

**LA ESPECTROSCOPIA ESTELAR COMO HERRAMIENTA PARA LLEVAR AL
AULA EL MODELO ATÓMICO DE BOHR**

ANA GABRIELA MARTINEZ MAHECHA

ASESOR: NÉSTOR FERNANDO MÉNDEZ HINCAPIÉ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN FÍSICA

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ D.C 2022

LÍNEA DE PROFUNDIZACIÓN: LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN
FÍSICA MATEMÁTICA

*Teaching has to support the pupil's development of personality
and his worldview as well as help to understand the position
of the natural sciences and technology in the culture.*

Hannula

*La enseñanza debe apoyar el desarrollo de la personalidad
de los estudiantes y su visión de mundo, así como ayudarlos a entender
la posición de las ciencias naturales y la tecnología en la cultura.*

Hannula

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	4
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO I	6
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.3 ANTECEDENTES.....	12
CAPÍTULO II.....	16
2.1 MARCO TEÓRICO.....	16
2.1.1 Sobre la radiación electromagnética.....	16
2.1.2. El efecto fotoeléctrico.....	19
2.1.3 La estructura atómica de la materia: el modelo de átomo por Niels Bohr	20
2.1.4. Interacción radiación-materia (espectros de emisión y absorción)	23
2.2 EL SOL Y SU ESPECTRO	26
2.2.1 Clasificación de las estrellas según su tipo espectral	27
2.2.2 Evolución estelar y el diagrama de Hertzsprung-Russell (HR).....	28
2.2.3 La atmosfera del Sol y la radiación solar	31
2.2.4 Identificación y caracterización de las líneas de Hidrógeno del espectro del sol.....	33
CAPÍTULO III.....	35
3.1 METODOLOGÍA	35
3.2 ACTIVIDADES PROPUESTAS PARA LA SEA	41
CAPÍTULO IV.....	44
4.1 EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD E IMPACTO DE LA PROPUESTA DE SEA. 44	
4.1.1 Análisis de resultados del Post-test	44
DISCUSIONES FINALES	51
CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXOS	58

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Yaneth, por apoyar y acompañar cada paso de mi carrera, por la paciencia dedicación y amor que me ha brindado durante toda mi vida.

A mis hermanas Mariale y Laura, por soportar mis momentos malos y buenos y por animar y colorear mis días.

A mi asesor Néstor Méndez por guiar mi proceso y orientar con paciencia mi desarrollo como profesional.

A mi gran amigo Nicolas, el gigante que permitió que me subiera a sus hombros y así poder enfrentar los grandes retos de la academia.

A mi profesora Farly y Milo por inspirarme y haber incentivado mi emoción por la física y la astronomía.

A los amigos que pude cosechar durante este tiempo, Paul, Mateo, Edwin, Santiago, Julián, Miguel, Angie y Jesús, su presencia en mi vida motivó mi crecimiento como persona.

Los admiro y dedico este trabajo a cada uno de ustedes...

INTRODUCCIÓN

En 1860 Robert Bunsen y Gustav Kirchhoff determinaron que todos los elementos químicos tienen un espectro único a partir del análisis de las frecuencias de las líneas de emisión y absorción de estos. Años antes, el físico Joseph Von Fraunhofer estudió las longitudes de onda de una serie de líneas más tenues que identificó en el espectro del Sol y su similitud con los espectros de otros elementos, “Fraunhofer determined that the wavelength of one prominent dark line in the Sun’s spectrum corresponds to the wavelength of the yellow light emitted when salt is sprinkled in a flame” (Carrol & Ostlie , 2017, pág. 111). En 1885, Johann Balmer encontró una fórmula para caracterizar y reproducir las líneas espectrales del Hidrógeno correspondientes a rangos de longitud de onda del visible.

Para finales del siglo XIX, la explicación de la existencia de estas líneas era un misterio, sin embargo, el análisis de los espectros atómicos dio paso a los primeros indicios de la composición química de las estrellas. Por otro lado, el físico Joseph Thompson estudiaría la estructura interna de la materia para dar cuenta de las propiedades fisicoquímicas de los elementos, resultado de su propio trabajo experimental con gases e inspirado por la electrodinámica de James Maxwell. Thompson presentó un modelo del átomo en el que trabajó durante años sin tener mucho éxito, pues no podía dar explicación a las propiedades espectrales de los elementos.

Hoy día el análisis de los espectros ha permitido a los astrofísicos estudiar las estrellas, desde parámetros como la velocidad radial, la temperatura de su atmosfera y su composición química hasta caracterizar los procesos convectivos de su superficie y la interacción del plasma con el campo magnético que se produce de esta convección.

El presente trabajo está dividido en cuatro capítulos, en el capítulo I se hace el planteamiento de la problemática entorno a la enseñanza-aprendizaje del modelo atómico de Bohr, partiendo explícitamente de los espectros de emisión y absorción de los gases y contextualizando su enseñanza en el estudio del espectro del Sol, se plantean los objetivos y se presentan los antecedentes, en el capítulo II se hace un análisis epistemológico con base a 4 ejes temáticos en relación con la radiación electromagnética y su interacción con la materia, que son la base de la explicación del modelo del átomo que propone Bohr y se expone algunas características del estudio del Sol, su espectro y evolución. En el capítulo III se expone la metodología utilizada y se presenta la propuesta de implementación, el capítulo IV muestra el estudio de la efectividad e impacto que tuvo la implementación, se discuten los resultados y se dan las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La historia de las ciencias presenta la gran influencia que tuvieron los espectros atómicos y estelares en la construcción del conocimiento alrededor de la estructura interna de la materia, pues son una evidencia experimental que da cuenta de la interacción de la radiación electromagnética con esta.

Aunque el modelo atómico de Bohr, presentado en 1913, solo puede dar cuenta de átomos parecidos al Hidrógeno, su importancia en el rompimiento de los paradigmas que llevaron a la creación de teorías que resolvieran las limitaciones de la física clásica es relevante, y convierte a los postulados de Bohr en una entrada para entender los retos de la naciente física cuántica, atómica y nuclear. “es necesario resaltar la simplicidad del modelo de Bohr frente a su gran

poder de predicción en el grupo particular de átomos citados. Finalmente, su simplicidad y su alto grado de aplicabilidad hacen de este modelo un caso ejemplar para ser enseñado en los cursos de Física Moderna de los últimos años de la enseñanza media” (Muñoz, 2014, pág. 62).

En Savall-Alemany, Doménech-Blanco, Guisasola y Martínez-Torregrosa (2016), se centran en identificar dificultades en la enseñanza- aprendizaje que presentan maestros y estudiantes de secundaria en la interpretación del modelo cuántico-clásico de Bohr encontrando que, aunque en España los currículos de física de secundaria especifican que los estudiantes deben relacionar los conceptos anteriormente mencionados, los docentes suelen plantear una introducción al modelo atómico desde los espectros atómicos. Se encontró que la mayoría de los estudiantes no logran describir cómo los átomos interactúan con la radiación en parte como consecuencia de que la enseñanza estos conceptos no brinda las oportunidades necesarias para que los estudiantes sean participes de la construcción de modelos o hagan uso del modelo en cuestión para explicar algunos otros fenómenos.

En Colombia, los Estándares Básicos de Competencias, establecidos por el Ministerio de Educación Nacional, garantizan que las mallas curriculares de las instituciones educativas se centren en unos ejes comunes, es decir, “que todos los estudiantes del país, independientemente de la región en la que se encuentren, deben saber y saber hacer una vez finalizado su paso por un grupo de grados” (MEN, 2006, p. 113). Particularmente en la enseñanza de la estructura de los átomos desde diferentes teorías, el uso de los espectros de emisión y absorción no se encuentran explícitamente descritos allí, lo que podría representar una limitación en la enseñanza de la estructura de la materia, si no se abordan teniendo en cuenta que es parte de la problemática presentada en la enseñanza de los modelos atómicos, corriendo el riesgo de alejar la teoría de sus

consecuencias experimentales; pues históricamente, a grandes rasgos representan las bases de la física moderna.

En Colombia las teorías de la física moderna no aparecen en los currículos propuestos para la educación media. Los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales mencionan, en relación con la estructura atómica de la materia y los modelos atómicos que: de grado sexto a séptimo el estudiante debe describir los modelos que dan cuenta de la estructura de la materia, y de grado decimo a once el objetivo se basa en lograr que se generen explicaciones acerca de la estructura de los átomos desde diferentes posturas teóricas (MEN, 2006). Las problemáticas en cuestión son excluidas de cualquier articulación con consideraciones cuánticas referentes a la física y terminan siendo enseñados desde los contenidos curriculares en química.

Para tener un acercamiento al contexto de los currículos llevados a las aulas en Colombia, se puede hacer una revisión de los elementos que constituyen la enseñanza de las ciencias en los colegios, como los Libros de Texto, recursos proporcionados a los docentes para establecer y reforzar los contenidos curriculares que ellos diseñan. En la investigación de Muñoz-Burbano, Solbes y Zambrano (2020), se realizó un análisis documental de aproximadamente 18 libros de texto de educación secundaria, de entre las editoriales más usadas en Colombia. Los autores encontraron que el 77% de estos textos no desarrollan una contextualización histórica del concepto de átomo, por lo menos un 32,5% no expone los antecedentes del modelo atómico de Bohr y tan solo el 18% muestra las correcciones cuánticas a este modelo, “Los LT [Libros de Texto] omiten también aportes en torno a los espectros de los átomos basados en el átomo de Rutherford” (Muñoz-Burbano, et al , 2020, pág. 6). Además, los autores sugieren que los Derechos Básicos de Aprendizaje (DBA) obstaculizan la meta que se busca alcanzar, que es lograr el desarrollo del pensamiento científico integral, interdisciplinar y fundamentado en la

construcción de teorías por medio de hipótesis, que pueden escalar en el diseño de experimentos y situaciones que den cuenta del grado de entendimiento sobre el mundo natural, y el papel del estudiante en este. Cabe destacar que estos fueron planteados en 2017 con mínimas actualizaciones desde entonces.

Que la física moderna desarrollada durante el siglo XX sea excluida de los currículos en Colombia representa una imposibilidad de la ciencia para mostrarse como un campo del conocimiento que evoluciona, tiene limitaciones y puede deconstruirse para formular nuevas percepciones científicas bajo las cuales funciona el mundo actual. En consecuencia, se da una versión incompleta del estudio de los fenómenos físicos y su utilidad en el avance de la industria, la ciencia y la tecnología.

Es importante tratar la estructura atómica de la materia desde la física cuántica para evitar errores conceptuales de corte epistemológico, en lo que se refiere a la construcción de los modelos, de lo contrario, los contenidos se tornan individuales y carecen de mutua relación. Entonces, “Se hace necesario mostrar los procesos que hicieron emerger, modificar y abandonar modelos en las comunidades de especialistas; las implicaciones y confrontaciones propias de toda actividad científica con el fin de romper con la imagen de ciencia ahistórica, apblemática, lineal y acumulativa” (Gallego, Moreno, & Pérez , 2010, pág. 612).

Además, puede considerarse contraproducente descuidar la formación y capacitación de los docentes a cargo de planear y guiar estos espacios académicos. En el trabajo de Moreno, Gallego y Pérez (2010) se hace un análisis de varios libros de texto dirigidos a maestros en formación, según la presentación de un modelo teórico del átomo de Bohr acertado y del contexto histórico-

epistemológico del mismo. Los resultados arrojan que la confiabilidad para estos libros de texto es insuficiente teniendo en cuenta su papel dentro de la construcción del currículo en ciencias.

Ahora bien, el maestro como ente investigador en el aula debería inclinarse a hacer una revisión de los contenidos académicos a partir de las dificultades de enseñanza-aprendizaje que este encuentra, lo que puede resultar, por ejemplo, en la formulación de secuencias de Enseñanza-Aprendizaje, que involucran el contexto sociocultural en el que se desarrollan las actividades y las demandas de aprendizaje que identifica el docente en la población de estudiantes.

Además, Savall-Aleman, et al en 2016, concluyen que la enseñanza por conferencias parece no ser la manera más apropiada de conseguir que los estudiantes usen las leyes de la física cuántica para explicar experimentos que la física clásica no resuelve, como los espectros discontinuos, por lo que se sugiere diseñar nuevas estrategias de enseñanza que superen los problemas mencionados.

La astronomía en la educación en ciencias ha venido tomando gran relevancia, pues ha sido parte de las diferentes revoluciones del conocimiento en la historia de la humanidad hasta la actualidad, su impacto como “ciencia del universo” ha inspirado desarrollos en otras ciencias, como en la física, la tecnología y las perspectivas culturales y artísticas de la sociedad. Hannula en 2005 señala que “Observations, exploration of phenomena and discussions belong to astronomical studies. They will familiarize the pupils with the scientific method almost unnoticed. Astronomy is appropriate in educating pupils as scientists” (Hannula, 2005, pág. 69). Lo que sugiere que el análisis del espectro del sol y otras estrellas puede dar paso a que los estudiantes aterricen conceptos y logren construir representaciones de lo que interpretan de los fenómenos.

Luego, introducir a los estudiantes sobre el modelo semicuántico propuesto por Bohr a partir de estas experiencias da cabida a un escenario de contextualización de la física moderna que pueda abordar los conceptos para evitar ambigüedades epistemológicas y de alguna manera recrear los grandes problemas de la ciencia en el aula. Al mismo tiempo, a nivel disciplinar, recolectar y analizar los espectros de las estrellas, da las herramientas necesarias para definir parámetros bajo los cuales no solo pueden ser estudiadas las estrellas, sino que abre las puertas al descubrimiento y caracterización de planetas y galaxias.

Así pues, la motivación de esta investigación consta de hacer una reflexión acerca de las limitaciones de enseñanza-aprendizaje que representa que en Colombia los espectros de emisión y absorción no sean parte de los currículos, ya sea desde la aproximación a la física moderna (modelos cuánticos) o desde el entendimiento de la estructura de la materia. Como ya hemos visto, los modelos atómicos son presentados sin tener en cuenta su origen y sus aportes a la solución de enigmas científicos.

Como resultado del planteamiento anteriormente expuesto surge la pregunta que se espera resolver con esta investigación:

¿Qué características debe tener una *secuencia de enseñanza-aprendizaje* (SEA), para la enseñanza de la estructura atómica de la materia a partir del análisis de las líneas espectrales de las estrellas, dirigido a estudiantes del grado 10° en Colombia?

1.2 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Establecer las características y actividades que debe tener una SEA para la enseñanza de la estructura atómica de la materia, específicamente el modelo atómico de Bohr, en educación media a partir de la espectroscopia estelar.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis epistemológico de la relación entre los espectros de emisión-absorción y el modelo atómico de Bohr a partir de estas.
- Identificar las dificultades de enseñanza-aprendizaje de un grupo de estudiantes de grado 10° de un colegio en Bogotá.
- Diseñar una SEA sobre el modelo atómico de Bohr a partir del estudio de las líneas espectrales del Sol.
- Evaluar la efectividad e impacto de las actividades propuestas para la SEA a partir del análisis de los resultados de la implementación.

1.3 ANTECEDENTES

El estudio de (Ivanjek , Shaffer, Planinić, & McDermott, 2020) tiene como principal objetivo establecer si los estudiantes de cursos introductorios de física reconocen las condiciones bajo las cuales los espectros atómicos son formados. Después de llevar a cabo una implementación, las concepciones teóricas de los estudiantes fueron puestas a prueba con preguntas que tenían que ver con variaciones en los elementos del montaje experimental y cómo esto afectaría en la

obtención de un espectro discreto o continuo con el fin de identificar dificultades, respecto a los de espectros y sus causas.

Los autores revelan que, mientras el 20% de los estudiantes atribuyen la formación de un espectro discreto a la fuente de luz usada en el montaje experimental, el 80% restante dan explicaciones a partir de los elementos ópticos del montaje (rejillas, prismas, etc.) o argumentan sobre los principios ópticos y geométricos implicados en el experimento. Lo que, además, resulta en interpretaciones alejadas de usar el modelo cuántico del átomo para describir la causa de los espectros.

Por otro lado, Sinarcas y Solbes (2013) presentan el análisis de la aplicación de una prueba a estudiantes de bachillerato con el objetivo de identificar dificultades de aprendizaje de tipo epistemológico en el entendimiento de algunos principios de la física cuántica, en el test iban involucradas ideas sobre la concepción de los electrones y fotones como objetos con comportamiento cuántico y la cuantización de la energía, entre otras.

Las conclusiones revelan que los estudiantes no ven las teorías cuánticas como necesarias para superar las limitaciones de la física clásica, no relacionan el salto de electrones entre niveles de energía permitidos con las bandas de colores de los espectros discontinuos, no tienen claro qué representan los orbitales en el modelo de átomo, la gran mayoría no concibe el fotón como el cuanto de energía que constituye la radiación electromagnética y no encuentran la conexión de la física cuántica con la tecnología y sociedad.

Del trabajo de maestría (Peña, 2012), se presenta una revisión de los conceptos relacionados con la estructura atómica de la materia y la espectroscopia, haciendo un recorrido por la evolución histórica de estos. Se realiza la implementación de una propuesta didáctica enfocada en ejes

temáticos que tiene que ver con la comprensión de la naturaleza de la luz, la materia a través de la historia, la electricidad y magnetismo, el descubrimiento del electrón, radiación, entre otros, repartidos en nueve sesiones, usando montajes experimentales que tienen que ver con la formación y análisis de espectros atómicos de diferentes sustancias.

Peña (2012) señala que las actividades tuvieron un impacto positivo en la disposición de los estudiantes para comprender los conceptos físicos detrás de los espectros que observaron, lo que les llenó de curiosidad y motivación para llevar a cabo las actividades propuestas. Además, advierte que la introducción de diferentes demostraciones experimentales permite a los estudiantes construir explicaciones desde las teorías que conocen hacia los fenómenos que observan.

Así mismo (Hernández, 2016), establece la construcción de modelos científicos como parte relevante de las nociones epistemológicas de la ciencia y como herramienta para comprender los procesos de racionalización en la enseñanza aprendizaje de la física moderna. Se desarrolla un análisis con un enfoque epistemológico del modelo atómico de Bohr y su relación con el modelo como herramienta metodológica para representar teorías e ilustrar conceptos abstractos. Además, se propone una secuencia didáctica que engloba todo lo anterior.

La autora sugiere que existe una incidencia positiva en introducir el modelo de Bohr y las distintas teorías sobre la estructura de la materia en las transposiciones didácticas bajo las cuales, los maestros fundamentan el currículo usando el modelo como representación práctica y organizativa del saber tanto para la comunidad científica como para los estudiantes.

Por otro lado, el trabajo de (López, 2020), expone una propuesta para la didáctica y enseñanza de la astronomía mediante prácticas teórico-experimentales enfocadas en la espectroscopia. En

primer lugar, se hace una revisión histórica de la espectroscopia y se establecen los fundamentos teóricos para la comprensión de los espectros estelares. Finalmente, se caracterizan los elementos que componen el espectrógrafo LISA, su funcionamiento y el tratamiento de los datos obtenidos de este en el software ISIS.

López (2020) trabajó con diferentes poblaciones, en el planetario de Bogotá y estudiantes de universidad, se encuentra que existen inquietudes sobre el funcionamiento de los instrumentos a través de los cuales podían ser visualizados espectros y su relación con la composición química de los elementos, además se evidencia un interés por el Sol. Aunque el análisis para establecer los alcances de la propuesta se caracteriza por ser más bien cualitativo, el autor concluye que la espectroscopia puede aportar a la divulgación y enseñanza de este campo de la ciencia en el aula y otros escenarios.

El trabajo de Rosas (2017) en primer lugar, desarrolla un análisis de los conceptos teóricos que tienen que ver con los espectros y los fundamentos de la espectroscopia astronómica, características de las líneas espectrales y los parámetros bajo los cuales estas son reducidos y analizados. En una segunda etapa del trabajo, el autor se centra en describir el montaje y calibración de los instrumentos necesarios para la adquisición de los espectros y finalmente, se hace una caracterización del software para reducción de datos astronómicos IRAF y su utilización en el análisis de los espectros de cuatro objetos celestes obtenidos en el Observatorio de la Universidad de Nariño.

Se concluye que el uso del software IRAF trae consigo ventajas en cuanto a la corrección de los datos obtenidos, posee herramientas que permiten determinar fácilmente parámetros como velocidad radial, velocidad de rotación, diámetro y el perfil espectral de la línea $H\alpha$ de los objetos analizados.

CAPÍTULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Sobre la radiación electromagnética

En 1864, el matemático y físico escocés James Clerk Maxwell propuso las ecuaciones que caracterizan las ondas electromagnéticas. Estas ecuaciones mostraron que dichas ondas se propagan a través del espacio, transportando energía de un lugar a otro a una velocidad constante que se conoce como la velocidad de la luz. Este tipo de ondas se describen a partir de las leyes de inducción electromagnética (ley de Faraday-Lenz y ley de Ampere-Maxwell), es decir, campos eléctricos y magnéticos que oscilan en direcciones perpendiculares entre sí.

En 1888, el científico alemán Heinrich Hertz realizó experimentos que producían ondas de radiofrecuencia, estos experimentos confirmaron la existencia de la radiación electromagnética que se clasifica en función de su longitud de onda y su frecuencia, la comprensión moderna de las ondas electromagnéticas se desarrolló a finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

El físico alemán Gustav Kirchhoff exploró teóricamente la idea de que, la manera en que un cuerpo absorbe y emite energía debería estar descrita por una función que relacione la frecuencia de radiación del cuerpo con su temperatura. “existía una función universal, cuya existencia había demostrado Kirchhoff, para la forma en que la intensidad de la radiación térmica a una temperatura dada dependía de la frecuencia de la radiación. Esta función era independiente de las propiedades de la materia radiante” (Peréz, 2018, pág. 58). Resultaba necesario encontrar una función de distribución de energía que diera cuenta de las curvas experimentales obtenidas por Otto Lummer y propuestas teóricamente por Kirchhoff, que se muestra en la Figura 1.

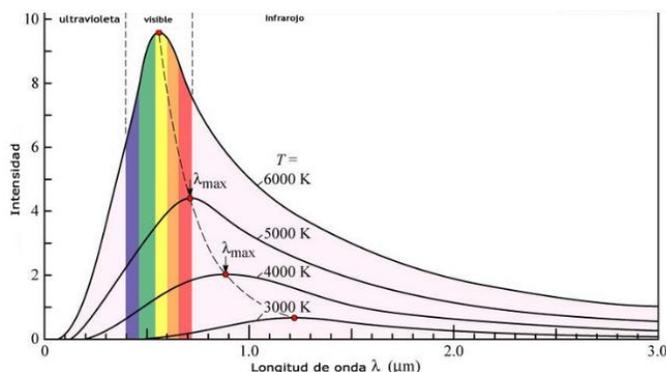


Figura 1. Curvas de radiación de cuerpo negro que muestran un pico de intensidad de radiación en una longitud de onda específica dependiendo de su temperatura. Tomada de <https://www.quimicafisica.com/radiacion-cuerpo-negro-hipotesisplanck.html>

Para dar solución a esta necesidad Max Planck en 1900, propone estudiar la radiación de un cuerpo negro ideal. El cuerpo negro se define como un objeto hipotético que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él, y la emite en función de su temperatura. Desde este punto, y cumpliendo el segundo principio de la termodinámica, si un cuerpo negro es irradiado, se calienta aumentando su temperatura hasta alcanzar el equilibrio, no aumentará más su temperatura, sino que emitirá la misma cantidad de radiación que reciba.

Para entonces se daba una controversia entre los energetistas y aquellos científicos que apoyaban la naturaleza atómica y molecular de la materia, referente a los desarrollos teóricos de la termodinámica, como por ejemplo, la teoría molecular del calor propuesta por Maxwell y Boltzmann que daría paso a que Planck planteara una solución hacia lo que estaba ocurriendo dentro del cuerpo negro como “una cavidad cuyas paredes estaban llenas de osciladores eléctricos de toda las frecuencias” (Pérez, 2018, pág. 53), es decir, osciladores eléctricamente cargados, como muestran esquemáticamente las figuras 2 y 3, que pueden absorber y emitir radiación de cualquier frecuencia y de los que podemos relacionar su energía de radiación a partir de la energía mecánica del oscilador. Sin embargo, las preguntas sobre el papel de la temperatura en esta relación seguían sin resolverse.

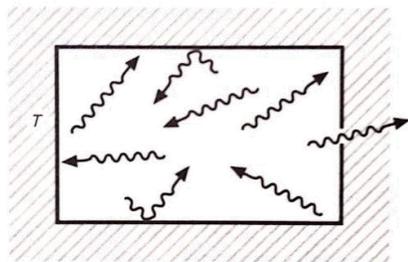


Figura 2. Modelo de cuerpo negro. Pérez, T.2012

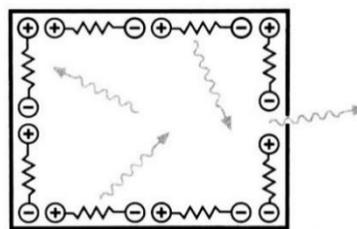


Figura 3. Modelo de cuerpo negro propuesto por Planck. Pérez, T.2012

Wilhelm Wien había descubierto una ley física que describe cómo la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro depende de la temperatura. Sin embargo, esta ley falla a bajas frecuencias, y es a esta conclusión experimental a la que llegaría el profesor de física Heinrich Rubens.

Planck se dispuso a encontrar la solución para este problema, encontrando la energía de un oscilador $u_\nu(\nu, T)$ en función de su frecuencia de radiación y la temperatura; utilizando las deducciones probabilísticas para la entropía de Stefan Boltzmann supone que los valores de esta energía debían ser divididos en elementos de energía discretos (cuanto) que daban cuenta de las posibles configuraciones del sistema.

$$u_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Estos elementos $\epsilon = h\nu$ dependen de la frecuencia de radiación ν y de h (la constante de Planck) una constante que relaciona la constante de Boltzmann k y la velocidad de la luz, y tiene un valor de 6.62×10^{-34} J-s. “La fórmula de Planck para la densidad de energía de la radiación del cuerpo negro predice correctamente los resultados experimentales. Reproduce la ley de Rayleigh-Jeans para frecuencias pequeñas y la de Wien para frecuencias grandes.” (García & Ewert, 2003, pág. 53)

2.1.2. El efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es el fenómeno en el cual los electrones son emitidos de un material cuando es iluminado. Este efecto se descubrió por primera vez en 1887 por Hertz, pero su explicación completa fue dada por Albert Einstein en 1905.

Según la teoría clásica, se esperaba que la energía de la luz incidiera sobre los electrones en un material, y que esta energía se acumulara hasta que fuera suficiente para liberar a los electrones del material. Sin embargo, los experimentos mostraron que incluso la luz de baja intensidad podía liberar electrones de un material, siempre y cuando la frecuencia de la radiación sea mayor que un mínimo que depende del material.

Para explicar este fenómeno, Einstein propuso que la luz no se comportaba como una onda continua, sino como una serie de partículas discretas, o fotones, cada uno con una cantidad finita de energía. El efecto fotoeléctrico se produce cuando un fotón colisiona con un electrón en un material, transfiriendo su energía al electrón y liberándolo del material. La energía mínima necesaria para liberar un electrón se conoce como función de trabajo. El efecto fotoeléctrico proporciona una prueba experimental de la naturaleza corpuscular de la luz y fue uno de los primeros ejemplos de la física cuántica.

En 1923, el físico Arthur Compton realizó experimentos con rayos X que refutaron la teoría de la luz como onda y confirmaron la teoría de Einstein de la luz como una partícula. El efecto Compton, es un fenómeno en el cual un fotón colisiona con un electrón libre y sufre un cambio en su longitud de onda y energía.

2.1.3 La estructura atómica de la materia: el modelo de átomo por Niels Bohr

Para finales del siglo XIX, las explicaciones sobre las propiedades químicas y espectrales de la materia estaban inconclusas, se pensaba que debían tener relación con la estructura interna de esta y los científicos defensores de la teoría atómica de la época pusieron sus esfuerzos en clarificar estas cuestiones. Dentro de las propiedades espectrales se denotan fenómenos como la radiación o luminiscencia espontánea de los gases cuando son calentados, el descubrimiento de la radioactividad y los rayos x.

J.J Thomson durante años trabajó en la teoría de vórtices para dar explicación a lo atómico, presentando al átomo como un conjunto de vórtices en movimiento dentro de un fluido parecido al éter. Mas tarde abandonaría esta idea y apoyado en la evidencia experimental obtenida gracias al descubrimiento de los rayos catódicos en 1897, propone una perspectiva más compleja del átomo y establece que la unidad fundamental que constituye la estructura interna de este son los electrones, “corpúsculos” o cargas eléctricas subatómicas en equilibrio. Thomson se fundamentó en el desarrollo matemático de la electrodinámica de James Maxwell para sustentar su modelo de átomo. (Schwarz, 2013)

Según el modelo, los electrones debían estar repartidos uniformemente a través de una esfera de homogénea de carga positiva inerte y sin masa que le permitía al átomo estar unido y ser neutro. “Thomson only knew the charge-to-mass ratio e/m of the cathode ray electrons and therefore had to assume that the particles were subatomic, with a charge numerically equal to that of the hydrogen ion.” (Kragh, 2012, pág. 8). Sin embargo, siguiendo la electrodinámica Maxwelliana, las configuraciones inestables y en movimiento de los electrones producirían la emisión de radiación electromagnética, lo que resultaría en el colapso del átomo. A pesar de que el átomo de Thomson pudo dar cuenta del comportamiento químico de la materia, poseía limitaciones

conceptuales y seguía sin dar explicación del espectro de líneas emitido por los átomos (Schwarz, 2013)

De manera simultánea hubo varios científicos que propusieron una solución a estas limitaciones planteando el modelo planetario que consistía en un punto central de carga positiva y a su alrededor orbitando los electrones, uno de ellos fue J.W Nicholson cuyo trabajo estudiando las líneas del espectro Solar sirvió como referente para los desarrollos teóricos de Niels Bohr años después (Schwarz, 2013) Pero no fue sino hasta 1911 que el físico Ernest Rutherford, estudiante de J.J Thomson, obtuvo de los ángulos de deflexión de las partículas α (átomo de helio ionizado) que atraviesan una lámina de oro un indicio experimental concluyente de la existencia de un núcleo positivo en el átomo con una masa determinada, “De este modo, si el volumen del núcleo es lo suficientemente pequeño, entonces una partícula alfa que pase cerca de éste debe ser dispersada bajo un ángulo grande debido a la intensa repulsión Coulombiana experimentada” (Muñoz, 2014, pág. 55)

El modelo nuclear planteado por Rutherford correspondía mejor con los datos experimentales, predecía de manera exitosa las propiedades químicas de los elementos, la cantidad de electrones y el peso atómico. Pero, aun si los electrones estuviesen orbitando o en reposo a cierta distancia del núcleo su aceleración los haría perder energía y eventualmente colapsarían con el núcleo, lo que nos lleva a otro problema relacionado con el radio atómico. Además, si esta pérdida de energía cinética se produce de manera periódica e inmediata, el espectro atómico sería de naturaleza continua (Baily, 2013)

Entonces, el modelo presentaba limitaciones de tipo mecánico y electrodinámico a las cuales Niels Bohr en 1913 propuso una solución desde una perspectiva no clásica de la física, “Bohr had applied the work of Max Planck in the context of atoms, to estimate the higher vibrational

frequencies on molecular oxygen (which were not well known at the time).” (Baily, 2013, pág. 46), estaba enfocado en dar explicación al espectro discreto del átomo de Hidrógeno y presentó dos hipótesis concretas frente a estas limitaciones, aceptando la sustentación clásica de la interacción Coulombiana que da estabilidad a los electrones orbitando alrededor del núcleo:

1. La cuantización del momento angular asegura la estabilidad del átomo, pues Bohr asume que la frecuencia de radiación $E = h\nu$ propuesta por Planck es equivalente a la frecuencia de oscilación de las orbitas donde se encuentran los electrones, entendiendo al sistema del átomo como un oscilador armónico y así poder estudiarlo desde el punto de vista mecánico. Bohr describe los orbitales como estados estacionarios de los electrones cuya energía cinética puede relacionarse con su frecuencia angular:

$$E_c = nh \frac{\omega}{2}$$

Donde n es un numero entero, que representa la existencia de una serie de configuraciones estacionarias en las que la energía cinética del electrón toma dicho valor. Posteriormente para dar una generalización de esta hipótesis Bohr explica: en cualquier sistema molecular que consista en un núcleo positivo en reposo y electrones moviéndose en orbitas circulares, el momentum angular de los electrones alrededor del centro de su órbita será $l = \frac{n}{2\pi} h$ en un estado estacionario del sistema. (Bohr & Phil, 1913)

2. La cuantización de la energía irradiada por la transición de un electrón de un estado estacionario a otro resuelve la limitación referente a la emisión y absorción de radiación electromagnética clásica pues Bohr postula que la radiación discreta del átomo se da a partir de la siguiente formula:

$$E_i - E_f = E_{rad} = h\nu_{rad}$$

Donde E_i representa la energía en el nivel energético (estado estacionario) inicial, E_f el nivel energético final. (Alonso & Finn, 1968)

Finalmente, Bohr definió que los fenómenos químicos y espectrales de las sustancias se debían a interacciones de los electrones como lo veremos más adelante y atribuyó a la radiación α y β la inestabilidad del núcleo atómico.

2.1.4. Interacción radiación-materia (espectros de emisión y absorción)

En sus escritos Bohr, acude constantemente al espectro discreto de líneas del átomo de Hidrógeno para ilustrar las consideraciones de su modelo. Pues para la época las líneas de emisión de este espectro habían sido analizadas y estudiadas a fondo por varios científicos. Johann Balmer en 1885 descubrió un conjunto de líneas espectrales emitidas por los átomos de hidrógeno en el espectro visible (Figura 4); Balmer dedujo empíricamente una expresión matemática que relaciona la longitud de onda de estas líneas con un número entero n , que actualmente sabemos que se refiere del nivel energético o número cuántico del electrón (Alonso & Finn, 1968).

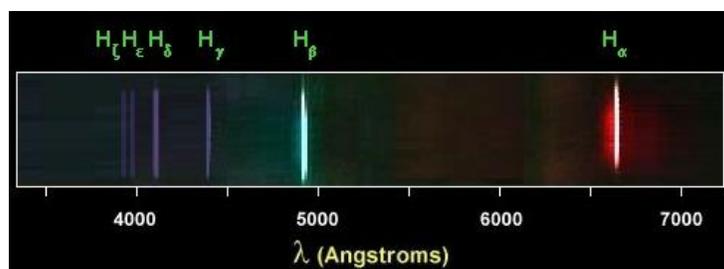


Figura 4. Espectro de emisión del átomo de Hidrógeno, series de Balmer. Tomada de: <https://onx.la/9de03>

En esta ecuación se puede ver que a medida que n aumenta, las longitudes de onda de las líneas de la serie de Balmer también aumentan, las líneas de la serie de Balmer son características de los átomos de hidrógeno y se encuentran en la región del espectro visible y ultravioleta:

$$\lambda = b \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

Donde b es la constante de Balmer que tiene un valor de 364,6 nm, en tanto a las longitudes de onda λ : $n = 3$ corresponde con la línea roja 656,3 nm H_α ; $n = 4$ con la línea verde 486,1 nm H_β ; $n = 5$ con la línea azul 434,1 nm H_γ ; y $n = 6$ con la línea violeta 410,2 nm H_δ . Todas las líneas más allá de H_δ corresponden al rango ultravioleta del espectro o series de Lyman ($n = 1$).

Ahora bien, en busca de una generalización que no solo predijera las líneas del rango visible del átomo de Hidrógeno, sino de otros átomos, el físico sueco Johannes Rydberg en 1888, propuso una ecuación que permite calcular la longitud de onda de cualquier línea en la serie de Rydberg. Esta ecuación establece una relación inversamente proporcional entre la longitud de onda de una línea espectral y un número entero n (número cuántico).

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$$

La constante experimental de Rydberg R_H equivale a $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, valor al que Bohr logró llegar de manera teórica, “Bohr could derive the value of the spectroscopic Rydberg constant from the experimental values of e , m_e , c , h , and ϵ_0 at the level of experimental accuracy.” (Schwarz, 2013, pág. 6). El carácter predictivo y explicativo del modelo atómico de Bohr para las series de Rydberg da cuenta de que el modelo logra dar explicación a los espectros de emisión y absorción, entendiéndolos como el resultado de la interacción entre la radiación electromagnética con el átomo.

Los espectros de emisión se producen cuando un átomo es excitado, el electrón ganará un valor específico de energía que le permite transicionar a un nivel energético más alto y luego emite un fotón (radiación electromagnética) al regresar a su estado fundamental, cuyo valor discreto de energía corresponde a la diferencia de energía entre un nivel y otro, es proporcional a una frecuencia de radiación asociada a una longitud de onda del espectro y por ende a una línea observada en el espectro. Entonces, las líneas de la serie de Rydberg son producidas cuando los electrones saltan desde un estado estacionario más elevado a un nivel energético más bajo en el átomo (Alonso & Finn, 1968).

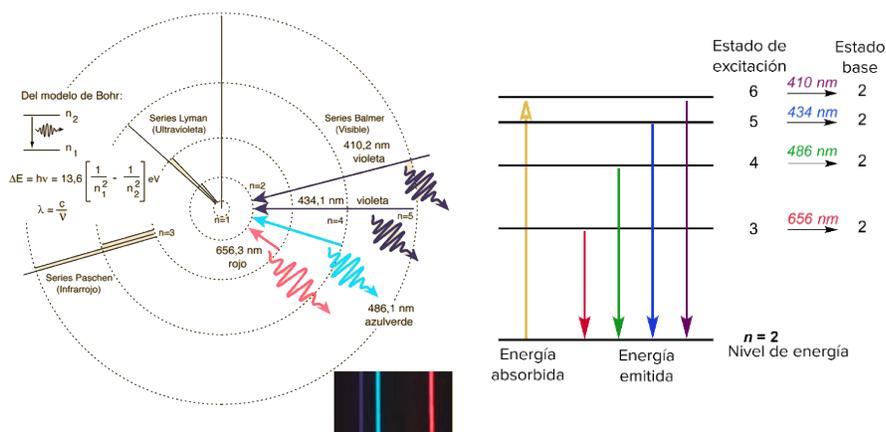


Figura 5. Representación gráfica (no a escala) de la transición de electrones de los niveles mayores de energía n_i al nivel $n = 2$, para λ del visible. Tomado de: <https://onx.la/9de03>

Por otro lado, un espectro de absorción se refiere a las líneas oscuras que se observan en un espectro cuando un átomo absorbe radiación de una fuente externa. El espectro de absorción es el opuesto al espectro de emisión, en el cual las líneas visibles son producidas cuando el átomo emite radiación. En un espectro de absorción, la luz blanca de una fuente incide sobre un gas o un líquido y algunas longitudes de onda son absorbidas por los átomos de ese gas o líquido, produciendo líneas oscuras específicas (Carrol & Ostlie, 2017).

El modelo de Bohr proporcionó una base importante para el desarrollo de la mecánica cuántica y la comprensión de la estructura atómica de la materia, sin embargo, sus limitaciones comenzaron cuando el modelo no lograba predecir el comportamiento de átomos con muchos electrones, pues las configuraciones de estos en los diferentes niveles de energía no eran muy comprensibles, hoy día se le atribuyen muchas más propiedades de tipo cuántico al electrón lo que hace más complejo su comportamiento en el átomo, el principio de Pauli propone que cada electrón en un átomo tiene una propiedad adicional llamada spin, o momento angular intrínseco, además del momento angular orbital, que es una medida de la distribución espacial del electrón en su órbita.

El físico alemán Sommerfeld siguió trabajando de la mano con Bohr para dar solución al problema de los átomos más pesados y años después con el creciente desarrollo de la mecánica cuántica, a la estructura del átomo se agregaron las consideraciones de la dualidad onda partícula de la materia por De Broglie y finalmente, a partir de la función de onda construida por Schrödinger, se plantea un modelo cuántico del átomo, más adecuado.

2.2 EL SOL Y SU ESPECTRO

Retomando la importancia del estudio del Sol en la historia no solo de la espectroscopia sino de la física atómica, pues todos los desarrollos respecto al planteamiento de un modelo atómico se dieron a partir de la observación del espectro del Sol; en el siglo XXI el estudio del espectro solar se ha vuelto cada vez más preciso y detallado.

Los científicos han utilizado diversas técnicas y tecnologías para lograr una mayor comprensión de la dinámica de este astro. En 1960 se lanzó el primer satélite espectroscópico, el Skylab, que sirvió para estudiar el espectro del Sol desde el espacio. En los años siguientes, se lanzaron varios satélites y telescopios, como el Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) y el Solar

Dynamics Observatory (SDO), que han permitido analizar el espectro solar en diferentes longitudes de onda y partes de la atmósfera solar.

Los estudios del espectro de las estrellas han derivado en un avance en el conocimiento de la física y la química de la atmósfera solar, el ciclo de vida de las estrellas y la evolución del universo. También ha sido una herramienta valiosa para predecir y entender los fenómenos solares, como las tormentas y las eyecciones solares, que pueden afectar a la vida y la tecnología en la Tierra. (Carrol & Ostlie , 2017)

2.2.1 Clasificación de las estrellas según su tipo espectral

La clasificación espectral de Harvard publicada entre 1918 y 1924, fue un trabajo en conjunto de las astrónomas W. Fleming, A. Cannon y A. Maury llamado “Henry Draper Catalog”. Para la clasificación se tienen en cuenta características como la intensidad de las líneas de Hidrógeno más prominentes en los espectros de absorción de las estrellas y se designan las letras en el orden “O B A F G K M”. La temperatura efectiva de la estrella es un factor determinante para deducir el tipo espectral, donde las estrellas O son las más calientes y las M, las más frías. Además, se da una subdivisión espectral del 0 al 9, siendo 9 la etapa evolutiva más avanzada de una estrella. Finalmente, según su luminosidad o magnitud absoluta se establece los números romanos del I hasta el V, de la más luminosa a la menos luminosa, el Sol es una estrella tipo G2V según esta denominación. El estudio de todas estas características nos ayuda a entender y organizar a las estrellas según el estado evolutivo en que se encuentran.

2.2.2 Evolución estelar y el diagrama de Hertzsprung-Russell (HR)

La formación de una estrella es un proceso complejo que comienza con la acumulación de gas y polvo en una nube interestelar, también conocida como nube molecular, es un lugar donde la densidad de varios cientos de miles de partículas por centímetro cúbico y la temperatura son suficientemente altas para que el gas y el polvo se condensen, se agrupen y vayan aumentando de tamaño hasta formar núcleos de condensación (protoestrella) que se contraen bajo la influencia de su propia gravedad. (Gray , 2005)

Una vez que un núcleo de condensación alcanza las masas solares suficientes, comienza a atraer más gas y polvo hacia sí mismo y a medida que el núcleo se hace más masivo, aumenta la densidad y temperatura en su interior. El calor generado por la compresión del gas y el polvo hace que los átomos de hidrógeno en el núcleo se ionicen y comiencen a colisionar con suficiente energía para iniciar la fusión nuclear “el proceso principal que genera energía en el Sol consiste en la colisión de dos protones muy rápidos, dando lugar a un átomo de deuterio, un positrón y liberando un neutrino” (Vázquez, 2004).



Luego, la fusión nuclear de Hidrógeno en Helio libera una gran cantidad de energía (radiación γ) y el radio de la estrella joven aumenta, lo que permite que se formen capas más externas de menor temperatura llegando al equilibrio hidrostático.



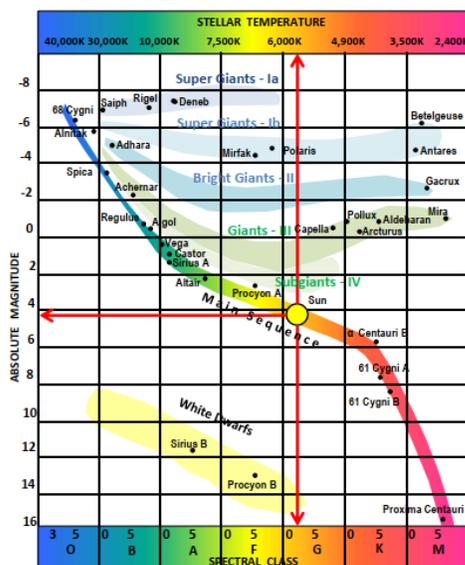


Figura 6. Diagrama Hertzsprung-Russell para clasificación de las estrellas según su tipo espectral. Gray, D.2005

La estrella continúa fusionando grandes cantidades de Hidrógeno en Helio en su núcleo cada segundo y emite una gran cantidad de energía (aprox. $6,4 \times 10^{11} J$) en forma de luz y calor por millones de años. Conforme la estrella envejece, su combustible se agota y su estructura comienza a cambiar dependiendo de su masa puede convertirse en una enana blanca, como es el caso del Sol, una estrella gigante roja o incluso en una supernova.

El diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) es una herramienta utilizada para representar el estado evolutivo de las estrellas. Fue desarrollado independientemente por los astrónomos daneses Ejnar Hertzsprung y Henry Norris Russell en la primera década del siglo XX.

Este diagrama representa la relación entre la luminosidad, relacionada con la magnitud absoluta, de una estrella y su temperatura efectiva (o tipo espectral). La luminosidad se representa en el eje y, y la temperatura superficial en el eje x. El resultado es una gráfica en la que las estrellas se distribuyen de forma característica según su tipo espectral y su luminosidad. (Gray, 2005)

$$L = (4\pi R_e^2)\sigma T_e^4$$

Esta ecuación para la luminosidad L se refiere al flujo o cantidad de radiación emitida por unidad de superficie de la estrella, donde R_e representa el radio de la estrella, T_e su temperatura efectiva y σ la constante de Stefan-Boltzmann. En el diagrama HR, se pueden distinguir varias zonas, cada una correspondiente a una etapa particular en la evolución de las estrellas:

- La secuencia principal es la zona principal en la que se encuentran las estrellas jóvenes y en las que se encuentra el Sol. Estas estrellas están en la etapa de fusión de hidrógeno en helio se mantienen en equilibrio por mucho tiempo.
- La secuencia de gigantes está formada por estrellas con una temperatura superficial menor que las estrellas de la secuencia principal, pero con una luminosidad mayor. Estas estrellas se encuentran en la etapa en la que el hidrógeno se está agotando en su núcleo, fusionando elementos más pesados.
- La secuencia de enanas blancas es una línea vertical formada por estrellas con una alta temperatura superficial, pero con una baja luminosidad. Estas estrellas suelen ser los remanentes de la muerte de una estrella como el Sol.

Haciendo referencia a la relación de proporcionalidad entre la temperatura y la frecuencia de radiación sugerida de la explicación de la radiación de cuerpo negro, propuesta por Planck, los índices de color de las estrellas respecto a su temperatura tienen correspondencia con este principio, por lo que las estrellas que tienen su pico de radiación en longitudes de onda del azul tienen mayor temperatura efectiva que las que tienen su pico de radiación en longitudes de onda largas (rojo). (Walker, 2012)

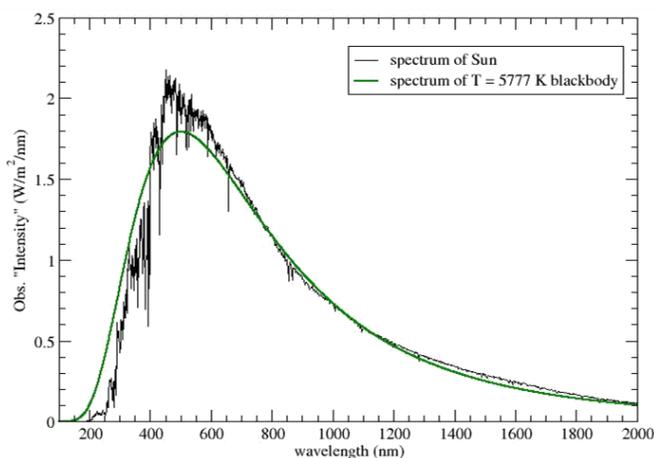


Figura 7. Espectro del Sol graficado en línea negra, y la curva de un cuerpo negro a aproximadamente 5700 grados Kelvin corresponde a la línea color verde. Tomado de: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/calor/radiacion/radiacion.html>

2.2.3 La atmosfera del Sol y la radiación solar

La estructura interna del Sol se divide en varias capas, cada una con características físicas y químicas distintas. El núcleo es la capa más interna del Sol y es donde se lleva a cabo la fusión nuclear. La temperatura en el núcleo es de alrededor de 15 millones de grados Celsius y es responsable de generar la mayor parte de la energía que se libera en el Sol. (Vázquez, 2004)

La zona radiativa es donde la energía generada en el núcleo se propaga hacia la superficie. La temperatura en esta capa es de alrededor de 2 millones de grados Celsius y la zona convectiva es donde se lleva a cabo la convección, es decir, el movimiento del gas debido a la diferencia de densidades y la temperatura en esta capa es de alrededor de 1 millón de grados Celsius.

Las capas más exteriores del Sol son la cromósfera, donde se originan las protuberancias y las erupciones solares, la temperatura en esta capa es de alrededor de 20,000 grados Celsius. La corona es la capa más externa, allí se producen el viento solar y las auroras. Entre estas capas y la zona convectiva se encuentra ubicada la fotosfera, que es la capa visible de la superficie del Sol, está compuesta por gas y plasma y es donde se generan las manchas solares; la temperatura en esta capa es de alrededor de 5600 grados Celsius.

La radiación proveniente de la zona radiativa de la estrella atraviesa la zona convectiva (corrientes convectivas de gas) e incide en los átomos neutros o ionizados de la fotosfera, estos absorben esta radiación produciendo el espectro de absorción que obtenemos con nuestros instrumentos. Además, al ser la capa visible de la superficie la temperatura efectiva del sol será igual a la temperatura de esta, “For an observer of stellar atmospheres, one concept is very important: the major portion of the visible stellar spectrum originates in the region marked “photosphere”.” (Gray , 2005).

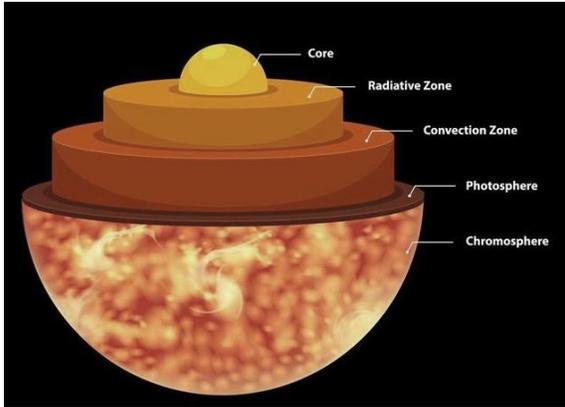


Figura 8. Capas internas del Sol

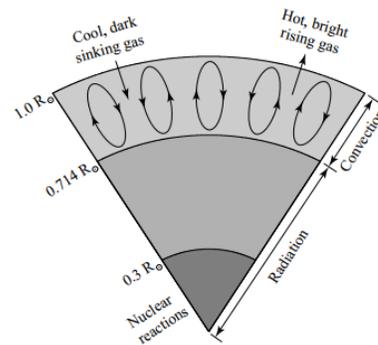


Figura 9. Diagrama del interior del Sol.
Carrol, B. Ostlie, D.2017

El Sol emite radiación electromagnética en una amplia gama de longitudes de onda del espectro electromagnético, desde rayos gamma y rayos X (menos de 0.01 micrómetros), ultravioleta (de 0.01 a 0.4 micrómetros), visible (de 0.4 a 0.7 micrómetros), infrarrojo (de 0.7 a 1 millón de micrómetros) y microondas (de 1 millón a 1 billardos de micrómetros). La mayor parte de la radiación que recibimos de la Tierra es en el rango de longitudes de onda visible, es decir, luz blanca.

Cada longitud de onda tiene una función específica en el estudio del sol, el ultravioleta y la luz visible son utilizadas para estudiar la estructura y dinámica de la fotosfera, y aunque el índice de color en las longitudes de onda del visible del sol de acuerdo con su temperatura está en la gama del rojo, existen herramientas que nos permiten visualizar la radiación de los rangos no visibles provenientes del Sol, como se observa en la ilustración 11.

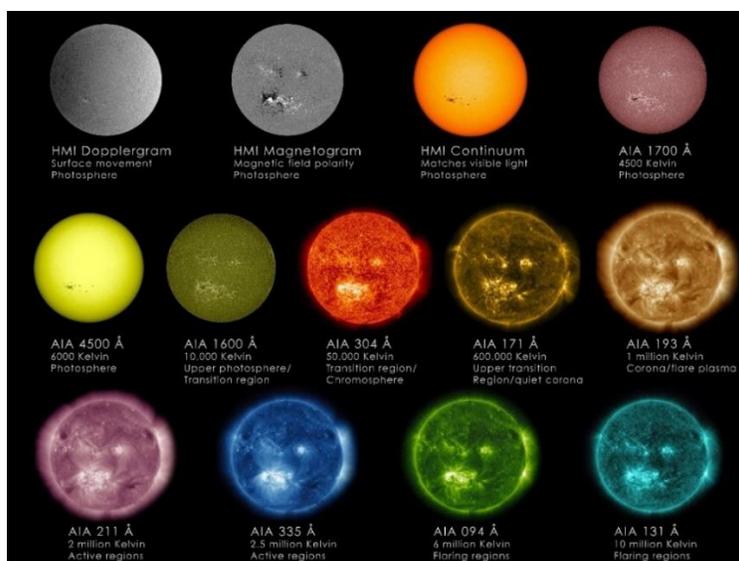


Figura 10. El Sol en diferentes longitudes de onda. Tomada de: NASA/SDO/Centro de Vuelo Espacial Goddard

2.2.4 Identificación y caracterización de las líneas de Hidrógeno del espectro del sol

El análisis del espectro de absorción del Sol se refiere al estudio de las líneas oscuras o "líneas de Fraunhofer" que aparecen en el espectro solar. A través del análisis de estas líneas, es posible determinar la composición química de la atmósfera solar y obtener información sobre su estructura y dinámica. Se obtiene a través del uso de un espectrógrafo, que es un instrumento que junto con una cámara se instalan en el telescopio y logra dispersar la luz proveniente del astro en sus diferentes longitudes de onda, debe ubicarse de manera que la luz que llega al telescopio sea direccionada hacia una apertura llegando a un colimador que redireccionara los rayos para que estos atraviesen la rejilla encargada de la dispersión y posteriormente con ayuda de una cámara CCD que consta de una placa de silicio cuyo principio de funcionamiento deriva del efecto fotoeléctrico, la radiación que llega a la placa interviene con los electrones y su posicionamiento genera la imagen. (Oostra & Ramírez, 2011)

Para obtener el espectro solar, se coloca este instrumento en el telescopio y con el Sol en su punto de máxima brillantez se toma una exposición lo suficientemente larga para obtener un

espectro de alta resolución. Una vez obtenido el espectro, este se analiza en busca de líneas de absorción, que son las bandas oscuras ubicadas en diferentes longitudes de onda que aparecen en el espectro y así iniciar la búsqueda de las bandas correspondientes al elemento Hidrógeno H_α , H_β , H_γ y H_δ .



Figura 11. Espectro de absorción del Sol.

Los perfiles espectrales son una representación gráfica del flujo o la intensidad de la luz que llega de la tierra a nuestros telescopios en función de la longitud de onda y resultan de la reducción de estos haciendo uso de un software de procesamiento (ISIS, IRAF, etc) para los datos obtenidos con el espectrógrafo, desde aquí serán analizadas las profundidades y anchuras de las distintas distribuciones gaussianas que representan cada línea del espectro.

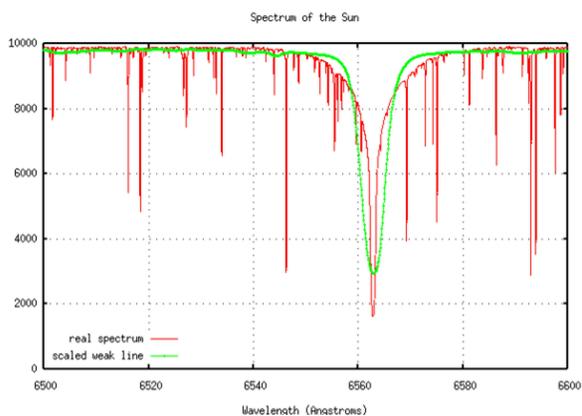


Figura 12. Perfil espectral del Sol en un rango específico de longitudes de onda. Tomado de <https://www.eso.org/sci/observing/tools/uvespop/interface.html>

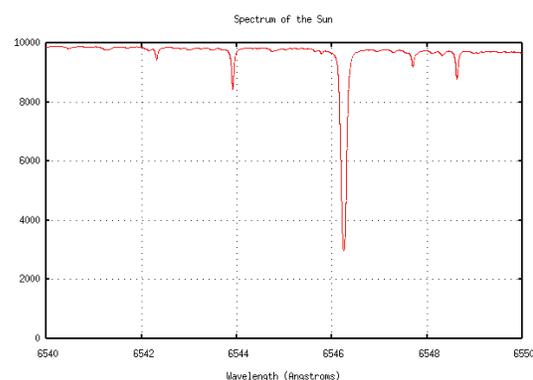


Figura 13. Perfil espectral del Sol aumentado, ensanchamiento de línea espectral. Tomado de <https://www.eso.org/sci/observing/tools/uvespop/interface.html>

La profundidad de la línea da cuenta de un pico de flujo luminoso en ciertas longitudes de onda, es decir una línea del espectro. Ahora bien, el ensanchamiento de la línea depende de tres variables importantes, la abundancia o profundidad en la fotosfera de los átomos o iones absorbentes, las variaciones de presión debidas a la dinámica atmosférica y la temperatura,

“Temperature is the variable that most strongly controls the line strength. This sensitivity arises from the exponential and power dependences with T in the excitation-ionization processes.”

(Gray , 2005, pág. 316).

Teniendo en cuenta lo anterior, la temperatura, densidad de la atmosfera y la velocidad radial de la estrella podrán ser calculados a partir del ensanchamiento de la línea espectral. En el análisis de los datos es crucial tener en cuenta el ruido de la imagen proveniente de la misma estrella, los ruidos ocasionados por los instrumentos de medición y por las condiciones de la atmosfera terrestre.

CAPÍTULO III

3.1 METODOLOGÍA

La IBD (Investigación basada en el diseño), se propone como una herramienta metodológica que busca mejorar el quehacer docente y su investigación sobre el contexto en que se desempeña. La metodología IBD pone como pilar que, la investigación debe estar situada en un “contexto educativo real” para asegurar su validez y que en consecuencia pueda ser evaluada su efectividad. Por lo que permite el trabajo colaborativo entre docentes investigadores y docentes en la práctica, dando la oportunidad a estos últimos de evaluar y discriminar por sí mismos los elementos de estas investigaciones.

La IBD se caracteriza por ser iterativa, algo que Anderson y Shattuck (2012) exponen como “Investigando a través de los errores” entendiend que ninguna intervención significativa basada en esta metodología, es diseñada e implementada de manera absoluta. Por tanto, debe someterse a constantes modificaciones para garantizar su mejoramiento. Este tipo de

metodologías se enmarca en una investigación mixta que consta de componentes cualitativos y cuantitativos para su desarrollo.

Uno de los instrumentos utilizados para ejecutar la metodología IBD son las secuencias de enseñanza-aprendizaje (SEA) que Guisasola, Ametller, y Zuza, (2021) señalan que Incluye actividades de enseñanza- aprendizaje bien investigadas y adaptadas empíricamente al razonamiento del estudiante. A veces, también se incluyen pautas de enseñanza que cubren las reacciones esperadas de los estudiantes. Teniendo en cuenta lo anterior, el diseño de una SEA representa un proceso investigativo donde la creación de cada actividad se realiza de acuerdo con las demandas de aprendizaje identificadas en el aula.

En el campo de la enseñanza de las ciencias Guisasola, Ametller, y Zuza (2021) hacen una revisión de la literatura relacionada con el diseño y evaluación de las SEA como instrumento de la metodología IBD, y proponen unas fases metodológicas. De la caracterización de estas fases y haciendo una adaptación de las necesidades investigativas de este trabajo, se plantea el esquema mostrado en la figura 14

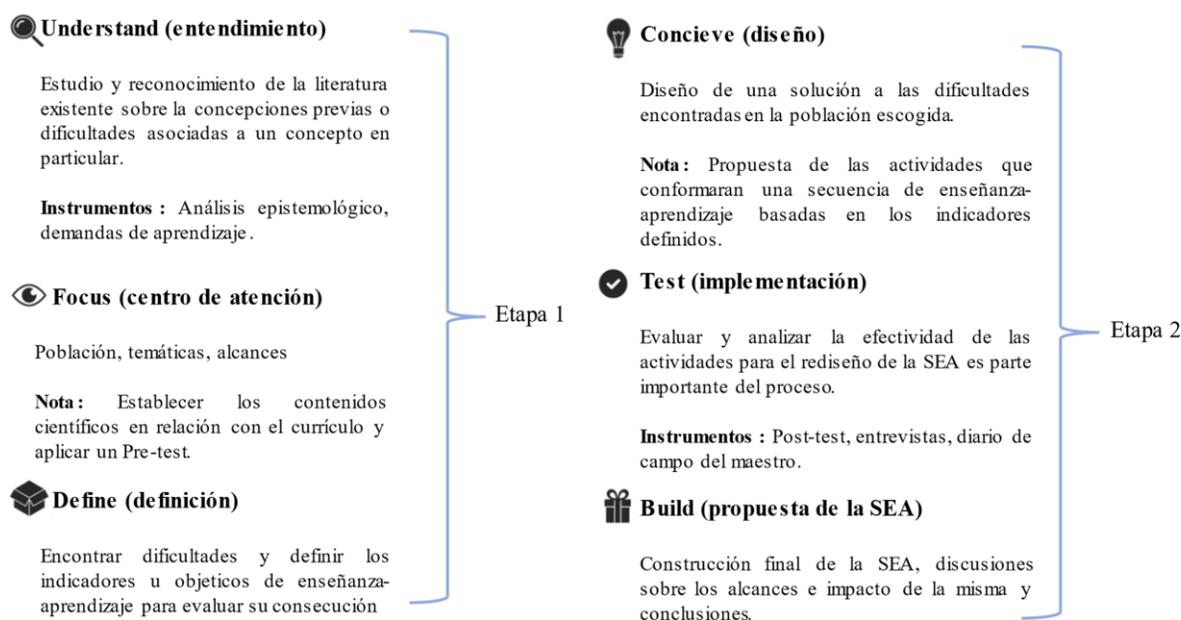


Figura 14. Esquema de las etapas y fases de la metodología adaptado de (Guisasola, Ametller, & Zuza, 2021)

En la etapa 1 (Understand) están incluidos el planteamiento del problema y la búsqueda de estudios y antecedentes enfocados en la identificación de demandas de enseñanza-aprendizaje del modelo atómico de Bohr, presentados en el capítulo I, como herramienta para comprender los aspectos de la física que involucran las preguntas sobre la estructura de la materia en educación media.

La población objetivo de este estudio fueron 20 estudiantes de grado decimo del Colegio Nuevo Gimnasio en el norte de la ciudad de Bogotá, una institución educativa privada enfocada en un modelo pedagógico basado en cuatro niveles de aprendizaje repartidos desde el grado transición y primero de primaria hasta once de bachillerato, el área de ciencias naturales está dividido en tres asignaturas (física, química y biología) acompañadas de proyectos ambientales, incluidas en el currículo desde primaria. Respecto a los conceptos relacionados con el estudio de la estructura interna de la materia, la población de estudiantes para grado decimo ya habían abordado los modelos atómicos, en la asignatura de química, termodinámica, ondas y una instrucción a electricidad y magnetismo en los contenidos de física.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantean cuatro ejes temáticos a través de los cuales se espera llegar a los contenidos científicos puntuales y conceptos clave (indicadores de enseñanza-aprendizaje) en los que se basara la SEA:

- La radiación electromagnética
- La estructura interna de la materia: el modelo atómico de Bohr
- La interacción radiación-materia
- El Sol y sus características espectrales

A partir de estos ejes temáticos se desarrolla un análisis epistemológico (expuesto en el capítulo II) que para metodología IBD consiste en una herramienta que permite proponer una sucesión de

conceptos y su influencia en las teorías científicas articulados para dar razón de un enfoque específico, las dificultades de aprendizaje presentadas por los estudiantes, pues hacer el análisis epistemológico “considera la estructura interna del dominio científico elegido para justificar una propuesta para la construcción de ese conocimiento en un entorno educativo específico. El resultado es un conjunto de ideas clave que deben ser articuladas para enseñar a los estudiantes” (Guisasola, Ametller, & Zuza, 2021, pág. 9)

De la misma manera, estos ejes temáticos sirvieron de guía para formular las preguntas de un Pre-test (ver Anexo 2), como se ve en la tabla 1, y así confirmar las posibles dificultades que presenta la población de estudiantes. Cabe aclarar que las preguntas en el Pre-test también están guiadas por las temáticas vistas por los estudiantes e incluidas en el currículo de la institución en asignaturas como química y física.

El Pre-test fue aplicado con el fin de analizar si los estudiantes reconocen las implicaciones físicas del modelo atómico de Bohr y construyen explicaciones relacionadas con la estructura atómica e ionización de los gases. Además, identificar si logran describir los elementos ópticos que permiten la formación de espectros y sus posibles causas.

Tabla 1. Preguntas del Pre-test en relación con los ejes temáticos planteados

Eje temático	Pregunta del Pre-test
La radiación electromagnética	¿Qué puede estar ocurriendo con el gas dentro del tubo para que este brille?
La estructura interna de la materia: el modelo atómico de Bohr	¿De qué están compuestos los gases como el Hidrogeno? ¿En qué consiste cada uno de los modelos (de Bohr y Rutherford)? indica sus diferencias.
La interacción radiación-materia	¿Cuáles fueron las limitaciones del modelo de Rutherford al intentar describir la estructura del átomo?

	<p>El montaje experimental consiste en una fuente de luz blanca bombilla, una rendija con una sola hendidura de ancho ajustable, un prisma de vidrio y una pantalla. Si encendemos la fuente de luz blanca o ponemos un tubo con gas de Hidrógeno ¿Qué tipo de espectro vería en la pantalla?</p>
--	---

Para análisis de Pre-test se establecieron tres categorías como criterios para la valoración de las respuestas de cada pregunta de manera individual, calculando el número de respuestas clasificadas en cada categoría respecto al total de respuestas (20):

- Categoría A: El estudiante logra dar una descripción y/o explicación muy completa del fenómeno o hecho en cuestión.
- Categoría B: El estudiante logra dar una descripción parcialmente completa del fenómeno o hecho en cuestión, dejando de lado aspectos matemáticos y/o conceptos importantes para la explicación.
- Categoría C: El estudiante logra relacionar conceptos relevantes para reconocer el fenómeno, sin embargo, tiene dificultades estructurando una descripción y/o explicación que dé cuenta de este.

Se encontró que el 90% de los estudiantes no asocian el brillo o luminiscencia del tubo de gas con fenómenos relacionados con la luz, pues cuestiones sobre el fotón o las longitudes de onda del color observado no son mencionadas en sus explicaciones.

Por otro lado, un 75% de los estudiantes no especifica cuáles son los elementos (electrón, protón) que estructuran el átomo de Hidrógeno en particular, el 90% puede dar descripciones de lo que representa agregar energía a los átomos de manera macroscópica (velocidades y colisiones) pero no logran formular explicaciones a nivel atómico. Aunque mencionan la existencia de niveles de

energía en el modelo de Bohr, no establecen la relación de estos con el comportamiento orbital de los electrones ni con la cuantización de este.

Además, en lo que respecta a la explicación y diferenciación de los espectros atómicos, el 90% de los estudiantes describe las causas de la luminiscencia del gas de Hidrógeno a partir de propiedades o fenómenos químicos y tan solo el 15% logran diferenciar las fuentes que producen un espectro continuo y uno discreto de líneas.

A partir de las dificultades encontradas de la aplicación del Pre-test y del análisis epistemológico-basados en los ejes temáticos propuestos se definen los siguientes indicadores de enseñanza-aprendizaje:

La radiación electromagnética:

- I. La luz es radiación electromagnética con características de onda y partícula que puede propagarse en diferentes direcciones y con una velocidad específica c en el vacío, compuesta de fotones cuya energía es proporcional a la frecuencia de radiación.
- II. La manera en que un cuerpo emite energía está dada por una función que relaciona la frecuencia de radiación del cuerpo con su temperatura

La estructura interna de la materia: el modelo atómico de Bohr

- III. Los átomos solo se pueden encontrar en estados estacionarios, caracterizados por valores discretos de energía. Cualquier cambio de energía implica la transición del átomo de un estado estacionario a otro. (Torregrosa, Savall, Domènech, Rey, & Rosa, 2016)

La interacción radiación-materia

- IV. Cuando un átomo es excitado, el electrón pasa de un nivel de energía menor a uno mayor. El electrón regresa su nivel anterior de energía y se emite radiación electromagnética (un fotón).
- V. Un espectro de emisión se produce a partir de la excitación de los átomos de un gas y el de absorción se produce porque el átomo absorbe radiación electromagnética de una fuente externa.

3.2 ACTIVIDADES PROPUESTAS PARA LA SEA

El eje temático relacionado con la caracterización cualitativa del Sol y el estudio de su espectro de absorción, desarrollado en el capítulo II, se presenta como herramienta de contextualización para llegar a cada indicador de enseñanza-aprendizaje establecido, se diseñaron cinco actividades que componen la SEA articuladas en una guía (ver Anexo 4) repartidas en 5 sesiones de clase con una duración aproximada de 90 minutos cada una. El diseño de cada sesión se basa en el siguiente esquema:

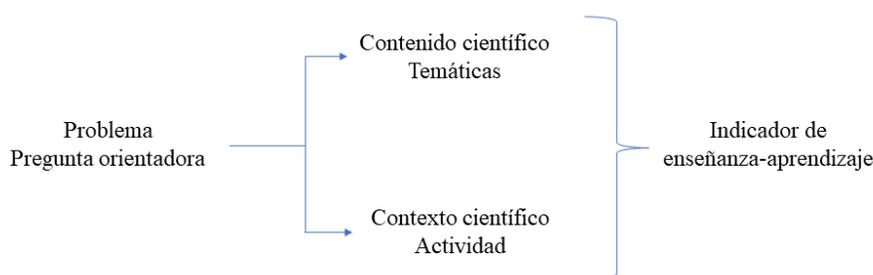


Figura 15. Esquema para el diseño de la SEA. Elaboración propia

Las sesiones están planteadas de manera que cada una de estas corresponde a un indicador de enseñanza-aprendizaje y, además, están guiadas por una pregunta problema orientadora relacionada con la descripción cualitativa de parámetros estelares del Sol (ver Tabla 2). Para la

metodología DBR estas preguntas o “indagaciones orientadas” propician un escenario que “propone una estructura didáctica basada en que los estudiantes construyan sus conocimientos como resultado de las indagaciones que realizan para resolver problemas planteados por el profesorado” (Guisasola, et al, 2021, pág. 3). Es por esto que, la resolución de estas preguntas consta de la explicación de unas temáticas (contenido científico) y la realización de unas actividades (contexto científico) necesarias para abarcar el indicador de enseñanza-aprendizaje tratado.

Tabla 2. Secuencia de enseñanza-aprendizaje titulada: ¿Qué tipo de estrella es nuestro Sol?

Pregunta orientadora	Temáticas	Actividad	Indicador de enseñanza-aprendizaje
¿De qué color es el sol?	La luz. Radiación electromagnética. El espectro electromagnético.	<p>Los colores del Sol</p> <p>La actividad consiste en tomar varios acetatos o filtros de color (rojo, azul, amarillo), mirar a través de ellos una imagen del Sol en el rango del espectro visible. Haciendo una analogía de los filtros que son adaptados a los telescopios para ver la radiación solar en diferentes longitudes de onda.</p>	La luz es radiación electromagnética con características de onda y partícula que puede propagarse en diferentes direcciones y con una velocidad específica c en el vacío, compuesta de fotones cuya energía es proporcional a la frecuencia de radiación.
¿Cuáles estrellas están más calientes, las azules o las amarillas?	Radiación de cuerpo negro. Constante de Planck.	<p>La constante que revolucionó el mundo atómico</p> <p>Esta actividad demostrativa consiste en mostrarles a los estudiantes en el laboratorio cómo a medida que es calentado un metal este va cambiando a rojo y luego cerca de su temperatura de fundición a amarillo casi blanco.</p> <p>Luego de la explicación se proyecta la imagen de un cúmulo de estrellas y se les pide que señalen una estrella caliente y una fría, finalmente se les muestra las distribuciones de cuerpo negro de varias estrellas con el pico de radiación en</p>	La manera en que un cuerpo emite energía está dada por una función que relaciona la frecuencia de radiación del cuerpo con su temperatura.

		diferentes longitudes de onda y se les pide que solo viendo la gráfica indiquen de qué color es la estrella usando la función de radiación de cuerpo negro.	
¿El sol es un cuerpo negro ideal?	Dispersión y difracción de la luz. Espectro de emisión y absorción y su obtención.	<p>Experiencia de laboratorio: Los espectros atómicos</p> <p>Para esta actividad se dispuso del material de laboratorio del colegio que consistía en tubos de gas de Hidrógeno y Helio, fuentes de alto voltaje y rejillas de difracción dispuestos en un montaje descrito en la guía (ver anexo 4). Los estudiantes debían tomar medidas de las distancias de las líneas prominentes del espectro para calcular las longitudes de onda de cada color identificado en el espectro.</p>	Un espectro de emisión se produce a partir de la excitación de los átomos de un gas y el de absorción se produce porque el átomo absorbe radiación electromagnética de una fuente externa.
¿Cuáles son las causas de los espectros discretos de las estrellas y los elementos químicos?	Modelo atómico de Bohr.	<p>El enigma de los espectros discretos</p> <p>Para la segunda parte del laboratorio, con los datos de longitud de onda encontrados los estudiantes deben encontrar la energía del fotón emitido para cada longitud de onda y haciendo uso del modelo propuesto por Bohr se les pide que representen gráficamente que transición del electrón entre los niveles de energía corresponde con cada línea.</p>	Los átomos solo se pueden encontrar en estados estacionarios, caracterizados por valores discretos de energía. Cualquier cambio de energía implica la transición del átomo de un estado estacionario a otro.
¿De qué está compuesto el Sol?	Evolución estelar. Atmosfera del Sol. Espectro del Sol	<p>Analizando el espectro del Sol</p> <p>La actividad consiste en hacer una descripción y comparación cualitativa del espectro de emisión del Hidrógeno y Helio que los estudiantes encontraron en el laboratorio y el espectro real del Sol, luego deben identificar a partir de las longitudes de onda las líneas del espectro del Hidrógeno en el del Sol.</p>	Cuando un átomo es excitado, el electrón pasa de un nivel de energía menor a uno mayor. El electrón regresa su nivel anterior de energía y se emite radiación electromagnética (un fotón).

CAPÍTULO IV

4.1 EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD E IMPACTO DE LA PROPUESTA DE SEA

Para poder evaluar la efectividad e impacto de las actividades propuestas en la población de estudiantes escogida, fue necesario diseñar y aplicar un Post-test (ver Anexo 3) que no fuera muy diferente del Pre-test realizado en primer lugar. Cabe destacar que cada pregunta tanto del Pre-test como del Post-test tiene asociado un indicador de enseñanza-aprendizaje bajo el cual puede ser analizada.

Se establecieron las mismas tres categorías del Pre-test como criterios para la valoración de las respuestas del Post-test:

- Categoría A: El estudiante logra dar una descripción y/o explicación muy completa del fenómeno o hecho en cuestión.
- Categoría B: El estudiante logra dar una descripción parcialmente completa del fenómeno o hecho en cuestión, dejando de lado aspectos matemáticos y/o conceptos importantes para la explicación.
- Categoría C: El estudiante logra relacionar conceptos relevantes para reconocer el fenómeno, sin embargo, tiene dificultades estructurando una descripción y/o explicación que dé cuenta de este.

4.1.1 Análisis de resultados del Post-test

Las respuestas y sus porcentajes de clasificación en cada categoría se presentan como una generalización de las descripciones y explicaciones a partir de los puntos en común de cada grupo de respuestas, esto se ve reflejado en el análisis que se muestra a continuación:

Indicador de aprendizaje I: La luz es radiación electromagnética con características de onda y partícula que puede propagarse en diferentes direcciones y con una velocidad específica c en el vacío, compuesta de fotones cuya energía es proporcional a la frecuencia de radiación.

Para este indicador se estructuraron dos preguntas relacionadas con la radiación solar y con el brillo del gas dentro del tubo (ver Anexo 3). De la pregunta 1 relacionada con la radiación solar puede identificarse que la mayoría de los estudiantes comprende que la luz o radiación electromagnética tiene asociada una longitud de onda, sin embargo, tan solo el 40% de la categoría A tiene presente la que existe una ecuación relacionada con este comportamiento ondulatorio de la luz.

Pregunta 1. ¿Qué tipo de radiación emite el Sol? ¿Por qué es necesario colocar filtros en los telescopios con los que lo vemos de distintos “colores”?	
Categoría A: El Sol emite radiación en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, así que deben usarse los filtros para poder observarlo en longitudes de onda fuera del espectro visible.	40%
Categoría B: El Sol emite radiación en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, así que deben usarse los filtros para poder observarlo.	35%
Categoría C: El Sol emite radiación en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (ultravioleta, infrarrojo y visible)	25%

Las repuestas para la pregunta 2 denotan que alrededor de un 80% de los estudiantes puede dar explicación al fenómeno de ionización de los gases siendo la mayoría de estas explicaciones abordadas desde el comportamiento atómico del gas.

Pregunta 2. ¿Qué puede estar ocurriendo con el gas dentro del tubo para que este brille?	
Categoría A: Al agregar energía a los átomos que componen el gas, estos sufrirán una excitación, los electrones harán transiciones entre niveles de energía o se desprenderán del átomo.	50%
Categoría B: Al agregar energía a los átomos que componen el gas, estos sufrirán una excitación	30%
Categoría C: Los átomos se sobrecargan de energía y reaccionan.	20%

Indicador de aprendizaje II: La manera en que un cuerpo emite energía está por una función que relacione la frecuencia de radiación del cuerpo con su temperatura. Al indicador de aprendizaje II se le fue asignada solo la pregunta 5 relacionada con el color de las estrellas:

Pregunta 5. ¿Cómo podemos obtener información sobre la temperatura de una estrella a partir de su color? ¿Qué constante matemática ayudó a solucionar este enigma?	
Categoría A: La longitud de onda de radiación de un objeto depende de su temperatura, y es inversamente proporcional a esta, por lo que las estrellas azules o blancas serán estrellas más calientes que las de colores amarillos y rojizos. El enigma sobre la radiación de cuerpo negro fue resuelto gracias a la constante de Planck.	40%
Categoría B: La longitud de onda de radiación de un objeto depende de su temperatura, por lo que las estrellas azules o blancas serán estrellas más calientes que las de colores amarillos y rojizos.	35%
Categoría C: Las estrellas azules o blancas son estrellas más calientes que las de colores amarillos y rojos.	25%

Aunque todos los estudiantes comprenden que el color de la estrella está relacionado con su temperatura, solo el 40% logró ir más allá y estructurar una explicación más detallada sobre esta idea.

Indicador de aprendizaje III: Los átomos solo se pueden encontrar en estados estacionarios, caracterizados por valores discretos de energía. Cualquier cambio de energía implica la transición del átomo de un estado estacionario a otro.

Indicador de aprendizaje IV: Cuando un átomo es excitado, el electrón pasa de un nivel de energía menor a uno mayor. El electrón regresa su nivel anterior de energía y se emite radiación electromagnética (un fotón).

Los indicadores de aprendizaje III y IV fueron incluidos en la pregunta 4 que intentaba probar la habilidad que tiene los estudiantes para usar el modelo de Bohr en la explicación de fenómenos como el espectro de emisión del Hidrógeno:

Pregunta 4. ¿Cómo podrías explicar los espectros de emisión observados en el laboratorio, usando el modelo de átomo propuesto por Bohr en 1913?	
Categoría A: Un espectro de emisión se produce si al agregar una cantidad específica de energía a los electrones de un átomo del gas, estos transicionan de un nivel de energía menor a uno mayor, eventualmente el electrón retornará a su nivel de energía permitido y se emitirá un fotón con frecuencia de radiación correspondiente a una línea de color observada en el espectro.	45%
Categoría B: Un espectro se produce si al agregar energía a los electrones de un átomo del gas, estos transicionan entre los niveles de energía y se emitirá un fotón de un color específico.	35%
Categoría C: El modelo de Bohr propone que el átomo está compuesto por un núcleo y 7 orbitales o niveles de energía a su alrededor donde se encuentran los electrones, los niveles más cerca del núcleo poseen menos energía.	20%

Las respuestas conducen a que un 80% logra dar explicación desde el comportamiento del átomo que compone el gas dentro del tubo a fenómenos macroscópicos como un espectro de emisión, dando detalles sobre el modelo de Bohr, el 20% restante solo se limitó a explicar el modelo.

Indicador de aprendizaje V: Un espectro de emisión se produce a partir de la excitación de los átomos de un gas y el de absorción se produce porque el átomo absorbe radiación electromagnética de una fuente externa. La pregunta 3 con respecto al indicador de aprendizaje V iba enfocada en reconocer si los estudiantes identifican las fuentes de radiación que producen espectros continuos, emisión y absorción. Se encuentra que hay un 15% de la población que no logra diferenciar los tipos de espectros, y solo el 25% diferencia entre la fuente de un espectro continuo y uno discreto.

Pregunta 3. Dependiendo de la disposición de los siguientes montajes uno cada uno con el tipo de espectro resultante: (ver Anexo 3)	
Categoría A: El estudiante identifica que una fuente de luz blanca o incandescente corresponde con un espectro continuo, una fuente de luz emitida por un gas que brilla corresponde con un espectro de emisión y una fuente de luz pasando a través de un gas corresponde con un espectro de absorción.	60%
Categoría B: El estudiante identifica que una fuente de luz blanca o incandescente corresponde con un espectro continuo y una fuente de luz proveniente de un gas corresponde con un espectro discreto.	25%
Categoría C: El estudiante no logra identificar a que fuente de luz corresponde cada	15%

tipo de espectro.	
-------------------	--

Aunque la pregunta 6 no iba encaminada a ningún indicador de aprendizaje, resulta interesante reconocer la relevancia que tuvo el estudio cualitativo del Sol y su espectro en el entendimiento de los estudiantes sobre la estructura interna de la materia. Brindando una contextualización sobre el estudio de los parámetros estelares que nos permiten comprender las dinámicas energéticas y colosales del motor del Sistema Solar y la física involucrada.

Pregunta 6. Después de comparar los espectros ¿Crees que el comportamiento del espectro solar pueda deberse a los átomos que componen dicha estrella? Justifica (ver Anexo 3)	
Categoría A: Si, a partir del espectro de absorción de una estrella es posible determinar los elementos químicos que la componen, pues cada gas tiene un espectro único y el espectro resultante será la combinación de todos lo que integran las capas más externas de la estrella.	50%
Categoría B: Si, la energía proveniente del núcleo excitara los átomos que componen la estrella dando como resultado un espectro de absorción.	30%
Categoría C: No responde	20%

Este análisis del Post-test nos permite hacer una comparación con los resultados del Pre-test pues al estar basados ambos en los mismos indicadores de enseñanza-aprendizaje puede ser evidenciada la persistencia de las dificultades encontradas inicialmente en la población de estudiantes de grado décimo del Colegio Nuevo Gimnasio, dando cuenta de la efectividad de la SEA, como lo muestra la Tabla 3:

Tabla 3. Distribución de porcentajes en las tres categorías

	Categorías	Pre-test	Post-test
Indicador I	Categoría A	10%	45%
	Categoría B	20%	32,5%
	Categoría C	70%	22,5%
Indicador II	Categoría A	10%	40%

	Categoría B	5%	35%
	Categoría C	85%	25%
Indicador III	Categoría A	5%	45%
	Categoría B	15%	35%
	Categoría C	80%	20%
Indicador IV	Categoría A	10%	45%
	Categoría B	15%	35%
	Categoría C	75%	20%
Indicador V	Categoría A	15%	60%
	Categoría B	5%	25%
	Categoría C	80%	15%

Se presenta la relación entre el porcentaje de estudiantes que presentaron dificultades respecto a un indicador de enseñanza-aprendizaje, y además hace una comparación entre estas dificultades antes (Pre-test) y después de la implementación de la SEA (Post-test).

Dentro de la SEA se propone la implementación de una práctica de laboratorio expuesta en la tabla 2, los estudiantes conformaron grupos de 5 personas, cada grupo dispuso de la guía de laboratorio con instrucciones para la medición y análisis de los datos encontrados a partir de los espectros de emisión (ver Anexo 4), la guía de laboratorio cuenta con distintas preguntas y ejercicios que debían ser resueltos por el grupo en clase conforme se realizaba la práctica. El análisis de estas se basa en la evaluación de los siguientes criterios:

Capacidad de análisis

Se entiende por capacidad de análisis a que los estudiantes logran relacionar los datos obtenidos en la práctica de laboratorio con la teoría y los conceptos vistos en clase.

Se observó que cada grupo identificó el rango del espectro electromagnético al que corresponden las longitudes de onda halladas en el experimento a partir de las mediciones tomadas y dedujeron que los colores azules y violetas tienen mayor energía de radiación.

Entendimiento del experimento

Se refiere a entendimiento de experimentos a la manera en que los estudiantes logran reconocer los elementos que conforman el montaje experimental y las medidas que deben tomar para lograr los objetivos de la práctica.

La mayoría de los grupos entiende que tanto la rejilla de difracción como el prisma son herramientas ópticas que difractan y dispersan la luz respectivamente, y que en efecto se veía el mismo fenómeno (espectro de emisión).

Capacidad de predicción

La capacidad de predicción se refiere a que la manera en que los estudiantes generan hipótesis sobre situaciones que cambien la configuración inicial del laboratorio a partir de lo observado.

Concluyen que si el gas dentro del tubo es cambiado por un gas de otro elemento distinto el espectro de emisión será distinto. Además, se les preguntó qué pasaría si el electrón ubicado en los últimos niveles absorbe más energía y teorizan que el electrón sería arrancado.

Procesamiento de los datos obtenidos por los estudiantes y resultados finales del laboratorio (ver Anexo 5):

Se refiere a cómo los estudiantes a partir del análisis de los datos obtenidos por ellos mismos, y haciendo uso de las ecuaciones explicadas en clase, logran graficar la transición entre niveles de energía de los electrones a partir de las longitudes de onda y energías calculadas

Se observó que a pesar de que la mayoría de los resultados fueron acertados, los estudiantes reconocían que había errores humanos y de los instrumentos involucrados que afectaban la toma de los datos, lo que podía resultar en longitudes de onda desfazadas o incorrectas.

DISCUSIONES FINALES

En cuanto a la efectividad de la SEA puede afirmarse que la población de estudiantes superó en gran medida las dificultades presentadas antes de la implementación, los estudiantes comprendieron en que consiste el modelo de Bohr y lo usaron como herramienta para responder preguntas relevantes sobre los espectros atómicos y la naturaleza del Sol. Además, se podría destacar la importancia de la creación de modelos en la física para ilustrar ideas abstractas y contraintuitivas.

Para el rediseño también es necesario hacer un proceso retrospectivo sobre las dificultades y fortalezas de enseñanza que representa la implementación de la SEA propuesta y, además, acorde al hecho de que ninguna intervención en el aula es absoluta y debe ser mejorada dependiendo de las demandas de aprendizaje de los estudiantes. De las actividades propuestas en este trabajo y del análisis del impacto de estas en el aula, podría recomendarse trabajar o extenderse en propuestas relacionadas con la enseñanza de la concepción del fotón y todos los desarrollos históricos, teóricos y matemáticos que este conlleva, pues como lo vimos en el análisis, el entendimiento profundo de este puede abarcar y complementar todos los ejes temáticos.

Reforzar las ideas de lo que significa pensarse la radiación de manera discreta y presentar las limitaciones del modelo de Bohr a los estudiantes, que en este caso no pudieron ser cubiertas,

para incurrir en la idea de que la ciencia es una construcción cambiante y desarrollada dependiendo de un contexto histórico particular.

Ahora bien, es de vital importancia pensar en la replicabilidad de las actividades diseñadas; en lo que respecta a la práctica de laboratorio puede que el contexto donde se intenten adaptar las actividades aquí propuestas no permita la obtención de los instrumentos, entonces se podría pensar en alternativas que involucren la construcción de un espectroscopio casero, el uso de prismas, entre otros.

Presentar una narrativa en el aula entorno a preguntas que pueden resolverse conforme se desarrollan las actividades incrementa el interés de los estudiantes por las temáticas. Por otro lado, el análisis de los resultados y la disposición de los estudiantes durante la implementación puede dar cuenta de la utilidad que tiene la astronomía como recurso para llevar al aula situaciones reales para enseñar la física.

El estudio del Sol como herramienta de enseñanza en educación media permite abarcar un conjunto considerable de conceptos relacionados con distintos campos de la física, de manera introductoria o más profunda. En lo que respecta a este trabajo, aunque el estudio del astro se hizo de manera más bien cualitativa, pueden seguirse resolviendo incógnitas sobre otros parámetros que afectan el ensanchamiento de las líneas del espectro del Sol y su explicación física.

CONCLUSIONES

Las dificultades de aprendizaje que se identificaron están relacionadas con las explicaciones que formulaban los estudiantes sobre la ionización del gas de Hidrógeno, se encontró que la mayoría no relaciona el fenómeno con el comportamiento atómico que lo produce, así mismo sus concepciones sobre la importancia y limitaciones del modelo atómico de Bohr, carecen de descripciones basadas en la cuantización de la energía, el comportamiento orbital de los electrones y su interacción con la radiación. Además, muy pocos estudiantes logran diferenciar las fuentes de luz que producen un espectro continuo y uno discreto de líneas.

El marco teórico evidencia una ruta contextualizada sobre el modelo atómico de Bohr y cómo sirvió para explicar las líneas espectrales de los diferentes elementos químicos, pues está compuesto por 4 ejes temáticos en relación con la radiación electromagnética, los postulados de Bohr y su contribución en la solución de las limitaciones de los modelos propuestos hasta la época y una descripción cualitativa del espectro del Sol. Este análisis epistemológico se establece como herramienta fundamental para la definición de los indicadores de enseñanza-aprendizaje.

A partir de las dificultades identificadas y del análisis epistemológico, se diseñó una SEA con base en el estudio del espectro solar. Cada actividad incluida tiene asociado un indicador de aprendizaje y una pregunta orientadora que le brinda una narrativa organizada a la secuencia, el uso de experiencias de laboratorio favoreció el acercamiento de los estudiantes al fenómeno de los espectros y el procesamiento de los datos obtenidos en estas les permitió relacionar y utilizar el modelo de Bohr con el comportamiento de las líneas espectrales.

Por otro lado, el uso de la astronomía en el aula, en nuestro caso, posibilitó la construcción de escenarios donde fueron usadas las teorías físicas para dar un panorama contextualizado y

significativo de la ciencia, además de introducir e incentivar al estudiante al quehacer científico e investigativo.

Los resultados del análisis de la efectividad de la SEA muestran un avance en la comprensión de los estudiantes hasta en un 70% en cuanto a las dificultades relacionadas con la radiación electromagnética, en un 61% las que se refieren al modelo atómico de Bohr y en un 65% las dificultades en relación con la interacción de la radiación con la materia (espectros atómicos).

Además, los estudiantes demostraron nuevos aprendizajes respecto al Sol y los parámetros estelares como el color (radiación), la temperatura y la composición química que lo caracterizan.

Finalmente, este trabajo de investigación queda abierto a que la SEA propuesta pueda ser mejorada, adaptada e implementada en otros contextos educativos, señalando la pertinencia de la enseñanza no solo de los espectros atómicos para dar sentido a los modelos de la estructura de la materia, sino a la introducción de la física moderna en el aula.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, T., & Shattuck, J. (2012). Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research? *Educational Researcher*, 41(1), 16–25. doi:10.3102/0013189X11428813
- Kragh, H. (2012). *Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913-1925* (1 ed., Vol. 1). Great Britain : Oxford University Press. doi:9780199654987
- López, S. (2020). *Práctica en espectroscopia estelar como apoyo a las actividades del Observatorio Astronómico*. Bogotá: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS. Retrieved from <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24999/L%C3%B3pezFonsecaBryanSantiago2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Muñoz Burbano, Z. (2020). *ENSEÑANZA DE LA ESTRUCTURA ATÓMICA DE LA MATERIA EN LA EDUCACIÓN SECUNDARIA EN COLOMBIA*. Colombia: FACULTAD DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDAD DE NARIÑO. Retrieved from [https://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/75604/ENSE%c3%91ANZA%20DE%20LA%20ESTRUCTURA%20ATOMICA%20DE%20LA%20MATERIA%20COLOMBIA%20\(1\).pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/75604/ENSE%c3%91ANZA%20DE%20LA%20ESTRUCTURA%20ATOMICA%20DE%20LA%20MATERIA%20COLOMBIA%20(1).pdf?isAllowed=y&sequence=1)
- Rosas, D. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DE IRAF COMO SOFTWARE DE REDUCCIÓN Y ANÁLISIS DE ESPECTROS DE CUERPOS CELESTES EN EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO*. Colombia: UNIVERSIDAD DE NARIÑO.
- Alonso, M., & Finn, E. (1968). *Fundamental University Physics: Quantum and Statistical Physics* (Vol. 3). Addison-Wesley Publishing Company.
- Baily, C. (2013). Early Atomic Models – From Mechanical to Quantum (1904-1913). *The European Physical Journal*, 38, 1-60. doi:10.1140/epjh/e2012-30009-7
- Bohr, N., & Phil, D. (1913). On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine Series* 6, 26(151), 1-25. doi:10.1080/14786441308634955
- Carrol, B. W., & Ostlie, D. A. (2017). *An Introduction To Modern Astrophysics* (2 ed.). United Kingdom: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108380980
- Gallego, R., Moreno, J. E., & Pérez, R. (2010). EL MODELO SEMICUÁNTICO DE BOHR EN LOS LIBROS DE TEXTO. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 16(3), 611-629. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=251019456008>
- García, M., & Ewert, J. (2003). *Introducción a la Física Moderna* (3 ed.). Universidad Nacional de Colombia. doi:958-701-266-6
- Gray, D. (2005). *The observation and analysis of stellar photospheres* (3 ed., Vol. 1). United Kingdom: Cambridge University Press. doi:139780521851862
- Guisasola, J., Ametller, J., & Zuza, K. (2021). Investigación basada en el diseño de Secuencias de Enseñanza-Aprendizaje: una línea de investigación emergente en Enseñanza de las Ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(1). doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1801

- Hannula, I. (2005). *Need and possibilities of astronomy teaching in the Finnish comprehensive school*. Finlandia: UNIVERSITY OF HELSINKI. doi:952-10-2104-7
- Hernández, J. (2016). *ANÁLISIS DEL MODELO COMO REPRESENTACIÓN Y SU INCIDENCIA EN LA CONCEPCIÓN DEL MODELO ATÓMICO DE BOHR*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales. Retrieved from <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57939/AN%20DEL%20MODELO%20COMO%20REPRESENTACION%20Y%20SU%20INCIDENCIA%20EN%20LA%20CONCEPCION%20DEL%20MODELO%20ATOMIC%20DE%20BOHR..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ivanjek, L., Shaffer, P., Planinić, M., & McDermott, L. (2020). Probing student understanding of spectra through the use of a typical experiment used in teaching introductory modern physics. *PHYSICAL REVIEW PHYSICS EDUCATION RESEARCH*, 16. doi:10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010102
- Martínez Torregrosa, J., Savall Alemany, F., Domènech Blanco, J., Rey Cubero, A., & Rosa Cintas, S. (2016). La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada. *Revista de enseñanza de la física*, 28(2), 77-100. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/78637525.pdf>
- Ministerio de Educacion Nacional. (2006). *Estándares Básicos de Competencias en Lenguaje, Matemáticas, Ciencias y Ciudadanas* (1 ed., Vol. 1). Colombia. doi:958-691-290-6
- Muñoz, E. L. (2014). Evolución de los modelos atómicos hasta arribar al modelo de Bohr: Un análisis de su poder de predicción. *Revista de Enseñanza de la Física*, 26(1), 53-62. Retrieved 2022, from <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/9511/10285>
- Muñoz-Burbano, Z., Solbes, J., & Ramos, G. (2020). Análisis de la enseñanza de conceptos cuánticos en la unidad de “Estructura atómica de la materia” en libros de texto. *Praxis & Saber*, 11(27). doi:10.19053/22160159.v11.n27.2020.10754
- Oostra, B., & Ramírez, D. (2011). Espartaco: Un Espectrógrafo Didáctico De Alta Resolución Y Bajo Costo. *Revista Colombiana de Física*, 43(2).
- Peña, J. (2012). *LA ESPECTROSCOPIA Y SU DESARROLLO COMO UNA HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA COMPRENDER LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia Maestría en la Enseñanza de las Ciencias. Retrieved from <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11293>
- Peréz, T. (2018). *La Teoría Cuántica Max Planck: La revolución de lo muy pequeño* (1 ed.). RBA libros. doi:9788447392797
- Savall-Alemany, F., Domènech-Blanco, J. L., Guisasola, J., & Martínez-Torregrosa, J. (2016). Identifying student and teacher difficulties in interpreting atomic spectra using a quantum model of emission and absorption of radiation. *PHYSICAL REVIEW PHYSICS EDUCATION RESEARCH*, 12(1). doi:10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010132
- Schwarz, W. (2013). 100th Anniversary of Bohrs Model of the Atom. *Angewandte Chemie International edition*, 52(47), 2-13. doi:10.1002/anie.201306024

- Sinarcas, V., & Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en bachillerato. *Revista de investigación y experiencias didácticas ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS*, 3(31), 9-25. doi:2174-6486
- Solbes, J., Muñoz-Burbano, Z., & Ramos, G. (2019). Enseñanza de la estructura atómica de la materia en Colombia. *Revista Historia de la Educación en Colombia*, 22(22), 117-140. Retrieved from <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rhec/article/view/4780>
- Vázquez, M. (2004). *El sol, algo más que una estrella* (1 ed.). Equipo Sirius.
- Walker, R. (2012). *Analysis and Interpretation of Astronomical Spectra*. Theoretical Background and Practical Applications for Amateur Astronomers.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de antecedentes

Año	Título	Autores	Universidad o revista
2009	Aportes de la espectroscopia al planteamiento a la teoría atómica de la materia	Diego Javier Gaitán	Universidad Pedagógica Nacional (Licenciatura en Física)
2012	La espectroscopia y su desarrollo como una herramienta didáctica para comprender la estructura de la materia	Yecid Peña Triana	Universidad Nacional de Colombia Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales
2013	Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato	Vicent Sinarcas Jordi Solbes	Revista de investigación y experiencias didácticas
2016	Análisis del modelo como representación y su incidencia en la concepción del modelo atómico de Bohr	Yenifer Johana Hernández León	Universidad Nacional de Colombia Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales
2017	Implementación de IRAF como software de reducción y análisis de espectros de cuerpos celestes en el observatorio astronómico de la Universidad de Nariño	Faiber Danilo Rosas Portilla	Universidad de Nariño (Pregrado en Física)
2020	Probing student understanding of spectra through the use of a typical experiment used in teaching introductory modern physics	Lana Ivanjek Peter Shaffer Maja Planinić Lillian McDermott	PHYSICAL REVIEW PHYSICS EDUCATION RESEARCH
2020	Práctica en espectroscopia estelar como apoyo a las actividades del Observatorio Astronómico de la Universidad Distrital	Bryan Santiago López Fonseca	Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Licenciatura en Física)

Anexo 2. Pre-test



La estructura atómica de la materia

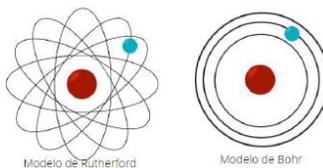
1. Dentro de un tubo de vidrio se contiene cierta cantidad de gas de Hidrógeno, como se muestra en la figura ¿De qué están compuestos los gases como el Hidrógeno?



2. Si se somete el gas de hidrógeno dentro del tubo a un voltaje eléctrico o se calienta a altas temperaturas, como se muestra en la figura ¿Qué puede estar ocurriendo con el gas dentro del tubo para que este brille?

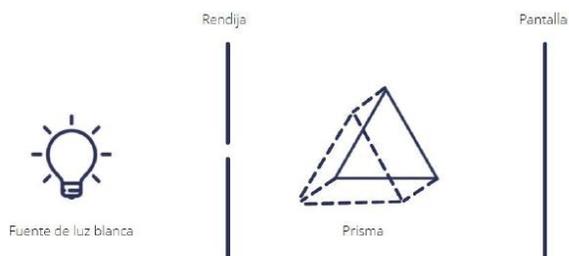


La figura muestra el modelo atómico propuesto por el químico y físico Ernest Rutherford en 1911 y el modelo atómico planteado por el físico Niels Bohr unos años más tarde (1913), alrededor de la estructura de la materia, específicamente de los átomos y su organización interna.

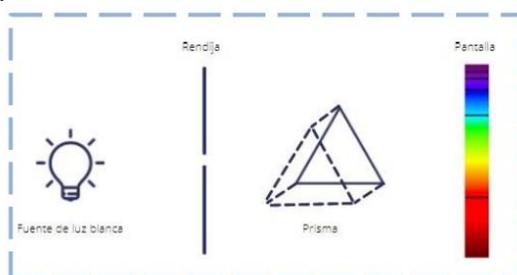


3. Describe en qué consiste cada uno de los modelos de la figura e indica sus diferencias
4. ¿Cuáles fueron las limitaciones físicas del modelo de Rutherford al intentar describir la estructura del átomo? ¿De qué manera el modelo atómico de Bohr revuelve estas limitaciones

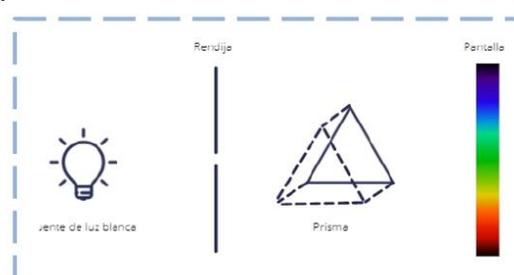
5. El siguiente montaje experimental consiste en una fuente de luz blanca bombilla, una rendija con una sola hendidura de ancho ajustable, un prisma de vidrio y una pantalla. Si encendemos la fuente de luz blanca ¿Cuál de las siguientes opciones verías en la pantalla?



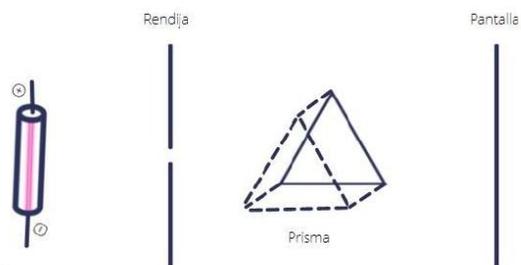
a.



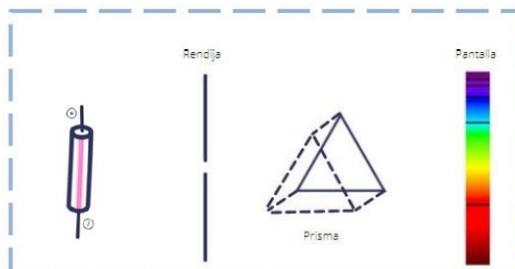
b.



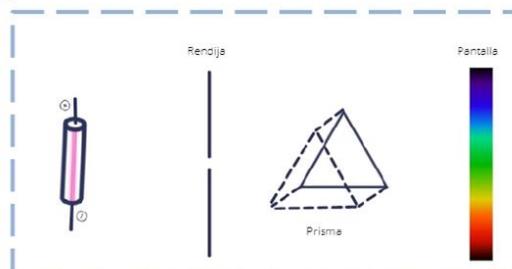
6. El siguiente montaje experimental consiste en un tubo de gas, una rendija con una sola hendidura de ancho ajustable, un prisma de vidrio, y una pantalla. Si hacemos brillar gas de hidrógeno ¿Cuál de las siguientes opciones verías en la pantalla?



a.



b.



Anexo 3. Post-test



La estructura atómica de la materia

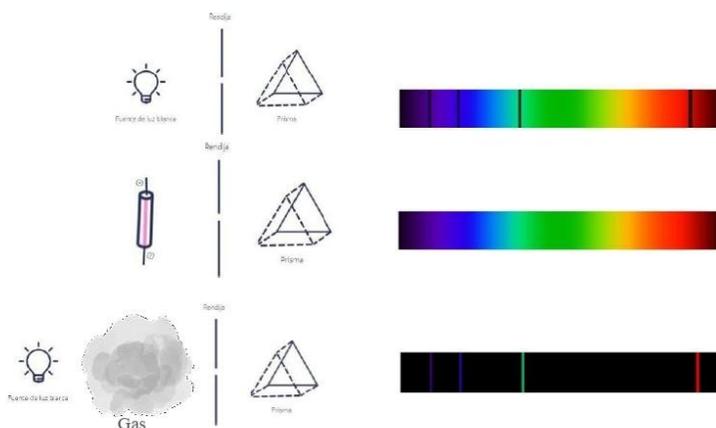
1. ¿Qué tipo de radiación emite el Sol? ¿Por qué es necesario colocar filtros en los telescopios con los que lo vemos de distintos “colores”?

Recuerdas con ¿qué ecuación se relacionan los fenómenos ondulatorios de la luz?

2. Si se somete el gas de Hidrógeno o Helio dentro del tubo a un voltaje eléctrico o se calienta a altas temperaturas, como se muestra en la figura ¿Qué puede estar ocurriendo con gas dentro del tubo para que este brille?



3. Dependiendo de la disposición de los siguientes montajes uno cada uno con el tipo de espectro resultante: (recuerda que los prismas y la rejilla de difracción cumplen la misma función)

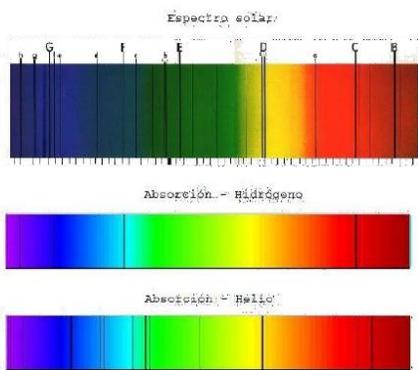


4. Cómo podrías explicar los espectros de emisión observados en el laboratorio, usando el modelo de átomo propuesto por Bohr en 1913

5. Para responder la pregunta sobre qué tipo de estrella es el Sol, en astrofísica existen diversos parámetros o variables bajo las cuales podemos dar una caracterización de las estrellas, todos estos son obtenidos a través de la luz (radiación) que llega a la Tierra de estas. En las sesiones anteriores hablamos de un parámetro que tienen que ver con la temperatura: ¿Cómo podemos obtener información sobre la temperatura de una estrella a partir de su color? ¿Qué constante matemática ayudo a solucionar este enigma?

6. La razón de que el espectro de radiación del Sol no sea una curva perfecta de cuerpo negro tiene que ver con una serie de líneas oscuras y pronunciadas de su espectro. Los espectros que solemos obtener de las estrellas son de absorción.

Con esta información, tu experiencia en el laboratorio y analizando la siguiente gráfica, responde:



¿Crees que este comportamiento del espectro pueda deberse a los átomos que componen dicha estrella? Justifica

Me gustaría agradecerles por la atención y la disposición para aprender un poco sobre las estrellas y la física detrás de su estudio. Les he podido dar una introducción a lo que varios años después de Bohr se llamaría física cuántica, un campo de la física dedicado a estudiar lo más pequeño; mi proceso de formación como maestra se ha visto enriquecido con esta experiencia y espero que sus procesos de aprendizaje también.

Éxitos

Anexo 4. Propuesta de Secuencia de Enseñanza-Aprendizaje

¿Qué tipo de estrella es el Sol?

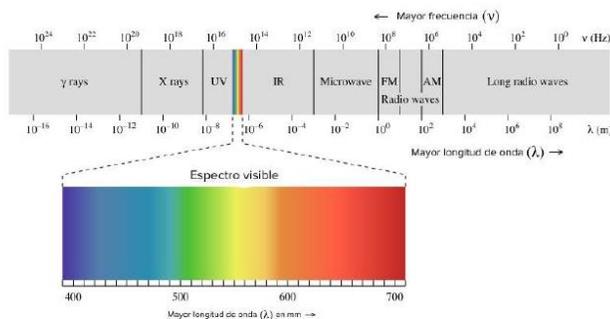
Actividad 1: Los colores del Sol

Las preguntas sobre la naturaleza y comportamiento de la luz han existido desde que la misma física existe, para el siglo XVII la teoría corpuscular estaba propuesta y hacia un intento por explicar los fenómenos experimentales relacionados con la luz, como la refracción o reflexión de esta. Sin embargo, aparecerían fenómenos que esta teoría no cubría, fenómenos como las interferencias o la polarización le permitieron a Young proponer una naturaleza más bien ondulatoria de la luz. Siguiendo esta línea Hertz y luego Maxwell establecerían la idea de la radiación electromagnética.

Hoy día se entiende que la luz es radiación electromagnética con características de onda-partícula que puede propagarse en diferentes direcciones y con una velocidad específica con el vacío.

$$c = \lambda \nu$$

De la dispersión de la luz resulta un conjunto de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda (λ), donde se encuentra lo que se conoce como luz visible. El espectro electromagnético fue la organización que le dieron los científicos a los diferentes tipos de radiación electromagnética según su valor de longitud de onda.



El espectro electromagnético. Imagen tomada de la ChemWiki de UC Davis (Universidad de California en Davis)

¡Pregunta!

¿Las ondas electromagnéticas transportan energía?

El Sol es la principal fuente de radiación electromagnética de la Tierra, esto quiere decir que emite energía en diferentes longitudes de onda, abarcando el espectro electromagnético desde el infrarrojo hasta los rayos x, aunque nuestros ojos solo logran captar la radiación que se encuentra en el espectro visible hoy día podemos, con ayuda de instrumentos adaptados en los telescopios, ver los colores del sol en longitudes de onda que no podemos detectar. En este caso los acetatos serán los filtros que nos permite observar el sol en diferentes longitudes de onda, esto es de gran utilidad para estudiar este astro pues no solo cambiara su color sino la información del comportamiento de su atmosfera.

Nota: Puedes comparar la apariencia de una mancha solar con diferentes filtros.

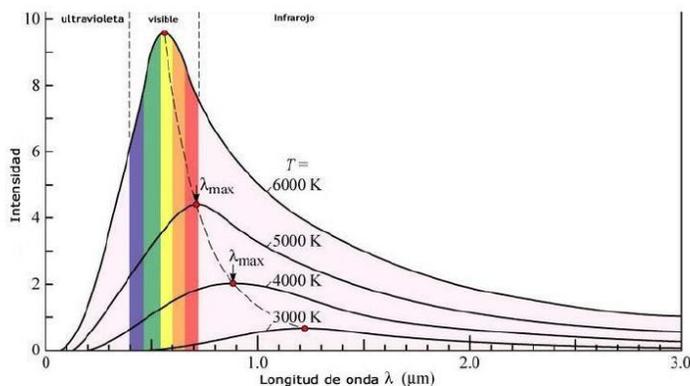


Actividad 2: La constante que revolucionó el mundo cuántico

El color de los objetos incandescentes tiene que ver con su temperatura. Entonces la longitud de onda de radiación de un objeto depende de su temperatura, representada en una distribución de cuerpo negro.

El físico alemán Gustav Kirchhoff exploró teóricamente la idea de cuerpo negro y planteó que, la manera en que dicho cuerpo absorbe y emite energía debería estar descrita por una función que relacione la frecuencia de radiación del cuerpo con su temperatura.

Por otro lado, científicos como Wien, y Rayleigh-Jeans idearon ecuaciones basadas en las herramientas teóricas de la radiación clásica; ecuaciones que no terminaban de dar una predicción acertada del comportamiento empírico de la radiación de un cuerpo negro.



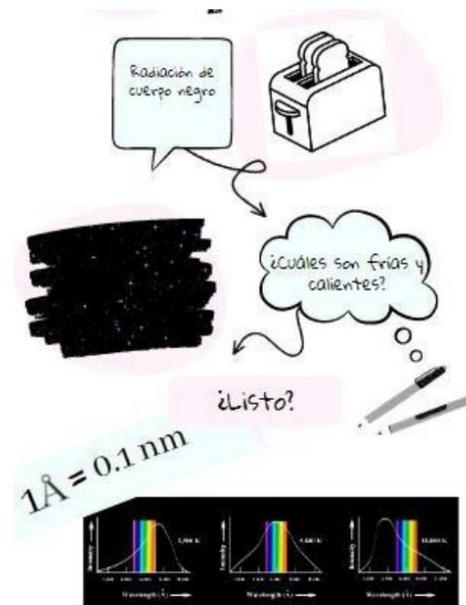
Radiación de cuerpo negro. Imagen tomada de <https://www.quimicafisica.com/radiacion-cuerpo-negro-hipotesis-planck.html>

La catástrofe ultravioleta es una consecuencia del colapso de la ecuación de la ley de Rayleigh-Jeans pues la curva que describe se va hacia el infinito. Max Planck plantea el rompiendo de la continuidad en la emisión de energía y propone correcciones a dichas ecuaciones.

$$B_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad \lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{T}$$

De la ecuación para la longitud de onda máxima en que emite radiación un cuerpo incandescente, decimos que el color o frecuencia de radiación de una estrella depende en parte de su temperatura. Luego, las estrellas azules o blancas serán estrellas de alta temperatura (50000k) y aquellas de colores amarillos y rojizos serán estrellas más bien frías (5700k). Viendo la imagen de un cúmulo de estrellas a diferentes distancias podrías

identificar aquellas que son frías o caliente, incluso analizando sus curvas de radiación de cuerpo negro podrías describir el color de una estrella.

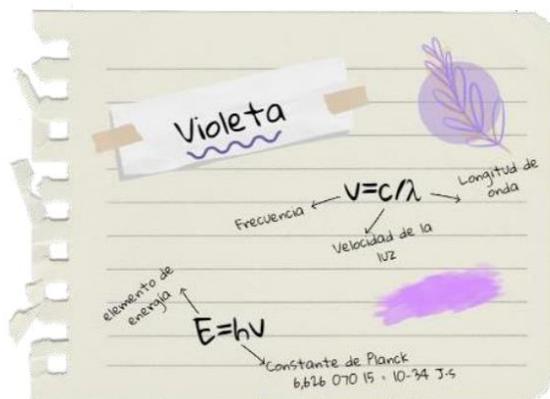


Con solo esta información, crees que podamos saber ¿Qué tipo de estrella es el Sol?

El sentido físico de la constante de Planck representa que la energía de radiación de un cuerpo negro debe ser múltiplo de una cantidad mínima de energía constante (h), lo que resulta en “elementos o paquetes de energía” cuantizados, es decir, ligados a un coeficiente que les parametriza.

$$E = h\nu$$

La energía de cada fotón es proporcional a su frecuencia de radiación, al elegir un valor de frecuencia dentro del espectro electromagnético podríamos encontrar su valor de energía correspondiente. Dentro de una bolsa cada participante escogerá al azar una frecuencia de

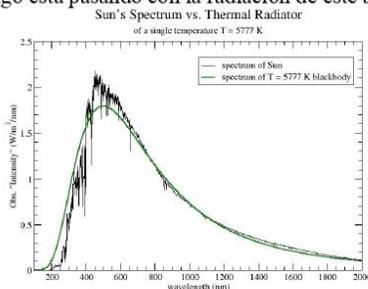


radiación, utilizando la ecuación encontrara la energía y luego todos organizaran sus resultados de mayor a menor.

Actividad 3: ¿De qué está hecho el sol? ¿Las estrellas son cuerpos negros ideales?

Para resolver estas preguntas debemos tener en cuenta el papel protagonista que tienen los espectros atómicos y cuál es la razón de su existencia. Estudiando las propiedades de los gases y entendiendo que desde hace siglos se ha establecido que toda la materia está compuesta de átomos, hasta los descubrimientos de Thompson se pensaba que el átomo era una partícula indivisible, pero los indicios experimentales sobre la existencia de una partícula aún más pequeña (el electrón) abrieron la posibilidad de entender muchísimo mejor fenómenos que no podían ser explicados macroscópicamente.

El espectro del sol comparado con la curva de radican de cuerpo negro que teóricamente debería tener, presenta diferencias pues si bien la longitud de onda máxima está en los mismos valores, existen picos que sugieren que algo está pasando con la radiación de este astro.



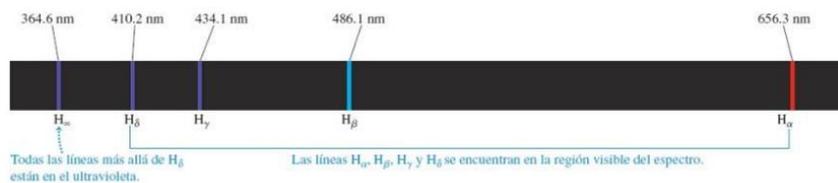
La emisión real del Sol se halla graficado en línea negra, y el espectro de un cuerpo negro aproximadamente 5800 grados Kelvin se halla representado en color verde.

¿El sol es un cuerpo negro ideal?

Introducción

Cuando calentamos un cuerpo incandescente tendremos un espectro de radiación continua que depende de la temperatura del objeto y su longitud de onda de radiación, si colocamos entre este objeto y el observador una nube de gas de un determinado elemento tendremos una sucesión de líneas oscuras superpuestas en un espectro continuo, si por el contrario es la nube de gas la fuente de la radiación como por ejemplo cuando hacemos pasar una descarga eléctrica a través de esta o la calentamos a altas temperaturas y brilla, obtendremos solo una sucesión de líneas de emisión de radiación en diferentes longitudes de onda.

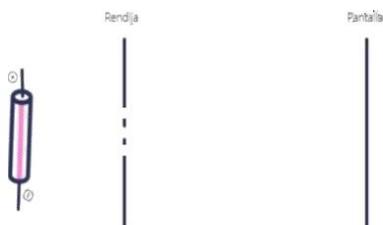
La manera en que obtenemos dichos espectros no difiere mucho de la forma en que, en el siglo XVII Isaac Newton descubrió el espectro continuo del sol, a través de la óptica de un prisma cuya función es dispersar la luz y descomponerla en un espectro de colores (radiación de diferentes frecuencias y longitudes de onda). Las redes o rejillas de difracción propuestas por Rowland son un conjunto de miles de láminas paralelas no muy distanciadas entre sí que al ser incididas por una fuente de radiación la difractan, generando fenómenos de interferencia o líneas de emisión y absorción de diferentes intensidades de longitudes de onda.



Objetivos

- Hallar de manera experimental los espectros de emisión del Hidrógeno y Helio
- Identificar los colores más prominentes de dichos espectros y encontrar un valor de longitud de onda para cada uno de ellos

Montaje experimental



Para desarrollar este laboratorio debes contar con los siguientes materiales:

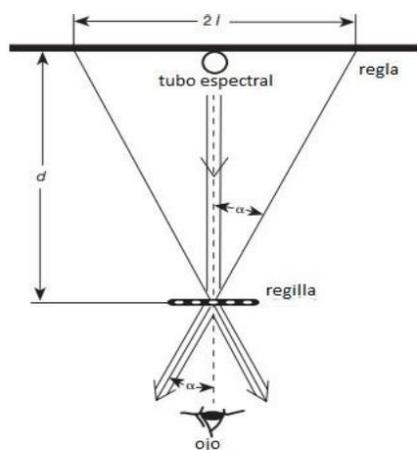
- Tubos espectrales de gas de Hidrógeno y Helio
- Fuente de alto voltaje
- Rejilla de difracción
- Regla
- Soporte para rejilla

Nota de advertencia: El manejo de fuentes de alto voltaje puede ser peligroso para tu salud si no tienes precauciones al usarla.

- **No** debes manipular ni tocar la fuente mientras este conectada
- Los tubos espectrales puestos allí **solo** deben permanecer encendidos **entre 30 segundos**
- En caso de que algún integrante tenga contacto con la fuente en funcionamiento **NO** debes tocarle directamente, **alerta** de inmediato al docente a cargo, **apaga** la fuente y si es el caso, **separa** a la persona de la fuente con un objeto de material aislante (madera o plástico).

Procedimiento

Los equipos deben revisar si tienen el material requerido completo, una vez lo hayan confirmado se escogerá un delegado del grupo para que haga el manejo, durante toda la práctica, de la fuente y la instalación del tubo espectral siguiendo las precauciones dadas en la **Nota de advertencia**, los integrantes deben colocar la rejilla de difracción en el soporte y ubicarla a 10 o 15 cm de la fuente. Entre el tubo y la fuente se pone la regla con el riel, como se muestra en la figura.



Antes de comenzar, deben identificar estos datos, en sus materiales:

- Elemento del tubo espectral: _____
- La distancia entre las rendijas que componen la rejilla: _____

1. Antes de encender la fuente debe haber una persona preparada para observar a través de la rejilla, identificar los de que colores ve las líneas y registrarlas en la primera columna de la tabla 1, cada integrante debe pasar a observar y confirmar la información encontrada (*sin descuidar las precauciones de uso de la fuente*). Pueden ayudarse tomando una foto de lo que se observa en la rejilla.

Color	$\lambda(nm)$

2. Ahora responde: ¿Qué tipo de espectro están observando? Justifica tu respuesta

3. Deben ubicar a qué distancia del cero de la regla se encuentra la línea de emisión de uno de los colores tanto por izquierda como por derecha y anotarlo en la tabla 2. Repetir este procedimiento con cada color identificado.

Color	Lado derecho	Lado izquierdo	$sen\alpha$

4. Con ayuda de las siguientes ecuaciones se debe hallar la longitud de onda correspondiente a cada línea de emisión del espectro y registrarlas en la tabla 1. (recuerda hacer un buen manejo de las unidades de medida y asegúrate de que la calculadora este en radianes)

$$d sen\alpha = n\lambda$$

Donde:

d : La distancia entre las rendijas de la rejilla

n : Orden de difracción según los máximos observados ($n = 1, n = 2, n = 3$)

λ : Longitud de onda de radiación

$$sen\alpha = \frac{l}{\sqrt{D^2 + l^2}}$$

Análisis de resultados y conclusiones

5. Ahora responde:
- ¿De qué depende la aparición de los colores en esas determinadas longitudes de onda en el espectro?
 - ¿A qué rango del espectro electromagnético corresponden las longitudes de onda encontradas?
 - ¿Qué pasaría si en vez de la rejilla de difracción colocamos un prisma?
 - ¿Si colocamos un tubo con otro tipo de gas el espectro cambiaría?
 - De acuerdo con lo visto en la sesión anterior, ¿cuál de las longitudes de onda encontradas tiene mayor energía de radiación?
 - ¿Qué puede estar sucediendo internamente con el gas para que este brille al encender la fuente?

6. Cada integrante del equipo debe escribir al menos una **conclusión** sobre lo que han encontrado en la práctica de laboratorio.

¿Cuáles son las causas de los espectros discreto de las estrellas y los elementos químicos?

La respuesta a esta pregunta viene de entender la estructura atómica de la materia, en este caso, de los gases que pudimos observar y analizar en el laboratorio. Después de ser definido como una partícula indivisible por Dalton, J.J Thomson descubre el electrón, una partícula aun más pequeña y se abre la puerta a la explicación desde lo atómico a varios fenómenos físicos que no tenían respuesta. Ernest Rutherford, experimenta con núcleos atómicos y se propone una configuración distinta de los electrones y estos núcleos compuestos por neutrones y protones. En esta nueva configuración los electrones o cargas negativas orbitan entorno al núcleo.

Frente a las distintas limitaciones mecánicas y electromagnéticas que presentaba este modelo, Bohr en 1913, 8 años después de la consolidación del fotón como componente principal y discreto de la radiación, plantea una serie de postulados que buscarían solucionar dichas limitaciones.

Los espectros atómicos son una consecuencia de la interacción de la radiación electromagnética con el átomo, específicamente los electrones. Se proponen niveles de energía u orbitas en los que se les es permitido estar a los electrones y su transición de un nivel a otro resultará de la emisión o absorción de paquetes específicos de energía de radiación (fotones), cuya frecuencia de radiación asociada podrá ser observada en un espectro.

Así:

$$E_{fmax} - E_{imin} = E_{fotón} = hv$$

Donde

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

Además, la ecuación experimental encontrada por Balmer-Rydberg para la serie de longitudes de onda del infrarrojo hasta el ultravioleta relacionando la constante de Planck y los niveles de energía cuantizados es:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

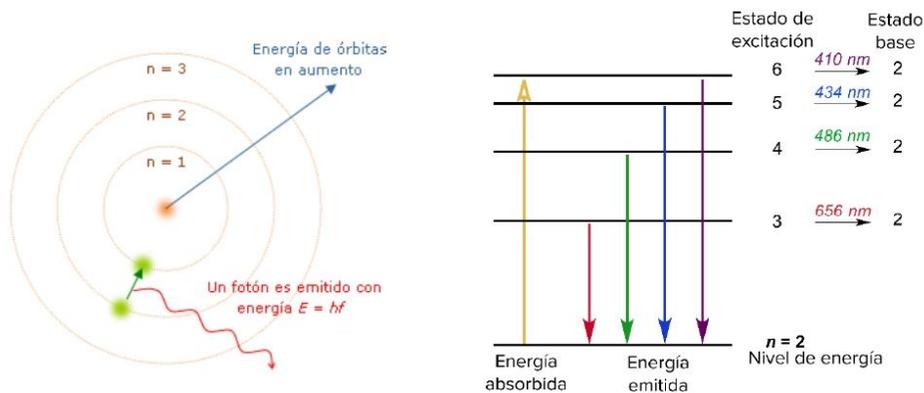
$$n_i = \sqrt{\frac{1}{\left(-\frac{1}{\lambda R} + \frac{1}{n_f^2}\right)}}$$

Donde

$$R(\text{Constante de Rydberg}) = 1.097 \times 10^7 / \text{m}$$

n_i = Nivel de menor energía

n_f = Nivel de mayor energía



Representación gráfica (no a escala) de la transición de electrones de los niveles menores de energía n_i al nivel base de mayor energía $n_f = 2$ para λ del visible

Actividad

Con las longitudes de onda encontradas para las líneas del espectro del Helio, llena la siguiente tabla:

Color	Energía del fotón emitido (ev)

Ahora responde:

¿Qué representa la energía del fotón para el modelo de átomo de Bohr?

Así como con el ejemplo del átomo de Hidrógeno, los integrantes del grupo deben hacer una representación gráfica de la transición de los electrones de niveles de energía menores a un nivel base en relación con la longitud de onda encontrada en la actividad experimental y con ayuda de la ecuación de Balmer-Rydberg.

Ahora responde:

¿Qué creen que pasaría con la transición de un electrón que absorbe una cantidad muy grande de energía?

Discute con tu equipo algunas reflexiones y/o conclusiones que hayan podido encontrar de lo que vimos en esta sesión.

El modelo atómico de Bohr y el espectro del Sol

Unidad 4

Analizando el espectro del Sol

El estudio del Sol y su dinámica ha sido un objeto de fascinación en la historia de la humanidad. La investigación sobre el Sol ha llevado a importantes descubrimientos en la física estelar, incluyendo el descubrimiento de la fusión nuclear y la comprensión de los procesos de energía del universo.

Además, el Sol es la fuente de energía que sustenta la vida en la Tierra, y su estudio es crucial para la comprensión de los fenómenos climáticos y meteorológicos. La investigación sobre el Sol ha llevado a la sociedad a tener importantes avances para la tecnología y la vida en la Tierra.

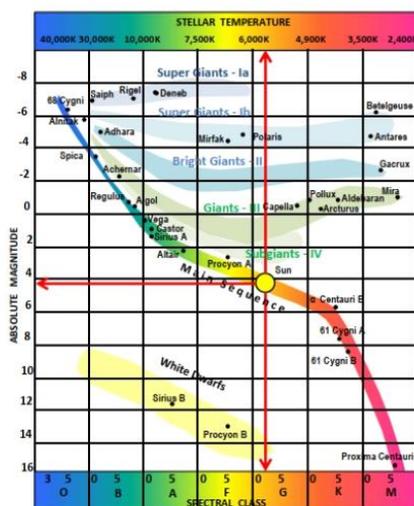
¡Pregunta!

¿En qué otras cosas crees que el estudio de Sol aporta a la ciencia y la cultura?

¿Qué edad tiene el Sol?

Actualmente se estima que el universo existe hace aproximadamente 13.700 millones de años, la creación de nuestro sistema planetario se dio con el nacimiento o formación de una estrella, el Sol. La edad del Sol es importante porque está directamente relacionada con la comprensión de la evolución del sistema solar y la vida en la Tierra.

Algunos de los parámetros que los astrofísicos obtienen para saber en qué estado de evolución se encuentra el Sol tienen que ver con **su temperatura, su masa y su composición química**. Para poder entender la evolución estelar es necesario conocer como nacen, evolucionan y mueren las estrellas.



Las estrellas nacen a partir de una nube de gas y polvo en el espacio, conocida como nebulosa. Estas nubes pueden estar compuestas principalmente de hidrógeno y helio, pero también contienen pequeñas cantidades de otros elementos. A medida que la nube se contrae gravitatoriamente, comienza a calentarse ya formar una concentración de gas y polvo en su centro.

La evolución de una estrella depende de su masa inicial. Las estrellas más pequeñas y menos masivas, como nuestra estrella, el Sol, pasan la mayor parte de su vida en la secuencia principal, fusionando hidrógeno en su núcleo para producir helio y liberando energía en forma de luz y calor.

A medida que la estrella envejece, su núcleo se agota de hidrógeno y comienza a fusionar helio en carbono y oxígeno en su núcleo. Esto hace que la estrella se expanda y se enfríe, convirtiéndose en una gigante roja. Al final de su vida, la estrella pierde sus capas exteriores y se convierte en una enana blanca, una estrella caliente y densa que se desvanece lentamente con el tiempo.

¿Cómo obtenemos esta información del Sol?

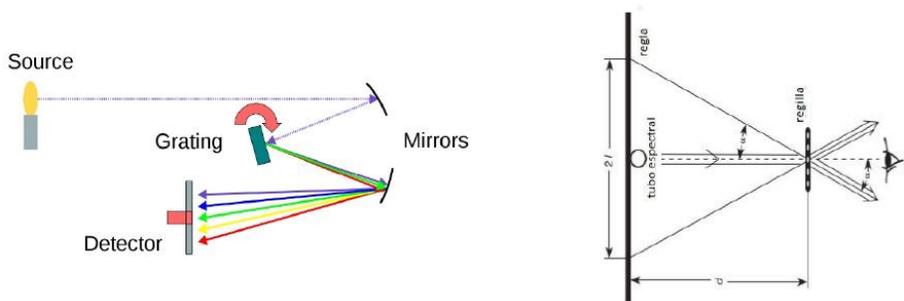
La estructura interna del Sol se divide en varias capas, cada una con características físicas y químicas distintas. El núcleo es la capa más interna del Sol y es donde se lleva a cabo la fusión nuclear. La temperatura en el núcleo es de alrededor de 15 millones de grados Celsius y es responsable de generar la mayor parte de la energía que se libera en el Sol. (Vázquez, 2004)

Las capas más exteriores del Sol son la cromósfera, la corona es la capa más externa, allí se producen el viento solar y las auroras. La fotosfera, que es la capa visible de la superficie del Sol, está compuesta por gas y plasma temperatura en esta capa es de alrededor de 5600 grados Celsius.

La luminosidad del sol, cantidad o flujo de energía de su superficie que llega a la tierra en forma de radiación electromagnética, proveniente de esta capa de su atmosfera nos permite determinar su temperatura y masa. Por lo que la temperatura del sol seria 5600 Kelvin y su tamaño en términos del radio es de aproximadamente $6,96 \times 10^8$ metros.

¿De qué está compuesto el Sol?

Como ya hemos dicho, el Sol está hecho de gases y plasma (gas ionizado). Comparemos ahora la manera en que los científicos obtienen los espectros de las estrellas y la manera en que nosotros obtuvimos nuestros espectros en el laboratorio. Describe las diferencias y semejanzas que identificas:

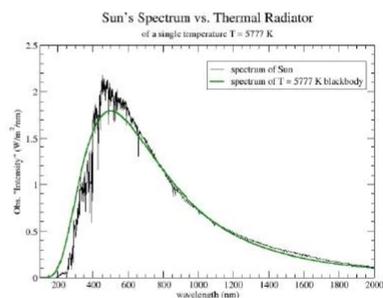


¡Pregunta!

¿Por qué obtenemos un espectro de absorción para el Sol y uno de emisión para el Hidrógeno si ambos son gases a altas temperaturas?

¡Analicemos el espectro del Sol!

Debes observar el espectro del Sol mostrado a continuación, encuentra las longitudes de onda a las que pertenecen las líneas oscuras señaladas de este espectro y compáralas con las longitudes de onda de las líneas del gas de hidrógeno:



Ahora responde, con base a esta información:

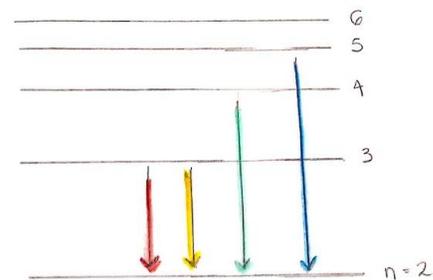
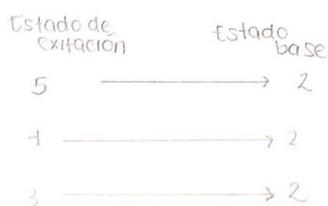
- ¿El Sol se compone de hidrógeno?
- ¿Las líneas que no pertenecen a las de hidrogeno, podrían representar que puede estar compuesto de otros elementos?

De acuerdo con todo lo visto es estas unidades podemos resolver nuestra pregunta inicial con base a algunos parámetros estelares de Sol, selecciona la información correcta en el siguiente párrafo:

¿Qué tipo de estrella es nuestro Sol?

El Sol es una estrella fría/caliente pues su pico de radiación en el espectro visible es las longitudes de onda del amarillo, está compuesta por Hidrógeno/Hierro y otros elementos no tan pesados, lo que nos indica que su estado evolutivo se encuentra dentro de la secuencia principal/ grupo de gigantes rojas.

Anexo 5. Fotos y evidencias de la implementación



Color	Energía del fotón emitido (ev)
Verde	$3,1799 \times 10^{-19} \text{ J}$
Azul	$4,15 \times 10^{-19} \text{ J}$
Amarillo	$3,26453 \times 10^{-19} \text{ J}$
Rojo	$3,154 \times 10^{-19} \text{ J}$

Ahora responde:

¿Qué representa la energía del fotón para el modelo de átomo de Bohr?

Para el modelo de átomo de Bohr el fotón representa esa energía que transfiere un electrón al excitarse y pasar a un nivel de energía más alto y cuando vuelve a su nivel de energía original emite o desprende un fotón. En ese sentido el fotón funciona como herramienta para que el electrón cambie de nivel de energía.

