

**DE LA NOCIÓN DE MATERIA AL MODELO NUCLEAR: UN ANÁLISIS
HISTÓRICO DESDE EL ATOMISMO CLÁSICO HASTA EL
SURGIMIENTO DE LA FÍSICA NUCLEAR**

Jonathan Bernal Viuche

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Licenciado en Física

Asesora:

Sandra Ávila

Línea de profundización:

La enseñanza de la física y la relación física matemática

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

2025

Dedicatoria:

Quiero dedicar principalmente este trabajo de grado a mi madre, Dora Milena Viuche, por brindarme todo su apoyo en este proceso formativo, por creer y tener fe en mí. ¡Te amo, mamá!

Agradecimientos

Inicialmente quiero agradecerle a mi madre por su apoyo en el transcurso de mi tiempo en la universidad; sin ella, esto no hubiera sido posible. Té agradezco inmensamente mamá.

A la profesora Sandra Ávila, por asesorarme y guiarme en la construcción de este trabajo de grado, por su tiempo, paciencia y dedicación. ¡Muchas gracias, profe!

También quiero expresar agradecimiento a mi pareja, Valentina Guaje, por brindarme su apoyo y tiempo, y además por ser una parte de mi motivación e inspiración.

Agradezco a todos mis compañeros que hicieron parte de mi proceso en la universidad, especialmente a Laura Pedraza, Cristian Méndez, Juan Camilo, Sebastián Guerrero, Santiago Campos, Yancy Castillo, y a todos los demás compañeros, con los cuales viví momentos inolvidables en este paso por la universidad.

Y, por último, le agradezco a la Universidad Pedagógica Nacional, a la línea de profundización la enseñanza de la física y la relación física matemática y a todos los profesores que hicieron parte de mi proceso; les agradezco profundamente.

LISTA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
Objetivo General	12
Objetivos específicos.....	13
Antecedentes	13
Metodología	14
CAPÍTULO 1: EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE ÁTOMO	16
1.1 Grecia: Noción de Materia	16
1.2 La Alquimia.....	19
1.3 Resurgimiento del Atomismo.....	22
1.4 El Atomismo Comienza a Consolidarse.....	27
1.5 Construcción del Formalismo Frente al Atomismo	36
1.6 La Electricidad y el Descubrimiento del Electrón	39
1.7 Reflexiones Finales Sobre La Evolución Del Concepto De Átomo	43
CAPÍTULO 2: ESTABLECIMIENTO DEL CONCEPTO DE NÚCLEO ATOMICO	45
2.1 El Movimiento Browniano y el Tamaño de los Átomos.....	45
2.2 La Radiactividad	47
2.3 Los Nuevos Tipos de Radiación.....	50
2.4 Desintegración Radiactiva.....	51
2.5 El Átomo Tiene Un Núcleo.....	54
2.6 El Número Atómico y Los Isotopos.....	59
2.7 Reflexiones Finales Sobre el Establecimiento del Concepto de Núcleo Atómico.....	62
CAPITULO 3: EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE NÚCLEO ATOMICO	64
3.1 La Trasmutación Artificial, El Protón Y La Teoría protón-electrón.....	64
3.2 El Descubrimiento del Neutrón.....	68
3.3 La Teoría Protón-Neutrón y la Interacción Nuclear.....	71
3.4 Fisión Nuclear	73

3.5 Modelo de la Gota Liquida.....	76
3.6 Reflexiones Sobre la Evolución del Concepto de Núcleo Atómico.....	78
3.7 Aspectos Relevantes Sobre los Conceptos de Átomo y Núcleo en la Enseñanza.....	80
CONCLUSIONES	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Esquema del modelo de Rutherford</i>	10
Figura 2. <i>Barómetro de Torricell</i>	24
Figura 3. <i>Tabla de sustancias consideradas elementos por Lavoisier</i>	29
Figura 4. <i>Representación de los elementos y sustancias por Dalton</i>	33
Figura 5. <i>Tabla de los elementos con los pesos relativos entre ellos, elaborada por Dalton</i>	34
Figura 6. <i>Grafica de la distribución de las velocidades para los gases nobles de Maxwell</i>	38
Figura 7. <i>Representación de la producción de los rayos catódicos</i>	40
Figura 8. <i>Esquema del átomo según el modelo de Thomson</i>	42
Figura 9. <i>Fotografía de Marie y Pierre Curie en el laboratorio de la escuela</i>	48
Figura 10. <i>Ilustración del grado de penetración de la radiación</i>	50
Figura 11. <i>Esquema original de las series de desintegración radiactiva del uranio, torio y radio</i>	53
Figura 12. <i>Esquema gráfico del experimento de Rutherford</i>	56
Figura 13. <i>Representación esquemática del modelo atómico de Rutherford</i>	58
Figura 14. <i>Representación Gráfica de la ley de Moseley</i>	61
Figura 15. <i>Esquema del experimento de transmutación artificial de Rutherford</i>	65
Figura 16. <i>Representación del experimento de Chadwick que condujo al descubrimiento del neutrón</i>	70
Figura 17. <i>Representación del átomo de carbono con el modelo nuclear protón-neutrón</i>	72
Figura 18. <i>Esquema del bombardeo de neutrones de fermi</i>	74
Figura 19. <i>Deformaciones Nucleares y el Proceso de Fisión según el Modelo de la Gota Líquida</i>	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Comparación entre la evolución histórica y conceptual del átomo y del núcleo atómico</i>	83
--	----

INTRODUCCIÓN

La comprensión del átomo ha ocupado un lugar central en el desarrollo de la física, constituyéndose como uno de los conceptos fundamentales para explicar la estructura y el comportamiento de la materia. Sin embargo, la manera en que este concepto se presenta habitualmente en la enseñanza suele privilegiar modelos simplificados, dejando de lado el complejo proceso histórico y conceptual que dio lugar a su formulación actual. En particular, el desarrollo del núcleo atómico -aunque decisivo para la consolidación del atomismo moderno- suele abordarse de manera fragmentada o subordinada, sin un análisis profundo de su evolución ni de las problemáticas teóricas y experimentales que lo hicieron emerger como objeto de estudio específico.

Desde una perspectiva histórica y epistemológica, el concepto de átomo no surge como una entidad estática ni inmutable, sino como el resultado de transformaciones sucesivas que atraviesan distintos contextos culturales, filosóficos y científicos. Desde el atomismo clásico de la Grecia antigua, de carácter filosófico, hasta la consolidación del atomismo moderno en el siglo XX, las ideas sobre la constitución de la materia han experimentado rupturas conceptuales que pueden interpretarse, en cierto momento, como un cambio de paradigma, en la visión de la materia. En este proceso, el establecimiento del núcleo atómico a comienzos del siglo XX representa un punto de inflexión fundamental, al cuestionar la indivisibilidad del átomo y redefinir su estructura interna.

El desarrollo del núcleo atómico, impulsado por el estudio de la radiactividad y por avances experimentales, dio lugar a una nueva rama de la física: la física nuclear. A diferencia del estudio del átomo, el análisis del núcleo se orientó hacia la comprensión de fenómenos específicamente nucleares, como la estabilidad, la emisión de radiación y la liberación de energía. Este proceso culmina hacia 1939 con el descubrimiento de la fisión nuclear, hecho que no solo consolidó el conocimiento teórico del núcleo, sino que también inauguró profundas implicaciones tecnológicas y sociales.

En este contexto, el presente trabajo se propone realizar un análisis histórico y conceptual de la evolución del átomo y del núcleo atómico, organizado en tres capítulos. El primero aborda el origen del atomismo clásico desde la antigua Grecia, pasando por diversas nociones y concepciones, hasta culminar en el modelo de Thomson, el cual da inicio al atomismo moderno.

El segundo capítulo se centra en el surgimiento del concepto de núcleo atómico, impulsado tanto por los avances en el estudio de la radiactividad como por los experimentos que condujeron a su formulación teórica, evidenciando un cambio profundo en la manera de concebir el átomo.

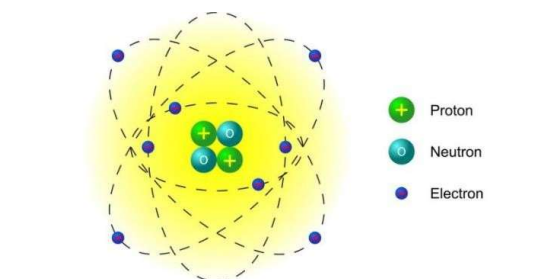
Finalmente, el tercer capítulo analiza las transformaciones asociadas a los avances experimentales y a las problemáticas teóricas que marcaron el desarrollo del núcleo atómico hasta 1939. A partir

de este recorrido, se realiza un análisis comparativo que busca establecer criterios orientadores para reflexionar sobre la enseñanza del átomo en la educación media, superando una visión meramente descriptiva de los modelos y favoreciendo una comprensión más crítica, histórica y contextualizada del conocimiento científico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El núcleo atómico ha sido un concepto que desde el ámbito educativo no se enseña de manera independiente, de hecho, se menciona como parte de un átomo. El modelo atómico que más se enseña y que más se emplea es el modelo de Rutherford, el cual se puede considerar como el más sencillo de entender para los estudiantes debido a que se presenta como “Un pequeño sistema solar”. Si leemos el libro de texto de Física de Raymond A. Serway, en la sección de Física Atómica, este menciona: “... Rutherford los representó moviéndose en órbitas alrededor del núcleo de la misma forma en que los planetas giran alrededor del Sol. Por esta causa, con frecuencia el modelo se conoce como el modelo planetario del átomo” (Serway y Jewett, 2008, pág. 1219), haciendo referencia a la forma en que los electrones en este modelo se muestran orbitando el núcleo.

Figura 1. Esquema del modelo de Rutherford



Nota. Tomado de Ondarse, 2024.

En la Figura 1 se muestra una ilustración de cómo se representa este modelo para llevarlo al aula en la educación media e introducir además las partículas subatómicas. Como se observa aquí, no se da una imagen correcta del modelo, y no tiene en cuenta el contexto histórico y científico en el cual surge, además, presenta un error conceptual sobre el mismo ya que para la época en la que Rutherford lo propone, la estructura del núcleo no se había establecido, incluso no se había propuesto o descubierto la partícula llamada neutrón.

Usualmente, al momento de explicar este modelo, se toma al núcleo como el centro del átomo donde coexisten “partículas” subatómicas con carga positiva y neutra denominadas respectivamente protón y neutrón, pero no se profundiza más en las propiedades, estructura y características del núcleo atómico. Más allá de esto, es de resaltar que el núcleo atómico resulta ser algo más que un simple concepto, y requirió de un proceso de evolución en su entendimiento desde la formulación de Rutherford hasta la actualidad.

Por otro lado, la enseñanza de la estructura atómica es un componente esencial en la formación científica de los estudiantes, proporcionando una base crucial para el entendimiento de la química y la física. Particularmente, en la ciudad de Bogotá, y en general en Colombia, la educación sobre la estructura del núcleo atómico no está adecuadamente representada en los planes de estudio de las instituciones educativas, especialmente en la educación media. Al analizar los estándares

básicos de competencias en ciencias, establecidos por el Ministerio de Educación Nacional (MEN), la estructura atómica debe abordarse en grado undécimo. Un ejemplo de una de estas competencias se menciona en inciso *Procesos Químicos*, y establece lo siguiente: “*Explicar la estructura de los átomos a partir de diferentes teorías*” (MEN, 2006, pág. 140) pero omiten por completo competencias relacionadas con la estructura nuclear.

Esta deficiencia en el campo de la educación tiene ciertas consecuencias negativas, no sólo en las escuelas, sino también en las carreras de ingeniería e incluso de química o física en las universidades. En primer lugar, limita la comprensión profunda de los fenómenos nucleares por parte de los estudiantes, que es la base de campos científicos y tecnológicos tan avanzados como la energía nuclear, la medicina nuclear y la investigación en física de partículas, como lo menciona Javier Parra:

Los conceptos de la física moderna hoy día están más que presentes en la vida de las personas, y es imperativo que los lineamientos que direccionan la enseñanza de la física orienten temas de física moderna en la escuela, porque precisamente, la física moderna juega un papel importante en los avances significativos de la humanidad de los últimos tiempos... (Parra, 2023, pág. 3).

Lo cual muestra de base la importancia de incluir no solo las generalidades, sino realmente hacer un acercamiento de los estudiantes a la física moderna.

Adicionalmente, en la búsqueda de la literatura académica y de monografías correspondientes a trabajos que abordan específicamente la enseñanza del concepto de núcleo atómico, se evidencia una notable escasez de estudios dedicados a este tema. La mayoría de los trabajos que se revisaron se centran en los modelos atómicos o en la enseñanza de la física moderna, priorizando contenidos como la mecánica cuántica y la relatividad, haciendo menciones breves del núcleo atómico. Algunos de los trabajos revisados se presentan en la sección de antecedentes.

Esta falta de atención detallada a la educación y la investigación académica refleja y perpetúa la omisión del núcleo de la educación secundaria y superior. Por otro lado, los profesores no tienen la oportunidad de enseñar las estructuras básicas que se encuentran alrededor del mundo subatómico, esta situación puede deberse a varias razones: primero se tienen las limitaciones en los currículos escolares alrededor de la enseñanza de la física moderna, como lo presenta Marcela González en su trabajo “Enseñanza y aprendizaje de la física moderna en los estudiantes del grado 11^ºb de la institución educativa Antonio Lenis de la ciudad de Sincelejo Sucre: Una aproximación desde la relatividad especial de Albert Einstein”:

Por consiguiente, se destaca un elemento esencial que podría ser un factor determinante en el bajo rendimiento a nivel nacional e internacional por parte de los estudiantes. Dicho factor consiste, en que, en el currículo escolar, no se incluyen o en su defecto son casi inexistentes las temáticas de física moderna (González, 2022, pág. 8).

Además, se tienen las dificultades inherentes a la asignatura, o falta de documentación al alcance de

los profesores que contenga información clara y precisa que les permita el abordaje la descripción de temas puntuales de la física moderna, como es el caso del núcleo desde ciertos modelos, ya que como se mostró anteriormente se hace un reduccionismo al comparar el átomo con el modelo planetario.

Es por esto por lo que el presente trabajo se enmarca en el abordaje desde la historia para presentar la evolución del núcleo atómico. Cabe señalar que un análisis histórico para la enseñanza es fundamental porque permite comprender cómo las ideas científicas han evolucionado, superando paradigmas anteriores y construyendo conceptos más estructurados a lo largo del tiempo. Un análisis histórico no solo revela que la ciencia es un proceso dinámico, lleno de debates y reestructuraciones, sino que también ayuda a los estudiantes y docentes a identificar las dificultades conceptuales que enfrentaron los científicos en su momento, promoviendo una comprensión profunda de los fenómenos, además, al mostrar cómo los contextos sociales, culturales y tecnológicos influyen en el desarrollo científico. Así como se muestra en el libro “Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias”:

Comprendemos que el conocimiento científico tiene un componente histórico; sin embargo, no es por ello por lo que acudimos al estudio de los textos originales. La recurrencia al estudio de los textos de los científicos sobre nuestras preguntas es un ejercicio de comprensión de la fenomenología distinto al ejercicio del historiador de la ciencia... Estas no son las cuestiones del educador en ciencias. La recurrencia al estudio de la historia de la ciencia, al estudio de los textos originales, está en vínculo con la actividad de comprender los fenómenos que estudiamos y que luego convertimos en objetos de estudio para otros, lo cual marca nuestro compromiso con el conocimiento científico (Malagón Sánchez y otros, 2018, pág. 25).

Por lo tanto, la presente investigación se propone para hacer una revisión desde la historia, que sea una base para el abordaje de la evolución del concepto de núcleo y que se establezca como material de apoyo para los lectores y profesores alrededor de su enseñanza. Por ende, se plantea la siguiente pregunta que guiará la investigación:

¿Cómo las transformaciones conceptuales en los modelos de átomo desde el atomismo clásico al modelo nuclear permiten establecer un análisis comparativo que aporte criterios para la enseñanza de átomo en educación media?

Objetivo General

Realizar un análisis de la evolución histórica de los modelos de átomo y sus transformaciones conceptuales teniendo en cuenta el atomismo clásico, el modelo nuclear y los cambios en el modelo nuclear hasta 1939, con el fin de establecer una comparativa que permita derivar criterios para la enseñanza de átomo en educación media.

Objetivos específicos

- Describir las principales concepciones de átomo en la física clásica, previas a la inclusión del núcleo atómico, identificando las relaciones con la estructura de la materia.
- Analizar el surgimiento del modelo atómico con núcleo y los aspectos relevantes a nivel fenomenológico y conceptual que requirieron su establecimiento.
- Contrastar las transformaciones conceptuales en el modelo de núcleo atómico dadas por los avances experimentales y problemáticas teóricas hasta 1939, con el fin de establecer una comparativa que permita la orientación de criterios para la enseñanza del átomo en educación media.

Antecedentes

En la búsqueda bibliográfica, sobre trabajos relacionados con la investigación propuesta a nivel local e internacional, se encuentran muy pocos que aborden de manera general un análisis histórico de la física nuclear y, en especial, de los modelos nucleares.

Un artículo de 2011, realizado en colaboración entre la Universidad Pedagógica y la Universidad Distrital, titulado “*Una propuesta pedagógica en torno a tópicos introductorios de física nuclear*” (Ramos y otros, 2011). En el artículo se plantean propuestas pedagógicas desde la metodología cooperativo-colaborativo para la enseñanza de temas introductorios a la Física nuclear, específicamente sobre la estructura Atómica y la Fisión nuclear. El documento menciona que, gracias a la metodología empleada, en donde los estudiantes podían debatir constantemente sus puntos de vista a partir del desarrollo de cada una de las actividades, los estudiantes pudieron construir conocimientos base para la física nuclear. Este documento aportó a la investigación con la reflexión respecto a la metodología propuesta para la enseñanza de la Física moderna. Lo que da una base para las reflexiones finales del trabajo en investigación.

Adicionalmente, existe un trabajo de pregrado de la Universidad de Sucre titulado *Enseñanza y aprendizaje de la física moderna en los estudiantes del grado 11°B de la institución educativa Antonio Lenis de la ciudad de Sincelejo, Sucre: Una aproximación desde la relatividad especial de Albert Einstein*” (González, 2022), el cual identifica diversas dificultades en la enseñanza de la física escolar. Entre ellas se destacan: el bajo desempeño de los estudiantes colombianos en ciencias según las pruebas PISA de la OCDE, los resultados insuficientes en las pruebas Saber 11°, las debilidades en la interpretación de fenómenos científicos, la exclusión de contenidos de física moderna en el currículo tradicional y la falta de formación docente en temáticas como relatividad y física cuántica. A partir de este diagnóstico, el autor implementa una propuesta didáctica centrada en la relatividad especial. Este antecedente resulta relevante para el presente trabajo, pues permite reconocer problemáticas estructurales en la enseñanza de la física moderna en Colombia, estableciendo puntos de convergencia con las dificultades que también atraviesan la enseñanza de la física nuclear.

A nivel local y dentro de la Universidad Pedagógica, existen trabajos que abordan análisis históricos, especialmente en el ámbito de la física moderna, aunque no directamente sobre la evolución del núcleo atómico y sus diferentes modelos. Primero se encuentra el trabajo titulado “*De la física clásica a la moderna: Un análisis histórico-matemático sobre la cuantización de la energía por medio del efecto fotoeléctrico*” (Ariza Romero, 2020). Este trabajo de pregrado ofrece una contextualización histórica sobre la evolución del concepto de energía y describe los experimentos de la física moderna que llevaron al cambio de la idea de energía continua a discreta, así como la generalización matemática del concepto de cuanto en el efecto fotoeléctrico. Aunque, no se centra específicamente en la física nuclear, se enmarca en la física moderna y aporta conceptos, una estructura y contextualizaciones históricas que se relacionan con el trabajo de investigación.

Otro trabajo de pregrado de la Universidad Pedagógica que presenta un acercamiento a la física nuclear se titula “*Sobre la estructura nuclear: El modelo de Yang-Mills como una explicación a su estabilidad*” (Camelo Oliveros, 2018). En este trabajo se muestra un breve recorrido alrededor de los modelos de átomo y su estructura de Demócrito al modelo de Yukawa (1932), centrándose en la descripción del problema de estabilidad del núcleo para así llegar a la necesidad de las simetrías gauge. Posteriormente, se realiza un análisis conceptual del modelo de Yang-Mills y su importancia en la estabilidad del núcleo. Este documento ofrece un punto de partida en términos conceptuales al proyecto que se está desarrollando, debido a que muestra de manera general algunos de los problemas históricos sobre los conceptos de núcleo atómico y su estructura, lo cual constituye una base para la investigación.

Metodología

El presente trabajo se realizó utilizando una metodología cualitativa basada en el análisis histórico y conceptual del desarrollo de átomo y núcleo atómico hasta 1939. La metodología cualitativa resultó adecuada para este estudio debido a su capacidad para la investigación respecto a la evolución de los conceptos y modelos científicos dentro de su contexto histórico.

Y es que un análisis histórico-conceptual es un enfoque que estudia cómo se han construido, transformado y consolidado los conceptos científicos a través del tiempo, atendiendo a su contexto histórico y epistemológico. Este tipo de análisis no se limita a solo a narrar los hechos históricos cronológicamente, sino que además busca comprender los significados, concesos, rupturas y continuidades que dan forma a los conceptos. Por tal razón resulta adecuado dentro de una metodología cualitativa ya que privilegia la interpretación, el análisis, textos y fuentes históricas, y la comprensión de los procesos de producción del conocimiento, más que la medición o la generalización estadística, como se haría en un trabajo de metodología cuantitativa (Izcara Palacios, 2014).

El análisis se estructuró en tres fases principales:

Fase 1: *Antecedentes Históricos Pre-Núcleo:*

Se realizó una revisión de la literatura para contextualizar los primeros desarrollos teóricos, epistemológicos y experimentales respecto al concepto de átomo y materia. Esta sección incluye un análisis de documentos que aborden la evolución conceptual de la materia y el atomismo hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

Fase 2: *Análisis del surgimiento del modelo atómico y su establecimiento.*

Esta sección incluye un análisis de las contribuciones e ideas clave que sentaron las bases de la física nuclear, especialmente los experimentos y aspectos fenomenológicos que llevaron a la construcción del concepto y de los modelos del núcleo atómico.

Fase 3: *Análisis de las transformaciones conceptuales en el modelo de núcleo y comparativa que permita la orientación de criterios para la enseñanza del átomo en educación media.*

En esta sección del documento se realizó un análisis de las transformaciones teóricas y conceptuales que surgieron tras el nacimiento del concepto de núcleo atómico. Además, se llevó a cabo una comparación entre la evolución del modelo atómico y la del núcleo, destacando cómo este proceso histórico permite orientar criterios para la enseñanza del átomo en la educación media.

Para el desarrollo de este análisis se utilizaron fuentes primarias y secundarias, entre ellas artículos científicos y libros de carácter histórico y académico. Los hechos históricos recopilados se organizaron siguiendo una secuencia cronológica, y se analizaron de manera temática, identificando los cambios o transformaciones significativas en la conceptualización del átomo y del núcleo, así como los modelos que surgieron a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO 1: EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE ÁTOMO

Este capítulo abordará la contextualización histórica de la noción de la materia y del átomo. Se explorará desde las perspectivas de los filósofos griegos y la alquimia, hasta llegar a las contribuciones de científicos y filósofos, tales como Gassendi, Boyle, Lavoisier, Dalton y Boltzmann culminando con los avances de Thompson. Este recorrido sirve como base en el camino hacia el siguiente capítulo, que profundizará en el nacimiento del concepto del núcleo atómico.

1.1 Grecia: Noción de Materia

Parte de las inquietudes sobre cuestiones físicas tienen su origen en la antigüedad, incluso antes del surgimiento de la civilización griega, durante la prehistoria, cuando los seres humanos se encontraban en pleno proceso de desarrollo como civilización. En este periodo, la agricultura y la ganadería comenzaban a prosperar, mientras que el fuego y los primeros metales ya habían sido descubiertos.

El ser humano por este tiempo ideó formas de crear y poder preservar el fuego, lo que condujo posteriormente al desarrollo de las primeras herramientas. Esto llevó al inicio de la edad de piedra y posteriormente a la edad de los metales donde se destacó la manipulación del cobre y el hierro. A lo largo de este periodo los seres humanos trataron de comprender y dominar la naturaleza. Por ejemplo, el hecho de mantener el fuego obligaba a los seres humanos primitivos a buscar materiales adecuados que sirvieran como combustible, lo que fue un gran avance para esta época. Posteriormente durante la edad de los metales, el cobre y el hierro eran usados para fabricar herramientas, sin embargo, estos no siempre se encontraban a simple vista en la naturaleza. Esta necesidad de encontrar materiales llevó a la invención de calderas para calcinar minerales, de los cuales se encontraron fácilmente metales con tonalidades azules y verdes, como la azurita y la malaquita, los cuales contenían una parte de cobre en su interior y por sus colores vibrantes se les utilizó ampliamente y de forma especial para decoración y rituales en ceremonias como ocurría en Egipto. Así pues, de este modo se sentaron las bases de la metalurgia y la alquimia primitiva (Asimov, 2010), sin embargo, esta transformación de sustancias que de forma empírica se estableció en las primeras civilizaciones, llevó a cuestiones mucho más profundas que se retomarían tiempo después, por ejemplo sobre lo que hacía que se tornaran de ciertos colores o por qué por ejemplo la azurita se desgastaba más fácilmente.

Estos procesos de transformación de sustancias llevaron a pensar respecto a la materia y su composición, estructura o cómo era posible estas transformaciones. Alrededor del s. XI a. C. La civilización griega puso la atención exactamente sobre estas cuestiones. Se tiene como registro que dentro de los primeros en hablar sobre el tema se encuentra el filósofo Tales de Mileto (640-546 a.C.), él pensaba y reflexionaba sobre los cambios en la materia; es probable que antes de Tales haya habido otros griegos que pensarán sobre esta cuestión, sin embargo, desde donde se tiene certeza se retomará a Tales como el primero. En su pensamiento, Tales consideró como la

materia podía transformarse de una sustancia a otra, por ejemplo, en el caso bien conocido de la azurita, un mineral azul, se transformaba en cobre por procesos asociados a la calcinación. Tal vez, pensaba en cómo era la naturaleza de estas sustancias o si estas sustancias eran el mismo elemento, pero en diferentes aspectos (Asimov, 2010).

Tales creyó que era así, y que este elemento del cual se derivaban el resto de las sustancias era el agua, ya que veía como podía transformarse en diferentes estados como (sólido, líquido y gaseoso). La hipótesis de Tales fue poco a poco aceptada entre los filósofos griegos posteriores, pero estos no se limitaron a que este elemento fuera el agua.

Es así como Anaxímenes (585-528 a.C) sugirió que el elemento fundamental era el aire, ya que postuló que este podía condensarse formando el agua y la tierra o expandirse formando el fuego. Sin embargo, este no fue el único filósofo griego que sugirió un elemento base alternativo al de Tales, Heráclito (535-470 a.C) propuso al fuego como principio fundamental, ya que este elemento para él simbolizaba el cambio y la transformación (Sambursky, 1962).

No obstante, la hipótesis de Tales para los demás filósofos no se podía limitar a un solo elemento, Empédocles (495-430 a.C) fue el primero en sugerir que la materia estaba compuesta por 4 elementos fundamentales: tierra, aire, fuego y agua. Pero además introdujo en su hipótesis dos fuerzas que las combinaban y separaban, estas eran el amor (atracción) y la discordia (repulsión). Aun así, la hipótesis de Empédocles fue una base para que Aristóteles (384-322 a.C) formulara su propia hipótesis al respecto y modificara algunos de los aspectos propuestos por Empédocles. Aristóteles pensaba que estos elementos se formaban con dos pares de propiedades opuestas (frío, calor, humedad y sequedad). El agua se formaba por el frío y húmedo, la tierra por el frío y seco, el aire por el cálido y húmedo, el fuego cálido y seco. Además, les añadió a estos elementos ciertas propiedades innatas como a la tierra el caer y al fuego el elevarse. Pero estos 4 elementos no fueron los únicos, Aristóteles al observar los cuerpos celestes supuso que deberían estar compuestas por otra sustancia distinta a las ya mencionadas, a esta sustancia la denominó éter. (Sambursky, 1962)

Esta época tan fructífera para el pensamiento permitió que a la par, otros filósofos griegos reflexionaran en otro aspecto sobre la materia: y es que no solo su composición era vital para entender cómo los materiales de los que se disponía estaban formados, además, se encontraba la cuestión sobre la divisibilidad de los materiales ¿es posible dividir un objeto indefinidamente?

Leucipo (450 a.C) es considerado el primero de los filósofos griegos en afirmar la hipótesis de que debería existir una partícula tan pequeña que ya no se pudiera dividir. Posteriormente siguiendo con esta idea de pensamiento su discípulo Demócrito (470-380 a.C) denominó a estas partículas tan pequeñas *átomon* que significa indivisible.

Esta corriente de pensamiento se llamó atomismo y afirmaba que la materia debía estar compuesta por estas partículas indivisibles (átomos) que se diferencian entre sí por su forma, tamaño, orden y posición, y eran estas diferencias una parte de las propiedades que permitían tener diferentes sustancias. Además, desde esta corriente de pensamiento, las sustancias estaban compuestas por diferentes átomos (unidades indivisibles) y vacío, el cual es necesario para explicar el movimiento:

los átomos se encuentran en eterno movimiento en el vacío y los fenómenos que se observan se explican por la interacción (choques o uniones) o la separación de los átomos sin una finalidad o propósito último. Esto les permitía a los atomistas pensar en que podían transformarse unas sustancias en otras por combinación o cambios en las relaciones de átomos, vacío y movimiento sin que los átomos sufrieran cambios en sí mismos (Kirk et al., 1987).

Sin embargo, esta doctrina no tuvo mucha popularidad entre los griegos, especialmente para Aristóteles, quien defendía la idea de que la materia era continua, y establece dos elementos para refutar la idea de átomo: el primero sobre el vacío, ya que para Aristóteles el vacío propuesto por los atomistas no es posible, y establece múltiples argumentos para refutar la idea de materia creada por átomos y vacío, llegando al argumento de que la existencia de vacío impediría el movimiento natural. El segundo elemento se encuentra alrededor de lo divisible e indivisible, argumenta que dividir de forma indefinida para él no conduce a unidades indivisibles, el continuo no puede estar hecho de indivisibles, para él se contradice la idea de continuo e indivisible, por tanto, si la materia es continua es divisible, sus partes serán por siempre divisibles sin poder llegar a la condición del átomo (Aristóteles, 1995).

Es así como la concepción de los atomistas al ser refutada por Aristóteles, que sería uno de los pensadores más influyentes en los siguientes siglos, se deja de lado y aproximadamente dos mil años más tarde se retoma. Aun así, hubo otros filósofos como en el caso de Epicuro (342-270 a.C) y Lucrecio (95-55 a.C) que siguieron con el legado del atomismo donde sus pensamientos tomarían más importancia en años posteriores.

En este momento se hará un alto para ampliar la caracterización las cualidades de los átomos desde las concepciones del atomismo propuesto por los griegos, particularmente desde lo descrito por Demócrito y Epicuro. Para estos autores los átomos al ser los elementos últimos que permiten la descripción de la realidad presentan las siguientes características:

- Los átomos son eternos e inmutables, lo que establece que no se crean ni se destruyen y persisten a los cambios naturales.
- Los átomos son indivisibles, no permitiendo partición alguna o perderían su identidad.
- Los átomos son incomprensibles, su existencia se establece mediante la razón, no por la experiencia mediante los sentidos.
- Los átomos son invisibles dado que su tamaño es extremadamente pequeño y esto establece la diferencia entre realidad última y apariencias sensibles.
- Los átomos se diferencian únicamente por su forma, tamaño y disposición, dejando de lado las cualidades sensibles como el color, la temperatura o el sabor.
- Los átomos son homogéneos en su naturaleza.
- La materia adquiere sus propiedades según la combinación de sus átomos, junto con el

orden y el movimiento de los átomos en el vacío.

De esta forma el legado de los atomistas establece que las propiedades observables de las sustancias no se atribuyen a los átomos en sí mismos, sino a la manera en que estos se combinan, se ordenan y se relacionan en el vacío. Por tanto, el cambio y la transformación de las sustancias no lleva a una modificación interna de los átomos, sino una reorganización de sus relaciones en el vacío y a cambios en el movimiento, lo que establece una explicación de que la naturaleza funciona de forma mecanicista y no teleológica.

Sin embargo, es importante señalar una diferencia relevante entre las propuestas de Demócrito y Epicuro. Mientras Demócrito concibió el movimiento de los átomos como regido estrictamente por la necesidad, Epicuro introdujo la noción de desviación espontánea e impredecible de los átomos en el vacío a la que denominó *clinamen*, con el fin de explicar la contingencia y evitar un determinismo absoluto. A pesar de esta diferencia, ambos pensadores coincidieron en considerar a los átomos y al vacío como los principios fundamentales de la realidad última, consolidando así el núcleo conceptual del atomismo antiguo (Kirk et al., 1987).

Son estos supuestos precisamente los que constituyen el punto de partida de la crítica aristotélica. Para Aristóteles, la explicación dada por los atomistas es insuficiente dado que postulan la existencia del vacío y conciben la materia como compuesta por unidades indivisibles, lo cual entra en tensión con su propia concepción de la naturaleza como algo continuo, dada la experiencia sensible. En consecuencia, la explicación mecanicista del atomismo se ve reemplazada por una interpretación en la que la continuidad de la materia y el análisis del movimiento que requiere de un medio ocupan un lugar central, estableciendo la concepción ampliamente aceptada en la época y por siglos para comprender la naturaleza y los cambios que se observan en los fenómenos naturales.

Se verá más adelante la similitud de los postulados propuestos por los atomistas griegos y la primera teoría atómica, que constituye el resurgimiento del atomismo como explicación fenomenológica de la naturaleza y de la materia (Joven, 2012).

1.2 La Alquimia

Retomando una de las cuestiones antiguas sobre la materia, específicamente sobre los metales y la relación entre el cobre y otros minerales como la azurita, a continuación, se hablará de la evolución de la química partiendo desde el surgimiento de la alquimia.

La alquimia inicia aproximadamente en el siglo III a.C. como una unión entre lo que denominaban “química”¹ que se describe como procesos asociados con la transformación, purificación y

¹ Para los egipcios la palabra química no tenía el sentido moderno de la ciencia que conocemos hoy, sino que se usaba relacionando el conocimiento que tenían sobre las transformaciones de sustancias, por prácticas asociadas a rituales y técnicas ligadas al *Kemet* -Tierra negra- (Holmyard, 1957).

regeneración (Kemet) que era una práctica de los antiguos egipcios y las ideas respecto a la materia de los filósofos griegos. La mezcla entre estas dos culturas se dio a partir del periodo helenístico, durante la conquista de Egipto por Alejandro Magno entre (356-323 a.C), que en ese tiempo se encontraba bajo el dominio del Imperio Persa. Aquí se fundaría la ciudad de Alejandría que posteriormente se convertiría en una ciudad de saberes científicos. Los egipcios asociaban el conocimiento al dios Thot (Dios de la sabiduría) y respectivamente para los griegos era el dios Hermes. Esto produjo que los alquimistas tomaran un aura de secretismo y espiritualidad, por lo que los textos que escribían respecto a la alquimia estaban expresados con simbolismos y metáforas lo que dificultaba la comunicación de este tipo de conocimiento (Martín, 2002).

En esta época se le denomina la alquimia greco-egipcia. Un personaje para destacar en este periodo de tiempo fue Zósimo de Panapolis (siglo III d.C) considerado de los primeros alquimistas en dejar escritos extensos y sistemáticos, sin embargo, muchos de estos estaban fuertemente influidos por el misticismo, la espiritualidad y la filosofía neoplatónica. Una de las ideas más interesantes de Zósimo es que el proceso alquímico refleja una purificación interior. El hecho de transformar metales impuros en “oro” para él no era solo un acto técnico, sino una metáfora del perfeccionismo espiritual del alquimista. Aunque sus ideas eran algo extravagantes permite establecer un punto de partida para la alquimia de aquí en adelante, que será retomado por otros autores (Martín, 2002).

Un poco antes de Zósimo durante el imperio romano, aproximadamente en el siglo II d.C., el conocimiento griego entró en declive y la expansión de la religión cristiana conllevó a que se desconfiara del pensamiento pagano y egipcio, por lo mismo los alquimistas sufrieron persecuciones por su creciente fama de brujos y falsificadores. Aproximadamente en el 292 d.C. el emperador Diocleciano ordenó la destrucción de tratados alquímicos, ya que pensaba que la supuesta fabricación de “oro” llevaría arruinar la economía del imperio. Esto provocó la casi extinción de la alquimia durante algunos siglos. Sin embargo, los textos alquímicos fueron refugiados en tierras del imperio bizantino. Tras la expansión del islam, los árabes se apoderaron de Persia y Siria y se dedicaron a la traducción al árabe de numerosos textos de ciencia y filosofía, entre ellos los de alquimia. De esta forma, fueron los árabes quienes denominaron el “Arte sagrado” como “*al -kimiya*”, de ahí vendría el nombre que posteriormente se popularizaría de “Alquimia” (Martín, 2002) (Asimov, 2010).

Jabir ibn-Hayyan (721-815 d.C) mejor conocido en Europa como Geber, es considerado el padre de la alquimia islámica y es una figura clave en la evolución hacia la química moderna. Geber propuso que los metales estaban compuestos por dos principios fundamentales: de mercurio, responsable del brillo y la maleabilidad, y de azufre encargado de la inflamabilidad y el color. Según su hipótesis los metales eran mezclas imperfectas de mercurio y azufre y si se lograba combinarlos en la proporción y pureza correcta se podía obtener oro. De aquí surge la idea de Geber de que el papel del alquimista consiste en obtener la legendaria “Piedra Filosofal” o “Elixir”, el cual agregado al metal imperfecto le da las proporciones exactas de las cualidades para que el metal transmute a oro. Además, se creía que este tal “Elixir” tenía la capacidad de regenerar la salud y dar larga vida al que lo ingiriese. La importancia de Geber radica en que la búsqueda de

este supuesto “Elixir” lo llevó a estudiar las transformaciones de sustancias, desarrollar o mejorar técnicas como la destilación, calcinación, disolución, purificación, cristalización y sublimación. Además de identificar y describir sustancias como el ácido nítrico, ácido acético, entre otros. Lo que fue crucial para el desarrollo de la química siglos después (Martín, 2002).

Otro alquimista importante de ser nombrado fue Al Razi (865-925) uno de los grandes médicos del mundo islámico, adoptó un enfoque pragmático de la alquimia, orientándola a la medicina y alejándola de la transmutación de metales. Sistematizó el saber alquímico al describir con claridad materiales y procedimientos, y amplió la teoría de Geber al incorporar la sal como tercer elemento, formando la tríada alquímica. Posteriormente, Avicena (980-1037) asumió una postura más escéptica y racionalista, criticando la transmutación al afirmar que los cambios en los metales eran solo aparentes y no alteraban su naturaleza esencial (Martín, 2002).

La alquimia árabe perduró hasta el siglo XIII y llegó a Europa principalmente por España, en consecuencia, de las cruzadas. Entre los siglos XII y XIV se transmitieron conocimientos árabes y griegos al resto de Europa, culturalmente empobrecida tras la caída del Imperio romano, gracias a las traducciones al latín. Destaca el traductor italiano Gerardo de Cremona, quien en Toledo tradujo noventa y dos obras árabes (Asimov, 2010).

En esta época, la alquimia fue adoptada en Europa, especialmente por monjes franciscanos y dominicos dando lugar a numerosas obras. La alquimia latina se basó en la tradición árabe y greco-egipcia, manteniendo la idea de la transmutación de los metales y la búsqueda del elixir, integradas con la filosofía y la religión medieval. Destaca el dominico francés Vicente de Beauvais (1190-1264) y su *Speculum Maius*, una enciclopedia de referencia para clérigos y estudiosos, donde describe la alquimia a partir de los cuatro espíritus (Mercurio, azufre, arsénico y sal), los seis metales (oro, plata, cobre, estaño, plomo y hierro) y sus aplicaciones prácticas (Martín, 2002).

El primer alquimista europeo destacado fue Alberto Magno (1200-1280) erudito de la filosofía aristotélica y precursor de la ciencia empírica en la tradición cristiana, aportó a la alquimia con una detallada descripción del arsénico, atribuida como su descubrimiento. Su contemporáneo Roger Bacon (1214-1292), también racionalista, defendió la experimentación y el uso de las matemáticas como base del conocimiento, además describió por primera vez en Occidente la pólvora negra y aunque no fue su inventor, impulsó una transformación en la tecnología militar europea de la época (Asimov, 2010).

Durante los siglos XV y XVI, la alquimia entro en etapa de renovación gracias a obras fundamentales que privilegiaron la observación y la sistematización sobre el misticismo. Georg Bauer (1494-1555) -conocido como Agrícola- marcó un hito en 1556 con *De Re Metallica*, una enciclopedia ilustrada que transformó la minería y la metalurgia en disciplinas basadas en el razonamiento técnico y la práctica directa, sentando las bases de la mineralogía. Por su parte, Andreas Libavius (1550-1616) consolidó este cambio en 1597 con su libro *Alchymia*, considerado el primer libro de texto de química. En él organizó de forma sintética y empírica el conocimiento de la época, describiendo procesos químicos complejos sin el simbolismo y misticismo (Asimov,

2010) (Martín, 2002).

Andreas Libavius mostró una inclinación hacia un atomismo pragmático, expuesto en su obra *Alchymia* (específicamente en la edición de 1597 y sus comentarios de 1606), argumentó a partir del principio de reversibilidad o *reductio ad pristinum statum*: si un metal puede disolverse en ácido y luego recuperarse mediante precipitación con el mismo peso y propiedades, entonces no se ha transformado en una nueva sustancia, sino que se ha dividido en partículas diminutas y permanentes. Esta postura que, basada en la observación experimental, se opuso a la teoría aristotélica de la mezcla total que implicaba que, al combinarse dos o más sustancias, estas dejaban de existir como tales y daban lugar a una nueva sustancia homogénea, sugiriendo que las sustancias están formadas por una especie de “bloques de construcción” que se combinan sin desaparecer, mostrando una noción primitiva de molécula previas a las de Boyle y Lavoisier (Libavius, 1606).

A pesar de estos avances, continuo la obsesión por el oro y la transmutación de los metales. Incluso otros alquimistas continuaron buscando la mítica “piedra filosofal”. Pero el siglo XVII sería testigo de la transición definitiva y el interés práctico sobre los ácidos, sales y otro tipo de reacciones prevalecería por sobre las ideas fantasiosas de la transmutación. Por lo que la alquimia como se conocía hasta el momento empezó a disolverse lentamente.

Aun así, los personajes nombrados anteriormente son importantes para el desarrollo de la química y física posteriormente. Ya que aportaron textos, hipótesis, ideas y prácticas procedimentales, que contribuyeron al desarrollo de estas ciencias y por ende a la construcción más adelante de los modelos atómicos. El atomismo estuvo abandonado por este periodo de tiempo y se seguía pensando la naturaleza de la materia de la manera aristotélica, no sería hasta la llegada del renacimiento que el atomismo tomaría fuerza nuevamente, la alquimia sería disuelta, pero quedaría el legado de una práctica experimental que permitió clasificar sustancias -como metales, sales y minerales-, reconocer regularidades en sus transformaciones y atribuirles propiedades relativamente estables, lo que favoreció la idea de que la materia estaba compuesta por entidades fundamentales, contribuyendo así al resurgimiento del atomismo y a la posterior noción de elemento.

1.3 Resurgimiento del Atomismo

Durante varios siglos la hipótesis del atomismo fue de alguna manera olvidada. Parte de esta sobrevivió debido a los teólogos árabes conocidos como *mutakallimūn*, quienes practicaban el *kalām*: una disciplina teológica del islam que buscaba defender la fe mediante la razón. Ellos adoptaron una idea atomista claramente inspirada por los filósofos griegos en su doctrina; ellos planteaban que todo lo que existe en el mundo físico está compuesto por átomos que llamaban “*ağzā*” y eran indivisibles e idénticos. Estos átomos para los árabes no tienen cualidades físicas como por ejemplo dimensiones, para ellos, Dios es el que les asigna las propiedades a estos elementos. Esta corriente se desarrolló entre los siglos VII y X, y es lo que sobrevivió durante estos siglos relacionado con el atomismo (Marinca, 2022).

Es decir que, lo que diferencia a los filósofos griegos de los árabes, es que ellos concebían los átomos como entidades eternas, indivisibles y dotadas de propiedades intrínsecas como la forma o peso, los teólogos del kalām hicieron una reinterpretación de esta idea con base también en la teología. Para ellos, los átomos eran indivisibles e idénticos, pero carecían de cualidades propias, era Dios quien, les otorgaba propiedades como color, movimiento, etc. Así, mientras que en el atomismo griego los átomos buscaban explicar el mundo desde un orden natural, en el atomismo islámico se convirtieron en prueba de la dependencia absoluta de la creación respecto a la voluntad divina.

No es sino hasta alrededor del siglo XVII que surge nuevamente en Europa la discusión alrededor de la concepción de átomo. El mérito de la resurrección atómica se da en el Renacimiento con Pierre Gassendi (1592-1655) un filósofo, astrónomo y sacerdote francés contemporáneo con Descartes, Galileo y Hobbes. Él retomó las ideas de Demócrito especialmente a partir de las concepciones de Epicuro y las reformuló para que fueran compatibles con el cristianismo de la época, algo que hasta el momento había sido contradictorio. Él plantea que la materia está compuesta por átomos (indivisibles e indestructibles) y vacío. A diferencia de los árabes, Gassendi les asigna propiedades como dimensión, forma y peso, y cualidades sensibles (color, olor, calor), las cuales están asociadas a colecciones de los átomos. Igualmente, al ser un hombre religioso él creía que Dios era el creador y mantenía el orden, por lo que los átomos y el vacío era una creación de este. Gassendi también escribió una biografía y exposición del pensamiento de Epicuro, por lo que hizo accesible la hipótesis del atomismo en los pensadores posteriores a él en Europa (Pullman, 1995).

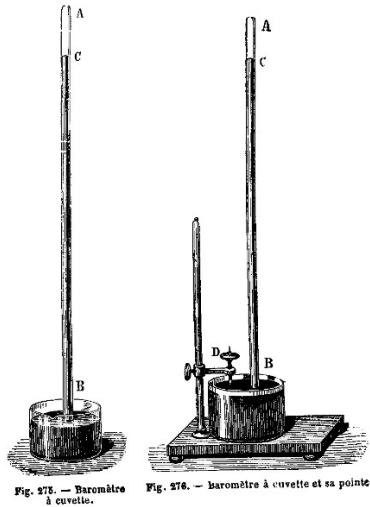
Gassendi era un empirista, de hecho, rechazaba el racionalismo de Descartes, pero él junto a pensadores como Francis Bacon (1561-1626) ayudó a consolidar una actitud más positivista respecto al conocimiento e involucrar la experimentación y observación sistemática, que gracias a científicos como Galileo Galilei, se aplicaron también a fenómenos físicos desde un enfoque matemático y cuantitativo, lo cual es el comienzo de lo que posteriormente sería la base de la física y las ciencias naturales en general.

En este contexto, es relevante señalar que lo que Gassendi establece, es una base tan necesaria en Europa respecto a las ideas atomistas, principalmente porque dota a los átomos de las cualidades que se señalaron anteriormente, esto pone en la escena científica de la época la discusión sobre la propia existencia de estos elementos, más allá de lo que un ser superior, como Dios les otorgue. Es decir, empiezan a tener características dadas por la forma en que los humanos percibimos el mundo, lo que lleva a plantear la realidad de los átomos.

Contemporáneo a Gassendi se encontraba Evangelista Torricelli (1608-1647) quien construyó el primer barómetro de mercurio en la historia (Figura 2). Él observó que, al dar vuelta a un tubo lleno de mercurio sin que este material salga del tubo colocándolo sobre una bandeja, en esta disposición, el mercurio ya no llenaba completamente el tubo, dejando la parte superior con un espacio vacío -vacío de Torricelli-. Esta idea de que ese pequeño espacio no contenía materia

alguna y de que el mercurio no se sostenía por succión sino por la presión del aire fue revolucionaria para el momento.

Figura 2. *Barómetro de Torricell*



Nota. Experimento de Torricelli donde se evidencia en la parte superior el vacío. Tomado de Wikimedia Commons contributors (2005). Baromètre à cuvette [Imagen]. Wikimedia Commons.

Además, poco después Blaise Pascal (1623-1662) confirmó una hipótesis adicional que surgía del experimento de Torricelli, demostrar que la altura del mercurio en el barómetro disminuía con la altitud, debido a la reducción de la presión atmosférica. Este experimento lo realizó con ayuda de su cuñado Florín Perier en una montaña, mostrando que efectivamente al cambiar de altura se encuentran cambios en la altura del mercurio del barómetro, lo que demostraba, primero, que el aire se comporta como un fluido con peso -Introduciendo el concepto de presión atmosférica como fenómeno físico medible- y además tuvo profundas implicaciones en la compresión de los gases y más adelante para la construcción de las teorías atómicas. Y es que la idea de la existencia del vacío no solo colocaba en jaque las ideas aristotélicas, sino que además reforzaba la hipótesis de Gassendi sobre la estructura de la materia donde los cuerpos estarían compuestos por átomos y vacío (Asimov, 2010) (Pullman, 1995). Puntualmente el vacío era un término controversial en la época y el hecho de que experimentalmente se encuentre un dispositivo capaz de generar vacío, contradice todas aquellas ideas intuitivas que permitían explicar la forma en que funcionaba el universo, principalmente derivado de la filosofía griega. Y es que el principio aristotélico del “horror vacui”, que ya había dominado el pensamiento por siglos, ofrecía de contraparte un marco de legitimación para las concepciones atomistas. Así pues, mientras que las ideas aristotélicas la continuidad y plenitud del cosmos garantizaban la inteligibilidad del movimiento y de la materia, el vacío abría la posibilidad de pensar la materia como discontinua formada por partículas indivisibles separadas entre sí. De este modo el experimento de Torricelli implicaba un cuestionamiento filosófico profundo, ya que mostraba que el vacío era posible, entonces la materia podía comprenderse mejor desde una perspectiva corpuscular, con lo cual la hipótesis de Gassendi adquiría no solo coherencia, sino que también un respaldo empírico frente a la tradición

aristotélica.

En este contexto, Robert Boyle (1627-1691) e Isaac Newton (1643-1727), se convierten en los primeros científicos en desarrollar las ideas de atomismo posteriores al renacimiento y por tanto los principales protagonistas de la teoría atómica en Inglaterra. Newton por su parte concebía la materia como partículas indivisibles, invisibles y duras. De hecho, en su obra *Óptica* en la pregunta número 31, libro III, menciona:

...me parece lo más probable que Dios formó en un principio la materia compuesta de partículas sólidas, macizas, duras, impenetrables y móviles, con los tamaños, formas y demás propiedades, ..., porque ninguna fuerza ordinaria sería capaz de dividir lo que el mismo Dios hizo al comienzo de la creación ... (Newton, 1947, pág. 375).

Pero a diferencia de los antiguos griegos, Newton introdujo su idea de la fuerza a distancia, la gravedad. Donde la materia no estaba en un vacío absoluto carente de interacción, sino que al contrario había fuerzas que interactuaban entre cuerpos con masa a través de este vacío. Estas ideas serían importantes posteriormente en la Física moderna (Pullman, 1995). Y es que la concepción de Newton marca un giro respecto al atomismo clásico, ya que, aunque acepta la materia como compuesta por partículas indivisibles, rechaza la idea de un vacío absolutamente inerte. Porque para Newton, el vacío no es un espacio totalmente vacío, dicho literalmente, sino el escenario en el que actúan fuerzas universales, como la gravedad, capaces de relacionar a los cuerpos sin necesidad de un medio material. Estas ideas de Newton introducen la noción de interacción a distancia, que no solo cuestiona el mecanicismo puramente materialista de los antiguos atomistas, sino que además sienta las bases de la física moderna al concebir un universo regido por leyes universales y fuerzas que operan incluso en el vacío.

Contemporáneo a Newton, la figura de Robert Boyle se establece como uno de los principales simpatizantes del atomismo en Inglaterra. Si bien sus ideas inspiradas en Gassendi no cambian fuertemente las descripciones dadas por el francés, su rol como químico introdujo definitivamente el enfoque experimental al estudio de los fluidos, especialmente de los gases, contribuyendo la transformación de la química como ciencia empírica y es considerado como el primer químico sobresaliente entre los atomistas. Una de sus mayores obras "*El químico escéptico*" (1661) junto a "*Nuevos experimentos físico-mecánicos sobre la elasticidad del aire y sus efectos*" (1660) representan un quiebre radical con las tradiciones e ideas alquimistas y aristotélicas que se llevaban hasta ese momento (Pullman, 1995).

Entre los seguidores del atomismo mecanicista², los atomistas de la época se planteaban la siguiente pregunta "¿Qué relación hay entre los átomos y las propiedades químicas específicas que pueden observarse en los cuerpos?" Boyle apuntó a que estas propiedades no dependen de la propiedad de cada uno de los elementos, sino que al contrario estas propiedades se explican por

² El atomismo mecanicista se diferencia del atomismo clásico por reformular la noción de átomo en términos de corpúsculos y por explicar los fenómenos naturales mediante leyes mecánicas.

las agregaciones entre partículas y las interacciones mecánicas entre ellas, o sea que las propiedades son por tanto causa de la forma en que estas partículas microscópicas se unen (Fernández, 2014). Es decir que, para Boyle las propiedades químicas que poseen los cuerpos o las sustancias son consecuencia de la forma en que diferentes partículas construyen la sustancia, y además existen propiedades mecánicas asociadas que también se involucran en la forma en que se unen. Podría establecerse en esta descripción una idea primitiva de molécula y cómo se establece físicamente la unión de diferentes elementos.

Lo anterior viene sustentado en su obra *El químico escéptico* (1661). Cabe aclarar que en este escrito Boyle se ve más interesado en rechazar y criticar las concepciones anteriores tales como la de los cuatro elementos de Aristóteles (Tierra, agua, aire y fuego) y también la hipótesis de los tres principios alquímicos (azufre, mercurio y sal) y no propone en su lugar una nueva teoría, sino que, a lo largo de su escrito da una definición provisional y temprana de lo que considera es un “elemento”. En un fragmento del capítulo sexto de *El químico escéptico* menciona lo siguiente:

... debo advertirle que aquí entiendo por elementos lo mismo que entienden los químicos que tan llanamente hablan por sus principios, esto es, ciertos cuerpos sin mezcla, primitivos y simples, que no están hechos de ningún otro cuerpo, ni los unos de los otros, y que constituyen los ingredientes de los que los llamados cuerpos perfectamente mixtos están inmediatamente formados (Boyle, 2017, pág. 324).

Si bien esta definición no corresponde exactamente a la noción moderna de elemento químico, introduce para la época una nueva concepción de lo que puede llegar a ser un átomo, de forma muy distinta a las concepciones antiguas y que se acerca un poco más a las concepciones modernas. Se destacan dos frases clave que muestran cómo Boyle establece esta concepción de átomo en el fragmento que se citó de su obra: primero, la de *cuerpos primitivos y simples*, dando a entender que estas partículas no pueden descomponerse en otras, y son en sí mismas un elemento o unidad básica, segundo la de *perfectamente no mezclados* aquí se refiere a que estas no son mezcla de otros elementos o sustancias y Boyle continúa diciendo “*que no están hechos de otros cuerpos, ni unos de otros*” reforzando la idea de que estos “elementos” son fundamentales y no derivan de nada más.

Otro de los aportes fundamentales de Robert Boyle al atomismo proviene de sus estudios experimentales sobre los gases, los cuales lo llevaron a formular la ley de Boyle. Para ello, utilizó un tubo de vidrio sellado en el que quedaba confinada una cantidad fija de aire, sobre la cual se variaba la presión mediante la adición de mercurio. Boyle observó que, al aumentar la presión ejercida sobre el gas, su volumen disminuía de forma inversamente proporcional. Básicamente encontró que, al duplicarse la presión el volumen se reducía aproximadamente a la mitad. A partir de estos resultados, enunció que, para una cantidad fija de gas a temperatura constante, el volumen es inversamente proporcional a la presión ($PV=\text{constante}$), lo cual aportó evidencia experimental a favor de una concepción corpuscular de la materia (Asimov, 2010).

Y es que más allá de su utilidad práctica, esta ley proporcionaba una evidencia empírica a favor

del atomismo. Ya que, en esa época la atención seguía centrada en el estudio de los líquidos y sólidos los cuales, al ser comprimidos apenas mostraban cambios en su volumen. Esto planteaba para una explicación atomista, que los átomos en estas sustancias deben estar juntos y que, al comprimirlos, debían acercarse aún más, algo difícil de justificar en los líquidos y sólidos. Sin embargo, en gases sucede todo lo contrario y es que, al describir la compresión de los gases resulta más práctico hacerlo suponiendo que estos están compuestos por diminutas partículas separadas por espacios vacíos, y que estos espacios podían reducirse mediante la presión. En otras palabras, los gases no podían ser de una sustancia continua. Esta justificación despertó de alguna manera un interés en los átomos y es que, si pensamos que los líquidos y sólidos son sustancias continuas, sería muy difícil comprimirlos, pero si se acepta que los gases estaban compuestos por átomos, esto llevaría en consecuencia a tener que considerar que los líquidos y sólidos también lo fuesen (Fernández, 2014). Así pues, el experimento de Boyle tomó un papel más protagónico al sugerir que ciertos fenómenos físicos podían explicarse de manera más adecuada al suponer que la materia está compuesta por átomos. Esta interpretación fue el paso a nuevas reflexiones sobre la forma en que la materia interactúa, en particular sobre si su comportamiento debía entenderse como continuo o discontinuo, otorgando a esta discusión un lugar central en el desarrollo de la física moderna.

Sin duda, Gassendi contribuyó de manera decisiva a la difusión del atomismo en la Europa moderna, sin embargo, su aporte más relevante fue la reformulación de estas ideas desde un nuevo enfoque. Gassendi retomó el atomismo antiguo y propuso que los átomos, además de poseer propiedades físicas como tamaño, forma y movimiento, podían dar origen a cualidades sensibles a partir de sus combinaciones. Posteriormente con los aportes de Boyle y de Newton, el concepto de átomo se transformó en un atomismo mecanicista, en el cual los átomos debían obedecer las leyes del movimiento y de la mecánica. Este enfoque representó un avance respecto al atomismo clásico al integrar las hipótesis atomistas dentro del marco de las leyes físicas formuladas en ese periodo. De este modo, puede observarse una evolución del atomismo desde las hipótesis griegas hasta una concepción en la que los átomos se encuentran sometidos a las leyes de la física newtoniana.

1.4 El Atomismo Comienza a Consolidarse

Continuando en el orden cronológico de la época de Boyle y posterior a él, surgieron figuras que hicieron importantes aportes a la química, así como en la termodinámica, se continuaron estudiando los gases, descubriéndose sustancias importantes como el dióxido de carbono, por Joseph Black (1728-1799) en 1754, el nitrógeno, aislado por Daniel Rutherford (1749-1819) en 1772, y el hidrógeno, reconocido por Henry Cavendish (1731-1810) en 1766.

En ese mismo periodo del siglo XVIII, se desarrolló la máquina de vapor construida inicialmente por Newcomen (1663-1729) y perfeccionada por James Watt (1736-1819). A la par que se desarrolló y se popularizó la teoría del flogisto, propuesta por Georg Ernst Stahl (1659-1734) que

explicaba la combustión como la liberación de una sustancia invisible llamada “flogisto³”. Sin embargo, el descubrimiento del oxígeno por los químicos Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) y Joseph Priestley (1733-1804), en la década de 1770, fue clave para posteriormente refutar dicha teoría (Asimov, 2010). Este nuevo conocimiento alrededor de sustancias particulares que se desarrolla en este periodo, sienta las bases para un análisis más profundo respecto a la forma en que se encuentra constituida la materia, además genera conexiones importantes de reflexionar no solo desde el ámbito químico sino también desde el físico.

Es así, como durante este siglo surge el que es considerado el padre de la química, Antoine Lavoisier (1743-1794), él a partir de los nuevos conocimientos sobre el oxígeno y mediante rigurosos experimentos sobre la combustión, así como experimentos acerca de la relación de la masa antes y después de un proceso químico, refutó la teoría del flogisto y formuló la ley de conservación de la masa. Todo este trabajo se ve reflejado en su mayor obra titulada “*Tratado elemental de química*”, que es considerado por muchos como el primer tratado de química de la historia moderna y marca el inicio de una nueva etapa en la química basada en principios cuantitativos y experimentales (Muñoz, 2013).

Lavoisier al igual que Boyle, rechaza en su tratado las antiguas concepciones aristotélicas sobre los elementos, debido a que estas se basaban en cualidades sensibles y principios filosóficos que no podían ser verificados ni cuantificados experimentalmente. Asimismo, refuta la teoría del flogisto, ampliamente aceptada en su época, al demostrar que mediante mediciones precisas de masa que en los procesos de combustión y calcinación no se produce una pérdida de materia, sino una ganancia asociada a la combinación de la sustancia con una parte del aire que posteriormente se identificaría como el oxígeno. Este énfasis en la experimentación y el uso sistemático de la balanza lo conduce a formular una de las leyes fundamentales de la física y la química: la ley de la conservación de la masa -también conocida como ley de Lavoisier- la cual establece que la masa no se crea ni se destruye, solo se transforma (Muñoz, 2013).

Puntualmente, en el capítulo XIII del tomo I de su *Tratado elemental de química*, Lavoisier menciona:

...porque no hay cosa que se cree ni en las operaciones del arte, ni en las de la naturaleza, pudiéndose establecer como principio, que en toda operación hay una igual cantidad de materia antes y después de la operación; que la calidad y cantidad de los principios son las mismas; y que no hay más que mutaciones ó modificaciones (Lavoisier, 1798, pág. 98).

Aquí Lavoisier resalta ese papel importante del cambio o transformación como elemento que justifica que se den ciertos efectos en la naturaleza, de forma que al final se debe conservar una cierta cantidad de la cual se disponía al inicio, específicamente él habla de la masa, debido a que

³ El flogisto fue una sustancia hipotética propuesta en los siglos XVII y XVIII para explicar la combustión. Según esta teoría los cuerpos combustibles contenían flogisto, el cual se liberaba al arder, la pérdida del flogisto explicaba la transformación de las sustancias, esta teoría fue reemplazada por la explicación química basada en el oxígeno.

su interés se centraba en las reacciones químicas y la combustión.

Del mismo modo, Lavoisier propone una definición de “elemento” más precisa que la que ofrecía Boyle. Esta definición es de carácter operativo y se aproxima notablemente a la concepción moderna del término. Lavoisier la presenta en el discurso preliminar del *Tratado elemental de química*, donde dice:

Me contentaré pues con decir, que si con el nombre de elementos queremos especificar las moléculas simples é indivisibles que componen los cuerpos, es probable que nos equivoquemos; pero por el contrario, si solamente queremos expresar la idea del último término á que llega la análisis, todas las sustancias que hasta ahora no hemos podido descomponer por ningún medio, son para nosotros otros tantos elementos; no porque podamos asegurar que estos cuerpos que miramos como simples no estén compuestos de dos o más principios, sino porque no habiéndose llegado jamás a separarlos, o por mejor decir, faltándonos los medios para hacerlo, son para nosotros unos cuerpos simples, que debemos mirar como tales, hasta que la experiencia y observación nos manifiesten lo contrario (Lavoisier, 1798, pág. 11).

Lavoisier presenta en este apartado ideas bastante claras de su concepción acerca de cómo se constituye la materia: inicialmente establece una idea inicial de molécula, tratándola como un elemento simple e indivisible que se encuentra en la naturaleza, es decir una unidad. Sin embargo, los elementos serían alternativamente algo diferente, un elemento sería aquellos cuerpos o sustancias que no se pueden separar en otros más simples por el momento, pero que podrían refutarse en ese carácter si la evidencia muestra lo contrario. Preparando la idea de elemental en cuanto a la composición de la materia.

Aunque Lavoisier no era en sentido estricto un atomista, los aportes que presenta en su *Tratado elemental de química* son fundamentales y marcan una ruptura definitiva con el modelo aristotélico de los elementos. Su obra lleva a la química hacia una ciencia verdaderamente experimental y cuantitativa. Entre sus contribuciones más relevantes se encuentra la clasificación de 33 elementos químicos presentados en la Figura 3 -de los cuales 31 forman parte de la actual tabla periódica-, así como la creación de una notación y nomenclatura química que, con adaptaciones, se usa actualmente. También, realizó aportes a la física, específicamente con la teoría del calórico que resultó ser una teoría refutada, pero no le quita el mérito de su enfoque riguroso y sistemático, y estos aportes sirvieron como base para que otros científicos pudieran con el tiempo, consolidar el atomismo como una teoría científica viable y aceptada.

Figura 3. *Tabla de sustancias consideradas elementos por Lavoisier*

	Nombres nuevos.	Nombres antiguos correspondientes.
	Luz.....	Luz. (Calor. Principio del calor.
	Calórico.....	Fluido igneo. Fuego.
Sustancias simples que pertenece a los tres rey- nos, y por- den mirarse como los ele- mentos de los cueros.	Oxígeno.....	Materia del fuego y del calor. Ayre deflogistado. Ayre empírico.
	Azoe.....	Ayre vital. Base del ayre vital. Gas flogistado.
	Hidrógeno.....	Mofeta. Base de la mofeta. Gas inflamable. Base del gas inflamable.
Sustancias simples no metálicas oxidables y acidificables.	Azufre.....	Azufre.
	Fósforo.....	Fósforo.
	Carbono.....	Carbono puro. Desconocido.
	Radical muriático.....	Desconocido.
	Radical fluorico.....	Desconocido.
	Radical borácico.....	Desconocido.
	Antimonio.....	Antimonio.
	Plata.....	Plata.
	Arsénico.....	Arsénico.
	Bismuto.....	Bismuto.
Sustancias simples me- tálicas oxi- dables y aci- dificables.	Cobalto.....	Cobalto.
	Cobre.....	Cobre.
	Estañó.....	Estañó.
	Hierro.....	Hierro.
	Manganeso.....	Manganeso.
	Mercurio.....	Mercurio.
	Molibdeno.....	Molibdeno.
	Nickel.....	Nickel.
	Oro.....	Oro.
	Platino.....	Platino.
Sustancias simples sal- ificables ter- restres.	Tungsteno.....	Tungsteno.
	Zinc.....	Zinc.
	Cal.....	Tierra caliza, cal. Magnesia, base de la sal de Epsom.
	Magnesia.....	Barro, tierra pesada. Arcilla; tierra de alumbre, base del alumbre.
	Silica.....	Tierra silicea, tierra vitri- ficable.

Nota. De las 33 sustancias consideradas elementos por Lavoisier, 2 no se consideran como tal en la química actual: la luz y el calórico. Tomado de Tratado elemental de química: Presentado baxo nuevo orden y conforme a los descubrimientos modernos (Lavoisier, 1798, pág. 135).

Posteriormente, de los trabajos de Lavoisier durante el siglo XIX emergieron nuevas teorías y leyes que fortalecerían aún más la concepción atomista de la materia. Entre estas se encuentra una ley importante para la química, que ofrecía una evidencia empírica sobre la existencia de partículas fundamentales e indivisibles de la materia, enunciada al final del siglo XVIII y principios del siglo XIX, la cual se conoce como la *Ley de las Proporciones Definidas* y establece que los elementos que componen un compuesto químico lo hacen siempre en una proporción fija en masa (Asimov, 2010).

Esta ley fue enunciada inicialmente por Joseph Louis Proust (1754-1826) entre 1794 y 1806. Proust era un farmacéutico y químico de origen francés que desarrolló gran parte de su carrera en España. Tras una serie de experimentos cuantitativos de análisis químico en los que preparó y descompuso compuestos por distintos métodos y midió cuidadosamente la masa de sus componentes mediante el uso de la balanza, analizó sustancias como los óxidos de estaño y de cobre. A partir de estos estudios Proust demostró en 1799 que el carbonato de cobre contenía en su composición cobre, carbono y oxígeno en proporciones definidas respecto al peso. Independientemente de cómo se prepare en el laboratorio o se aísle, la proporción siempre será de 5,3 partes de cobre, 4 partes de oxígeno y 1 parte de carbono. Proust observó este mismo comportamiento en otros compuestos y enunció la generalización de que todos los compuestos contienen siempre los mismos elementos en proporciones fijas de masa, sin importar su procedencia o el método de preparación (Joven, 2012).

Un papel clave en la validación y difusión de esta ley lo realizó el químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848). Aunque en un inicio algunos científicos, como Claude Louis Berthollet, se oponían a la idea de composiciones constantes, Berzelius respaldó la ley de Proust mediante una

gran cantidad de experimentos validando la ley. Berzelius publicó unas tablas de masas atómicas relativas -importante para consolidación de la teoría atómica-que también contribuyeron a organizar y cuantificar las combinaciones químicas, afianzando la importancia de esta ley en el pensamiento químico (más adelante se continuará hablando sobre las masas atómicas ya que se da durante y posterior al modelo atómico de Dalton) (Thorpe, 1909).

Esta regularidad no se explicaba fácilmente si la materia es continua, pero cobra total sentido si se asume que está compuesta por unidades indivisibles -como los átomos-. Así pues, la ley de Proust consolidó las bases de la química cuantitativa y moderna, además que proporcionó un fuerte respaldo al atomismo ya que sugiere que la existencia de proporciones constantes en los compuestos era una consecuencia natural de la unión entre átomos enteros, no fraccionables (Asimov, 2010).

De forma contemporánea se encuentra la figura de John Dalton (1766–1844), un científico inglés autodidacta. Aunque comenzó su carrera como maestro, después se interesaría por las ciencias naturales, en especial por la meteorología, la química y la física. Dalton llevó una vida modesta en Manchester Inglaterra, donde desarrolló la mayor parte de su trabajo científico. Su curiosidad, acompañada de su capacidad de observación y de razonamiento, lo llevó a reflexionar sobre la composición de la materia, en un momento en el que la teoría atómica aún no tenía un sustento sólido en el ámbito científico (Thorpe, 1909).

Dalton influenciado por el trabajo de Proust, de forma análoga enuncia una ley también de proporciones, similar a la de Proust, esta se nombran *Ley de las Proporciones Múltiples* o también se le conoce como la *Ley de Dalton*. Propuesta en 1803, esta ley dice que cuando dos elementos se combinan para formar más de un compuesto, las cantidades de uno de ellos que se combinan con una cantidad fija del otro guardan una relación de números enteros. Dalton propuso esta ley alrededor de 1803, pero aparece por primera vez en una enciclopedia de química en 1807. Dalton llegó a esta conclusión estudiando diferentes combinaciones de gases y sustancias simples, observando que las relaciones de masa entre los elementos no eran arbitrarias, sino que seguían patrones numéricos precisos (Thorpe, 1909).

Estas observaciones llevaron a Dalton a reflexionar sobre la estructura de la materia y, en consecuencia, él supuso que estas regularidades podían explicarse de una mejor manera si se asumía que la materia estaba compuesta por átomos de tamaño y pesos diferentes según la sustancia, pero con un peso y tamaño idéntico para un mismo elemento, y la combinación química consiste en la combinación de estos átomos. La teoría de Dalton fue dada a conocer por el químico escocés Thomas Thompson (1773-1852) en la tercera edición de *System of Chemistry* en 1807, posteriormente Dalton hace su propia publicación un año siguiente en 1808 en la obra de *System of Chemical Philosophy*, donde da a conocer las ideas que ya había expuesto anteriormente en una serie de conferencias en el Royal Institution de Londres en 1803 (Thorpe, 1909).

El modelo de Dalton, que se puede considerar como el primer modelo atómico ya que no se basa en la especulación y razonamiento filosófico, sino que incluye evidencia experimental al darle la

explicación a fenómenos como la ley de las proporciones definidas y la ley de las proporciones múltiples, se puede resumir en los siguientes postulados y conclusiones tomados de *La teoría atómica: Dalton ¿Cuánto pesan los átomos?* (Joven, 2012):

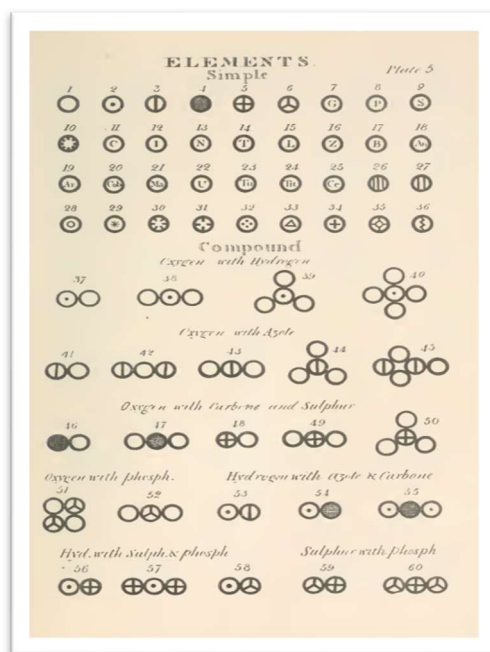
- La materia está formada por átomos, que están unidos por una fuerza de atracción.
- Los átomos son indivisibles.
- Los átomos no se crean ni se destruyen.
- Todos los átomos de un elemento son idénticos en forma, tamaño y masa.
- Los átomos de distintos elementos difieren en la masa.
- Los átomos se pueden agrupar para formar “moléculas” pero siempre en un número fijo.
- La masa de la molécula es la suma de las masas de los átomos que la constituyen.
- Las cantidades de un mismo elemento, combinado con una cantidad fija de otro elemento para formar un compuesto, siguen una relación de números enteros.
- La masa de un elemento siempre es la misma para todos los compuestos de los que hace parte.
- Los átomos se combinan de la forma más simple posible.
- *Volúmenes iguales de gases a la misma presión y temperatura no pueden contener el mismo número de átomos y moléculas.

Al analizar estos postulados, se observa la similitud con algunas ideas propuestas por los filósofos griegos, como Epicuro y Demócrito, particularmente alrededor de la indivisibilidad de los átomos, también respecto a que mantienen sus pesos y formas, entre otras. También se identifican influencias de Lavoisier, especialmente en el postulado, el cual los átomos no se crean ni se destruyen. Además, se incorporan las leyes de las proporciones en las combinaciones químicas tanto la de Dalton como la de Proust. En la Figura 4 se muestran algunas ilustraciones de los compuestos estudiados por Dalton y la forma geométrica en la cual él establece la disposición de los elementos que forman dicho compuesto, aunque no sean los elementos que se conocen en la actualidad, esta es una base que evidencia la introducción de la noción de estos elementos fundamentales que son la base para generar sustancias compuestas.

Sin embargo, el último postulado de Dalton (*) fue refutado en su misma época por Joseph Gay-Lussac (1778–1850) y Amedeo Avogadro (1776–1856), a partir del estudio del comportamiento de los gases. Gay-Lussac enunció la ley de los volúmenes combinatorios, según la cual cuando los gases reaccionan entre sí, lo hacen en relaciones simples de volumen, siempre que se midan a la misma temperatura y presión. Estos resultados experimentales demostraban que los volúmenes gaseosos no dependían directamente de la masa de los átomos individuales, sino de relaciones

volumétricas definidas, lo que entraba en contradicción con el último postulado de Dalton. Cabe destacar que Dalton nunca aceptó estos hallazgos, en particular la ley de los volúmenes propuesta por Gay-Lussac (Joven, 2012), ya que consideraba que, si los átomos que componen los gases tenían masas diferentes, dichas relaciones volumétricas simples resultaban contrarias a la intuición, motivo por el cual defendió su postulado hasta el final.

Figura 4. Representación de los elementos y sustancias por Dalton



Nota. Tomado de A new system of chemical philosophy (Dalton, 1808, pág. 561).

En este punto es importante hacer un paréntesis, mencionando los aportes de Gay-Lussac y Avogadro al atomismo. Inicialmente Gay-Lussac observó experimentalmente que los gases reaccionan en proporciones volumétricas simples cuando se encuentran a la misma temperatura y presión, lo que lo llevó a enunciar su famosa ley de los volúmenes de combinación, aunque este hallazgo planteaba una regularidad difícil de explicar con las ideas atómicas de Dalton. Avogadro fue quien posteriormente, en 1811, propuso una solución muy importante al sugerir que volúmenes iguales de gases, en las mismas condiciones de temperatura y presión, contienen el mismo número de moléculas. Esta hipótesis de alguna manera permitía distinguir entre átomos y moléculas, sentando las bases para una mejor comprensión de la composición de los cuerpos y consolidando un modelo atómico-molecular de la materia, aunque el reconocimiento de Avogadro fue tardío en la comunidad científica (Joven, 2012).

Retomando la discusión, otro de los aportes más relevantes de Dalton fue su trabajo sobre las masas atómicas; esto es importante dado que establece el inicio para cuando se propone que el átomo se compone de más partes, por lo cual se vuelve fundamental saber cuáles son las masas de estas partes que lo componen, en especial de su núcleo, posteriormente se hablara más en detalle

sobre esto. Para poder explicar las proporciones en que los elementos se combinaban, Dalton propuso asignar masas relativas a los átomos de diferentes elementos, tomando como base el hidrógeno con peso “1” y elaboró así la primera tabla de pesos atómicos de la historia. Aunque muchos de sus valores eran inexactos, este fue un paso fundamental hacia el desarrollo de la química moderna (Joven, 2012).

Figura 5. *Tabla de los elementos con los pesos relativos entre ellos, elaborada por Dalton*

Tables of the elements of elastic fluids ; at a mean temperature and pressure.
(TABLE 1.)

Names of the gases.	Wt. of an atom	Wt. of 100 cubic inch. grs.	Specific gravity.	Diameter of an atom	No. of atoms in a given volume.
Atmospheric air	—	31	1.00	—	—
Hydrogen	1	2.5	.08	1.000	1000
Oxygen	7	54	1.10	.794	2000
Azote	5	30.2	.97	.747	2400
Muriatic acid	22	39.5	1.24	1.12	700
Ammonia	6	18.6	.60	.909	1330
Oxy mur. acid	29	76	2.46	.981	1060
Nitrous gas	12	32.2	1.04	.980	1060
Nitrous oxide	17	50	1.60	.947	1180
Carbonic oxide	12.4	29	.94	1.020	940
Carbonic acid	19.4	47	1.52	1.00	1000
Sulphurous acid	27	71	2.30	.95	1170
Olefiant gas	6.4	29.5	.95	.81	1890
Carburetted hyd.	7.4	18.6	.60	1.00	1000
Sulphuretted hyd.	14	36	1.16	1.00	1000
Phosphur. hyd.	10	26	.84	1.00	1000
Superflu. of silex	75	130	4.20	1.15	653

Nota. Tomado de A new system of chemical philosophy (Dalton, 1808, pág. 560).

Otra figura clave que contribuyó en avanzar en las masas atómicas fue Jöns Jacob Berzelius (1779-1848), Berzelius continuó con la labor de Dalton y se dedicó a determinar con gran precisión las masas relativas de los elementos, mejorando significativamente la exactitud de las mediciones que ya había iniciado Dalton. Sus tablas de masas atómicas, publicadas entre 1818 y 1826, fueron fundamentales para establecer patrones confiables de combinaciones químicas, y su trabajo fue esencial para consolidar el uso del sistema de símbolos latinos en química que aún hoy se utiliza. Aunque su trabajo de masas atómicas fue más preciso que el de Dalton, aún contenía algunos errores en las fórmulas químicas. Igualmente, al no conocerse en ese momento que algunos de los gases que se encuentran en la naturaleza son diatómicos, se opacó un poco el logro de la exactitud propuesta. Sin embargo, más tarde y gracias al postulado de Avogadro en el que se señala que algunos gases debían ser diatómicos, más la llegada de la electricidad, se mejoran las mediciones de las masas atómicas de los elementos (Asimov, 1985).

Para establecer estas proporciones en los compuestos y las masas atómicas de los elementos, Berzelius observó que el hidrógeno se unía con un poco menos de ocho veces su masa de oxígeno, lo que daba un valor de 15,87 en lugar de 16 para la masa relativa de este último. Sin embargo, como el oxígeno formaba compuestos con mayor facilidad y frecuencia que el hidrógeno, Berzelius decidió usarlo como referencia para establecer una escala más práctica. En un inicio fijó la masa relativa del oxígeno en 100, pero luego la ajustó a 16 para reducir los valores relativos de los demás elementos sin que ninguno fuese menor a 1. De esta manera, asignó al hidrógeno una

masa relativa de 1,008 y elaboró en 1828 una tabla de masas atómicas que sería la base del sistema utilizado por la química durante más de un siglo. Su método permitió no solo precisar valores, sino también establecer una referencia uniforme que facilitó la comparación entre diferentes elementos (Asimov, 1985).

Así pues, lo que hizo Berzelius no solo fortaleció el atomismo del siglo XIX, sino que además preparó el terreno para el desarrollo de modelos nucleares en el siglo XX, ya que el conocimiento detallado de las masas atómicas sería crucial tanto para la identificación de isótopos como para la comprensión de reacciones nucleares y procesos de decaimiento, además del desarrollo de la tabla periódica.

En este orden de ideas, volviendo con Dalton se puede decir que los aportes de su trabajo fueron trascendentales, ya que su modelo atómico proporcionó una base teórica coherente que unificó varias leyes químicas empíricas y dio un gran impulso al desarrollo de la química y de la física en el siglo XIX. Además, ofrecía un argumento sólido a favor del atomismo, que se conocería adelante como un modelo atómico-molecular, reforzando la idea de que la materia estaba efectivamente compuesta por partículas elementales. A partir de sus ideas, se desarrollaron modelos atómicos más complejos y se afianzó la noción de átomo como una entidad existente y medible, constituyéndose así un cambio de paradigma en la historia del pensamiento científico. Aunque hubo detractores, como el químico francés Claude Louis Berthollet (1748–1822), sus objeciones no lograron desacreditar el modelo propuesto por Dalton. Por el contrario, este se vería fortalecido más adelante con la llegada de la física estadística y con el descubrimiento de fenómenos clave, como el movimiento browniano.

Para finalizar esta sección se resalta la importancia del estudio de los gases, ya que estos resultaron fundamentales para consolidar el atomismo como una explicación válida de ciertos fenómenos y leyes químicas descubiertas y formuladas en su época. En este contexto, el papel de Dalton adquiere especial relevancia al decir que dichos fenómenos podían comprenderse de manera más coherente al atribuir a la materia un carácter discontinuo, dotando a los átomos de propiedades compatibles con leyes previamente enunciadas por otros científicos, como la conservación de la masa propuesta por Lavoisier o las fuerzas de atracción de origen newtoniano. Sin embargo, el atomismo hasta comienzos del siglo XIX presentaba importantes limitaciones, ya que carecía de evidencia experimental directa sobre la existencia de los átomos, no distinguía con claridad entre átomos y moléculas, y asumía la indivisibilidad y homogeneidad de estas entidades como postulados más filosóficos que empíricos. Además, el modelo resultaba insuficiente para explicar fenómenos eléctricos, térmicos o químicos más complejos, y su aplicación a los gases dependía de idealizaciones que aún no estaban plenamente justificadas.

A pesar de estas falencias, a partir del siglo XIX el concepto de átomo comienza a consolidarse como una entidad dotada de propiedades definidas retomando características heredadas del atomismo griego -como la indivisibilidad y la homogeneidad-, pero integrándolas ahora a un marco mecanicista en el que los átomos obedecen leyes regulares al combinarse, tales como la ley

de las proporciones múltiples y la ley de los volúmenes combinatorios. A ello se suma la incorporación de una dimensión cuantitativa con la hipótesis de Avogadro, que establece una relación fija entre el volumen de un gas y la cantidad de partículas que lo constituyen.

1.5 Construcción del Formalismo Frente al Atomismo

El intentar demostrar la existencia de los átomos fue esencial para la aceptación en la comunidad científica, por lo que fue el resultado del trabajo conjunto y constructivo de numerosos científicos a lo largo de varios siglos. Desde los aportes de Pascal, Boyle, Lavoisier, Proust y Dalton, se construyó un conocimiento tanto teórico como experimental que apoyaba la hipótesis atomista. Más allá de los experimentos y observaciones empíricas realizados por estas figuras, surgió un aporte teórico fundamental que algunos autores han llegado a describir como una “demostración con lápiz y papel”: el desarrollo de la física estadística, y en particular la distribución de Maxwell-Boltzmann. Esta formulación matemática sin precedentes permitió relacionar las propiedades macroscópicas de los gases con el comportamiento microscópico de partículas individuales, proporcionando evidencia teórica de que la materia está compuesta por átomos y moléculas.

Todo comienza con la figura de Daniel Bernoulli (1700–1782) quien fue un físico y matemático suizo, miembro de una célebre familia de científicos. Su obra más influyente e importante es *Hydrodynamica*, publicada en 1738. Esta obra es un hito en la historia de la física al establecer principios fundamentales en el estudio del movimiento de los fluidos. En ella, Bernoulli formuló lo que hoy se conoce como el principio de Bernoulli, que describe cómo, en un fluido en movimiento, un aumento en la velocidad conlleva una disminución en la presión (Dale y otros, 2009). Además, de esta obra se puede destacar que Bernoulli inició con la teoría cinética de los gases, especialmente en el capítulo 10 de su obra *Hydrodynamica* titulado en español como “*Sobre las propiedades y movimientos de los fluidos elásticos*”, explicó la presión de un gas como el resultado del movimiento de pequeñas partículas en su interior, es decir, como una consecuencia del movimiento de los átomos o moléculas que lo componen. Esta interpretación, basada en la idea de que los gases están formados por partículas en movimiento constante, puede considerarse uno de los primeros avances de lo que más tarde se desarrollaría como la teoría cinética de los gases, además de una base teórica que tome como objeto los átomos y moléculas para la explicación de fenómenos físicos (Dale y otros, 2009).

Si bien su planteamiento no fue plenamente reconocido ni aceptado en su época, constituyó un precedente conceptual directo para los trabajos de James Clerk Maxwell (1831-1879) y Ludwig Boltzmann (1844-1906) en el siglo XIX, quienes formalizaron la física estadística. Pero inicialmente fue Rudolf Clausius (1822-1888) uno de los científicos clave en el desarrollo de la teoría cinética de los gases en el siglo XIX. A partir de las ideas propuestas por Daniel Bernoulli, Clausius ofreció una formulación más precisa y matemática de esta teoría, integrándola con los principios de la termodinámica. Uno de sus aportes más relevantes fue la introducción del concepto de recorrido libre medio, es decir, la distancia promedio que recorre una partícula antes de colisionar con otra. Esta idea permitió comprender mejor cómo se transfiere la energía entre

partículas en un gas, además que -aunque todavía no se había demostrado completamente la existencia de los átomos- poder calcular algunas de sus propiedades daban buenas razones para establecer su existencia (Arroyo Pérez, 2012).

Posteriormente, James Clerk Maxwell, influenciado por los trabajos de Rudolf Clausius, profundizó en la descripción estadística del comportamiento de los gases. En este contexto, en 1860 propuso una función matemática que describe cómo se distribuyen las velocidades de las moléculas en un gas ideal en equilibrio térmico. Esta expresión, conocida como la distribución de velocidades de Maxwell, establece que la probabilidad de encontrar moléculas con velocidades entre v y $v + dv$ está dada por:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi\kappa T} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2\kappa T}} dv$$

donde m es la masa de la molécula, T la temperatura absoluta del gas, κ la constante de Boltzmann y v el módulo de la velocidad molecular. En la figura 6, se puede observar una gráfica de la distribución de velocidades para varios gases nobles. Esta distribución permitió conectar de manera cuantitativa la temperatura con el movimiento microscópico de las partículas consolidando así un enfoque estadístico en la teoría cinética de los gases.

Este trabajo representó un avance fundamental al introducir formalmente el tratamiento probabilístico en la física, iniciando una nueva rama de la física fascinante. Maxwell además de ampliar la teoría cinética, también sentó las bases para el desarrollo teórico posterior de Ludwig Boltzmann (Arroyo Pérez, 2012).

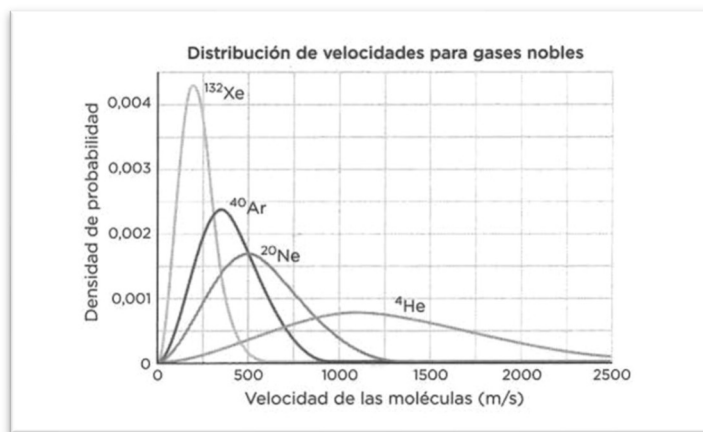
Teniendo en cuenta el contexto histórico de la época, tras la publicación del trabajo de Maxwell en 1866, aún se encontraba un ambiente de resistencia hacia las ideas sobre el atomismo. Quien daría un impulso a esta descripción de la materia sería Ludwig Boltzmann (1844-1906), físico austríaco a quien le debe su nombre la famosa constante de Boltzmann. Boltzmann fue quien consolidó definitivamente la teoría cinética de los gases y fundó, en gran medida, la física estadística como disciplina.

Entre 1868 y 1877, a través de diversas publicaciones en revistas como *Wiener Berichte* y *Annalen der Physik*, Boltzmann profundizó en la teoría cinética de los gases. Influido por el trabajo de Maxwell, al que accedió gracias a su mentor Josef Stefan, Boltzmann se interesó especialmente en la distribución estadística de las velocidades moleculares en un gas ideal. A partir de estos estudios, amplió y generalizó la distribución propuesta por Maxwell, dando lugar a la distribución de Maxwell-Boltzmann. Esta describe la probabilidad de que una partícula clásica posea una determinada velocidad o energía en un sistema en equilibrio térmico, con interacciones mínimas entre partículas, proporcionando así una explicación matemática de la distribución de energías y velocidades en un gas ideal. Si bien Maxwell fue el primero en proponer esta idea, fue Boltzmann quien la fundamentó teóricamente, apoyándose en la formulación de la ecuación de Boltzmann, de la cual la ley de distribución de velocidades de Maxwell emerge como una de sus soluciones. De

este modo, Boltzmann mostró que un sistema de partículas que conforma un gas tiende de manera natural a aproximarse a la distribución de Maxwell, independientemente del tipo de gas o de las condiciones iniciales en las que se encuentre. Una vez alcanzada dicha distribución, el sistema permanece en ese estado de equilibrio estadístico y no se ve afectado por la evolución posterior del sistema (Arroyo Pérez, 2012).

Este trabajo que realizó Boltzmann ofreció un marco teórico importante para la teoría atómica-molecular, ya que permitió deducir propiedades macroscópicas como la presión o la temperatura a partir de hipótesis sobre átomos y moléculas en movimiento. Así pues, Boltzmann se convierte en una figura central al demostrar que las leyes de la termodinámica pueden entenderse como consecuencias estadísticas del comportamiento de partículas microscópicas, dotando al atomismo de una base teórica y matemática, mostrando una evidencia con “lápiz y papel” de que la materia debe componerse de átomos y moléculas.

Figura 6. Grafica de la distribución de las velocidades para los gases nobles de Maxwell



Nota. Tomado de La termodinámica y la entropía: Boltzmann el universo morirá de frío (Arroyo Pérez, 2012, pág.49).

Hasta este punto, posterior a la publicación del modelo de Dalton en 1808, el atomismo se expande y fortalece a nivel teórico gracias a los aportes de Boltzmann, al permitir la explicación de fenómenos térmicos y estadísticos, otorgándole al átomo un papel central en la comprensión microscópica de la materia. Así hacia finales del siglo XIX, el átomo se concibe como una entidad dotada de propiedades mecánicas y responsable del comportamiento macroscópico de los sistemas, aunque su existencia aún no cuenta con una verificación experimental directa. Y es que, pese a su potencial explicativo, el atomismo presenta importantes problemas abiertos en el momento, tales como: la imposibilidad de observar los átomos de manera directa, el choque teórico con la termodinámica clásica, que ofrecía una descripción de los fenómenos térmicos sin necesidad de

postular la existencia de átomos y las tensiones con corrientes como el energetismo⁴ que postulaba que la energía como único elemento de la realidad física oponiéndose al atomismo. Por lo tanto, el átomo se había establecido como idea teórica, pero su existencia aún era motivo de discusión, situación que solo empezaría a resolverse con los avances experimentales del siglo XX.

1.6 La Electricidad y el Descubrimiento del Electrón

En los siglos XVIII y XIX, la electricidad fue uno de los fenómenos naturales más interesantes y fascinantes para los científicos de la época. Su capacidad de producir movimiento, luz o calor, y su interacción con otros fenómenos como el magnetismo, despertaron múltiples intentos por comprender su naturaleza. En esa época, se propusieron varios modelos explicativos, algunos la concebían como un fluido que se desplazaba a través de los cuerpos, mientras que otros proponían que estaba compuesta por partículas. Estas concepciones estaban a la par con ideas similares en otras áreas, como el modelo del calórico, que postulaba que el calor era un fluido que se transfería de un cuerpo a otro. Ambos modelos compartían la idea de una "sustancia" invisible, pero el del calórico fue eventualmente refutado por la evidencia experimental que mostraba que el calor era una forma de energía, no una sustancia en sí. Esta refutación también debilitó la credibilidad del modelo de fluido eléctrico.

En este contexto también surgió una hipótesis sobre el éter, un medio invisible y omnipresente que se estableció como soporte para explicar la propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío, similar a cómo las ondas mecánicas necesitan de un medio para propagarse. Se creía que el éter era esencial para explicar cómo las fuerzas eléctricas y magnéticas podían actuar a distancia. Sin embargo, esta idea fue perdiendo fuerza, especialmente tras el experimento de Michelson y Morley en 1887, que no logró detectar evidencia alguna del éter, lo cual allanó el camino para nuevas concepciones del espacio y la materia. Hermann von Helmholtz (1821-1894) en una conferencia en 1881, señaló lo siguiente: *“si se acepta la hipótesis de que las sustancias elementales están compuestas por átomos, no puede evitarse la conclusión de que la hipótesis de la electricidad también lo está”* (Anderson, 1968). Esto implica, por pura lógica deductiva que, si se acepta la teoría atomista de la materia, no habría razón para dudar de que la electricidad, vista en esa época como una manifestación de la materia, posea también una estructura discreta. En este sentido, cuando Helmholtz se refiere a “átomos”, puede interpretarse como una afirmación de una naturaleza corpuscular en la electricidad (Anderson, 1968).

El camino hacia el descubrimiento del electrón comenzó con el estudio de la electricidad en gases enrarecidos desde inicios del siglo XVIII. Observaciones tempranas mostraron que la electricidad se propagaba con mayor facilidad a bajas presiones, como había evidenciado William Watson

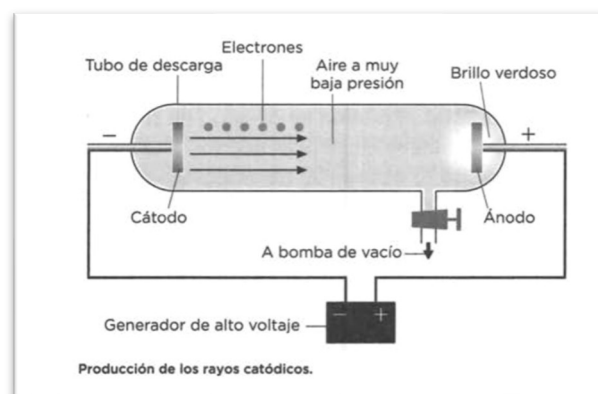
⁴ El energetismo es una corriente idealista de finales del siglo XIX que sostenía que la energía era el concepto fundamental de la física, relegando la materia y los átomos a construcciones teóricas secundarias.

(1715-1787) al observar luminiscencias en tubos de vidrio. Más adelante, el señor Michael Faraday (1791-1867) y Heinrich Geissler (1814-1879) perfeccionaron estos experimentos mediante el uso de tubos sellados con electrodos y mejores sistemas de vacío, permitiendo observar con mayor claridad la emisión de luz y el comportamiento de las descargas eléctricas (Anderson, 1968).

Posteriormente, investigadores como Julius Plücker (1801-1868) y Johann Hittorf (1824-1914) estudiaron los rayos generados en estos tubos, demostrando su desviación por campos magnéticos y su propagación rectilínea desde el cátodo. Eugen Goldstein (1850-1930) identificó propiedades fundamentales de estos rayos, como su carga negativa y su independencia del material de los electrodos, además de descubrir los rayos canales o anódicos. Por otro lado, Cromwell Varley (1828-1883) y William Crookes (1832-1919) propusieron que los rayos catódicos estaban formados por partículas materiales con carga negativa, mostrando que podían ejercer fuerza, transportar energía y poseer masa, ideas clave que condujeron al posterior descubrimiento del electrón (Anderson, 1968). En contraste, investigadores alemanes como Goldstein, Hertz y Wiedemann defendieron una interpretación ondulatoria, sugiriendo que los rayos catódicos eran una forma particular de ondas electromagnéticas, aunque esta explicación presentó dificultades, especialmente para justificar su desviación en campos magnéticos estáticos (Anderson, 1968).

En esta etapa coexistían dos modelos contradictorios para explicar los rayos catódicos, ambos compatibles con los hechos observados, lo que impulsó una competencia experimental que generó avances decisivos. En este contexto, Arthur Schuster, partidario del modelo corpuscular, fue pionero en utilizar la desviación magnética para obtener datos cuantitativos, mostrando que los rayos describían trayectorias circulares en un campo magnético y formulando por primera vez una relación entre carga y masa. Aunque no logró determinar la velocidad de las partículas y, por tanto, no obtuvo la relación carga-masa completa, su trabajo sentó las bases para que posteriormente Joseph John Thomson (1856-1940) la estableciera (Anderson, 1968).

Figura 7. Representación de la producción de los rayos catódicos



Nota. Tomado de La Radiactividad Y los Elementos: Marie Curie el secreto mejor guardado de la materia (Muñoz Páez, 2012, pág.36).

Thomson fue un físico británico que trabajó en el laboratorio de Cavendish en la Universidad de Cambridge, realizó a finales del siglo XIX investigaciones sobre la naturaleza de los rayos catódicos, motivado en parte por su rechazo al modelo ondulatorio y su interés en determinar sus propiedades físicas. Retomando el montaje experimental de Schuster e incorporando la desviación simultánea por campos eléctricos y magnéticos, logró estimar la velocidad de estas partículas en torno a 10^7 m/s y calcular por primera vez la relación carga-masa e/m , obteniendo valores alrededor de $1.0 \times 10^{11} \frac{C}{kg}$ a $1.4 \times 10^{11} \frac{C}{kg}$, mucho mayores que los de cualquier ion conocido, lo que condujo a la conclusión de que se trataba de partículas con masa extremadamente pequeña.

A esta conclusión se sumaron los resultados experimentales previos obtenidos por Philipp Lenard (1862-1947), quien había mostrado que los rayos catódicos podían penetrar varios milímetros en el aire a presión atmosférica antes de detenerse, pero una molécula normal no podía penetrar tanto de hecho la distancia era unas 10^5 veces mucho menor. Thomson interpretó esto como indicio de que, si eran partículas, debían ser mucho más pequeñas que las moléculas del aire y, por lo tanto, menores que los átomos mismos, por lo que lo llevó a pensar por primera vez que estas partículas son partículas subatómicas. Esta idea condujo por primera vez a la noción de partículas subatómicas, rompiendo con el principio del atomismo clásico que concebía al átomo como una entidad indivisible. En 1897, Thomson publicó estos resultados en su artículo *Cathode Rays*, y junto con los aportes de Jean Perrin y el concepto de “electrón” introducido previamente por George Johnstone Stoney, Thomson pudo proponer la existencia de una partícula elemental, el electrón (Pullman, 1995).

Después del descubrimiento del electrón en 1897, J. J. Thomson, vendría mucho más adelante el científico Robert Andrews Millikan (1868-1953) que pudo hallar el valor de la carga del electrón con su famoso experimento la gota de Millikan alrededor del 1909-1913 y así afirmarse que la carga está cuantizada, el valor de esta es de $1.6 \times 10^{-19} C$. Continuando con Thomson él se dedicó a investigar cómo debía estar estructurado el átomo, pues el modelo existente hasta entonces, propuesto por Dalton a comienzos del siglo XIX, no contemplaba la existencia de partículas subatómicas. Thomson presentó en 1904 su propuesta estructural del átomo en el artículo *On the Structure of the Atom*, publicado en *Philosophical Magazine* (serie 6, vol. 7, pp. 237–265). Allí, en la página 237, describe su idea con las palabras: “*La visión de que los átomos de los elementos consisten en un número de corpúsculos cargados negativamente encerrados en una esfera de electrificación positiva uniforme...*”, lo que constituye la formulación más clara de lo que entendemos hoy de su modelo (Pullman, 1995).

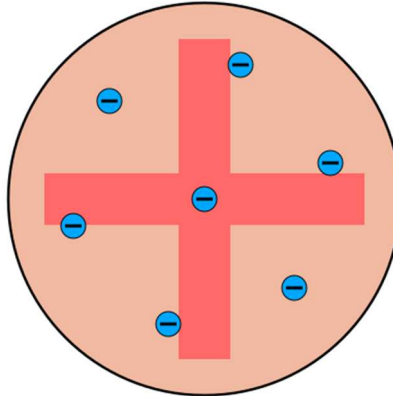
Este modelo, es comúnmente conocido como el modelo del pudín con pasas, y planteaba que el átomo era una esfera de carga positiva en cuyo interior estaban incrustados los electrones, distribuidos de manera que el conjunto resultaba eléctricamente con carga neutra. Entre sus características podemos dividir las en:

- El átomo ya es divisible.

- La presencia de una carga positiva difusa.
- La inclusión de partículas negativas (electrones) y la neutralidad eléctrica global.

Esta propuesta intentaba explicar no solo la estructura interna, sino también fenómenos como la estabilidad de la materia y algunos fenómenos eléctricos y de polarización eléctrica. En comparación al modelo atómico de Dalton que consideraba que los átomos eran partículas indivisibles, macizas y sin estructura interna, que era suficiente de alguna manera para explicar las leyes ponderales y la combinación química, pero no podía dar cuenta de los resultados experimentales que revelaban la existencia de partículas cargadas más pequeñas que el átomo. La aparición del electrón obligaba a abandonar la idea de indivisibilidad y llevaba a construir una representación más compleja, de este modo el modelo de Thomson ofrecía una solución, pero que no duraría mucho ya que más adelante sería reemplazado por el modelo nuclear de Rutherford.

Figura 8. Esquema del átomo según el modelo de Thomson



Nota. Este es un esquema del átomo según Thomson una esfera de materia cargada positivamente con los electrones sumergidos dentro de la esfera haciendo que el átomo fuera neutro Tomado de Kurzon (2014), The plum pudding model of the atom [Imagen], Wikimedia Commons.

Para concluir esta sección, es importante recalcar el papel fundamental de la electricidad y la recontextualización dada ya que permite una comprensión del avance del atomismo. Y es que, el estudio de los fenómenos eléctricos, en particular el de los rayos catódicos, permitió acceder a un nuevo nivel de análisis de la materia. Estas investigaciones derivaron, en el caso de Thomson, en la formulación de un nuevo modelo atómico que transformó las concepciones heredadas del atomismo clásico, renacentista e industrial. De este modo, el átomo dejó de concebirse como una entidad indivisible, y pasó a entenderse como una estructura divisible, compuesta por partículas subatómicas, como el electrón propuesto por Thomson. Este cambio marcó el surgimiento del atomismo moderno y condujo a una comprensión más profunda de la materia, evidenciando que su estructura es más compleja de lo que se creía hasta entonces, al estar formada por entidades aún más elementales que el propio átomo.

1.7 Reflexiones Finales Sobre La Evolución Del Concepto De Átomo

El átomo constituye hoy en día un concepto fundamental para comprender la constitución de la materia y explicar una amplia variedad de fenómenos físicos y químicos. No obstante, el presente trabajo no pretende ofrecer una definición explícita de lo que es un átomo, sino centrarse en la corriente del atomismo: su surgimiento como idea explicativa, su desarrollo histórico y su transformación a lo largo del tiempo. En este sentido, se observa que el atomismo nace como un intento por comprender de qué está hecha la materia y como se da sus transformaciones, es decir, cuál es ese carácter fundamental que permite que, bajo determinadas condiciones, una sustancia se convierta en otra. La perspectiva de la época clásica, varios filósofos asociaron esta explicación a los elementos -agua, fuego, tierra y aire- como unidades fundamentales de la materia. Sin embargo, serían los atomistas, particularmente Leucipo y Demócrito, y posteriormente Epicuro, quienes propondrían una concepción alternativa, sosteniendo que la materia está compuesta por partículas extremadamente pequeñas e indivisibles, denominadas átomos.

En sus inicios, esta doctrina no fue ampliamente aceptada y permaneció relegada durante varios siglos. No sería sino hasta el Renacimiento cuando el atomismo resurge con mayor fuerza, adquiriendo un nuevo carácter. Este proceso de evolución se da a través de momentos clave en distintas épocas históricas, comenzando con el pensamiento de Newton, donde el atomismo deja de ser puramente clásico para transformarse en un atomismo mecanicista. En este contexto, los átomos pasan a estar regidos por las leyes del movimiento newtoniano, reflejo de la profunda influencia de la mecánica clásica en la época. Asimismo, se formulan las primeras definiciones primitivas de conceptos como elemento químico y molécula, sentando las bases para lo que sería una comprensión más estructurada de la materia y de su organización a partir de los átomos.

Otro paso trascendental se da con la formulación del primer modelo atómico, en el cual los átomos, además de poseer propiedades mecánicas, adquieren propiedades físicas más específicas. Estas propiedades permiten explicar la existencia de los distintos elementos químicos y su homogeneidad, así como la formación de sustancias a partir de la manera en que los átomos se organizan. En este punto, el atomismo-molecular adquiere una relevancia aún mayor, al demostrar su capacidad explicativa sobre un rango más amplio de fenómenos, tanto químicos como físicos, tales como la ley de las proporciones definidas y los fenómenos térmicos y termodinámicos abordados desde la teoría cinética de los gases desarrollada por Boltzman.

Finalmente, el atomismo experimenta una transformación radical, dando lugar a una concepción del átomo mucho más compleja que la propuesta por el atomismo clásico. Este cambio se materializa con el modelo atómico de Thomson, que introduce una estructura interna del átomo y marca un punto de inflexión en su conceptualización. Si bien este modelo presentaba limitaciones, al no poder explicar ciertos resultados experimentales, y persistían aún dudas sobre la existencia de los átomos, dichos cuestionamientos comenzarían a resolverse a inicios del siglo XX, consolidando definitivamente al atomismo como un pilar fundamental de la física y de la química.

Ya para finalizar, la importancia de esta primera parte radica en que recoge contenidos de manera histórica que los estudiantes de grado 11 deben conocer según los Estándares Básicos de Competencias. En particular, dentro del componente de Procesos Químicos, se establece el objetivo de “explicar la estructura de los átomos a partir de diferentes teorías” (MEN, 2006). De esta forma, el documento no solo constituye un insumo para los estudiantes de licenciatura en Física, quienes pueden acercarse históricamente a la concepción del atomismo, sino que también busca servir como material de apoyo para la enseñanza de la física desde una perspectiva histórica en la educación media y en especial para grado 11. En este sentido, pretende facilitar la comprensión de los conceptos y, al mismo tiempo, incentivar la enseñanza reflexiva de la física moderna.

Como se mencionó anteriormente en el planteamiento del problema, en los colegios de educación media el átomo suele abordarse de manera superficial. Además, el currículo escolar no incluye de forma explícita contenidos de física moderna (González Salgado, 2022), lo cual dificulta en gran medida el cumplimiento del objetivo previamente mencionado en los Estándares Básicos de Competencias. Esta situación impide que los estudiantes conozcan las distintas visiones atomistas que se han desarrollado a lo largo del tiempo, limitando su comprensión a una representación básica del átomo -generalmente de carácter moderno- pero con importantes deficiencias tanto conceptuales como históricas.

CAPÍTULO 2: ESTABLECIMIENTO DEL CONCEPTO DE NÚCLEO ATÓMICO

El siguiente capítulo inicia con un análisis del movimiento browniano, resaltando su relevancia como evidencia concluyente de la constitución atómica de la materia. Posteriormente, se desarrolla el análisis histórico sobre el nacimiento del concepto del núcleo atómico, en el que se examina el papel fundamental de la radiación en dicho proceso y los avances que permitieron la comprensión progresiva de la estructura nuclear.

2.1 El Movimiento Browniano y el Tamaño de los Átomos

El movimiento browniano fue observado por primera vez en 1827 por el botánico Robert Brown (1773-1858), quien al estudiar granos de polen en suspensión en agua notó que estos presentaban un movimiento irregular y agitado, aparentemente sin causa externa. Aunque Brown descartó que dicho fenómeno estuviera relacionado con la vida de las partículas, durante décadas no existió una interpretación clara de su origen (Santamaría, 2013).

En la segunda mitad del siglo XIX surgieron explicaciones más precisas del movimiento browniano, atribuyéndolo al movimiento térmico de las moléculas del líquido, cuyos choques desiguales producían el desplazamiento errático de las partículas en suspensión. En 1887, Louis Gouy (1854-1926) mostró experimentalmente que la velocidad de estas partículas era inversamente proporcional a la viscosidad del medio, resultado que puso en cuestionaba el principio de equipartición de la energía, que para entonces se consideraba fundamental en la explicación de los movimientos microscópicos. Entre tanto a su vez en la época se llevaba la discusión sobre la existencia real de átomos y moléculas (Santamaría, 2013).

El avance decisivo llegó con la figura de Albert Einstein (1879-1955) que en 1905 publicó su artículo con el nombre traducido al español de *“Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en líquidos en reposo, según la teoría cinético-molecular del calor”* aquí el elaboró un modelo matemático capaz de describir cuantitativamente el movimiento browniano -inspirado por Boltzman-. Interpretándolo como resultado de las constantes colisiones entre las partículas en suspensión y las moléculas del líquido, lo que impide definir una velocidad precisa entre mediciones consecutivas. En su explicación, Einstein destacó dos aspectos fundamentales: primero, que el movimiento de los granos de polen está originado por el altísimo número de impactos con las moléculas del fluido en el que se encuentran, y segundo, que el carácter extremadamente complejo de estos impactos solo puede ser descrito de manera probabilística, como una sucesión de procesos independientes. Así, cada partícula realiza un movimiento autónomo respecto a las demás y además los desplazamientos de una misma partícula en intervalos distintos de tiempo también deben considerarse independientes. Esta concepción abrió el camino a una descripción estadística del fenómeno, profundizándose más adelante como una evidencia de que la materia está compuesta por átomos y moléculas (Santamaría, 2013).

A partir de Einstein, otros investigadores profundizaron en el estudio del movimiento browniano. Marian Smoluchowski (1872-1917), en 1906, presentó de manera independiente un análisis teórico similar, enfatizando la naturaleza probabilística de las trayectorias de las partículas y sus fluctuaciones. Paul Langevin (1872-1946), en 1908, desarrolló una descripción dinámica introduciendo lo que hoy se conoce como la ecuación de Langevin, que incorpora de forma explícita la fuerza aleatoria de las colisiones moleculares y la fuerza de fricción viscosa (Santamaría, 2013).

Finalmente, Jean Perrin (1870-1942) desempeñó un papel crucial en la validación empírica del movimiento browniano y, con ello, en la confirmación de la “existencia” de los átomos. Aunque las formulaciones teóricas de Einstein y Smoluchowski habían dado un marco matemático robusto al fenómeno, era indispensable contar con evidencias experimentales que demostraran que las predicciones coincidían con los datos observados. Para ello, Perrin aprovechó el desarrollo del ultramicroscopio de Richard Zsigmondy (1865-1929), que permitía observar partículas de coloides mucho más pequeñas que las que podían verse con un microscopio óptico convencional. Este instrumento fue decisivo para seguir las trayectorias de partículas microscópicas suspendidas en líquidos y así cuantificar de manera estadística su comportamiento (Corcho Orrit, 2012).

Entre 1908 y 1913, Jean Perrin aplicó la teoría de Einstein sobre el movimiento browniano para determinar experimentalmente la constante de Avogadro, trabajos que reunió en su libro *Les atomes*. A partir del estudio de la distribución vertical, la difusión y el desplazamiento medio cuadrático de partículas en suspensión, Perrin obtuvo valores concordantes de dicha constante mediante métodos independientes. La convergencia de resultados por métodos distintos ofreció una importante evidencia, no solo era posible medir indirectamente el tamaño y la masa de las moléculas de agua, sino también de los átomos que las componían, llegando a que el átomo tenía el tamaño de $10^{-10}m$. Esta cuantificación convirtió a los átomos en objetos físicos con magnitudes medibles (Corcho Orrit, 2012).

Más allá de sus aportes experimentales al movimiento browniano, Perrin también se interesó en problemas de estructura atómica. Propuso modificar el modelo de Thomson al sugerir que los electrones debían encontrarse en la superficie del átomo, en lugar de distribuidos homogéneamente en su interior. Aunque esta idea era aún una aproximación intuitiva y no representaba la estructura atómica moderna, mostraba su disposición a vincular los datos experimentales con modelos explicativos que buscaban mayor coherencia física. Su trabajo, sin duda, consolidó la visión atómica de la materia y le valió el Premio Nobel de Física en 1926, otorgado por su trabajo sobre la discontinuidad de la materia y en particular por sus descubrimientos relacionados con la sedimentación de coloide (Corcho Orrit, 2012).

De este modo, el movimiento browniano pasó de ser un simple fenómeno botánico para convertirse en una evidencia de la existencia de átomos y moléculas que componen la materia. Los trabajos de Einstein y especialmente de Jean Perrin, aparte de resolver un problema físico específico, contribuyeron a la consolidación del atomismo moderno y de la teoría atómica-

molecular de la materia, transformando un debate filosófico en un hecho científico que podía cuantificarse. Por lo que el premio nobel de Jean Perrin por la discontinuidad de la materia es la muestra de siglos de hipótesis, teorías, aportes, debates filosóficos y controversias que decenas de filósofos y científicos participaron a lo largo de la historia, desde las hipótesis de Demócrito y Epicuro, pasando por Gassendi, Newton, Boyle, Lavoisier, Dalton, Berzelius, Thompson, Rutherford y entre otros más, culminaron con Jean Perrin y la evidencia de que la materia está compuesta por átomos y moléculas. Por lo que de aquí en adelante la física atómica se centrara en estudiar las propiedades y estructura de los átomos.

2.2 La Radiactividad

En 1895, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) descubrió los rayos X al observar una radiación desconocida capaz de atravesar materiales opacos mientras experimentaba con tubos de rayos catódicos, hallazgo que revolucionó la ciencia y la medicina y le valió el Premio Nobel de Física en 1901. Inspirado por este descubrimiento, Henri Becquerel (1852-1908) en 1896 realizó un experimento colocando sales de uranio⁵ sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro para comprobar si, al ser activada por la luz solar, emitía rayos capaces de atravesar el papel. Al revelar la placa, observó la silueta del mineral, lo que inicialmente interpretó como una confirmación de su hipótesis, de que las sales de uranio emitían rayos x. Sin embargo, la clave de su descubrimiento fue accidental, ya que, al guardar el uranio y la placa en la oscuridad durante un día nublado, Becquerel observó que el contorno del mineral quedó igualmente impreso. Tras repetir el experimento, comprendió que no se trataba de fluorescencia ni de rayos X inducidos por la luz, sino de una emisión espontánea del uranio, lo que había descubierto era nada menos que la radiactividad (Anderson, 1968).

Joseph John Thomson, descubridor del electrón, y Ernest Rutherford (1871–1937) mantuvieron una estrecha relación académica, ya que Rutherford trabajó bajo la tutela de Thomson en el laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, referente a finales del siglo XIX en el estudio de los fenómenos eléctricos. Ambos se interesaron por los rayos descubiertos por Becquerel, que mostraban la capacidad de ciertos minerales, como el uranio, para ionizar gases y aumentar la conductividad del aire; no obstante, los estudios posteriores de Rutherford sobre la radiación se abordarán más adelante (Corcho Orrit, 2012).

Quienes también se interesaron de inmediato por este fenómeno fueron Pierre Curie (1859-1906) y Marie Curie (1867-1934), consolidando una estrecha colaboración científica. Pierre, quien junto a su hermano Jacques Curie (1855-1941) había descubierto el efecto piezoeléctrico, desarrolló un electrómetro de gran sensibilidad que permitió a Marie, en el marco de su doctorado, medir cuantitativamente la radiación emitida por el uranio. A diferencia de Becquerel, que empleó placas

⁵ El uranio fue descubierto por Martin Klaproth (1743-1817) en 1789 trabajando con el mineral de “pechblenda” o “uraninita” como se conoce actualmente.

fotográficas, los Curie centraron sus estudios en las propiedades eléctricas de la radiación, una metodología que sería utilizada posteriormente por Rutherford (Muñoz Paez, 2012).

Pierre y Marie Curie demostraron en 1898 que la radiación observada en minerales de uranio no era un fenómeno exclusivo de este elemento, al comprobar mediante mediciones con el electrómetro piezoeléctrico que ciertos residuos de pechblenda presentaban una radiactividad muy superior a la que se le atribuía al uranio presente, lo que implicaba la existencia de elementos radiactivos no descubiertos, como resultado de un riguroso y prolongado trabajo experimental y químico, anunciaron primero el descubrimiento del polonio en julio de ese año y meses después, en diciembre, el del radio, un elemento de radiactividad extraordinariamente intensa, obtenido tras complejos procesos de separación y concentración a partir de grandes cantidades de pechblenda (Muñoz Paez, 2012).

Gracias a este proceso, los Curie lograron aislar pequeñas cantidades de radio y estudiar sus propiedades. El descubrimiento de estos elementos les valió el Premio Nobel de Física en 1903 (compartido con Becquerel). Igualmente, en ese mismo año 1898, Pierre Curie y Marie Curie propusieron el término “radioactividad” para designar a estos rayos ionizantes procedentes de elementos como el uranio y el torio. Que se les conocía por el momento como rayos de Becquerel, el nombre aludía a la actividad propia de los elementos, Radius que en latín significa rayo y el sufijo actividad, lo que lo convierte en “radioactividad” (Muñoz Paez, 2012). Sin embargo, para los Curie no bastaba con bautizar el fenómeno y descubrir nuevos elementos, ya que también era necesario comprender su naturaleza (Muñoz Paez, 2012).

Figura 9. *Fotografía de Marie y Pierre Curie en el laboratorio de la escuela*



Nota. Tomado de AIP Emilio Segrè Visual Archives (1896), Marie and Pierre Curie converse [Fotografía], Wikimedia Commons. Dominio público (CC0 1.0).

En enero de 1899, Marie Curie presentó un conjunto de hipótesis sobre la naturaleza de la

radiactividad en la *Revue Générale des Sciences*, las cuales fueron recopiladas posteriormente por Pierre Radvanyi (1926-2021) en su estudio *sobre el matrimonio de los Curie*. Estas hipótesis reflejaban el esfuerzo inicial de comprender este fenómeno completamente nuevo y aún envuelto en la incertidumbre. Entre estas hipótesis se propone:

- La radiactividad es una fosforescencia de larga duración provocada por la luz, aunque la propia Marie reconoció que se trataba de una explicación poco probable.
- Los rayos emitidos correspondían a una emisión de materia, lo que implicaba una pérdida de peso de las sustancias radiactivas.
- La energía disponible de dichas sustancias disminuye constantemente.
- Los rayos son emisiones secundarias inducidas por radiaciones aún más penetrantes que los rayos X, provenientes del espacio, las cuales solo podrían ser absorbidas por elementos de gran peso atómico como el uranio o el torio.
- La radiactividad se producía a expensas del calor del medio, sin embargo, suponía una violación del principio de Carnot.

Si bien algunas de estas hipótesis fueron descartadas rápidamente, como la de la fosforescencia sostenida -ya refutada por Henri Becquerel al observar que las sales de uranio emitían radiación incluso tras permanecer en completa oscuridad-, otras resultaron más interesantes. En particular, la hipótesis que atribuía la radiactividad a una emisión de materia coincidía con las especulaciones iniciales de Marie en 1897 y que terminó mostrando un mayor grado de acierto, al anticipar la existencia de procesos ligados a la estructura subatómica. Sin embargo, la hipótesis cósmica de los rayos excitantes, que resultaba especialmente partidaria para Pierre Curie, terminó siendo un error compartido con Marie. Finalmente, en el Congreso Internacional de Física celebrado en París en agosto de 1900, durante la Exposición Universal, los Curie presentaron las propiedades de las nuevas sustancias radiactivas. En ese escenario reconocieron con honestidad que aún eran incapaces de proponer una explicación satisfactoria para el fenómeno de la radiactividad, pero daría paso al comienzo de una nueva física, que tiene como protagonista indudable al personaje de Rutherford (Corcho Orrit, 2012).

El descubrimiento de la radiactividad constituye una parte muy fundamental en la historia de la física nuclear, aunque en sus inicios su naturaleza y origen no estaban del todo claros. Los Curie intentaron proponer explicaciones, y la más acertada fue la que vinculaba este fenómeno con procesos subatómicos de la materia. En este mismo contexto, el descubrimiento del electrón por parte de Thomson y su posterior modelo atómico no lograban dar cuenta de la radiactividad. Sin embargo, el simple hecho de que los átomos ya no podían concebirse como entidades indivisibles -como se expresaba en el atomismo clásico- sino como sistemas constituidos por partículas aún más pequeñas, fortalecía de alguna manera la idea de que procesos internos en el átomo podían explicar este fenómeno. Por esta razón hablar de la radiactividad es hablar de los principios y las

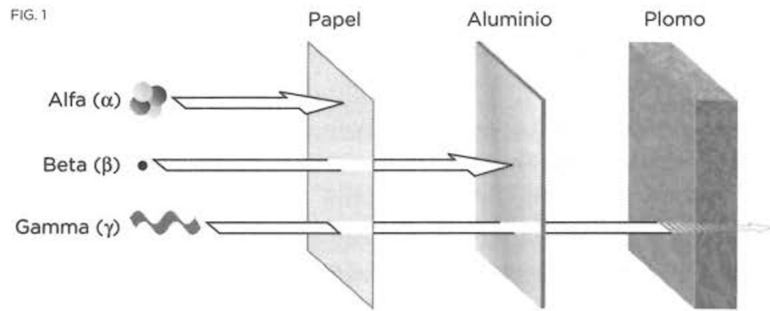
bases de la física nuclear y por ende también de cómo es el proceso que da al nacimiento del concepto del núcleo atómico, por lo que Rutherford en esta instancia será quien marque un cambio decisivo en la comprensión de la estructura de la materia, y particularmente del átomo, al vincular de manera más directa las propiedades nucleares con la radiactividad.

2.3 Los Nuevos Tipos de Radiación

El descubrimiento de los distintos tipos de radiación -alfa, beta y gamma- fue un proceso progresivo que combinó observaciones experimentales, comparaciones con otras radiaciones conocidas y deducciones teóricas. Así fue como, en este contexto, Rutherford se trasladó en 1898 a la Universidad McGill, en Canadá, donde encontró un entorno propicio para profundizar en el estudio de la ionización de los gases y la naturaleza de los llamados “rayos de Becquerel”. Aunque inicialmente buscó establecer similitudes con los rayos X, su aporte más relevante fue demostrar que la radiación del uranio no era homogénea, no se trataba de un solo tipo de emisión, sino que estaba compuesta por al menos dos tipos con distinto poder de penetración. Para demostrar esto, el experimento de Rutherford consistió en colocar uranio sobre placas de zinc, separadas por un gas y conectadas a un sistema que permitía medir la ionización. Al interponer láminas de aluminio y otros materiales como filtros, observó que una parte de la radiación quedaba absorbida fácilmente, mientras que otra era capaz de atravesar las barreras con mayor facilidad, lo que le permitió identificar los rayos alfa, poco penetrantes pero muy ionizantes, y los rayos beta, más penetrantes. Estos resultados, publicados en 1899, inauguraron la clasificación de la radiactividad y fueron clave para el posterior descubrimiento del núcleo atómico (Corcho Orrit, 2012).

El hallazgo de una tercera forma de radiación se debió al físico francés Paul Villard (1860-1934) en 1900. Mientras trabajaba en París con muestras de radio proporcionadas por los Curie, Villard observó una radiación aún más penetrante que las alfa y beta, capaz de atravesar incluso gruesas capas de plomo. Inicialmente confundió estos rayos con los rayos X, además que observó que esta radiación presentaba una particularidad y es que no se desviaba bajo la acción de un campo magnético. Fue entonces Rutherford, en 1902, quien retomó los resultados de Villard y estableció con claridad la naturaleza diferenciada de esta radiación, y recibirían el nombre de rayos gamma (Anderson, 1968).

Figura 10. *Ilustración del grado de penetración de la radiación*



Nota. En la imagen se observa los 3 tipos de radiación diferentes y su grado de penetración en diferentes materiales Tomado de El núcleo atómico: Rutherford los átomos también tienen corazón (Corcho Orrit, 2012, pág.66).

Aquí es importante señalar que, en el momento del descubrimiento, de las radiaciones alfa, beta y gamma estas se clasificaron únicamente por criterios experimentales, ya sea por su capacidad de penetrar distintos materiales y su comportamiento frente a campos magnéticos. No se conocía aún su verdadera naturaleza, de hecho, por el momento aún no se había descubierto el núcleo atómico. Pero gracias a investigaciones posteriores que se estableció que las partículas alfa correspondían a núcleos de helio, resultado que Rutherford y Geiger confirmaron en 1908 (Corcho Orrit, El núcleo atómico: Rutherford los átomos también tienen corazón, 2012). Los rayos beta se identificaron como electrones hacia inicios del siglo XX gracias a su desviación en campos eléctricos y magnéticos. Finalmente, los rayos gamma, descubiertos por Paul Villard, se comprendieron como radiación electromagnética de alta energía, análoga a los rayos X, varios años después.

Lo que resulta interesante es que la radiactividad, hoy es entendida como un fenómeno propio del núcleo atómico, fue en su momento la clave para descubrir la existencia de este. Esto suena como una paradoja histórica e invita a reflexionar, por ejemplo, cuando se enseña la radiactividad, ya que esta suele presentarse directamente como una manifestación nuclear, pero en realidad fue el estudio cuidadoso de estas radiaciones lo que permitió comprender la estructura de la materia, reconocer la presencia del núcleo y, posteriormente, profundizar en la naturaleza de la radiactividad en sí misma. Y es que no se puede dejar pasar por desapercibido los tipos de radiación porque como se mencionó, su estudio y el posterior uso de estas para gran variedad de experimentos fueron primordiales para la comprensión de la estructura y propiedades del núcleo y por ende también del átomo en general.

2.4 Desintegración Radiactiva

Hacia 1899 se observó que la radiactividad disminuía con el tiempo y no era un fenómeno constante. En ese contexto, Rutherford trabajando en la Universidad McGill, estudió el torio y descubrió que además de emitir radiaciones alfa y beta, producía una “emanación” capaz de volver temporalmente radiactivos a los objetos cercanos. Al aislarla, comprobó que esta actividad desaparecía con el tiempo y que el efecto no dependía del material expuesto, sino de la propia

“emanación”. Así descartó la hipótesis de que los cuerpos del entorno adquirieran radiactividad por sí mismos y al contrario afirmaba que todo este efecto se debía a que esta “emanación” se posaba sobre los objetos y les daba la apariencia de ser radiactivos (Corcho Orrit, 2012).

En 1901 Becquerel creía que las sales de uranio no eran totalmente puras, sino que se componían de varias sustancias, halló que las sales de uranio contenían una sustancia desconocida, a la que llamó uranio X, responsable de gran parte de la radiación. Se dio cuenta que, con el tiempo, las sales de uranio recuperaban su radiactividad mientras que el uranio X la perdía. Este proceso parecía indicar que el uranio generaba una sustancia secundaria que era radiactiva por un tiempo limitado. William Crookes contrastó los resultados y ambos científicos comunicaron sus observaciones a la universidad de McGill a finales del mismo año. Así pues, al enterarse Rutherford, él decidió comprobar si algo similar ocurría con el torio (Malley, 2011).

Así con una fructífera colaboración de alrededor de 2 años de 1901 hasta inicios de 1903 con el químico Frederick Soddy (1877-1956), Rutherford logró al igual que Becquerel aislar del torio una sustancia que llamarón torio X. Observaron que el torio perdía radiactividad mientras que el torio X la adquiría y luego este decaía de forma exponencial. Más tarde se dieron cuenta que el torio X era el origen de la misteriosa “emanación”, posteriormente Soddy logro identificarla como un gas noble, que se denominaría posteriormente como radón. Por el momento seguía existiendo la duda de que relación había entre esta “emanación” con la radiactividad y como vincularlas con las emisiones de las partículas alfa y beta. Pero ellos siguieron experimentando con el torio, permitiendo trazar una cadena de transformaciones que ellos explicaron así: el torio producía torio X, y este a su vez generaba la emanación gaseosa, todo ello acompañado de una pérdida progresiva de radiactividad. Con este proceso realizaron unas curvas experimentales de la actividad radiactiva mostrando claramente una relación cuantitativa, el decrecimiento del torio correspondía al incremento del torio X, lo que revelaba un vínculo directo entre ambos (Malley, 2011).

Así pues, a partir de estas observaciones, Rutherford y Soddy elaboraron la teoría de la desintegración radiactiva, publicada en la revista *Philosophical Magazine* de las Series 6 con el nombre de “*Radioactive Change*”. Aquí se exhibe una explicación completa hasta el momento del fenómeno de la radiactividad, cosa que Los Curie hasta el momento no habían logrado. Según esta, la radiactividad no era una simple emisión de energía, sino el resultado de una transformación profunda en la materia, en otras palabras, era la transmutación de un elemento químico en otro. En el artículo “*Radioactive Change*”, en la sección 6 denominada “*The Relation of Radioactive Change to Chemical Change*” mencionan:

Since radioactivity is a specific property of the element, the changing system must be the chemical atom, and since only one system is involved in the production of a new system and, in addition, heavy charged particles, in radioactive change the chemical atom must suffer disintegration (Rutherford & Soddy , *Radioactive Change*, 1903, pág. 586).

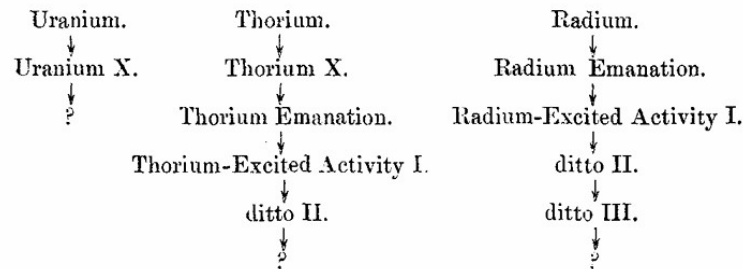
La traducción literal de esta parte del artículo sería:

Dado que la radiactividad es una propiedad específica del elemento, el sistema que cambia

debe ser el átomo químico, y dado que solo un sistema está involucrado en la producción de un nuevo sistema y, además, de partículas pesadas cargadas, en el cambio radiactivo el átomo químico debe sufrir desintegración. (Rutherford & Soddy , Radioactive Change, 1903, pág. 586)

Este fragmento es muy importante porque evidencia un giro radical en la concepción del átomo, inicialmente la radiactividad debe entenderse como una propiedad específica del elemento, entonces el cambio debe producirse en el propio átomo y no en sus combinaciones externas. Esto quiere decir que un solo átomo, al desintegrarse, da origen a otro distinto y, al mismo tiempo, emite partículas cargadas y pesadas que en este caso son las partículas alfa. Así, la radiactividad se entendió como una prueba experimental de que el átomo no era indivisible ni estable, como se creía en el atomismo clásico, sino que podía transformarse en un nuevo elemento a través de un proceso de desintegración interna.

Figura 11. Esquema original de las series de desintegración radiactiva del uranio, torio y radio



Nota. El esquema muestra la transformación de los elementos en productos intermedios (denominados provisionalmente como “Uranio X” o “Torio X”) y señala con signos de interrogación los productos finales que, en aquel entonces, aún eran desconocidos para la ciencia. Tomado de Radioactive Change (Rutherford & Soddy , 1903, pág.587)

Aquí los rayos alfa adquirieron un papel central. Rutherford también demostró en su artículo que no se trataba de radiación sin masa, sino de partículas pesadas cargadas positivamente, y hallaron también que esta masa es 1000 veces mayor que la radiación beta o los electrones, y que su masa es parecida al mismo orden del átomo de hidrógeno. Aquí al comprender un poco más acerca de la naturaleza corpuscular de las emisiones alfa permitió establecer que los átomos radiactivos se desintegraban en secuencias, dando lugar a nuevos átomos -los llamados “hijos”- con propiedades diferentes a las del “padre” original. Esta concepción introdujo el lenguaje de las “familias radiactivas”, en las que la materia seguía una suerte de genealogía hasta alcanzar un estado estable, que actualmente se sabe que llega al elemento del plomo (Malley, 2011).

Así pues, como se observa en la imagen anterior un elemento como el Torio transmuta a un nuevo elemento químico como el Torio X que actualmente sería el isótopo del radio 228, emitiendo una partícula del tipo alfa, después el Torio X, transmutaría a la “emanación de Torio” que actualmente sería el radón 220, emitiendo también dos partículas alfa, y así sucesivamente, hasta llegar a un elemento estable que sería el plomo.

Del artículo *Radioactive Change* podemos sacar ciertas características hasta el momento de la radiación:

- La radiación no es un efecto posterior o externo, sino que ocurre en el mismo instante de la transformación del átomo en otro.
- Las partículas alfa son corpúsculos con carga positiva y masa comparable a la del átomo de hidrógeno.
- Más del 99 % de la energía emitida se libera en forma de partículas alfa.
- La intensidad de la radiación decae exponencialmente en el tiempo, de acuerdo con una constante característica (λ) de cada sustancia.
- Cada emisión corresponde a la pérdida de una fracción concreta de materia y energía del átomo.

Esto llevo a dos cosas importantes primero, mostro un poco más sobre la naturaleza de los tipos de radiación, con estos aportes se supo que la radiación alfa era efectivamente partículas de materia con carga positiva aún se desconocía que eran núcleos de helio y que los rayos beta eran las mismas partículas que los rayos catódicos o sea electrones con carga negativa. Segundo, esto también conlleva a pensar claramente que los elementos radiactivos no eran sustancias eternas ni inmutables, como lo había concebido la química o el atomismo clásico, sino que sus átomos podían transformarse espontáneamente en otros diferentes, emitiendo partículas alfa o beta en el proceso.

Así pues, como se habló en la sección de la alquimia sobre como los alquimistas pensaban en la transmutación de un metal a otro, aquí en el fenómeno de radiactividad si sucedía, la radiactividad era un fenómeno de transmutación atómica natural, gobernado por leyes precisas, entre ellas la del decaimiento exponencial, que demostraron Rutherford y Soddy en su artículo. Como se observa hasta el momento no se sabía del núcleo atómico, por eso Rutherford habla en términos del átomo, aunque hasta el momento el modelo atómico vigente era el de Thompson, pensar en que la radiactividad conlleva la pérdida de materia, esto debido a la emisión de partículas Alfa, mostraba de alguna manera que la materia podía estar aún más fragmentada de como se pensaba, no solo era una esfera con electrones incrustados sino que podía ser muchas partículas de materia constituidas en un solo átomo, aun faltaría unos años hasta que Rutherford propusiera su modelo atómico y la existencia de un núcleo, pero sin duda la desintegración radiactiva, ponía a pensar más sobre cómo era esa estructura de la materia, provocando que el atomismo moderno fuera evolucionando conceptualmente.

2.5 El Átomo Tiene Un Núcleo

En 1904 Rutherford publicó *Radiactivity*, el primer libro que sentó las bases de la física nuclear, además que incluyó una estimación de la edad de la Tierra, consolidándolo como una figura central del campo y el Padre de la física nuclear. En 1907 se trasladó a la Universidad de Mánchester,

donde aseguró el acceso independiente a material radiactivo y estableció una colaboración clave con Hans Geiger (1882-1945), decisiva para el desarrollo de nuevas técnicas de detección de partículas radiactivas, entre ellas el contador Geiger (Heilbron, 2003).

Los experimentos conjuntos de Rutherford y Geiger permitieron esclarecer un interrogante, la verdadera naturaleza de los rayos alfa. Aunque desde años atrás Rutherford había sospechado que podían estar relacionados con el helio, aún no existían pruebas experimentales que lo demostraran. Gracias al diseño del contador Geiger, fue posible cuantificar el número de partículas emitidas y relacionarlo con la carga total producida. Al dividir ambos valores, demostraron que la radiación alfa estaba compuesta por partículas con la misma carga que los iones de helio o con carga $2e$. Aún no se hablaba en términos de “núcleo”, pero sí se reconocía que las partículas alfa correspondían a átomos de helio desprovistos de sus electrones (Corcho Orrit, 2012), lo que constituyó para el momento un avance importante porque mostraba que la radiación eran también átomos de elementos disparados a gran velocidad.

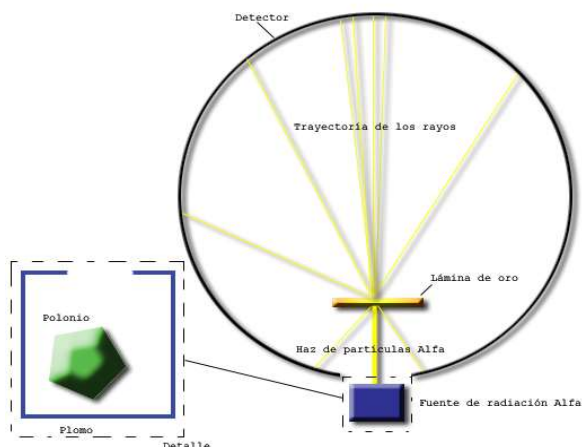
En el marco de sus investigaciones experimentales, Rutherford fue galardonado en 1908 con el Premio Nobel de Química por sus estudios sobre la desintegración de los elementos y las sustancias radiactivas, reconocimiento que evidenció la estrecha relación entre la física y la química y consolidó su prestigio científico. De regreso a Mánchester, continuó profundizando en la experimentación con radiación alfa, que se convirtió en su herramienta fundamental y lo condujo poco después al descubrimiento del núcleo atómico (Heilbron, 2003).

Rutherford comenzó a reflexionar sobre los resultados de los estudios sobre radiactividad, sin embargo, más allá de los fenómenos de emisión de partículas, su interés se centró ahora en lo que estos podían revelar acerca de la constitución misma de la materia. Entonces Geiger, colaborador de Rutherford, introdujo a un joven estudiante, Ernest Marsden (1889-1970), quien habría de desempeñar un papel crucial para el descubrimiento del núcleo atómico. Inicialmente, Rutherford propuso a Marsden un experimento aparentemente rutinario, le pidió investigar si las partículas alfa podían reflejarse al incidir sobre una superficie metálica. El propósito no era confirmar una hipótesis radical, sino descartar una posibilidad que, en principio, parecía improbable (Corcho Orrit, 2012). Aquí cabe mencionar que Rutherford no eligió las partículas alfa de manera fortuita, su experiencia previa en el estudio de la radiactividad le había permitido conocer profundamente su naturaleza y comportamiento. Tras haberlas investigado en detalle, decidió emplearlas no como objeto de análisis, sino ahora como herramienta para poder explorar la estructura interna del átomo. Esto muestra la genialidad científica de Rutherford.

Marsden, bajo la supervisión de Geiger, diseñó un dispositivo experimental para realizar el estudio que le había pedido Rutherford, consistió en un sistema de colimación que permitía dirigir un haz de partículas alfa hacia una delgada lámina metálica en el interior de una cámara de vacío. La elección del oro como material se debió a su maleabilidad que permitía obtener láminas extremadamente finas, lo que facilitaba el paso de las partículas sin absorberlas completamente (Corcho Orrit, 2012).

El procedimiento experimental fue el siguiente y requería un grado notable de precisión y paciencia. Las partículas alfa, generadas por una fuente de radio o polonio, eran canalizadas mediante un recipiente de plomo con una estrecha abertura, de modo que el haz incida directamente sobre la lámina de oro. Detrás de esta lamina se situaba una pantalla recubierta con sulfuro de Zinc, sustancia que emitía destellos luminosos cada vez que una partícula alfa la impactaba. Dado que en aquella época no existían detectores electrónicos como los hay hoy en día, ellos debían observar los diminutos destellos a través de un microscopio, contando manualmente todos los impactos y registrando sus posiciones. Esta engorrosa tarea permitía reconstruir la trayectoria de las partículas tras atravesar la lámina, revelando así desviaciones inesperadas, mientras la mayoría pasaban sin alteración, unas pocas se desviaban en ángulos considerables e incluso algunas regresaban casi en dirección contraria (Rutherford, 1911), en la figura 12 puede verse una representación del experimento. Los descubrimientos de Marsden y Geiger se publicaron en 1909 en las publicaciones científicas de *Proceedings of the Royal Society*.

Figura 12. Esquema gráfico del experimento de Rutherford



Nota. Tomado de Dr Juzam. (5 de noviembre de 2005). Experimento-de-Rutherford.png [Imagen]. Wikimedia Commons.

En 1911, Rutherford publicó un artículo que se titula “*The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*” donde mostraba los resultados e interpretaciones respecto a estos experimentos realizados por Geiger y Marsden, un artículo que marcó un hito en la comprensión de la estructura atómica. En este artículo menciona que observando la deflexión de dichas partículas. Encontró que una pequeña fracción de estas -aproximadamente 1 de cada 20,000- se desviaba en ángulos cercanos a 90° , mientras que la mayoría sufría desviaciones mínimas de alrededor de 0.87° . Estos resultados contradecían la interpretación que el modelo atómico de Thomson, conocido como se mencionó anteriormente, el modelo del “pudín de pasas” (Rutherford, 1911).

Thomson propuso un modelo atómico en el que la carga positiva estaba distribuida uniformemente

y los electrones se encontraban incrustados en ella, explicando la dispersión de partículas como el resultado de muchas pequeñas interacciones. Este enfoque, denominado por Rutherford como “dispersión compuesta”, sostenía que las grandes desviaciones solo podían surgir de la acumulación de numerosos encuentros, haciendo estadísticamente casi imposible que un único átomo produjera una deflexión de gran ángulo. Rutherford analizó esto y llegó a la conclusión de que la explicación de Thomson no podía sostenerse. La presencia de grandes deflexiones indicaba que la carga positiva del átomo no estaba distribuida uniformemente, sino concentrada en un espacio extremadamente pequeño. Para producir las desviaciones observadas, debía existir una región central, muy densa y con carga, capaz de generar un intenso campo eléctrico que interactuara fuertemente con las partículas alfa de alta velocidad. Esta región central, posteriormente llamada núcleo, debía concentrar prácticamente toda la carga positiva y gran parte de la masa del átomo (Rutherford, 1911).

De hecho, en la sección 7 de su artículo titulado *General Considerations* menciona:

Considering the evidence as a whole, it seems simplest to suppose that the atom contains a central charge distributed through a very small volume, and that the large single deflexions are due to the central charge as a whole, and not to its constituents (Rutherford, 1911, pág. 20).

La traducción literal sería:

Considerando la evidencia en su conjunto, parece más simple suponer que el átomo contiene una carga central distribuida en un volumen muy pequeño, y que las grandes deflexiones individuales se deben a la carga central en su conjunto, y no a sus constituyentes (Rutherford, 1911, pág. 20).

Esta frase básicamente marca la conclusión general de su teoría propuesta en el artículo, al explicar la dispersión de los rayos alfa en la materia y proponiendo por primera vez que el átomo debe contener un núcleo, aunque por el momento él no lo llamaba así. Al leer menciona inicialmente “parece más simple suponer que el átomo contiene una carga central distribuida en un volumen muy pequeño”, Aquí rechaza implícitamente el modelo de Thomson, y sugiere que al suponer que el átomo tiene un núcleo explicaría de mejor manera la dispersión de los rayos alfa. Y continuando con el texto él dice “y que las grandes deflexiones individuales se deben a la carga central en su conjunto, y no a sus constituyentes”, se refiere a que la única forma que ocurra la desviación es tomar esta carga central como una totalmente unificada, ya que así permite las deflexiones observadas y no si se tomara de manera fragmentada en pequeñas unidades separadas, como lo proponía Thomson.

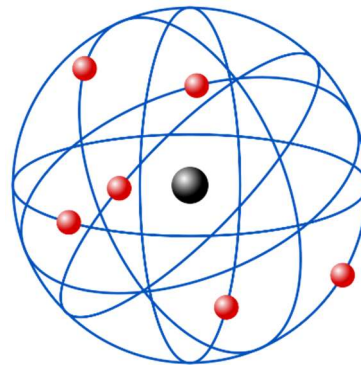
Aquí cabe mencionar que Rutherford no menciona que el núcleo este fragmentado en términos de masa, aun no se sabía esto. El hecho de que dijera de que la desviación se debe a una carga total y no a pequeñas cargas es porque para que ocurra la desviación esta solo es posible si toda la carga está constituida en punto, y lo demuestra matemáticamente con lo que en su artículo denomina la “desviación simple”, pero al realizar los cálculos con “desviación compuesta” que es la versión de

Thomson, la probabilidad de que ocurra una gran desviación prácticamente sería nula.

Además de esto Rutherford menciona en su artículo otras características muy importantes, pero en pocas palabras podemos resumir sus consideraciones generales de este modo:

- El átomo está constituido por una carga central rodeada por una distribución uniforme de carga de signo opuesto dentro de una esfera de radio R: De hecho, Rutherford menciona que el tamaño de este núcleo debe ser menor a 10^{-12} cm , unas 10 000 veces más pequeño que el átomo en general.
- El núcleo contiene toda la masa del átomo.
- El campo eléctrico dentro del átomo es extremadamente intenso cerca del núcleo, pero decrece rápidamente con la distancia.
- La magnitud de la carga central es proporcional al peso atómico del elemento: Esto lo sugirió para átomos más pesados que el aluminio, mostrando una relación directa entre la masa del átomo y su carga, la base para los números atómicos.

Figura 13. Representación esquemática del modelo atómico de Rutherford



Nota. Representación esquemática del átomo según Rutherford, mostrando el núcleo central y las órbitas electrónicas, este sería una representación del átomo de carbono ya que contiene 6 electrones a su alrededor. Tomado de Cburnett. (s.f.). *Rutherford_atom.svg* [Gráfico]. Wikimedia Commons.

Es importante mencionar, que después de que Thomson demostrara que el átomo podía fragmentarse y que estaba constituido por partículas aún más pequeñas: los electrones, se dio un gran paso en la comprensión de la materia y el cómo se constituía el átomo siendo el avance al atomismo moderno. Sin embargo, el artículo de Rutherford evidenció que todavía aun existían dificultades para entender cómo se estructuraba realmente el átomo. A partir de las observaciones de Marsden y Geiger, Rutherford propuso un modelo capaz de explicar de mejor manera estos resultados experimentales, a comparación de Thomson. Por primera vez, el átomo fue concebido como una estructura compuesta principalmente por vacío -como ya se había concebido en el atomismo clásico-, con una carga positiva muy pequeña concentrada en una región central.

Esta hipótesis sobre la estructura del átomo propuesta por Rutherford marcó el surgimiento de la

noción de núcleo atómico y dio lugar a una transformación del concepto de átomo. Dicho planteamiento constituyó un avance fundamental del atomismo moderno y, al mismo tiempo sentó las bases para el desarrollo de una de las ramas más importantes de la física: la física nuclear. Si bien en ese momento aún persistían dudas respecto a las propiedades y la estructura del núcleo, este modelo representó un progreso en la comprensión de la estructura atómica. A partir de ello, los avances posteriores se produjeron de manera gradual, hasta culminar en la explicación de la fisión nuclear como un fenómeno propio del núcleo y de la materia.

2.6 El Número Atómico y Los Isotopos

Luego de estos descubrimientos acerca de la estructura atómica, el átomo comenzó a entenderse como un sistema compuesto por dos partes fundamentales: los electrones y el núcleo, cada una de las cuales fue objeto de estudio por separado los siguientes años. Así pues, mientras que el estudio del núcleo se orientó más hacia la exploración experimental, el estudio de los electrones en el átomo se centró en enfoques teóricos, iniciados principalmente por Niels Bohr (1885-1962) entre 1913 y 1914. Bohr postuló posterior al modelo de Rutherford un modelo alternativo que mantenía el núcleo en su centro, pero con ligeras diferencias en el comportamiento de los electrones alrededor de este; aquí Bohr se centra en las orbitas de los electrones y no en la estructura nuclear. Y es que, según la física clásica, los electrones en órbitas alrededor del núcleo deberían emitir continuamente radiación electromagnética debido a su movimiento acelerado, perdiendo energía y colapsando finalmente en el núcleo. Sin embargo, esto no sucede así en la naturaleza (Fergusson, 2011). Por tanto, aunque el modelo fue clave para reconocer la presencia del núcleo, demostraba que la física clásica era insuficiente para describir correctamente la estabilidad de los átomos y los fenómenos a escala atómica.

Dado que el modelo de Bohr surgió como una mejora del modelo nuclear de Rutherford para explicar la estabilidad del átomo y los espectros de emisión, uno de los problemas más significativos que enfrentaba la física de comienzos del siglo XX era la explicación de los espectros atómicos. Los experimentos mostraban que los átomos no emitían radiación de manera continua, sino en líneas discretas características de cada elemento. El caso del hidrógeno era particularmente relevante, pues su espectro de emisión -descrito empíricamente por la fórmula de Balmer- evidenciaba regularidades matemáticas claras que no podían explicarse desde el modelo clásico de Rutherford. Esta tensión entre teoría clásica y evidencia experimental constituyó el trasfondo problemático que motivó nuevas propuestas teóricas (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2003).

En respuesta a esta situación, Bohr propuso en 1913 un modelo que introducía postulados radicalmente nuevos, los electrones solo podían ocupar orbitas estacionarias cuantizadas en las que no emitían energía, y la radiación se producía únicamente cuando el electrón transitaba entre niveles energéticos definidos, emitiendo o absorbiendo un cuanto de energía. Esta propuesta permitió explicar con notable precisión el espectro del hidrógeno, constituyéndose en un avance decisivo respecto al modelo anterior. No obstante, el modelo de Bohr no ofrecía una descripción completa de la estructura atómica, pues sus supuestos resultaban insuficientes para átomos más

complejos. Sin embargo, su importancia histórica radica en que consolidó la idea de cuantización en la física atómica y abrió el camino hacia la teoría cuántica (García Castañeda & Ewert De-Geus, 2003). A partir de entonces, los desarrollos posteriores se centraron en describir la distribución y el comportamiento de los electrones en el átomo, cuestión que, aunque fundamental en la física, no constituye el eje central de este trabajo, cuyo interés se orienta hacia la evolución del concepto de núcleo y sus transformaciones conceptuales, por lo cual no se retomarán en sí las propuestas posteriores a Bohr.

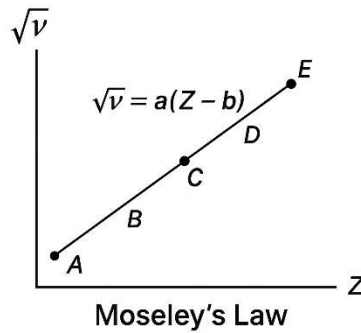
Por otro lado, el estudio del núcleo se centró en una cuestión y era determinar con precisión la magnitud de la carga nuclear y la cantidad de electrones asociados a cada tipo de átomo (Fergusson, 2011). Rutherford en su artículo de 1911, estimó la carga central del átomo de oro en aproximadamente $100e$, aunque no coincidía con el valor real, fue una aproximación destacable para su época. Además, propuso que la carga positiva del núcleo era proporcional al peso atómico, anticipando la idea del número atómico como medida de la carga nuclear (Rutherford, 1911).

Este problema fue abordado inicialmente mediante investigaciones experimentales con rayos X realizadas por Charles Glover Barkla (1877-1944) en 1911, quien observó que los átomos, al ser irradiados con rayos X, emitían radiaciones secundarias características de cada elemento, a las que denominó “rayos X característicos”. Este comportamiento evidenciaba que cada tipo de átomo respondía de manera particular a la irradiación, sugiriendo una relación directa entre la estructura interna del átomo y las propiedades de la radiación emitida. Posteriormente, en 1913, Henry Moseley profundizó estos resultados al medir con precisión las longitudes de onda de dichas radiaciones mediante la difracción de rayos X en cristales, encontrando una relación entre su frecuencia y la carga positiva del núcleo atómico. A partir de ello, estableció que el número atómico representaba una propiedad física fundamental del átomo -la carga nuclear- y no una simple posición en la tabla periódica, lo que permitió reorganizar los elementos según una magnitud intrínseca y no según el peso atómico, como se hacía hasta entonces (Asimov, 1985).

El aporte de Moseley permitió identificar con precisión los elementos y los que aún faltaban en la tabla periódica, evidenciando huecos asociados a números atómicos no descubiertos en su época (43, 61, 72, 75, 85, 87 y 91). Además, demostró que el orden correcto de los elementos depende del número atómico y no de la masa (Asimov, 1985).

El número atómico constituyó un avance fundamental para comprender la estructura y las propiedades nucleares, al proporcionar una base cuantitativa que vinculó la carga del núcleo con las propiedades químicas de los elementos. Este concepto permitió entender el núcleo como una entidad con carga discreta y definida, y no solo como una concentración de masa, abriendo el camino a modelos nucleares más precisos y a la identificación posteriormente de partículas fundamentales. Históricamente, el trabajo de Moseley unificó la estructura atómica, la química y los fenómenos de radiación, dejando una huella decisiva en la física, pese a que su muerte prematura le impidió recibir el reconocimiento que muchos consideran merecido (Corcho Orrit, 2012).

Figura 14. Representación Gráfica de la ley de Moseley



Nota. En la gráfica se observa la relación entre la frecuencia ν emitida por los elementos al ser irradiados, y su número atómico Z . Tomado de OpenAI. (2025). Diagrama de la ley de Moseley. Imagen generada por IA con ChatGPT.

El concepto de isótopos surgió a partir de los estudios de Rutherford y Soddy sobre la radiactividad, ya mencionados en el capítulo 2.4. Cuando demostraron que elementos como el uranio se transmutaban mediante cadenas de desintegración que culminaban en plomo estable. Al analizar los productos intermedios, observaron que algunos átomos presentaban idénticas propiedades químicas pero distintos comportamientos radiactivos, lo que evidenció la existencia de átomos químicamente iguales, pero físicamente diferentes. En 1913, Soddy formalizó esta idea al introducir el término *isótopos*, posteriormente reforzada por estudios que mostraron que incluso elementos estables podían existir en distintas formas, diferenciadas por su masa atómica, como los distintos isótopos de plomo (^{206}Pb , ^{207}Pb y ^{208}Pb) resultantes de las series del uranio, torio y actinio, estableciendo que la variación isotópica era un fenómeno general de la materia (Asimov, 1985).

En 1912 Thomson estaba realizando experimentos con gas neón en los que descubrió la existencia isotopos que no diferían de sus propiedades radiactivas sino de sus masas atómicas. Al hacer pasar electrones (rayos catódicos) a través de un gas neón, algunos átomos se ionizaban y, bajo la acción combinada de un campo eléctrico y magnético, sus trayectorias se curvaban de manera diferente según la masa de cada ion. El resultado en una placa fotográfica mostró dos zonas de oscurecimiento, lo que evidenciaba de alguna manera la presencia de dos tipos de neón: Thomson poco después demostraría que era dos tipos distintos de neón uno con masa atómica 20 y otro con masa 22. Y a partir de la intensidad del oscurecimiento, Thomson concluyó que el neón en estado natural estaba compuesto aproximadamente por un 90% de ^{20}Ne y un 10% de ^{22}Ne , lo cual explicaba su peso atómico promedio de 20.2. Esto llevó a la invención del espectrómetro de masas, un instrumento que se consolidaría años después gracias a Francis Aston (1877-1945), quien perfeccionó la técnica en 1919 y la utilizó para descubrir numerosos isótopos de diversos elementos.

El reconocimiento de los isótopos fue un avance crucial para la física nuclear, pues reveló que los núcleos atómicos podían tener composiciones diferentes sin alterar la identidad química del

elemento, avanzando aún más en la compresión nuclear y atómica de los elementos, cabe aclarar que por el momento no se conocía la partícula del neutrón, así que el por qué los átomos de igual número atómico diferían en masa atómica seguía siendo un misterio. Este descubrimiento permitió precisar las masas atómicas y redefinir los estándares de medida (como el uso del carbono-12 años después), sino que además fue esencial para el desarrollo de la energía nuclear, ya que al comprender la existencia de núcleos con distintas masas -como los del uranio ^{235}U y ^{238}U - posibilitaba posteriormente el estudio de las reacciones de fisión y la liberación controlada de energía atómica, marcando uno de los mayores avances en la comprensión de la estructura y el comportamiento del núcleo atómico durante esta década.

2.7 Reflexiones Finales Sobre el Establecimiento del Concepto de Núcleo Atómico

Aquí es importante mencionar los estudios realizados sobre la radiactividad, ya que a partir de ellos surgió la idea de llevar a cabo experimentos que consistían en hacer interactuar la radiación con la materia, con el fin de estudiar sus propiedades. Fue precisamente este enfoque el que condujo, gracias a la genialidad de Rutherford, al descubrimiento del núcleo atómico y al planteamiento de su modelo atómico, lo cual representó un paso fundamental en la comprensión de la estructura de la materia y del átomo.

Además, los estudios posteriores relacionados con el establecimiento del concepto de núcleo, como los realizados por Moseley -quien mostró la relación entre el número atómico y la carga neta del núcleo-, permitieron descubrir nuevas propiedades del núcleo atómico y, en consecuencia, profundizar en la comprensión de su estructura. Este avance resultó especialmente relevante, ya que evidenció que el núcleo y su carga neta eran los responsables de las propiedades químicas del átomo, estableciendo así una conexión directa entre la física atómica y la química. Sin duda, esto constituyó un avance trascendental en el desarrollo del atomismo moderno del siglo XX.

Por otro lado, en este punto de la historia resulta necesario hacer una aclaración relacionada con el surgimiento del concepto de núcleo atómico en la física. A partir de este momento, el átomo pasa a concebirse como una entidad compuesta por dos componentes fundamentales: los electrones y el núcleo atómico. Por lo que, el estudio de estos componentes comienza a desarrollarse de manera diferenciada, aun cuando ambos conforman conjuntamente la estructura del átomo.

Esto se evidencia, por ejemplo, tras la publicación del modelo atómico de Bohr, el cual se centra exclusivamente en el estudio de las capas electrónicas y en la forma en que estas deben organizarse, sin profundizar en absoluto en la estructura del núcleo. De este modo, los modelos atómicos de aquí en adelante, del atomismo moderno quedan restringidos, o bien se dedican principalmente, a describir y explicar el comportamiento de los electrones alrededor del núcleo.

Como consecuencia, el estudio del núcleo atómico comienza a separarse del atomismo moderno, dando lugar a una rama de investigación independiente -la física nuclear-, orientada exclusivamente al análisis de las propiedades y la estructura del núcleo, y no del átomo en su conjunto.

Por último, como se menciona en las consideraciones del capítulo anterior, resulta importante señalar que esta etapa de la historia de la física es fundamental para comprender cómo se consolida la idea de un átomo con un núcleo central. Sin embargo, este aspecto suele omitirse al momento de enseñar los modelos atómicos.

Y es que, en la práctica educativa, el modelo atómico que suele privilegiarse es un modelo híbrido, tal como lo señalan (Rosarúa y Gilbert, 2000), en el que se presenta una simplificación del átomo sin profundizar en su estructura ni en sus propiedades. De este modo, se deja de lado -como se mencionó en el planteamiento del problema- toda la repercusión histórica y conceptual asociada al proceso mediante el cual se construyeron los conceptos actuales sobre el átomo. Aunque estos conceptos suelen mencionarse en el aula, los estudiantes presentan un conocimiento limitado sobre ellos, principalmente debido a la ausencia de una adecuada contextualización histórica.

CAPITULO 3: EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE NÚCLEO ATOMICO

Este capítulo abordara un análisis de cómo fue la evolución del concepto del núcleo después de su establecimiento en 1911 hasta el año 1939, donde se tendrá en cuenta el análisis de ciertos experimentos, que fueron claves en su evolución ya que permitieron una comprensión de las propiedades y estructura del núcleo atómico.

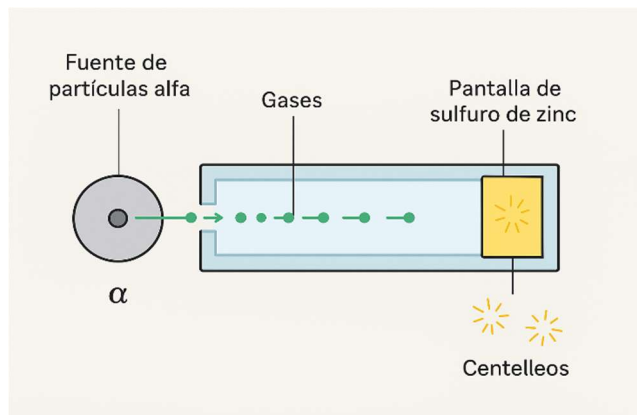
3.1 La Trasmutación Artificial, El Protón Y La Teoría protón-electrón

Durante la década de 1910, surgía una pregunta fundamental acerca de la estructura del núcleo: ¿estaba el núcleo compuesto por partículas, o se trataba simplemente de una masa unificada, como inicialmente había propuesto Rutherford?

La llegada de la Primera Guerra Mundial (1914-1918), generó una fuerte inestabilidad que afectó el desarrollo científico. Sin embargo, en 1915, poco antes de partir hacia Nueva Zelanda para participar en la gran guerra, Marsden llevó a cabo uno de sus últimos experimentos en el laboratorio de Manchester, bajo la dirección de Rutherford. Marsden bombardeó átomos de nitrógeno gaseoso con partículas alfa, observando la emisión de unas partículas desconocidas que no logró identificar en ese momento. Pensó inicialmente que se trataba de un nuevo tipo de radiación, distinta de las ya conocidas. Sin embargo, sus investigaciones se vieron interrumpidas por su incorporación al frente de guerra. A pesar de ello, Rutherford continuo la investigación ya que no se había conformado con la hipótesis preliminar de Marsden de un nuevo tipo de radiación, sino que mejoró el montaje experimental y volvió a realizar los experimentos obteniendo resultados muy impresionantes y que le permitieron identificar la verdadera naturaleza de estas partículas emitidas (Corcho Orrit, 2012).

Lo que realizó Rutherford fue bombardear distintos gases con partículas alfa y observó los resultados mediante una pantalla recubierta con sulfuro de zinc, la cual producía pequeños destellos luminosos o centelleos, cada vez que una partícula impactaba en ella, visualizar en la figura 15. Al analizar gases como el oxígeno y el dióxido de carbono, los resultados coincidieron con lo esperado, el número de centelleos disminuía a medida que las partículas alfa perdían energía al atravesar el gas. Sin embargo, al introducir aire seco en la cámara, Rutherford notó un incremento inesperado en el número de centelleos. Tras realizar un análisis más cuidadoso, determinó que este aumento se debía al nitrógeno presente en el aire, pues las colisiones de las partículas alfa con los núcleos de nitrógeno producían nuevas partículas más rápidas, que él identificó que eran núcleos de hidrógeno (Asimov, 1985).

Figura 15. Esquema del experimento de transmutación artificial de Rutherford



Nota. En el esquema se puede ver una simplificación del experimento, que fue clave para el descubrimiento de la primera transmutación artificial y posteriormente la identificación del protón. Tomado de OpenAI. (2025). Esquema experimento de Rutherford. Imagen generada por IA.

Rutherford pudo dar a conocer sus hallazgos después de la primera guerra mundial en 4 artículos titulados “*Collision of Particles with Light Atoms*” publicados en la revista *Philosophical Magazine Serie 6, Vol. 37*. Los resultados e interpretaciones del experimento anterior mencionado Rutherford lo comenta en el cuarto artículo titulado “*Collision of Particles with Light Atoms. IV. An Anomalous Effect in Nitrogen*” en la parte de *discussion of results* aquí menciona:

From the results so far obtained it is difficult to avoid the conclusion that the long-range atoms arising from collision of particles with nitrogen are not nitrogen atoms but probably atoms of hydrogen, or atoms of mass 2. If this be the case, we must conclude that the nitrogen atom is disintegrated under the intense forces developed in a close collision with a swift particle, and that the hydrogen atom which is liberated formed a constituent part of the nitrogen nucleus (Rutherford, 1919, pág. 586).

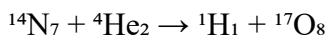
La traducción literal sería:

A partir de los resultados obtenidos hasta ahora, es difícil evitar la conclusión de que los átomos de largo alcance que surgen de la colisión de partículas con nitrógeno no son átomos de nitrógeno, sino probablemente átomos de hidrógeno, o átomos de masa 2. Si este es el caso, debemos concluir que el átomo de nitrógeno se desintegra bajo las intensas fuerzas desarrolladas en una colisión cercana con una partícula veloz, y que el átomo de hidrógeno que se libera formaba parte constitutiva del núcleo de nitrógeno (Rutherford, 1919, pág. 586).

Al analizar lo que menciona Rutherford, básicamente dice que de sus resultados obtenidos no es difícil concluir que, al bombardear los átomos de nitrógeno con las partículas alfa, la emisión

de núcleos más ligeros, que identificó como átomos de hidrógeno o de masa similar a dos⁶. Surge de la desintegración parcial del átomo de nitrógeno durante la colisión, liberando un núcleo de hidrogeno que formaba parte de su núcleo. Esta inferencia sin duda marca un antes y un después en la física nuclear, pues constituye la primera evidencia experimental de una transmutación artificial de un elemento en otro, lo que lleva sugerir que los núcleos atómicos también son divisibles y trasmutables, y que son compuestas de partículas aún más fundamentales.

El proceso nuclear que Rutherford evidencio –de la primera trasmutación artificial- se puede expresar de la siguiente manera:



De un átomo de nitrógeno al ser impactado por una partícula alfa trasmuta a un átomo de oxígeno y emite un protón a gran velocidad.

¿De dónde viene entonces el termino protón?: El termino protón no tiene un año en exacto donde se usa por primera vez para referirse a los núcleos de hidrogeno, algunos textos sugieren que Rutherford pudo haberlo usado por primera vez la palabra en 1914 para referirse exclusivamente al núcleo del átomo de hidrógeno, el cual consideró como la unidad fundamental de carga positiva en la materia. Ya que, tras varios años de investigaciones sobre la estructura del átomo, y luego de que fracasaran los intentos por encontrar una “partícula positiva” equivalente al electrón, Rutherford concluyó que el núcleo del hidrógeno -con una carga positiva igual en magnitud a la negativa del electrón, pero con una masa prácticamente 1837 veces mayor- debía asumirse como la partícula elemental responsable de la carga positiva en los demás núcleos. Por ello, Rutherford propuso denominarla protón que en griego significa *protos* de “primero”, aludiendo a que era el núcleo del primer elemento. Sin embargo, años posteriores se descubriría el positrón una partícula de igual carga y masa que el electrón (Heilbron, 2003).

Por otro lado, otros textos señalan que Rutherford empleaba la expresión núcleos de hidrógeno para referirse a lo que hoy conocemos como protones. A partir del experimento mencionado anteriormente, identificó por primera vez que los núcleos de hidrógeno formaban parte de todos los núcleos de los demás elementos. Fue así como, poco después de publicar sus resultados, en 1920 se establecería el término protón para designar la carga fundamental de los núcleos atómicos. Desde la década de 1920, este término comenzó a popularizarse, reemplazando gradualmente la denominación de núcleos de hidrógeno por protones (Heilbron, 2003).

La teoría protón-electrón: Durante la década de 1920 se popularizó la teoría protón-electrón como una de las primeras interpretaciones estructurales del núcleo atómico. Esta surgió tras el descubrimiento del protón y el reconocimiento de que los núcleos de los elementos eran más masivos que el del hidrógeno. Se asumía que los núcleos estaban formados por múltiples protones,

⁶ El elemento con masa similar a 2 es el deuterio un isotopo del hidrogeno con unidad de masa atómica igual a 2, que se diferencia del átomo de hidrogeno original por tener un neutrón.

de modo que la masa nuclear se explicaba por su cantidad, por ejemplo, el núcleo del helio -cuatro veces más pesado que el del hidrógeno- se imaginaba compuesto por cuatro protones mientras que el del oxígeno, con una masa 16 veces mayor, se consideraba formado por 16 protones. No obstante, esta idea presentaba un conflicto con las cargas observadas experimentalmente, lo que llevó a postular la existencia de “electrones nucleares” dentro del núcleo que neutralizaban parcialmente la carga positiva. Así, el núcleo de helio-4 se concebía como constituido por cuatro protones, cuya carga positiva se neutralizaba parcialmente mediante la presencia de dos electrones incluidos en el núcleo, lo que permitía explicar tanto su masa igual a 4 como su carga neta de +2 (Asimov, 1985).

La inclusión de estos electrones permitió explicar varios fenómenos conocidos en ese momento. En particular, ofrecía una interpretación de la existencia de isótopos, al atribuir las diferencias de masa a variaciones en el número de protones y electrones sin modificar la carga total del núcleo. Así, núcleos como el oxígeno-16, oxígeno-17 y oxígeno-18 conservarían el mismo número atómico pese a diferir en su composición interna. Además, la teoría parecía resolver el problema de la estabilidad nuclear, ya que los electrones nucleares, actuarían como un mecanismo que contrarrestaba la repulsión eléctrica entre protones, además, que también explicaba la emisión de partículas beta como electrones expulsados desde el núcleo (Asimov, 1985).

Gracias a estas explicaciones, la teoría protón-electrón se consolidó como un modelo coherente de la estructura nuclear durante la década de 1920. Sin embargo, con el avance de la física nuclear y el descubrimiento del neutrón, se evidenciaron sus limitaciones, los electrones no podían estar confinados en el núcleo según los principios de la mecánica cuántica, ni tampoco ayudaba a explicar correctamente las masas nucleares observadas (Asimov, 1985).

Y es que, la introducción del concepto de spin nuclear por Wolfgang Pauli (1900-1958) puso en evidencia serias inconsistencias en dicho modelo. El spin, entendido como una propiedad cuántica asociada al momento angular intrínseco de las partículas nucleares, resulta de la suma vectorial de los spines individuales (cada uno con valor $1/2$) y determina, el comportamiento magnético del núcleo. De acuerdo con la mecánica cuántica, un núcleo compuesto por un número par de protones y electrones debería presentar un spin total entero o nulo; no obstante, las mediciones experimentales del nitrógeno-14 arrojaron un valor de spin igual a 1, lo que implicaba un número par de partículas, en contradicción con la predicción del modelo protón-electrón, que postulaba 21 partículas. Esta discrepancia llevó a una crisis del modelo vigente y obligó a reconsiderar los supuestos fundamentales sobre la composición nuclear (Asimov, 1985).

A pesar de su refutación, esta teoría representó un esfuerzo clave por interpretar los datos experimentales disponibles y abrió el camino al modelo protón-neutrón, base de la comprensión moderna del núcleo atómico. Es importante mencionar que, la física nuclear en este punto comenzaba a avanzar de manera sin precedentes. El interés de los científicos por comprender con mayor profundidad las propiedades y la estructura del núcleo atómico condujo a la formulación de teorías, como la del protón-electrón que buscaban explicar los fenómenos y características propias

del núcleo. Aunque dichas teorías resultaron incorrectas, reflejaban el constante interés por construir modelos y explicaciones sobre la naturaleza del núcleo.

Sin duda, el descubrimiento del protón como partícula subatómica constituyente del núcleo representó un paso fundamental en la evolución del concepto del núcleo atómico. Y es que, este hallazgo permitió comprender que, así como el átomo está compuesto por elementos fundamentales -electrones y núcleo-, el propio núcleo posee a su vez una estructura interna formada por partículas aún más elementales, los protones, responsables de la carga positiva nuclear. Con ello, el núcleo atómico deja de concebirse como una entidad simple desde la formulación de Rutherford, y pasa a entenderse como un sistema con propiedades y estructura complejas. Por lo que, la teoría protón-electrón constituyó el primer intento por explicar su estructura y, en consecuencia, fenómenos como la existencia de isótopos y la radiactividad.

3.2 El Descubrimiento del Neutrón

En 1920, resurgió una idea previa propuesta por Rutherford, en su Bakerian Lecture que tiene como nombre "*Nuclear Constitution of Atoms*" que detalla el desarrollo de la teoría nuclear del átomo hasta el momento, además que habla y detalla el experimento del nitrógeno donde ocurre la transmutación artificial, también habla de la composición de los núcleos donde menciona que estos se constituyen de núcleos de hidrogeno y electrones, pero además hace una importante predicción y es que menciona que puede existir una partícula con masa 1 y que no tenga carga, esto lo menciona en la sección "*Constitution of Nuclei and Isotopes*":

Under some conditions, however, it may be possible for an electron to combine much more closely with the H nucleus, forming a kind of neutral doublet. Such an atom would have very novel properties. Its external field would be practically zero, except very close to the nucleus, and in consequence it should be able to move freely through matter. Its presence would probably be difficult to detect by the spectroscope, and it may be impossible to contain it in a sealed vessel. On the other hand, it should enter readily the structure of atoms and may either unite with the nucleus or be disintegrated by its intense field, resulting possibly in the escape of a charged H atom or an electron or both (Rutherford, 1920, pág. 396).

La traducción literal sería:

Bajo algunas condiciones, sin embargo, puede ser posible que un electrón se combine mucho más estrechamente con el núcleo de H, formando una especie de doblete neutro. Tal átomo tendría propiedades muy novedosas. Su campo externo sería prácticamente cero, excepto muy cerca del núcleo, y en consecuencia debería ser capaz de moverse libremente a través de la materia. Su presencia probablemente sería difícil de detectar mediante el espectroscopio, y puede ser imposible contenerlo en un recipiente sellado. Por otro lado, debería incorporarse fácilmente a la estructura de los átomos, y puede ya sea unirse con el núcleo o ser desintegrado por su intenso campo, dando posiblemente como resultado la liberación de un átomo de H cargado, o de un electrón, o de ambos (Rutherford, 1920, pág. 396).

En este pasaje, Rutherford propone la posibilidad de que un electrón se combine con un núcleo de hidrógeno formando lo que él llama un “doblete neutro”. Aquí describe un sistema sin carga eléctrica, cuya masa sería prácticamente la misma que la del hidrógeno, y cuyo campo eléctrico externo sería casi nulo. Y estas características le permitirían -según él- poder atravesar la materia sin interactuar fácilmente, lo que explicaría por qué sería difícil detectarlo mediante o contenerlo en un recipiente. Lo que parece sorprendente, es que esta descripción anticipa las propiedades esenciales del neutrón, descubierto años después en 1932. Aunque aquí Rutherford aún pensaba que se trataba de la unión entre un protón y un electrón, es claro que su razonamiento refleja un cambio profundo en la comprensión del núcleo, porque está anticipando la existencia de partículas neutras dentro de los átomos, capaces de penetrar la materia y participar en la estructura y estabilidad nuclear.

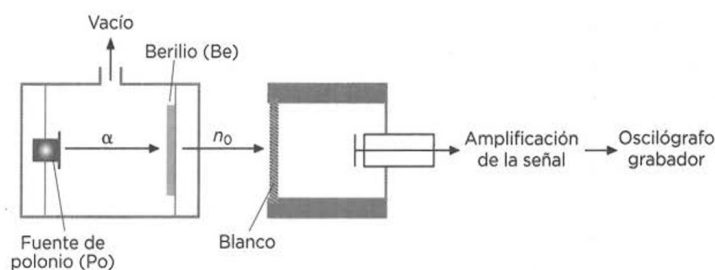
La hipótesis de una partícula neutra en el núcleo, planteada por Rutherford, se mantuvo sin confirmación experimental durante varios años. James Chadwick (1891-1974), conservó interés por aquella hipótesis, por lo que estuvo investigándola y, aunque los intentos por detectarla directamente en el Laboratorio Cavendish no tuvieron éxito, se observaron anomalías en las masas y energías de algunos núcleos, como el del aluminio. Estas irregularidades sugirieron la existencia de una partícula adicional y pusieron en evidencia las limitaciones de un modelo nuclear basado solo en protones y electrones (Corcho Orrit, El núcleo atómico: Rutherford los átomos también tienen corazón, 2012)

Más adelante en 1928, los alemanes Walther Bothe (1891-1954) y Herbert Becker (1890-1941) observaron que al bombardear berilio con partículas alfa se producía una radiación extremadamente penetrante, la cual interpretaron como un tipo extraño de rayos gamma. Este resultado, presentado por Bothe en 1931, llamó la atención de Frédéric Joliot (1900-1958) e Irène Curie (1897-1956), quienes, con grandes cantidades de polonio y experiencia heredada de Marie Curie, replicaron los experimentos. Descubriendo que dicha radiación -Que se denominó “radiación de berilio”- podía expulsar protones de la parafina a gran velocidad, ellos propusieron la misma hipótesis que Brothe, que se tratase de un tipo de radiación gamma, pero sin comprender profundamente cómo una radiación electromagnética podría producir ese efecto sin violar las leyes de conservación de energía y momento. Este resultado puso en cuestión las explicaciones antes mencionadas, especialmente de Chadwick, quien retomó la idea del neutrón de Rutherford con renovada determinación (Corcho Orrit, 2012).

A inicios del año 1932, Chadwick se lanzó a investigar la misteriosa radiación con una gran dedicación, trabajando día y noche durante semanas. Sus experimentos con diferentes elementos (desde litio hasta nitrógeno) mostraron que los efectos observados solo podían explicarse si la radiación consistía en partículas de cargas neutras con masa similar al protón. Chadwick publicó en 1932 su interpretación de estos experimentos en el artículo “*Possible Existence of a Neutron*”, donde presentó evidencia experimental que lo llevó a proponer la existencia de esta partícula nuclear (Corcho Orrit, 2012).

En este trabajo, Chadwick analizó la radiación emitida por el berilio al ser bombardeado con partículas alfa. A través de un contador de válvulas y una cámara de expansión, Chadwick detectó que dicha radiación expulsaba protones y núcleos de otros elementos con energías demasiado altas para ser explicadas mediante un proceso tipo Compton con rayos gamma. Concluyó que la radiación no podía ser un fenómeno puramente electromagnético y propuso que consistía en partículas con masa similar a la del protón, pero sin carga eléctrica, que recibió el nombre de neutrón. Él lo dice explícitamente en su artículo de esta manera: *“The difficulties disappear, however, if it be assumed that the radiation consists of particles of mass 1 and charge 0, or neutrons”*. Su traducción literal sería: *“Las dificultades desaparecen, sin embargo, si se supone que la radiación consiste en partículas de masa 1 y carga 0, o neutrones”* (Chadwick, 1932, pág. 312). En otras palabras, los resultados experimentales no conducían a ninguna otra conclusión: para poder explicar ese tipo de radiación era necesario asumir la existencia de partículas con una masa similar a la del hidrógeno, pero con carga neutra.

Figura 16. Representación del experimento de Chadwick que condujo al descubrimiento del neutrón



Nota. Esta representación muestra el experimento de Chadwick, donde bombardeó berilio con partículas alfa y observó que la radiación emitida expulsaba protones al incidir sobre parafina (Blanco), lo que le permitió inferir la existencia del neutrón. Tomado de *El núcleo atómico: Rutherford los átomos también tienen corazón* (Corcho Orrit, 2012, pág.126).

El descubrimiento del neutrón es de los avances más importantes en la física nuclear y en la comprensión de la estructura nuclear, el por qué tardó más de una década en ser descubierto desde su teorización por Rutherford, puede deberse a que los físicos se centraron a nivel teórico en avanzar respecto a la mecánica cuántica y a nivel experimental se centraron en desarrollar aceleradores de partículas dificultando su descubrimiento. Gracias a la neutralidad del neutrón, los científicos comprendieron que esta partícula podía penetrar fácilmente los núcleos, abriendo así una puerta al estudio profundo de las reacciones nucleares y, posteriormente, a la fisión nuclear. De una predicción teórica en 1920 a una confirmación experimental en 1932, el neutrón simbolizó la transición hacia una nueva era en la física moderna y un avance sin precedentes en la historia de la física nuclear. Donde sus aplicaciones a nivel industrial marcarían una etapa e importante en el avance tecnológico en la humanidad, el uso de la energía del núcleo para fines humanos.

Lo que resulta claro es que el descubrimiento del neutrón marca también una nueva etapa en la concepción del átomo. A partir de este momento, el átomo pasa a entenderse como un sistema

compuesto por tres partículas fundamentales, el protón y el neutrón, que constituyen el núcleo, y el electrón, que se dispone en torno a él. Esta visión contrasta de manera significativa con las concepciones clásicas, pues los pensadores griegos jamás imaginaron que la materia estuviera formada no por una sola entidad, sino por tres elementos diferenciados, organizados de tal manera que dan forma a la realidad observable. En consecuencia, esta nueva concepción confiere al átomo un mayor grado de complejidad, haciendo que la estructura y las propiedades del núcleo -ahora entendido como un sistema compuesto por dos partículas- se conviertan en un objeto de estudio fundamental dentro de la física moderna.

3.3 La Teoría Protón-Neutrón y la Interacción Nuclear

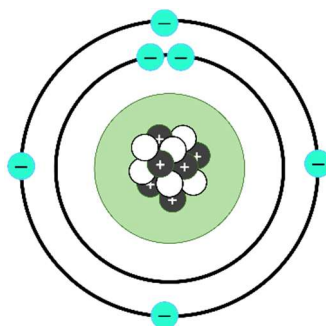
Tras el descubrimiento del neutrón, la teoría protón-electrón fue abandonada y dio paso al modelo protón-neutrón del núcleo atómico, el cual ofrecía una explicación más coherente de la estructura nuclear y del fenómeno de los isótopos. Werner Karl Heisenberg (1901-1976) propuso que el núcleo está compuesto exclusivamente por protones y neutrones, ligados entre sí mediante interacciones nucleares fuertes, descartando así la presencia de electrones en su interior. Este modelo permitió explicar de manera sencilla que el número de protones determina el número atómico y la identidad del elemento, mientras que las variaciones en el número de neutrones explican las diferencias de masa entre isótopos, como ocurre en el caso del oxígeno-16, oxígeno-17 y oxígeno-18, que comparten ocho protones, pero difieren en su número de neutrones (Asimov, 1985).

Este modelo también permitió explicar con mayor claridad la estabilidad nuclear y los procesos de desintegración radiactiva. En particular, mostró que los neutrones actúan como un “pegamento nuclear” al reducir la repulsión electrostática entre protones, lo que explica por qué los núcleos ligeros presentan números similares de protones y neutrones, mientras que los núcleos más pesados requieren un exceso de neutrones para mantenerse estables, aun así, cuando el tamaño del núcleo es demasiado grande, la inestabilidad da lugar a la radiactividad. Asimismo, esta teoría reinterpretó la emisión alfa como la expulsión de un núcleo de helio formado por dos protones y dos neutrones, y la radiación beta como la transformación de un neutrón en un protón con emisión simultánea de un electrón, integrando así las observaciones experimentales en una descripción más simple y físicamente consistente del núcleo atómico (Asimov, 1985).

El modelo protón-neutrón del núcleo atómico representó a nivel teórico, un cambio importante en la comprensión de la estructura nuclear a comienzos de la década de 1930 y desplazó definitivamente a la teoría protón-electrón que ya no podía explicar ciertos fenómenos como el espín nuclear ni las propiedades de la radiación beta. Esta nueva concepción permitió unificar los conocimientos hasta el momento sobre isótopos, estabilidad nuclear y radiactividad bajo una sola estructura conceptual, marcando un punto de inflexión en la historia de la física nuclear. A partir de ahora cambiaría totalmente la forma en cómo se entendía la materia, surgiría el modelo atómico que aún hoy en día se sigue enseñando en las escuelas, donde se toma al núcleo con partículas de protones y neutrones, mientras a su alrededor conviven los electrones.

En definitiva, fueron alrededor de 21 años, desde la primera propuesta de Rutherford al sugerir que los átomos tienen un núcleo en su interior hasta 1932 donde Chadwick propone que debe existir una partícula neutra en su interior, este periodo es un cambio radical en la concepción de la materia y en la comprensión del núcleo atómico. A partir de entonces, los átomos dejaron de concebirse como simples partículas esféricas con carga eléctrica para entenderse como sistemas compuestos por distintas partículas (protones, neutrones y electrones) cuyas interacciones explican la estructura de la materia y los fenómenos que de ella se derivan.

Figura 17. Representación del átomo de carbono con el modelo nuclear protón-neutrón



Nota. En la figura se presenta una representación del átomo de carbono, en la que se distinguen los protones y neutrones que conforman el núcleo, así como sus seis electrones distribuidos alrededor de este. Este tipo de modelos simplificados continúa utilizándose en la actualidad en las instituciones. SrKellyOP. (2021,). The Bohr model of a Carbon atom [Imagen]. Wikimedia Commons.

Interacción nuclear: En el proceso de comprensión de la estructura nuclear persistían importantes interrogantes, en particular sobre la Radiación beta, cuyos resultados energéticos no concordaban con los cálculos teóricos. Antes del descubrimiento del neutrón, estos fenómenos se interpretaban mediante el modelo protón-electrón; sin embargo, la observación de un espectro continuo en la energía de los electrones emitidos puso en cuestión el principio de conservación de la energía. En este contexto, Wolfgang Pauli (1900-1958) propuso en 1930 la existencia de una partícula neutra, ligera e indetectable que transportara la energía faltante. Enrico Fermi (1901-1954) retomó y formalizó esta hipótesis en 1933 al desarrollar una teoría de la desintegración beta, describiéndola como la transformación de un neutrón en un protón con la emisión de un electrón y un antineutrino, introduciendo así la idea de creación y destrucción de partículas en las interacciones y sentando las bases de la física de partículas y del concepto de interacción nuclear débil (Asimov, 1985).

En este contexto surgió la pregunta de cómo podían mantenerse unidos los protones en el núcleo una vez descartada la presencia de electrones, considerados hasta entonces el “pegamento” que neutralizaba la repulsión eléctrica, lo que condujo a la formulación del concepto de una fuerza nuclear fuerte como una interacción del núcleo. Los trabajos de Fermi sobre la radiación beta y el neutrino influyeron decisivamente en el físico japonés Hideki Yukawa (1907-1981), quien en 1935 publicó el artículo *On the Interaction of Elementary Particles*, en el que propuso que la atracción

entre protones y neutrones se debía a esta fuerza nuclear fuerte, transmitida por el intercambio de una nueva partícula mediadora, de forma análoga al papel del fotón en la interacción electromagnética. Yukawa dedujo además que dicha partícula debía tener un alcance muy corto y una masa distinta de cero, estimada en unas 200 veces la masa del electrón. Estas partículas, denominadas mesones -en particular el mesón pi o pion-, serían confirmadas posteriormente mediante experimentos con rayos cósmicos realizados por Carl David Anderson (1905-1991) y Cecil Frankl Powell (1903-1969), siendo las bases del concepto de partículas subatómicas y mediadoras de interacción, que hoy sustentan el Modelo Estándar (Asimov, 1985).

El reconocimiento de que en el núcleo atómico actuaban otras interacciones distintas de las fuerzas ya conocidas hasta entonces -la gravitacional y la electromagnética-, mostraba lo limitado que aún era el entendimiento sobre la realidad física. Los trabajos de Fermi y Yukawa representaron un avance fundamental en esta dirección, al mostrar que la materia no podía comprenderse sin considerar la existencia de partículas mediadoras en las interacciones. Inicialmente estas propuestas surgieron para dar explicación a ciertas “anomalías” observadas en los fenómenos nucleares, evitando la violación de leyes físicas fundamentales y que permitieron comprender con mayor profundidad la estructura y las propiedades de la materia en especial del núcleo atómico.

Así, el núcleo se consolida como un objeto central de estudio en la física, y su comprensión teórica se volvió fundamental para explicar numerosos fenómenos naturales y las propiedades de la materia. A su vez, la investigación de su estructura interna impulsó el desarrollo de modelos teóricos y la postulación de nuevas partículas, lo que permitió explicar con mayor precisión las características nucleares y dio origen a ramas como la física nuclear moderna y la física de partículas, ampliando de manera profunda la concepción científica sobre las propiedades de la materia.

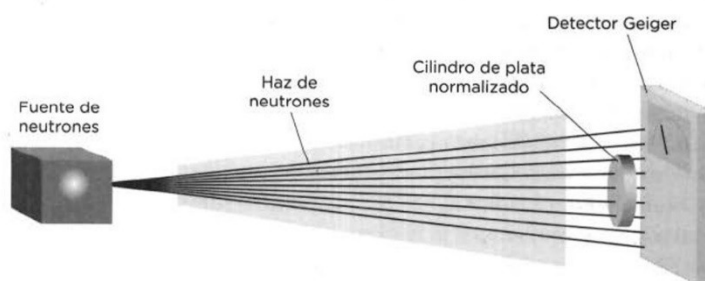
3.4 Fisión Nuclear

Hacia 1934, la investigación sobre la radiactividad artificial avanzó significativamente con los trabajos de Irène Curie y Frédéric Joliot, quienes lograron producir los primeros isótopos radiactivos mediante la irradiación de elementos ligeros con partículas alfa, demostrando que la materia podía transformarse deliberadamente y extendiendo los hallazgos de Pierre y Marie Curie sobre la radiactividad natural. Sin embargo, la limitada capacidad de las partículas alfa para penetrar núcleos pesados impulsó a Enrico Fermi y su grupo en Roma, conocidos como los *chicos de la Via Panisperna*, a explorar el uso de neutrones como proyectiles, ya que al carecer de carga podían atravesar las barreras coulombianas sin ser repelidos, observar la figura 18. Siguiendo este enfoque, Fermi y su equipo realizaron bombardeos sistemáticos a lo largo de la tabla periódica, construyendo el mismo sus propios instrumentos y usando técnicas propias, abrió el camino hacia un estudio más eficiente de las interacciones nucleares y, eventualmente al descubrimiento de la fisión nuclear (Hernández , 2012).

El trabajo de Fermi y su grupo, *los chicos de la Via Panisperna*, ejemplifica la importancia del

trabajo en equipo y la creatividad en la producción científica, ya que con recursos limitados lograron identificar más de cuarenta nuevos isótopos radiactivos e incluso pensaron haber creado elementos transuránicos⁷. En el otoño de 1934, Fermi y sus colaboradores descubrieron que la velocidad de los neutrones influía directamente en la eficacia de las reacciones nucleares, al observar que la radiactividad inducida variaba según el material de las mesas de laboratorio, introdujeron bloques de parafina -o también agua- entre la fuente de neutrones y los cilindros de plata, notando un aumento significativo de la radiactividad. Este efecto se debía a que los neutrones al chocar con núcleos ligeros, especialmente protones en la parafina perdían energía hasta alcanzar velocidades térmicas, convirtiéndose en neutrones⁸ más lentos y eficientes para penetrar núcleos y generar isótopos radiactivos, incrementando así la probabilidad de interacción nuclear (Hernández , 2012).

Figura 18. Esquema del bombardeo de neutrones de fermi



Nota. En el siguiente esquema se ve como fue el procedimiento de bombardeo de neutrones que uso Fermi en sus experimentos. Tomado de La Energía Nuclear: Fermi la Fisión Hace la Fuerza (Hernández , 2012, p.80).

Hacia 1934, Fermi bombardeó uranio con neutrones con la intención de producir elementos transuránicos, observando radiación beta, le pareció confirmar este hallazgo, sin embargo, la emisión de partículas beta con distintas energías generó confusión e impidió identificar con certeza los nuevos elementos. De manera paralela, Otto Hahn (1879-1968), Lise Meitner (1878-1968) y más tarde Fritz Strassmann (1902-1980) realizaron investigaciones similares, desarrollando métodos ingeniosos como el uso de “*portadores*” para facilitar la precipitación y aislamiento de los productos radiactivos. El procedimiento era muy engorroso y combinaba técnicas físicas y químicas: primero se irradiaba el uranio con neutrones, luego se disolvía la muestra y se aplicaban

⁷ Los elementos transuránicos son elementos situados más allá del uranio en la tabla periódica. Debido a su inestabilidad nuclear, todos son radiactivos y tienen una vida media que tiende a ser muy corta, lo que explica su ausencia en la naturaleza y su creación a través de la intervención humana.

⁸ Los neutrones lentos se denominan *neutrones térmicos*, y son partículas que han perdido gran parte de su energía cinética tras colisionar con un moderador (como agua o parafina). Al moverse a velocidades bajas, tienen una mayor probabilidad de ser capturados por núcleos atómicos pesados, lo que los hace fundamentales para mantener las reacciones de fisión nuclear controladas.

separaciones químicas para aislar los elementos obtenidos; finalmente, se medía su radiactividad y se analizaban sus propiedades químicas, comparándolas con elementos conocidos y observando las desintegraciones beta, lo que permitía interpretar si se trataba de un nuevo elemento transuránico (Hernández , 2012).

Aunque Hahn, Meitner y Strassmann estaban convencidos de haber hallado elementos transuránicos, empleando el renio como portador y obteniendo resultados aparentemente coherentes, comenzaron a aparecer productos inesperados que no encajaban en los modelos teóricos existentes. Meitner desempeñó un papel clave tratando de dar coherencia teórica a los datos, cuestionando cómo el número atómico podía aumentar sin que la masa lo hiciera, anticipando así la explicación que más tarde surgiría con la fisión nuclear. En 1936, Bohr propuso el modelo de la gota líquida del núcleo, reemplazando la visión de un núcleo rígido y estático, mientras que en 1938 Irène Curie y Pavel Savitch detectaron una radiación de semivida de 3,5 horas al bombardear uranio con neutrones lentos, inicialmente atribuida a un isótopo del torio, los experimentos posteriores de Hahn y Strassmann revelaron la presencia de bario, evidenciando ruptura del núcleo de uranio en fragmentos más ligeros, fenómeno que por entonces permanecía inexplicado (Hernández , 2012).

Los resultados de Hahn Y Strassmann fueron enviados a Meitner, que finalmente sería ella junto con su sobrino Otto Frisch (1904-1979), quien proporcionaría la interpretación teórica que dio sentido a este fenómeno (Hernández , 2012). Basándose en el modelo de la gota líquida de Bohr, propusieron que la absorción de un neutrón podía deformar el núcleo de uranio hasta dividirlo en dos partes, liberando una enorme cantidad de energía. Ellos publicaron un artículo titulado “*Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction*” en la revista *Nature*, donde introducen el concepto de fisión nuclear para explicar estos resultados anómalos obtenidos al bombardear uranio con neutrones. Ellos mencionan que la inestabilidad del núcleo de uranio, causada por la repulsión de su gran carga, hacía que, tras capturar un neutrón, se dividiera en dos núcleos de tamaño similar, liberando una enorme cantidad de energía cinética (Aproximadamente 200 MeV). Además, aclaran que este proceso, no requería efectos cuánticos, sino que podía describirse de manera clásica y explicaba la formación de bario y predecía la formación de otro elemento ligero como el criptón (Meitner & Frisch, 1939).

Ellos mencionan en su artículo lo siguiente:

On account of their close packing and strong energy exchange, the particles in a heavy nucleus would be expected to move in a collective way which has some resemblance to the movement of a liquid drop. If the movement is made sufficiently violent by adding energy, such a drop may divide itself into two smaller drops (Meitner & Frisch, 1939, pág. 239).

La traducción literal sería:

Debido a su empaquetamiento estrecho y al fuerte intercambio de energía, cabría esperar que las partículas en un núcleo pesado se movieran de manera colectiva, lo cual guarda cierta semejanza con el movimiento de una gota líquida. Si este movimiento se vuelve lo

suficientemente violento al añadir energía, dicha gota puede dividirse en dos gotas más pequeñas (Meitner & Frisch, 1939, pág. 239).

En este fragmento, los autores proponen una explicación desde la perspectiva del modelo de la gota líquida, entendido como una forma clásica de interpretar por qué los núcleos atómicos de gran tamaño pueden fragmentarse. Desde esta perspectiva, el núcleo se concibe como una masa de materia similar a una gota de líquido, capaz de deformarse y, al recibir suficiente energía o una perturbación externa, esta pueda dividirse en dos núcleos más pequeños.

El trabajo de Meitner y sus colaboradores representa uno hito en la historia de la física del siglo XX. Y es que, a partir de su interpretación de los resultados experimentales de Hahn y Strassmann, Meitner logró dar sentido a un fenómeno que desafiaba completamente las concepciones establecidas sobre la estabilidad nuclear hasta el momento. Este avance permitía comprender que los núcleos pesados podían dividirse en fragmentos más pequeños liberando enormes cantidades de energía. Este razonamiento amplió la comprensión teórica del núcleo atómico y de la materia misma. Porque hasta entonces, el núcleo se entendía como una entidad casi indivisible y estable, en la que las transformaciones eran graduales y pequeñas, como las desintegraciones alfa o beta, la idea de que un núcleo pudiera dividirse en dos partes semejantes mostraba que el núcleo no era una entidad con una estructura rígida, sino que era capaz de transformarse de manera abrupta y liberar grandes cantidades de energía. Esto permitió reinterpretar la estabilidad nuclear, la energía de enlace y la relación entre masa y energía, consolidando las bases de la física nuclear moderna. Además, los avances teóricos que surgieron de la fisión se tradujeron en profundas implicaciones tecnológicas y sociales. La posibilidad de usar la liberación de energía nuclear abrió las puertas a la industrialización tanto a la generación de energía eléctrica en los reactores nucleares como a la producción de armas nucleares o atómicas.

3.5 Modelo de la Gota Líquida

Posteriormente al artículo publicado por Meitner y Frisch, ellos enviaron sus resultados a Bohr. Por lo que unos meses después, Bohr junto con John Wheeler (1911-2008), publicó en el mismo año el artículo titulado "*The Mechanism of Nuclear Fission*". En este trabajo, desarrollaron de manera más detallada el proceso teórico mediante el cual ocurre la fisión nuclear, profundizando además en el análisis de la estabilidad del núcleo y la liberación de energía en el proceso.

En la sección del artículo titulada "*nuclear stability with respect to deformations*", los autores desarrollan un modelo físico del núcleo atómico inspirado en el modelo de una gota líquida cargada eléctricamente, ya propuesto con anterioridad por George Gamow (1904-1968) en 1930 para explicar la estabilidad nuclear. Según este modelo, el núcleo está compuesto por una sustancia fluida e incomprensible -la materia nuclear- cuyos nucleones (protones y neutrones) se mantienen unidos por fuerzas de atracción de corto alcance, equivalentes a la tensión superficial en una gota común. Al mismo tiempo, la carga eléctrica de los protones genera fuerzas de repulsión electrostática que actúan tratando de deformar o incluso dividir la gota. De esta competencia entre

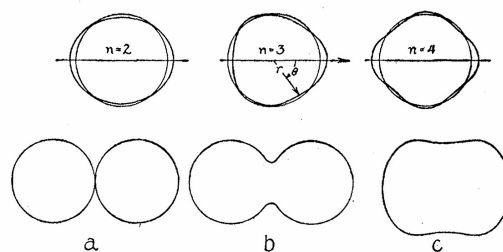
atracción y repulsión surge la estabilidad o inestabilidad del núcleo (Bohr & Wheeler, 1939).

Bohr y Wheeler plantean que, en equilibrio el núcleo tiende naturalmente a adoptar una forma esférica, pues esta minimiza su energía total (Así como en una gota de agua), la tensión superficial mantiene la cohesión y la simetría. Sin embargo, si se produce una deformación, el balance energético puede cambiar. Para pequeñas deformaciones, el núcleo puede comportarse como una gota que vibra alrededor de su forma original, recuperando el equilibrio por efecto de la tensión superficial. Pero cuando la repulsión eléctrica asociada a la carga de los protones es suficientemente intensa, esta puede contrarrestar y finalmente superar la fuerza estabilizadora de la tensión superficial y hacer que el núcleo se divida (Bohr & Wheeler, 1939).

Bohr y Wheeler analizaron la estabilidad nuclear mediante el modelo de la gota líquida, mostrando que esta depende críticamente del cociente Z^2/A , que relaciona el número de protones con el total de nucleones. Cuando este valor alcanza un límite determinado por el equilibrio entre la energía superficial y la energía electrostática, el núcleo se vuelve inestable frente a pequeñas deformaciones. En el caso de núcleos pesados como el uranio y el torio, dicho cociente se encuentra muy próximo a ese valor crítico, lo que explica su propensión a la fisión, ya que la captura de un neutrón puede aportar la energía necesaria para superar la barrera de estabilidad o energía crítica de fisión y provocar la división del núcleo. Los cálculos realizados por Bohr y Wheeler, basados en valores empíricos, mostraron que estos elementos se sitúan en el umbral de la inestabilidad nuclear (Bohr & Wheeler, 1939).

Básicamente hallaron que el valor crítico de este cociente es $(Z^2/A)_{lim} = 47.8$, correspondiente a una energía crítica de fisión de aproximadamente 6 MeV para el uranio-235. Este resultado muestra la cuantificación de la frontera entre la estabilidad y la fisión nuclear, donde los núcleos más pesados se encuentran tan cerca de esta barrera que una mínima perturbación -como la captura de un neutrón- puede aportar la energía necesaria para superar la barrera de estabilidad y producir la división del núcleo, en el artículo lo menciona, como superar una barrera de potencial limite, que es un punto silla, al superar este punto silla ocurre la fisión (Bohr & Wheeler, 1939).

Figura 19. *Deformaciones Nucleares y el Proceso de Fisión según el Modelo de la Gota Líquida*



Nota. La figura muestra los modos de oscilación y deformación del núcleo según el modelo de la gota líquida. Tomado de *The Mechanism of Nuclear Fission* (Bohr & Wheeler, 1939, p.430).

Así pues, el modelo de gota líquida logra dar cuenta de la estabilidad de la mayoría de los núcleos

y, al mismo tiempo, de la inestabilidad de los núcleos más pesados, integrando en una sola estructura teórica las observaciones empíricas del momento. Su importancia radica en haber proporcionado una explicación física de otras propiedades como la energía de ligadura, las vibraciones nucleares y la fisión, a partir de principios macroscópicos. Además, sus implicaciones trascendieron el ámbito teórico pues sentó las bases para comprender la liberación controlada de energía nuclear, marcando un punto de partida tanto para el desarrollo de la energía atómica como para la reflexión sobre sus consecuencias científicas y tecnológicas.

Este modelo resulta fundamental para la comprensión de la estructura del núcleo, ya que pone en evidencia que este no es una esfera rígida, como se pensaba en años anteriores, sino una entidad dinámica capaz de estirarse y deformarse hasta el punto de dividirse. Esto revela el alto grado de complejidad del núcleo atómico. Para este momento histórico, la física nuclear ya se encontraba prácticamente consolidada, y el atomismo moderno cobraba fuerza como marco explicativo de la composición de la materia. Sin embargo, el átomo dejó de concebirse como una partícula simple y con pocas propiedades, para entenderse, tras varios siglos de desarrollo teórico y experimental, como una entidad altamente compleja, constituida por partículas aún más elementales, cada una con propiedades físicas específicas y una estructura cada vez más sofisticada. Por lo que, el núcleo -donde se concentra la mayor parte de la masa del átomo- y los electrones, nos ayudarían a dar explicaciones a variedad de fenómenos, pero siendo aun entidades que no se comprende en su totalidad.

3.6 Reflexiones Sobre la Evolución del Concepto de Núcleo Atómico

La evolución del concepto de núcleo hasta llegar a la concepción que tenemos hoy en día fue un proceso en el que, al igual que ocurrió con su establecimiento inicial, los experimentos desempeñaron un papel esencial. Estos permitieron a los científicos formular explicaciones lo más coherentes posibles y acordes con las observaciones experimentales, lo que condujo a la evolución de los modelos y a la transformación del núcleo en una entidad cada vez más sofisticada y, por ende, del átomo en su conjunto.

Por ejemplo, en los experimentos relacionados con el descubrimiento del protón y del neutrón -mencionados respectivamente en las secciones 3.1 y 3.2, surgieron en ambos casos anomalías asociadas a un tipo de radiación desconocida. Recordando que estos experimentos contaban siempre con una fuente de radiación, un objeto -o gas- intermedio que era bombardeado por dicha radiación y un objeto que cumplía la función de detector.

En estos detectores se identificaba un tipo de radiación que no era conocida hasta el momento. Al analizar esta radiación, junto con lo que ocurría en los objetos intermedios, se pudieron extraer conclusiones relevantes. En el caso del protón, se observó que en el objeto detector aparecían núcleos de hidrógeno, mientras que, al analizar el objeto intermedio -que era gas de nitrógeno-, se evidenció una transmutación de nitrógeno a oxígeno. La cuestión central radicaba en cómo interpretar estos resultados.

El mérito en el caso del protón se lo llevó Rutherford, quien logró analizar los resultados experimentales y formular una hipótesis. Esto implicó una modificación en la concepción del núcleo, en particular la idea de que todos los núcleos consistían en núcleos de hidrógeno o protones, y que el núcleo podía ser modificado mediante la intervención humana. Esta idea resultó revolucionaria, ya que transformó por completo la manera en que se comprendía el núcleo atómico.

De este modo, los tres experimentos mencionados -relacionados, respectivamente, con el descubrimiento del protón, del neutrón y de la fisión nuclear- fueron clave para la evolución del concepto de núcleo, que pasó de concebirse prácticamente como una esfera rígida a entenderse como una especie de gota nuclear, conformada por partículas positivas (protones) y neutras (neutrones). Estas partículas podían modificarse espontáneamente mediante la emisión de radiación beta, asimismo, los núcleos podían transformarse emitiendo radiación alfa o incluso dividirse, dando lugar a dos núcleos con propiedades químicas distintas. De esta manera, el núcleo pasó a concebirse como una entidad susceptible a cambios tanto internos como externos, transformando profundamente la visión del átomo.

En términos educativos, los aspectos abordados en este capítulo suelen quedar relegados o directamente omitidos en la enseñanza del átomo. Si bien en el aula aparece el modelo -protón-neutrón-, la representación que la mayoría de los estudiantes asocian con el núcleo atómico, esta presencia se limita, en general, a un tratamiento superficial y meramente descriptivo. Tal como se expone en la problemática, no se profundiza en las propiedades del núcleo ni en su papel dentro de la estructura atómica, y mucho menos en su recorrido histórico y conceptual.

A pesar de que en la enseñanza habitual se recurre -como se señala en las reflexiones del capítulo anterior- a un modelo híbrido que combina elementos de distintos modelos atómicos, este enfoque termina desdibujando el significado físico del núcleo. La ausencia de una reconstrucción histórica y conceptual impide comprender que el núcleo no es una entidad estática, sino el resultado de un proceso científico complejo, marcado por la intervención y debates de muchos científicos. De este modo, el núcleo queda reducido a una representación esquemática, desconectada de sus propiedades físicas y de su relevancia en la comprensión del átomo moderno.

Si bien los estándares básicos de competencias no mencionan de manera explícita el núcleo atómico, este se encuentra implícito en el único estándar que hace referencia directa al átomo: “Explicar la estructura de los átomos a partir de diferentes teorías”. Sin embargo, la forma en que dicho estándar suele abordarse en la práctica escolar tiende a privilegiar la enumeración de modelos, en lugar de promover una comprensión profunda de los conceptos que los sustentan. Considerando que el núcleo atómico constituye un componente fundamental de la estructura del átomo, resulta problemático que no se fomente el estudio de sus propiedades, su estructura y su contextualización histórica.

En este orden de ideas, omitir el análisis del núcleo limita la posibilidad de que los estudiantes construyan explicaciones sólidas sobre el átomo moderno y refuerza una enseñanza fragmentada, centrada en imágenes y esquemas, más que en la comprensión conceptual. Recuperar el estudio

del núcleo desde una perspectiva histórica y reflexiva permitiría enriquecer la enseñanza de la estructura atómica, además de favorecer una visión más crítica y dinámica de la ciencia.

3.7 Aspectos Relevantes Sobre los Conceptos de Átomo y Núcleo en la Enseñanza

Teniendo en cuenta los aspectos desarrollados y analizados a lo largo de esta investigación, se encuentra que hay diferentes elementos para tener en cuenta a la hora de introducir el concepto de átomo en el aula, si se establece un enfoque desde la historia se encuentra que, en el caso del átomo, esta evolución puede organizarse en cuatro épocas clave, cada una de las cuales ofrece una concepción distinta de su naturaleza: el atomismo clásico, el atomismo de la época renacentista, el atomismo de la época industrial y, finalmente, el atomismo moderno. Esta periodización permite reconocer cambios conceptuales, además de comprender cómo las transformaciones de cada época influyeron en la manera de pensar la estructura de la materia.

- **Atomismo clásico:** Este periodo corresponde a la Grecia antigua y se inicia con las primeras reflexiones acerca de cómo está constituida la materia. En este contexto surgen dos grandes corrientes de pensamiento: la visión atomista y la aristotélica. El atomismo de esta época es fundamentalmente filosófico, más hipotético que experimental, ya que no se apoya en la verificación empírica, no obstante, sienta las bases conceptuales de todo el desarrollo posterior del atomismo. Su premisa central sostiene que la materia está constituida por átomos y vacío. Los átomos se caracterizan por ser eternos, indivisibles y homogéneos en su naturaleza, diferenciándose entre sí únicamente por su tamaño y forma. Asimismo, se plantea que las distintas propiedades de la materia emergen de la manera en que estos átomos se combinan y se organizan en el vacío.
- **Atomismo de la época renacentista:** Este periodo, correspondiente al Renacimiento, retoma la idea de que la materia está constituida por átomos y vacío, conservando varias de las propiedades atribuidas al atomismo clásico. Aun así, se introducen nuevos elementos conceptuales, en particular una interpretación mecanicista y la incorporación de propiedades sensibles, lo que refleja un cambio en la forma de explicar los fenómenos físicos. Una característica distintiva de esta etapa es la presencia de una visión teológica en torno al origen de los átomos. Pensadores como Gassendi y Newton influenciados por sus convicciones religiosas, sostenían que los átomos habían sido creados por Dios, quien les otorgó sus características y propiedades fundamentales. Además, la concepción aristotélica de la materia comienza a entrar en conflicto con las nuevas explicaciones naturalistas, siendo progresivamente cuestionada por científicos como Boyle y Lavoisier. Por lo que este proceso, marca uno de los primeros pasos hacia un cambio de paradigma en la comprensión de la materia, al desplazar gradualmente las explicaciones aristotélicas en favor de enfoques más experimentales y cuantitativos.
- **Atomismo de la época industrial:** En este período se produce el primer gran paso del

atomismo, pues comienza a consolidarse como una teoría científicamente factible, marcando una ruptura completa con la visión aristotélica, que para entonces ya se consideraba insuficiente para explicar los fenómenos naturales. Por lo que, en esta etapa representa el auténtico cambio de paradigma; a pesar de que el atomismo aún presentaba dificultades conceptuales. Pero, aun así, empezó a utilizarse para interpretar leyes experimentales y fenómenos térmicos.

Un ejemplo claro de ello se encuentra en los trabajos de Dalton y Boltzmann. Dalton recurrió al atomismo para formular el primer modelo atómico moderno, en el cual el átomo conservaba ciertos rasgos de concepciones anteriores, pero adquiría una estructura más definida que permitía explicar fenómenos químicos. No obstante, en este modelo la noción de vacío permanece poco desarrollada, ya que Dalton no profundizó explícitamente en este concepto. En contraste, en la teoría cinética de los gases de Boltzmann el vacío adquiere un papel fundamental, pues es en él donde las partículas coexisten y se desplazan con movimiento cinético, haciendo posible una explicación estadística del comportamiento macroscópico de los sistemas.

- **Atomismo Moderno:** El atomismo experimenta un avance sin precedentes en la manera de concebir el átomo, transformándose profundamente con respecto a las visiones anteriores. La materia continúa entendiéndose como constituida por átomos y vacío; sin embargo, el atomismo moderno introduce dos cambios conceptuales fundamentales. En primer lugar, los átomos dejan de considerarse indivisibles y, en segundo lugar, pasan a poseer una estructura interna compleja. De este modo, el átomo deja de concebirse como una esfera rígida y homogénea para convertirse en una entidad con organización interna, lo que modifica de manera sustancial su estatus teórico.

A partir de estos desarrollos, el atomismo logra una consolidación definitiva. Un hito clave en este proceso fue el trabajo de Jean Perrin, quien, al demostrar experimentalmente el movimiento browniano, aportó una evidencia decisiva a favor de la discontinuidad de la materia. Este aporte le valió el Premio Nobel en 1926, en un contexto histórico en el que la física nuclear comenzaba a afianzarse, reforzando aún más la visión moderna de la estructura de la materia.

Es claro que, hacia el año 1939, el atomismo y, en particular, la física nuclear ya se había consolidado como campos científicos clave desde el punto de vista tecnológico. Esto se evidencia en los años posteriores con la invención de la bomba atómica, que mostró la capacidad del ser humano para liberar y utilizar la energía nuclear con fines de destrucción masiva. No obstante, este mismo conocimiento también dio lugar a desarrollos orientados al aprovechamiento pacífico de la energía nuclear, como la construcción de reactores para la generación de energía eléctrica, considerada una de las fuentes energéticas con menor emisión directa de gases contaminantes.

Por su parte, para la descripción de la evolución del concepto de núcleo atómico puede dividirse,

a grandes rasgos, en tres períodos. El primero corresponde al establecimiento del concepto; el segundo, a su desarrollo y consolidación teórica y experimental; y el tercero, al descubrimiento de la fisión nuclear. Cabe destacar que este primer período de establecimiento del núcleo atómico se inscribe dentro del marco del atomismo moderno.

- Establecimiento del núcleo: Este período se desarrolla entre las dos primeras décadas del siglo XX, hasta el final de la Primera Guerra Mundial, y tiene lugar tras la formulación del modelo atómico de Thomson, momento en el que comienza a configurarse el atomismo moderno. De manera paralela, se inicia también el establecimiento de la física nuclear, impulsado principalmente por el estudio de la radiactividad.

A partir de la interpretación de Rutherford de los experimentos realizados por Geiger y Marsden, surge la concepción del núcleo atómico, dando lugar a una nueva visión del átomo profundamente distinta de las concepciones previas. Este cambio no solo redefinió la estructura atómica, sino que abrió la puerta al estudio de las primeras propiedades nucleares. En este mismo período destacan los trabajos de Moseley, quien mostró que la carga del núcleo permite identificar químicamente a un elemento, otorgándole al número atómico un significado físico fundamental. Así mismo, el núcleo comienza a reconocerse como el origen de fenómenos como la radiactividad, aunque en ese momento aún no se contaba con una explicación completa y precisa de dichos procesos.

- Evolución del Concepto de núcleo: Este período se desarrolla posterior a la década de los veinte y puede situarse, de manera aproximada, desde la finalización de la Primera Guerra Mundial hasta el surgimiento del modelo protón-neutrón. En este contexto, Rutherford publica sus trabajos sobre los experimentos de la primera transmutación artificial, asociados al denominado “descubrimiento del protón”. Estos resultados pusieron en evidencia que el núcleo atómico no era una entidad simple ni homogénea, sino que estaba constituido por partículas aún más elementales.

Posteriormente, el descubrimiento del neutrón permitió superar las limitaciones de los modelos iniciales y dio lugar a las primeras formulaciones estructuradas del núcleo, como el modelo protón-electrón y, más adelante, el modelo protón-neutrón. Este último representó un avance conceptual, ya que hizo posible explicar con mayor coherencia diversas propiedades nucleares, entre ellas la emisión de la radiactividad, la existencia de isótopos y las diferencias observadas en las masas atómicas. Así pues, el núcleo comienza a entenderse como un sistema complejo, cuya estructura interna resulta esencial para comprender el comportamiento de la materia a nivel fundamental.

- Descubrimiento de la fisión: Este período tiene lugar tras el establecimiento del modelo protón-neutrón. En él surgen una serie de anomalías experimentales observadas en los trabajos de Hahn y Strassmann, realizados en la búsqueda de elementos transuránicos. Dichos resultados fueron interpretados correctamente por Lise Meitner, quien propuso que el núcleo atómico podía dividirse en dos, dando lugar a la formación de nuevos elementos químicamente

distintos. Esta interpretación marcó un punto de inflexión en la comprensión de la estructura nuclear.

En este contexto surge también un modelo nuclear capaz de explicar el fenómeno de la fisión: el modelo de la gota líquida. Este modelo pone de manifiesto que el núcleo es una entidad mucho más dinámica de lo que se pensaba en concepciones anteriores, al compararlo con el comportamiento de una gota de agua susceptible de deformarse y fragmentarse. A partir de esta nueva visión, el núcleo deja de entenderse como una estructura estática y pasa a concebirse como un sistema complejo y altamente dinámico. En consecuencia, esta perspectiva transforma de manera profunda la comprensión del átomo en su conjunto, consolidándolo como un objeto de estudio que continuará siendo central en el desarrollo posterior de la física moderna.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo que sintetiza la evolución histórica y conceptual del átomo y del núcleo atómico, destacando sus principales diferencias y puntos de articulación. Este esquema permite visualizar cómo ambos conceptos, aunque distintos en su objeto de estudio, se desarrollan de manera interrelacionada y se consolidan conjuntamente dentro del marco de la física moderna:

Tabla 1. Comparación entre la evolución histórica y conceptual del átomo y del núcleo atómico

Evolución del átomo y del núcleo		
Aspecto	Evolución del átomo	Evolución del núcleo
Origen histórico	Se inicia en la Grecia antigua con el atomismo clásico, de carácter filosófico.	Surge a comienzos del siglo XX, dentro del marco del atomismo moderno.
Duración	Proceso largo y gradual, que atraviesa varias épocas históricas.	Proceso más corto y acelerado (siglo XX).
Naturaleza inicial	Entidad indivisible, eterna y homogénea.	Región central del átomo, inicialmente poco caracterizada.
Cambio conceptual clave	El átomo deja de ser indivisible y adquiere estructura interna.	El núcleo deja de ser simple y se concibe como un sistema compuesto y dinámico.
Objeto principal de estudio	Comportamiento químico de la materia, organización electrónica y fenómenos macroscópicos.	Propiedades nucleares: estabilidad, radiactividad y energía nuclear.
Rol del experimento	Se vuelve central a partir de la época industrial y moderna.	Es fundamental desde su origen (radiactividad dispersión, transmutación, etc).

Modelos representativos	Dalton, Thomson, Rutherford.	Modelo electrón-Protón, modelo protón-neutrón y modelo gota líquida.
Punto de inflexión	Consolidación del atomismo moderno y evidencia experimental de la discontinuidad de la materia.	Descubrimiento de la fisión nuclear.
Relación entre ambos	El átomo integra al núcleo como parte de su estructura interna.	El estudio del núcleo redefine la concepción del átomo.

Nota. Elaboración propia sintetizando el análisis histórico y conceptual de la evolución del átomo y del núcleo atómico.

Finalmente, después de la contrastación o comparación de la evolución de ambos modelos, se siguió con la construcción de criterios para la enseñanza del átomo en educación media, por lo que estos vienen dados de la siguiente manera:

- Al realizar la comparativa, entre las transformaciones conceptuales del núcleo atómico y los avances experimentales que las hicieron posibles hasta 1939, permite reconocer que el conocimiento nuclear no surge de manera lineal, sino como respuesta a problemáticas teóricas concretas que desbordaron a los modelos existentes. Desde el establecimiento del núcleo con el modelo de Rutherford hasta la interpretación de la fisión nuclear, cada avance implicó una revisión de las concepciones previas sobre la estructura del átomo, impulsada por anomalías experimentales que los modelos anteriores no podían explicar. Este carácter dinámico y conflictivo del desarrollo científico se presenta como un primer criterio orientador para la enseñanza del átomo en la educación media, ya que invita a superar una visión cerrada y dogmática de los modelos atómicos, y a mostrarlos como construcciones en constante debate y revisión.
- Asimismo, el análisis histórico del núcleo muestra que su estudio no puede reducirse a una simple “parte interna” del átomo, sino que posee un campo conceptual propio, con preguntas, métodos y objetivos distintos a los de la química. La progresiva diferenciación entre el estudio del átomo y el del núcleo sugiere la conveniencia de que, en el ámbito educativo, se explicita esta distinción conceptual, evitando confusiones frecuentes en las que ambos niveles de descripción se mezclan sin claridad. De este modo, se favorece una comprensión más precisa de qué fenómenos pueden explicarse desde modelos atómicos y cuáles requieren una mirada específicamente nuclear.
- Por otro lado, la evolución del concepto de núcleo pone en evidencia el papel central del experimento en la transformación de las ideas científicas. Los experimentos de dispersión, la radiactividad, la transmutación artificial y la fisión nuclear no solo aportaron nuevos datos, sino que forzaron la reformulación de los modelos teóricos. Este aspecto permite orientar la enseñanza del átomo hacia una visión en la que los modelos no se presenten como

representaciones definitivas, sino como construcciones provisorias, históricamente situadas y estrechamente ligadas a las posibilidades experimentales de cada época.

Este trabajo abre la puerta a revisar las formas en que podemos adaptar los currículos escolares para hacer de la ciencia una disciplina que atraiga a los estudiantes, mostrando que no se tienen verdades absolutas, sino que hay dinámicas y fenómenos que llevan a los científicos a desafiar sus concepciones y a desarrollar nuevas formas de describir la naturaleza.

CONCLUSIONES

En la evolución del concepto de átomo y de núcleo, así como en la relación que se establece entre ambos -pese a tratarse de nociones distintas, en la medida en que uno constituye parte del otro-, es posible identificar distintas épocas que evidencian rupturas y transformaciones en las ideas sobre la materia. El recorrido histórico abordado en la investigación permitió identificar puntos de inflexión -en el caso del átomo y del núcleo- que se pueden interpretar como cambios de paradigma, en el sentido propuesto por Thomas Kuhn, al modificar la concepción misma de la materia y de explicar los fenómenos asociados con esta. Dicho proceso culmina hacia 1939, momento en el que ambos conceptos quedan relativamente consolidados dentro del marco de la física moderna.

Es importante señalar, que el átomo y el núcleo comienzan a diferenciarse como objetos de estudio que, aunque estrechamente relacionados, se analizan de manera relativamente independiente. En este sentido, el estudio del núcleo se orienta principalmente hacia procesos y propiedades de carácter nuclear y físico -como la estabilidad y la energía nucleares-, más que hacia aspectos químicos. Por su parte, el análisis de las propiedades del átomo se vincula fundamentalmente con la explicación del comportamiento químico de la materia y con fenómenos observables a escala macroscópica.

La evolución del concepto de átomo y la del núcleo atómico presentan trayectorias históricas diferenciadas, aunque profundamente interrelacionadas. Mientras que el atomismo se desarrolla a lo largo de un extenso período histórico que abarca desde la Antigüedad clásica hasta la consolidación de la física moderna, el concepto de núcleo emerge de manera relativamente tardía y su evolución se da de manera más acelerada, circunscrito al marco del atomismo moderno del siglo XX. Esta diferencia temporal no implica independencia conceptual; por el contrario, el surgimiento del núcleo transforma radicalmente la manera de concebir el átomo.

Finalmente, al considerar el desarrollo del núcleo atómico hasta 1939, se pone de manifiesto la necesidad de incorporar, como criterio orientador para la enseñanza del átomo, una reflexión crítica sobre las implicaciones tecnológicas y sociales del conocimiento científico. Al reconocer que los modelos nucleares dieron lugar tanto a aplicaciones destructivas como a usos pacíficos de la energía nuclear permite problematizar, incluso en el nivel de educación media, el carácter no neutral de la ciencia. Desde esta perspectiva, la enseñanza del átomo no debería limitarse simplemente en la enseñanza de los modelos atómicos o de contenidos conceptuales, sino que debería propiciar también, el análisis de las consecuencias históricas y sociales asociadas a dichos desarrollos, favoreciendo una comprensión del conocimiento científico como una construcción situada, con impactos concretos en la sociedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aikin, A. a. (1807). *A Dictionary Of Chemistry And Mineralogy. I.* London : John and Arthur Arch; William Phillips.
- Anderson, D. (1968). *The Discovery Of The Electron* . (H. V. Briones, Trad.) D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N.J.
- Aristóteles. (1995). *Física* (Biblioteca Clásica Gredos, nº 203 ed.). (G. R. de Echandía, Trad.) Gredos.
- Ariza Romero, C. N. (2020). De la física clásica a la moderna: Un análisis histórico-matemático sobre la cuantización de la energía por medio del efecto fotoeléctrico. *Universidad Pedagógica Nacional*, 86.
- Arroyo Pérez, E. (2012). *La termodinámica y la entropía: Boltzmann el universo morirá de frío.* RBA Coleccionables.
- Asimov, I. (1985). *Mundos dentro de mundos: La historia de la energía nuclear.* (M. Paredes, Trad.) Madrid: Alianza Editorial .
- Asimov, I. (2010). *Breve historia de la química: introducción a las ideas y conceptos de la química.* (A. Cruz, & M. I. Villena, Trads.) Alianza.
- Bohr, N., & Wheeler, J. (1939). The Mechanism of Nuclear Fission. *Physical Review*, 56, 426–450. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.426>
- Boyle, R. (2017). *The Sceptical Chymist* (Javier Ordóñez y Natalia Pérez-Galdós ed.). (N. Pérez-Galdós, Trad.) Barcelona, España: Crítica.
- Camelo Oliveros, C. S. (2018). Sobre la estructura nuclear: El modelo de Yang –Mills como una explicación a su estabilidad. *Universidad Pedagógica Nacional* , 76.
- Chadwick, J. (1932). Possible Existence of a Neutron. *Nature*, 129(3252), 312. <https://doi.org/10.1038/129312a0>
- Corcho Orrit , R. (2013). *La Fisión Nuclear: Meitner Uranio Partido Por Dos, Igual a Energía.* RBA Coleccionables, S.A.
- Corcho Orrit, R. (2012). *El núcleo atómico: Rutherford los átomos también tienen corazón.* Villatuerta, Navarra, España : RBA Coleccionables .
- Dale, A., Ian, G., & Williams, B. (2009). *Flight and motion: The history and science of flying.* Routledge.
- Dalton, J. (1808). *A new system of chemical philosophy* (Vol. 1). Manchester: S. Russell for R. Bickerstaff. <https://archive.org/details/newssystemofchemi01dalt>
- Fergusson, J. (2011). The History Of The Discovery Of Nuclear Fission. *Foundations of*

- Chemistry*, 13, 145–166. <https://doi.org/10.1007/s10698-011-9112-2>
- Fernández, E. M. (2014). *La ley de Boyle: Boyle bajo presión*. Barcelona: RBA Coleccionables.
- García Castañeda, M., & Ewert De-Geus, J. (2003). *Introducción a la Física Moderna* (3ª edición ed.). Bogotá, Colombia : Universidad Nacional de Colombia.
- González Salgado, M. (2022). Enseñanza y aprendizaje de la física moderna en los estudiantes del grado 11ºb de la institución educativa Antonio Lenis de la ciudad de Sincelejo Sucre: Una aproximación desde la relatividad especial de Albert Einstein. *Universidad de Sucre*, 101.
- Harrison , A., & Treagust, D. (2000). A typology of school science. *International Journal of Science Education*, 22(9), pp. 1011-1026. <https://doi.org/10.1080/095006900416884>
- Heilbron, J. L. (2003). *Ernest Rutherford : And the Explosion of Atoms*. New York: Oxford University Press.
- Hernández , A. (2012). *La Energía Nuclear: Fermi la Fisión Hace la Fuerza*. RBA Coleccionables S.A.
- Holmyard, E. J. (1957). *Alchemy*. Harmondsworth, England: Penguin Books. <https://archive.org/details/alchemyholm00holm>
- Izcara Palacios , S. (2014). *MANUAL DE INVESTIGACIÓN CUALITATIVA*. México: Fontamara.
- Joven, E. (2012). *La teoría atómica: Dalton ¿Cuánto pesan los átomos?* España: RBA Coleccionables.
- Kirk, G. S., Raven, J. E., & Schofield, M. (1987). *Los filósofos presocráticos* (2.ª edición ed.). (J. García Fernández, Trad.) Madrid: Editorial Gredos.
- Kurzon. (9 de Septiembre de 2014). *The plum pudding model of the atom [Imagen]*. Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plum_pudding_model.svg. Licencia (CC BY-SA 4.0)
- Lavoisier, A.-L. (1798). *Tratado elemental de química: Presentado baxo nuevo orden y conforme a los descubrimientos modernos* (Vol. 1). (J. M. Munárriz, Trad.) Madrid : Imprenta Real.
- Libavius, A. (1606). *Alchymia*. Frankfurt: Wolffgang Richter.
- Malagón Sánchez, J., Tarazona Vargas, L., Ayala Manrique, M., Garzón Barrios, M., & Sandoval Osorio, S. (2018). *Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias*. Editorial Universidad Pedagógica Nacional.
- Malley, M. (2011). *Radioactivity: A History of a Mysterious Science*. New York: Oxford University Press.
- Marinca, A. (2022). Kalām atomism and its criticism in Arabic philosophy. *Philobiblon: Transylvanian Journal of Multidisciplinary Research in Humanities*, 27(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.26424/philobib.2022.27.1.08>

- Martín, G. (2002). La alquimia como precedente de la Química. Em F. C. Ciencia (Ed.), *Ciencia y cultura en la Edad Media. Seminario "Orotava" de Historia de la Ciencia* (pp. 394 - 406). España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=978024>
- Matthews, M. (1989). A Role for History and Philosophy in Science Teaching. *Interchange, Vol. 20(2)*, pp. 3-15.
- Meitner, L., & Frisch, O. (1939). Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. *Nature, 143(3615)*, 239.
- Ministerio de Educación Nacional. (2006). *Estándares Básicos de Competencias en Lenguaje, Matemáticas, Ciencias y Ciudadanas*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Educación Nacional.
- Muñoz Paez, A. (2012). *La Radiactividad Y los Elementos: Marie Curie el secreto mejor guardado de la materia*. RBA Coleccionables.
- Muñoz, A. (2013). *La Química Moderna: Lavoasier la revolución está en el aire*. España: RBA Coleccionables.
- Newton, I. (1947). *ÓPTICA O TRATADO DE LAS REFLEXIONES, REFRACCIONES, INFLEXIONES Y COLORES DE LA LUZ*. (E. D. CASTILLO, Trad.) New York, Buenos Aires: EMECÉ EDITORES S. A .
- Parra Caro, J. (2023). Impedimentos para impartir la introducción a la física moderna en la educación media vocacional en colegios a nivel Bogotá. *Universidad Distrital Jose Francisco Jose De Caldas, 1*, 34.
- Pullman, B. (1995). El átomo en la historia del pensamiento humano. Librarie Artheme Fayard .
- Ramos, G., Peralta, M., Monroy, C., & Cardona, R. (2011). Propuesta pedagógica en torno a tópicos introductorios de física nuclear. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Universidad Pedagógica Nacional, 7*.
- Röntgen, W. (1985). *First medical X-ray by Wilhelm Röntgen of his wife Anna Bertha Ludwig's hand* [Imagen]. Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:First_medical_X-ray_by_Wilhelm_R%C3%B6ntgen_of_his_wife_Anna_Bertha_Ludwig%27s_hand_-_18951222.jpg
- Rosaria, J., & Gilbert, J. (2003). *Chemical Education: Towards Research-based Practice*. (J. G. (eds.), Ed.) Kluwer Academic Publishers.
- Rosária, J., & Gilbert, J. K. (2000). History and philosophy of science through models: some challenges in the case of 'the atom'. *International Journal of Science Education, 22(9)*, 993-1009.
- Rutherford, E. (1911). The Scattering of alpha and beta Particles by Matter and the Structure of

- the Atom. *Philosophical Magazine*, 21(125), 669–688.
- Rutherford, E. (1919). Collision of α Particles with Light Atoms. IV. An Anomalous Effect in Nitrogen. *Philosophical Magazine*, 37(222), 581-587.
- Rutherford, E. (1920). Bakerian Lecture: Nuclear Constitution of Atoms. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 97(686), 374-400.
- Rutherford, E., & Soddy, F. (1903). Radioactive Change. *Philosophical Magazine Series 6*, pp. 576-591. <https://doi.org/10.1080/14786440309462960>
- Sambursky, S. (1962). *El Mundo Físico De Los Griegos* (Vol. 1). Alianza Universidad.
- Santamaría, J. (2013). El movimiento browniano: Un paradigma de la materia blanda y de la biología. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A, Matemáticas (Esp)*, 106(1-2), pp. 39-54. <https://rac.es/ficheros/doc/01099.pdf>
- Serway, R. A., y Jewett, J. W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna* (Septima ed., Vol. 2). (V. C. Olguín, Trad.) Estados Unidos: Cengage Learnig.
- Taber, K. (2005). The atom in The chemistry curriculum: fundamental concept, teaching model or epistemological obstacle? *Foundations of Chemistry*, 7, pp. 43–84. <https://doi.org/science-education-research.com>
- Thomson, J. (1904). On the Structure of the Atom: an Investigation of the Stability and Periods of Oscillation of a Number of Corpuscles placed at equal intervals round the Circumference of a Circle. *Philosophical Magazine*, 7(39), pp. 237–265.
- Thorpe, E. (1909). *A History Of Chemistry* (Vol. 1). New York : G.P.Putnam's Sons.