigaciones a nivel tanto local que aborden de manera específica el tema de las antipartículas, así como una limitada cantidad de trabajos que realicen una recontextualización histórica

detallada en el ámbito de la mecánica cuántica. Por consiguiente, la recontextualización histórica realizada en este documento ha resultado esclarecedora al identificar los principales hitos, teorías y descubrimientos que han contribuido en la concepción de la idea de antipartícula propuesta por Paul Dirac. Ofreciendo una visión complementaria y constitutiva al formalismo matemático a la que comúnmente desarrollan los libros de texto centrados en la disciplina. Adicional, es importante destacar que el presente documento queda como soporte en el repositorio de la Universidad Pedagógica Nacional, permitiendo que futuros licenciados puedan acercarse a su contenido y continuar con la construcción del concepto de antipartícula desde la postura de otros autores, como Richard Feynman, contribuyendo así a la ampliación de la documentación en el repositorio.

Bibliografía

La bibliografía se presentará segmentada en diversas secciones, siendo la primera de estas una dedicada a los trabajos originales que han contribuido significativamente a la exploración, análisis y presentación del concepto y la recontextualización histórica.

Anderson, C. D. (1932). The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives. *Science*, 76(1967), 238-239. <https://doi.org/10.1126/science.76.1967.238>

Bohr, N. (1961). *Atomic Theory and the Description of Nature: I-*

Bohr, N. (1985). *Foundations of Quantum Physics I (1926-1932)*.

Born, M. (1926). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *European Physical Journal. A, Hadrons And Nuclei*, 37(12), 863-867. <https://doi.org/10.1007/bf01397477>

Born, M. (1969). *Physics in my generation: A Selection of Papers*.

Born, M. (1970). *Physics in my generation*.

Dirac, P. A. M. (1927). The physical interpretation of the quantum dynamics. *Proceedings Of The Royal Society Of London*, 113(765), 621-641. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0012>

Dirac, P. A. M. (1928a). The quantum theory of the electron. *Proceedings Of The Royal Society Of London*, 117(778), 610-624. <https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0023>

Dirac, P. A. M. (1928b). The quantum theory of the Electron. Part II. *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series A, Containing Papers Of A Mathematical And Physical Character*, 118(779), 351-361. <https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0056>

Dirac, P. A. M. (1930a). A theory of electrons and protons. *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series A, Containing Papers Of A Mathematical And Physical Character*, 126(801), 360-365. <https://doi.org/10.1098/rspa.1930.0013>

Dirac, P. A. M. (1930b). On the Annihilation of Electrons and Protons. *Mathematical Proceedings Of The Cambridge Philosophical Society*, 26(3), 361-375. <https://doi.org/10.1017/s0305004100016091>

- Dirac, P. A. M. (1931). Quantised singularities in the electromagnetic field., *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series A, Containing Papers Of A Mathematical And Physical Character*, 133(821), 60-72. <https://doi.org/10.1098/rspa.1931.0130>
- Dirac, P. A. M. (1933). *Theory of electrons and positrons*. <https://docplayer.net/21140931-Theory-of-electrons-and-positrons.html>
- Dirac, P. A. M. (1978). *Directions in Physics: Lectures Delivered During a Visit to Australia and New Zealand August/September 1975*. John Wiley & Sons.
- Dirac, P. A. M., Tamm, I. J., & Kozhevnikov, A. B. (1993). *Paul Dirac and Igor Tamm correspondence. Part 1. 1928 - 1933*. <http://inspirehep.net/record/361713>
- Einstein, A., Born, M., & Born, H. (1971). *The Born-Einstein Letters: Correspondence Between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916-1955, with Commentaries by Max Born*. MacMillan.
- Feynman, R. P. (1949). The Theory of Positrons. *Physical Review*, 76(6), 749-759. <https://doi.org/10.1103/physrev.76.749>
- Heisenberg, W. (1973). Development of Concepts in the History of Quantum Theory. En *Springer eBooks* (pp. 264-275). https://doi.org/10.1007/978-94-010-2602-4_11
- Heisenberg, W. (2004). *Fundamental Physics — Heisenberg and Beyond: Werner Heisenberg Centennial Symposium «Developments in Modern Physics»*. Springer Science & Business Media.
- Heisenberg, W. (2013). *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Courier Corporation.
- Kapitza, P. L., Strelkov, P. G., & Laurman, E. (1938). The Zeeman and Paschen-Back effects in strong magnetic fields. *Proceedings Of The Royal Society Of London*, 167(928), 1-15. <https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0114>
- Klein, O. (1929). Die Reflexion von Elektronen an einem Potentialsprung nach der relativistischen Dynamik von Dirac. *European Physical Journal. A, Hadrons And Nuclei (Print)*, 53(3-4), 157-165. <https://doi.org/10.1007/bf01339716>

Klein, O., & Nishina, Y. (1929). Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac. *Zeitschrift Für Physik*, 52(11-12), 853-868.

<https://doi.org/10.1007/bf01366453>

Pauli, W. (1946). Remarks on the history of the exclusion principle. *Science*, 103(2669), 213-215.

<https://doi.org/10.1126/science.103.2669.213>

Pauli, W. (1947). *Exclusion principle and quantum mechanics: Lecture Given in Stockholm After the Award of the Nobel Prize of Physics 1945*.

Pauli, W. (2013). *Writings on Physics and philosophy*. Springer Science & Business Media.

Weyl, H. (1929). Elektron und Gravitation. I. *The European Physical Journal A*, 56(5-6), 330-352.

<https://doi.org/10.1007/bf01339504>

Weyl, H. (1967). *Gruppentheorie und Quantenmechanik*.

Wolfgang Ernst Pauli, 1900-1958. (1960). *Biographical Memoirs Of Fellows Of The Royal Society*, 5, 174-192. <https://doi.org/10.1098/rsbm.1960.0014>

En este segundo bloque se encuentran libros y artículos que fueron fundamentales para la redacción y contextualización histórica de la mecánica cuántica. Gran parte de estos recursos proporcionaron el sustento teórico y documental necesario para comprender el desarrollo y las contribuciones clave en este campo, ofreciendo una perspectiva detallada sobre la evolución de la teoría cuántica y las interpretaciones fundamentales que han moldeado nuestra comprensión actual. Además, estos recursos ayudaron a destacar las problemáticas de la época, ilustradas a través de la correspondencia entre los físicos de aquel entonces.

Baer, H., & Belyaev, A. (2003). *Proceedings of the Dirac Centennial Symposium*. World Scientific.

Baer, H., Dirac, P. A. M., & Belyaev, A. (2003). *Proceedings of the Dirac Centennial Symposium: Florida State University, Tallahassee, USA, 6-7 December 2002*. World Scientific.

Baggott, J. E. (2017). *Mass: The Quest to Understand Matter from Greek Atoms to Quantum Fields*. Oxford University Press.

Baggott, J. E., & Baggott, J. (2011). *The Quantum Story: A History in 40 Moments*. Oxford University Press.

- Ballentine, L. E. (1970). The statistical interpretation of quantum mechanics. *Reviews Of Modern Physics*, 42(4), 358-381. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.42.358>
- Belloni, L. (1994). On Fermi's route to Fermi-Dirac statistics. *European Journal Of Physics*, 15(3), 102-109. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/15/3/002>
- Bloch, F. (1976). Heisenberg and the early days of quantum mechanics. *Physics Today*, 29(12), 23-27. <https://doi.org/10.1063/1.3024633>
- Bolles, E. B. (2004). *Einstein defiant: Genius Versus Genius in the Quantum Revolution*. Joseph Henry Press.
- Buchwald, J. Z., & Warwick, A. (2001). *Histories of the Electron: The Birth of Microphysics*. Mit Press.
- Carretero, J. A. C. (2013). *Dirac, la antimateria: el reflejo oscuro de la materia*.
- Carretero, J. A. C. (2014). *Pauli, el Espín: los electrones bailan*.
- Cassidy, D. C. (1993). *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*. W. H. Freeman.
- Cassidy, D. C. (2010). *Beyond uncertainty: Heisenberg, Quantum Physics, and The Bomb*. Bellevue Literary Press.
- Crowther, J. G. (1881). *Fifty Years with Science*.
- Dittrich, W. (2015). On the Pauli-Weisskopf anti-Dirac paper. *The α European Physical Journal. H*, 40(2), 261-278. <https://doi.org/10.1140/epjh/e2015-60006-1>
- Duncan, A., & Janssen, M. (2007). On the verge of umdeutung in Minnesota: Van Vleck and the Correspondence Principle. Part one. *Archive For History Of Exact Sciences*, 61(6), 553-624. <https://doi.org/10.1007/s00407-007-0010-x>
- Enz, C. P. (2010). *No time to be brief: A Scientific Biography of Wolfgang Pauli*.
- Enz, C. P. (2013). *Wolfgang Pauli: Das Gewissen der Physik*. Springer-Verlag.
- Farmelo, G. (2009). *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*. Faber & Faber.
- Farmelo, G. (2010). Did Dirac predict the positron? *Contemporary Physics*, 51(2), 97-101. <https://doi.org/10.1080/00107510903217214>

- Faus, J. N. (2017). *El principio de incertidumbre de Heisenberg*. RBA Libros.
- Feynman, R. P., & Weinberg, S. (1987). *Elementary Particles and the Laws of Physics: The 1986 Dirac Memorial Lectures*. Cambridge University Press.
- Fierz, M., & Weisskopf, V. F. (1960). *Theoretical Physics in the Twentieth Century: A Memorial Volume to Wolfgang Pauli*.
- Forman, P. (1970). Alfred Landé and the Anomalous Zeeman Effect, 1919-1921. *Hist Stud Phys Sci*, 2, 153-261. <https://doi.org/10.2307/27757307>
- Gangui, A. (2007). El universo de Einstein: 1905 - Annus mirabilis - 2005. *arXiv (Cornell University)*. <https://arxiv.org/abs/0705.4266v1>
- Gomberoff, A., & Edelstein, J. (2021). Antimateria, magia y poesía. DEBATE.
- Heilbron, J. L. (1983). The origins of the exclusion principle. *Hist Stud Phys Sci*, 13(2), 261-310. <https://doi.org/10.2307/27757517>
- Hendry, J. (1984). *The Creation of Quantum Mechanics and the Bohr-Pauli Dialogue*. Springer.
- Hunt, B. J. (2005). JED Z. BUCHWALD and ANDREW WARWICK (eds.), *Histories of the Electron: The Birth of Microphysics*. Dibner Institute Studies in the History of Science and Technology. Cambridge, MA and London: MIT Press, 2001. Pp. xi+514. ISBN 0-262-02494-2. £37.95 (hardback). *The British Journal For The History Of Science*, 38(1), 117-118. <https://doi.org/10.1017/s0007087404346686>
- Jackson, J. D. (2010). Llewellyn Hilleth Thomas: An appraisal of an under-appreciated polymath. *Bulletin Of The American Physical Society*, 2010. http://absimage.aps.org/image/APR10/MWS_APR10-2009-000051.pdf
- Jammer, M. (1966). *The conceptual development of quantum mechanics*.
- Jed Z. Buchwald, Andrew Warwick (Editors). *Histories of the Electron: The Birth of Microphysics*. XI + 514 pp., Figs, Index. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2001. \$24.95, £16.95 (paper); \$62, £42.95 (cloth). (2002). *Isis*, 93(2), 368. <https://doi.org/10.1086/345071>

- Kojevnikov, A. (2002). Dirac's Quantum Electrodynamics. En *Birkhäuser Boston eBooks* (pp. 229-259).
https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0131-1_8
- Kojevnikov, A. (2020). *The Copenhagen Network: The Birth of Quantum Mechanics from a Postdoctoral Perspective*. Springer Nature.
- Kragh, H. (1979). *Niels Bohr's Second Atomic Theory*.
- Kragh, H. (1984). Equation with the many fathers. The Klein–Gordon equation in 1926. *American Journal Of Physics*, 52(11), 1024-1033. <https://doi.org/10.1119/1.13782>
- Kragh, H. (1985). The Fine Structure of hydrogen and the gross Structure of the Physics Community, 1916-26. *Hist Stud Phys Sci*, 15(2), 67-125. <https://doi.org/10.2307/27757550>
- Kragh, H. (2012). *Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913-1925*. OUP Oxford.
- Kragh, H. (2016). *Simply dirac*. Simply Charly.
- Kragh, H. (2020). *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton University Press.
- Kuhn, T. S. (1963, 7 mayo). *P. A. M. Dirac - Session III*. <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4575-3>
- La Teana, F. (2005). *La nascita dello spin*.
- Laserna, D. B. (2012). *Schrödinger, las paradojas cuánticas: el universo está en la onda*.
- Leone, M., & Robotti, N. (2008). P M S Blackett, G Occhialini and the invention of the counter-controlled cloud chamber (1931–32). *European Journal Of Physics*, 29(2), 177-189.
<https://doi.org/10.1088/0143-0807/29/2/001>
- Mehra, J. (1973). *The Physicist's Conception of Nature*. Springer.
- Mehra, J. (1987). *The Historical Development of Quantum Theory. 5,1. Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics. Pt. 1. - Schrödinger in Vienna and Zurich : 1887 - 1925*.

- Mehra, J., & Rechenberg, H. (1982). *The Formulation of Matrix Mechanics and its modifications 1925–1926*. Springer.
- Moore, W. J. (1994). *A life of Erwin Schrödinger*. Cambridge University Press.
- Navarro, J., & Vives, J. N. (2013). *Niels Bohr, El Átomo Cuántico: pasaporte cuántico a otro estado*.
- Pais, A. (1982). Max Born's Statistical Interpretation of Quantum Mechanics. *Science*, 218(4578), 1193-1198. <https://doi.org/10.1126/science.218.4578.1193>
- Pais, A. (1986). PLAYING WITH EQUATIONS, THE DIRAC WAY. *RU86-B-150, DOE-ER-40033B-106*. <https://inspirehep.net/literature/18127>
- Pais, A. (1991). *Niels Bohr's Times: In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford University Press.
- Pais, A. (2000). *The genius of science: A Portrait Gallery of Twentieth-century Physicists*.
- Pais, A., Jacob, M., Olive, D. I., & Atiyah, M. F. (2005). *Paul Dirac: The Man and His Work*. Cambridge University Press.
- Rodriguez-Meza, M. A., & Cervantes-Cota, J. L. (2006). El efecto fotoeléctrico. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/315538875_El_efecto_fotoelectrico
- Ron, J. M. S. (2001). *Historia de la física cuántica*.
- Rosa, P. S. (2021). *Louis de Broglie e as ondas de matéria*. <https://doi.org/10.47749/t/unicamp.2004.297902>
- Straumann, N. (2009). Wolfgang Pauli and Modern Physics. *Space Science Reviews*, 148(1-4), 25-36. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9486-9>
- Winter, R. G. (1959). Klein Paradox for the Klein-Gordon Equation. *American Journal Of Physics*, 27(5), 355-358. <https://doi.org/10.1119/1.1934851>

En esta sección se presentan los artículos fundamentales que se emplearon extensamente para discutir la ecuación de Dirac y el surgimiento del concepto de antipartícula propuesto por Paul Dirac. La importancia de esta revisión radica en que proporciona un marco teórico sólido y contextualiza los desarrollos históricos y científicos que sustentan el análisis principal de este trabajo de grado.

Kragh, H. (1981). The genesis of Dirac's relativistic theory of electrons. *Archive For History Of Exact Sciences*, 24(1), 31-67. <https://doi.org/10.1007/bf00327714>

Kragh, H. (1990). *Dirac: A Scientific Biography*. Cambridge University Press.

Moyer, D. F. (1981). Evaluations of Dirac's electron, 1928–1932. *American Journal Of Physics*, 49(11), 1055-1062. <https://doi.org/10.1119/1.12643>

Pashby, T. (2012). Dirac's Prediction of the Positron: A Case Study for the Current Realism Debate. *Perspectives On Science*, 20(4), 440-475. https://doi.org/10.1162/posc_a_00081

Wright, A. S. (2016). A beautiful sea: P. A. M. Dirac's epistemology and ontology of the vacuum. *Annals Of Science*, 73(3), 225-256. <https://doi.org/10.1080/00033790.2016.1157731>

Finalmente, se presentan los artículos y libros que fueron fundamentales para explicar los conceptos abordados, así como aquellos que contribuyeron a la recontextualización histórica y al planteamiento de la problemática.

Andino, F., Recarte, M., & Spilsbury, M. (2019). La función Delta de Dirac. *Revista de la Escuela de Física*, 2(1), 55-61. <https://doi.org/10.5377/ref.v2i1.8292>

Ayala, M. (2017). LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA PARA LA FORMACIÓN DE PROFESORES DE FÍSICA. *Tecné, Episteme y Didaxis TED/Tecné, Episteme y Didaxis/Revista de la Facultad de Ciencia y Tecnología*, 6. <https://doi.org/10.17227/ted.num6-5663>

Ayala, M. M. (2006). *Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades.*
<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/proposic/article/view/8643653>

Cassini, A., & Levinas, L. (2005). La reinterpretación radical del experimento de Michelson-Morley por la relatividad especial. *Scientiae Studia*, 3(4). <https://doi.org/10.1590/s1678-31662005000400002>

Galili, I. (2007). Thought experiments: determining their meaning. *Science & Education*, 18(1), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11191-007-9124-4>

Guerrero, C., & Antonio, J. (2007). Historia y epistemología de las ciencias : las aportaciones de Toulmin a la enseñanza de las ciencias. *Investigación y Experiencias Didácticas*.

<http://redined.mecd.gob.es/xmlui/handle/11162/22782>

Omnès, R. (2002). *Quantum Philosophy: Understanding and Interpreting Contemporary Science*. Princeton University Press.

Omnès, R. (2020). *Understanding quantum mechanics*. Princeton University Press.

Rodriguez-Meza, M. A., & Cervantes-Cota, J. L. (2006). El efecto fotoeléctrico. *ResearchGate*.

https://www.researchgate.net/publication/315538875_El_efecto_fotoelectrico

Rovira, S. C. (2006). Un recorrido por la historia del libro de divulgación científica. *Quark: Ciencia, Medicina, Comunicación y Cultura*, 37, 58-64.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2048384>

Anexos

1. Correspondencia de Bohr- Dirac

Respuesta de Dirac a la correspondencia de Bohr:

"Estimado profesor Bohr,

Agradezco sinceramente su carta. La problemática concerniente al origen del espectro continuo de rayos gamma reviste un interés singular y podría erigirse como una enmienda seria a la teoría atómica. Previamente, había tenido conocimiento de las exposiciones de Gámov durante las reuniones del club Kapitza, donde delineó sus puntos de vista.

Con relación a esta cuestión, mi posición radica en la preferencia inquebrantable por la conservación estricta de la energía. Preferiría abandonar incluso el concepto de materia compuesta por átomos y electrones separados que la conservación de la energía.

Para evitar la dificultad concerniente a la energía cinética negativa de los electrones, propongo un enfoque sencillo. Consideremos la ecuación de onda: [Ecuación]. Si esta ecuación describe con fidelidad el movimiento de un único electrón, implica que, si el electrón inicia con energía positiva, existe una probabilidad finita de una transición repentina a un estado de energía negativa, irradiando el excedente energético en forma de radiación de alta frecuencia. Así, el retorno a un estado de energía positiva se torna arduo, pues requeriría absorber radiación de alta energía, escasa en la naturaleza. Sin embargo, el electrón podría incrementar su velocidad (de ser capaz de adquirir momento), reduciendo su energía y emitiendo más radiación. Por lo tanto, los estados más estables para el electrón son aquellos de energía negativa con una velocidad muy alta.

Supongamos ahora una cantidad tan vasta de electrones que todos estos estados estables estén ocupados. El principio de exclusión de Pauli obligaría entonces a algunos electrones a permanecer en estados menos estables. Por ejemplo, si todos los estados de energía negativa están ocupados y solo unos pocos de energía positiva, dichos electrones con energía positiva no podrían transicionar a estados de energía negativa y, por ende, se comportarían de manera adecuada. La distribución de electrones negativos, si bien de densidad infinita, sería uniforme y no induciría campo electromagnético observable.

Es plausible asumir que no todos los estados de energía negativa están ocupados, sino que existen vacancias o 'agujeros'. Estos agujeros, descriptibles mediante una función de onda como órbitas de rayos X, se manifestarían experimentalmente como partículas con energía positiva, pues rellenar un agujero (es decir, dotarlo de energía negativa) requeriría suministrar energía. Además, se vislumbra que un agujero se desplazaría en un campo electromagnético como si poseyera carga positiva. Sugiero que estos agujeros son

los protones. Cuando un electrón con energía positiva colisiona con un agujero y lo rellena, se genera simultáneamente un electrón y un protón, emitiendo su energía en forma de radiación.

Creo que de esta manera se puede entender por qué todas las cosas que uno realmente observa en la naturaleza tienen una energía positiva. Asimismo, abre la posibilidad de esclarecer la asimetría entre electrones y protones; se podría considerar a los protones como las partículas reales y a los electrones como los agujeros en la distribución de protones de energía negativa. Sin embargo, cuando se tiene en cuenta la interacción entre los electrones, esta simetría se estropea. Aún no he trabajado matemáticamente las consecuencias de la interacción. Es el efecto de "Austausch" lo que es importante y aún no he podido obtener una formulación relativista de esto. En cambio, uno puede esperar que una teoría adecuada de esto permita calcular la proporción de las masas del protón y el electrón.

Me alegró mucho escuchar que visitará Cambridge en primavera y espero su visita. Con mis más cordiales saludos,

Atentamente,

P. A. M. Dirac " (Kragh, 1990).

Aquí Dirac empezaba a mostrar la característica principal de su nueva teoría. Pese a ello Bohr nuevamente encontró y señaló la propuesta de Dirac tan interesante como objetable.

"Querido Dirac,

5 de diciembre de 1929

Muchas gracias por tu carta tan interesante, que ha provocado en Klein y en mí mucho pensamiento y discusión. Tu idea es realmente fascinante, pero debo confesar que no vemos cómo se desarrolla en detalle. Ante todo, no entendemos cómo evitas el efecto de la densidad eléctrica infinita en el espacio. Según los principios de la electrostática, parece que incluso una electrificación uniforme finita debería dar lugar a un campo de fuerza considerable, si no infinito. En las dificultades de tu antigua teoría, aún siento inclinación por ver un límite de los conceptos fundamentales en los que hasta ahora se basa la teoría atómica, más que un problema de interpretar la evidencia experimental de manera adecuada mediante estos conceptos. De hecho, según mi punto de vista, la transición fatal de energía positiva a negativa no debería considerarse como una indicación de lo que puede suceder bajo ciertas condiciones, sino más bien como una limitación en la aplicabilidad del concepto de energía...

...En el caso de electrones que impactan en una barrera de potencial examinada por Klein, tenemos, por un lado, un ejemplo destacado de las dificultades involucradas en el uso ilimitado del concepto de potenciales en la mecánica cuántica relativista. Por otro lado, tenemos precisamente en este caso un ejemplo del límite real de la aplicación de la idea de potenciales en relación con posibles disposiciones

experimentales. De hecho, debido a la existencia de una unidad elemental de carga eléctrica, no podemos construir una barrera de potencial de cualquier altura y pendiente deseada sin enfrentarnos a un problema atómico definido. [paradigma de Klein]...

...En el problema de los espectros de desintegración beta³², ahora podríamos estar fuera del límite natural para la aplicabilidad coherente de los conceptos de energía y momento, y en este sentido podríamos considerar la expulsión de un rayo beta de un núcleo como el nacimiento de un electrón como individuo dinámico. En el hecho de que la carga total del núcleo pueda medirse antes y después de la desintegración del rayo beta, y que los resultados concuerden con la conservación de la electricidad, veo un respaldo para mantener la conservación de las cargas elementales, incluso a riesgo de abandonar la conservación de la energía, y no entiendo del todo tus razones para adoptar el punto de vista opuesto. Por supuesto, no deseo abogar por ninguna de las escépticas, antiguas o nuevas, respecto a la estricta conservación de la energía en la teoría cuántica ordinaria. Por el contrario, mi opinión es que el campo legítimo de aplicación de los teoremas de conservación puede ser justo el mismo que el de una aplicación consistente de la mecánica cuántica en su forma actual, donde se ignoran los problemas que surgen en la electrodinámica clásica en relación con la constitución del electrón.

En cuanto a las transiciones de energía positiva a negativa acompañadas de radiación, no estoy seguro de que presenten una dificultad tan seria para tu ecuación de onda como podría parecer. La pregunta es cuánto influyen esas características de la teoría que reclaman las transiciones en cuestión en los problemas, donde tu teoría se ha encontrado en tan maravilloso acuerdo con los experimentos. En este sentido, debo corregir la afirmación en mi carta anterior con respecto a la probabilidad de estas transiciones, que no es ni mucho menos tan grande como creía. Al discutir el problema más detenidamente con Klein, nos convencimos de que la estimación de esta probabilidad no tuvo en cuenta suficientemente la pequeñez de la longitud de onda de la radiación en cuestión en comparación con las dimensiones atómicas. No hemos realizado un cálculo real de ninguna de estas probabilidades, y si has considerado el problema en detalle, te estaría muy agradecido por cualquier información sobre este punto. Mi esperanza es que debería ser posible defender todas las aplicaciones exitosas de tu ecuación de onda, pero sospecho que la limitación natural de estas aplicaciones impide una extrapolación del tipo que describes en tu carta. En cuanto al problema de la aniquilación de electrones y protones que mencionas en este contexto, me parece que la evidencia astrofísica es de naturaleza muy conflictiva. Así, la teoría de Eddington sobre el equilibrio

³² Durante aquel periodo de indagación científica, el fenómeno de la desintegración beta de los núcleos atómicos se erigió como un objeto de estudio ampliamente abordado. En el entendimiento de que los núcleos atómicos se hallan compuestos por protones y electrones, se avizoraban múltiples dilemas. Uno de los retos inherentes a esta concepción residía en la complejidad concerniente a la confinación del electrón dentro del núcleo. En tanto que los electrones son comúnmente concebidos como partículas que orbitan en torno al núcleo, derivado de la interacción electromagnética, su inserción dentro del núcleo planteaba interrogantes acerca de los mecanismos físicos que pudieran conferir sustento a su reclusión en un ámbito tan confinado.

Simultáneamente, emerge un dilema de carácter estadístico asociado a la desintegración beta. Esta vicisitud sugiere impedimentos para explicar los fenómenos observados desde una perspectiva probabilística, lo cual podría hallarse vinculado a la intrincada naturaleza del comportamiento cuántico exhibido por las partículas nucleares involucradas en el proceso de desintegración.

de las estrellas parece indicar que la tasa de producción de energía por unidad de masa atribuida a dicha aniquilación es mayor en las etapas iniciales de la evolución estelar donde la densidad en el interior es menor que en las etapas posteriores donde la densidad interior es mayor. Por lo que puedo ver, cualquier punto de vista como el tuyo reclamaría una variación con la densidad en la dirección opuesta. En general, me parece que una comprensión de las leyes de la evolución estelar reclama algún nuevo y radical cambio en nuestra vista actual sobre el equilibrio energético.

Con los más cordiales saludos de parte de Klein y míos,

Atentamente,

Niels Bohr" (Moyer, 1981).

Dirac respondió de inmediato, aprovechando la oportunidad para destacar la diferencia entre su concepción y la de Bohr respecto a las dificultades actuales de la teoría cuántica. Opuesto a la estrategia revolucionaria de Bohr, incluida su disposición a renunciar a la conservación de la energía para algunos procesos atómicos, Dirac favorecía una estrategia gradual. Una vez más, se reproduce la carta completa.

"Querido Profesor Bohr:

Agradezco profundamente su correspondencia. Sin embargo, permítame expresar mi disentimiento respecto a algunos de los puntos vertidos en su carta. Si bien concibo que la mecánica cuántica, como cualquier teoría física, presenta sus limitaciones intrínsecas y eventualmente podría ser superada por una concepción más avanzada, no encuentro motivos para afirmar que haya alcanzado el cenit de su desarrollo. Considero plausible que experimente iterativas modificaciones, particularmente en lo concerniente a su metodología de aplicación, las cuales podrían solventar las actuales dificultades que enfrenta la teoría.

¿Has visto el artículo de Pokrowski, Z.f.Physik 58. 706, donde afirma mostrar que los procesos radioactivos no son independientes entre sí? Creo que es en alguna base como esta, incluso si Pokrowski no tiene razón, que uno debe buscar una explicación del espectro continuo de rayos beta. Teóricamente, depende quizás de alguna interacción de resonancia u "austausch" pasada por alto hasta ahora entre los electrones en diferentes núcleos.

Hay un caso donde las transiciones de los electrones de niveles de energía positiva a negativa sí plantean serias dificultades prácticas, como me ha señalado Waller. Este es el caso de la dispersión de radiación por un electrón, libre o ligado. Un proceso de dispersión es realmente una doble transición, que consiste primero en la absorción de un fotón con el electrón saltando a cualquier estado y luego en una emisión con el electrón saltando a su estado final (como en el efecto Raman) (o también de primero la emisión y luego la absorción). Los estados inicial y final de todo el sistema tienen la misma energía, pero no el estado intermedio, que dura solo un tiempo muy corto. Ahora se encuentra, para la radiación cuya frecuencia es pequeña en comparación con mc^2 / h , que prácticamente toda la dispersión proviene de transiciones dobles

en las que el estado intermedio es de energía negativa para el electrón. Waller ha realizado cálculos detallados de esto. Si se dice que los estados de energía negativa no tienen un significado físico, entonces no se puede ver cómo puede ocurrir la dispersión.

En mi nueva teoría, el estado de energía negativa tiene un significado físico, pero el electrón no puede saltar hacia abajo en él porque ya está ocupado. Sin embargo, hay un nuevo tipo de doble transición que está teniendo lugar ahora, en la que primero uno de los electrones de energía negativa salta al estado final adecuado con emisión (o absorción) de un fotón, y luego el electrón original de energía positiva salta hacia abajo y llena el hueco, con absorción (o emisión) de un fotón. Este nuevo tipo de proceso compensa precisamente aquellos excluidos y restaura la validez de las fórmulas de dispersión derivadas sobre la base de la posibilidad de estados intermedios de energía negativa.

No creo que la distribución infinita de electrones de energía negativa cause ninguna dificultad. Se puede asumir que en la ecuación de Maxwell

$$\text{div } E = -4\pi\rho,$$

la p significa la diferencia en la densidad eléctrica respecto a su valor cuando el mundo está en su estado normal (es decir, cuando se ocupa cada estado de energía negativa y ninguno de energía positiva). Así, p consiste en una contribución $-e$ de cada estado ocupado de energía positiva y una contribución $+e$ de cada estado no ocupado de energía negativa.

No he realizado ningún cálculo real de las probabilidades de transición de energía positiva a negativa, pero creo que son bastante pequeñas.

Con un cordial saludo para ti y Klein,

Atentamente,

P. A. M. Dirac" (Moyer, 1981).