

PROYECTO: Revoluciones científicas. De Copérnico a la mecánica cuántica

La profesión de fe ciega en una teoría no es una virtud intelectual sino un crimen intelectual.

Imre Lakatos

En este documento que vas a encontrar:

Introducción / Objetivo General de la Unidad / Dónde encuadrar esta actividad en el currículo oficial / Temporalización por sesiones / Evaluación / Referencias /

1. INTRODUCCIÓN

La enseñanza de las ciencias no se debe centrar exclusivamente en el desarrollo de contenidos y destrezas que doten al alumno de la capacidad para resolver problemas, si no que también es necesario potenciar en ellos un juicio crítico acerca de la propia ciencia en sí, su estructura y sus leyes, que permitan al estudiante y futuro conocedor y hacedor de la ciencia cuestionar las leyes, teorías y conocimientos preestablecidos, en pos de explicaciones sucesivas que se correspondan en mayor grado con el mundo natural y/o teórico que modelan

Enseñar ciencia es también enseñar historia de la ciencia. Diferentes estudios [1-2] destacan que la introducción y aprendizaje de las competencias propias de la ciencia según su evolución histórica, en base al razonamiento llevado a cabo por los científicos del momento, conduce en mayor grado a un aprendizaje significativo. No solo se trata de recurrir a la lógica sucesión de los contenidos, sino que se trata de enfocar el aprendizaje desde una perspectiva de problema y respuesta. Todo ello bajo el auspicio de la crítica y desde el razonamiento científico

Esta unidad didáctica pretende demostrar contenidos clásicos de la Física que se cursan en Bachillerato, tanto en primero como en segundo, desde **su perspectiva histórica**. Estableciendo las razones que condujeron a aceptar una u otra teoría (paradigma o proyecto de investigación científica, según distintos filósofos de la ciencia). Así, cada alumno deberá ponerse en la piel de los científicos que defendieron una u otra visión del mundo en base al conocimiento científico que poseían hasta el momento. Deberán aprender a justificar científicamente sus decisiones apoyándose en su base empírica o racional. De este modo, además de potenciar el aprendizaje de competencias propias de la ciencia, se deberán adquirir competencias acerca de la escucha activa, la metacognición, la reflexión propia y el diálogo entre compañeros.

La discusión de articular la ciencia según la sucesión de paradigmas (Thomas Khun), proyectos de investigación científica (Imre Lakatos) o tradiciones investigadoras (Larry Laudan) donde progresan poco a poco los conceptos científicos bajo la *apariencia estática* del avance de la ciencia en contraste con las *dinámicas revoluciones científicas* que suponen un fuerte cambio conceptual, de herramientas y metodologías en la disciplina deben discutirse bajo el saber de la propia ciencia que involucran. Ese es el objetivo de este proyecto.

2. OBJETIVO GENERAL DE LA UNIDAD DIDÁCTICA

El objetivo general de la Unidad Didáctica consiste en familiarizar al alumnado de Bachillerato con las principales revoluciones científicas. Entender sus causas, los descubrimientos y las repercusiones a las que dieron lugar. Para hacerlo, se establecen tres bloques conceptuales, de modo que el docente que pretenda emplear el siguiente material, pueda secuenciar cualesquiera de ellos de una forma indistinta

- Revolución copernicana. Geocentrismo vs. Heliocentrismo
- Revolución relativista. Viviendo en un universo cuatridimensional
- Revolución cuántica. El ladrillo de lo ínfimo

La temporalización de cada uno de los bloques no exige de más de dos o tres sesiones; de modo que puedan implementarse rápidamente, pero, que, a su vez, promuevan un incentivo conceptual al alumnado. Se trata de otorgar al docente material complementario del que pueda disponer y secuenciar, sin que eso le conlleve una demora en otros aspectos del currículo oficial

Si le es posible al docente, resulta muy conveniente abordar la primera parte de la presente Unidad Didáctica en **colaboración con el departamento de Filosofía y el de Matemáticas**. La visión de la revolución copernicana desde la perspectiva de paradigma y revolución propuesta por Thomas Kuhn se trabaja en la Unidad Didáctica *micro o macro, depende de la lente*; elaborada por el compañero de Filosofía. A su vez, en la Unidad Didáctica confeccionada por el compañero de Matemáticas, se parte de las ideas griegas del quadrivium (aritmética, geometría, música y astronomía) hasta desembocar en las leyes de Kepler. Kepler, y posteriormente, Newton, serán también el final de la primera parte de esta unidad, a saber, la revolución copernicana; enlazando así los proyectos entre sí. No obstante, es importante recalcar que cada uno de los proyectos abordan un mismo suceso cultural desde diferentes perspectivas; lo que hace ideal su complemento en el aula desde las diversas materias.

3. ENCUADRE EN EL CURRÍCULO OFICIAL

Los contenidos de las revoluciones científicas del siglo XX: cuántica y relativista se encuentran dentro del currículo propuesto para la asignatura de Física en 2º de Bachillerato

Según el Real Decreto por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato 1105/2014 del 26 de diciembre [3] y del Decreto 52/2015 de la Comunidad de Madrid [4] que establece el currículo de Bachillerato para la Comunidad de Madrid, la relatividad especial y la física cuántica se enmarca dentro del bloque 6. *Física del siglo XX*, de la asignatura de Física en 2º de Bachillerato

La relatividad especial se incluye en los criterios de evaluación 1 y 3, especificados en los estándares de aprendizaje 1.1, 1.2 y 3.1

1.1 Explica el papel del éter en el desarrollo de la Teoría Especial de la Relatividad

1.2 Reproduce esquemáticamente el experimento de Michelson – Morley así como los cálculos asociados sobre la velocidad de la luz, analizando las consecuencias que se derivaron

3.1 Discute los postulados y las aparentes paradojas asociadas a la Teoría Espacial de la Relatividad y su evidencia experimental

La física cuántica se incluye en los criterios de evaluación 5, 7 y 9, especificados en los estándares de aprendizaje 1.1, 1.2 y 3.1

5.1 Explica las limitaciones de la física clásica al enfrentarse a determinados hechos físicos, como la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico o los espectros atómicos

7.1 Compara la predicción clásica del efecto fotoeléctrico con la explicación cuántica postulada por Einstein y realiza cálculos relacionados con el trabajo de extracción y la energía cinética de los fotoelectrones

9.1 Determina las longitudes de onda asociadas a las partículas en movimiento a diferentes escalas, extrayendo conclusiones acerca de los efectos cuánticos a escalas macroscópicas

Por otra parte, la revolución copernicana se puede encuadrar dentro de la asignatura de Física y Química de 1º de Bachillerato. En el bloque 7. Dinámica; en concreto en el criterio de evaluación 6, especificado en los estándares de aprendizaje 6.1 y 6.2

6.1 Comprueba las leyes de Kepler a partir de las tablas de datos astronómicos correspondientes de algunos planetas

6.2 Describe el movimiento orbital de los planetas del Sistema Solar aplicando las leyes de Kepler y extrae conclusiones acerca del periodo orbital de los mismos

Esto permite pautar y desarrollar los contenidos aquí propuestos en concordancia con la ley educativa presente

4. TEMPORALIZACIÓN POR SESIONES

El desarrollo de las sesiones incluye tanto los contenidos temporalizados, como las herramientas didácticas asociadas para alcanzar el aprendizaje significativo del alumno

Durante la implementación de las sesiones, se parte de un nivel mínimo, dado el curso para el que se enmarca la unidad didáctica, de modo que bastantes de los contenidos básicos son dados por conocidos. En este caso, aquellos conceptos generales propios de la física clásica y de la matemática cursados en la Educación Secundaria Obligatoria

Cada sesión está plantada para una duración de unos 50 minutos, si bien su tiempo de aplicación deberá ser fijado exclusivamente por el docente que aplique estos materiales en el aula

REVOLUCIÓN COPERNICANA: GEOCENTRISMO VS. HELIOCENTRISMO

SESIÓN 1. Antecedentes históricos

Desde casi el principio de su propia identidad se cuestiona el hombre cual es la posición que ocupa dentro del Universo. No es de extrañar, por tanto, que los primeros registros obtenidos acerca de la posición de las estrellas errantes daten de la arcaica civilización babilónica y sumeria. Las estrellas errantes, denominadas así por los griegos, debido al extraño giro que realizaban en el cielo (de especial relevancia será el movimiento retrógrado) son conocidos hoy en día, como los planetas Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, además de la Luna y el Sol.

Las antiguas civilizaciones comenzaron a establecer por escrito en las tablas astronómicas un registro continuo de la posición de los principales astros [5]. De este modo, además de sentar unas bases iniciales de la ciencia a partir de la observación, consiguen deducir la periodicidad de ciertos fenómenos astronómicos como el ciclo de los saros

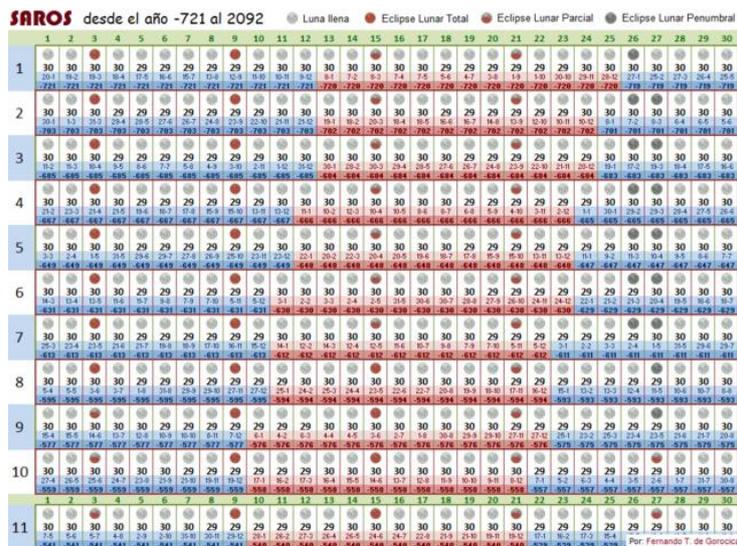


Tabla del ciclo de los saros. Por Fernando de Gorocica. Obra propia CC BY - SA 4.0

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/ff/c/Ciclo_de_Saros_o_de_Eclipses_Lunares.png/640px-Ciclo_de_Saros_o_de_Eclipses_Lunares.png

La astronomía, como muchas otras ciencias, porta una gran deuda con la antigua sociedad griega. Dicho pueblo fue pionero en buscar explicaciones científicas al lugar que ocupaba la Tierra. Tales de Mileto (S. VI a.C.), que perteneció a la escuela jónica, afirmó que la Tierra era un disco flotando en el agua mientras que Anaxímenes (S. VI a.C) aseveraba que era una hoja flotando en el aire. Su principal aportación, fue suponer que la Tierra no necesitaba de sujeción alguna para ocupar la posición que sita en el Universo.

No obstante, la primera gran respuesta constitutiva de paradigma fue la realizada por Aristóteles (S. IV a.C.). El sistema aristotélico heredaba de la escuela pitagórico – platónica la concepción de los planetas como esferas, situando a la Tierra en el centro del Universo. Así era, dado la condición de la tierra como elemento primordial más pesado, ligando su teoría cosmológica con su teoría acerca de la composición de la materia. Sobre ella se situaban las esferas del agua, del aire y del fuego. Finalmente, por encima se situaba la división supralunar, donde se encuentran las esferas celestes, formadas por la quintaesencia, eterna, inmutable e incorruptible. Los planetas conocidos hasta el momento, a saber, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, además de la Luna y el Sol, giraban en torno a la Tierra en las esferas de la órbita supralunar. Todo bajo la predominancia astronómica de la figura esférica y circular.

El sistema aristotélico fue encumbrado por Claudio Ptolomeo (S.II). En su obra *Almagesto* realiza una perfecta descripción geométrica de los cielos, de modo que consigue aunar las observaciones con el sistema teórico aristotélico. Para satisfacer las observaciones realizadas por Hiparco un siglo antes, así como para satisfacer la observación experimental del movimiento retrógrado de los planetas, Ptolomeo introduce la descripción de varios movimientos de los astros en el cielo.



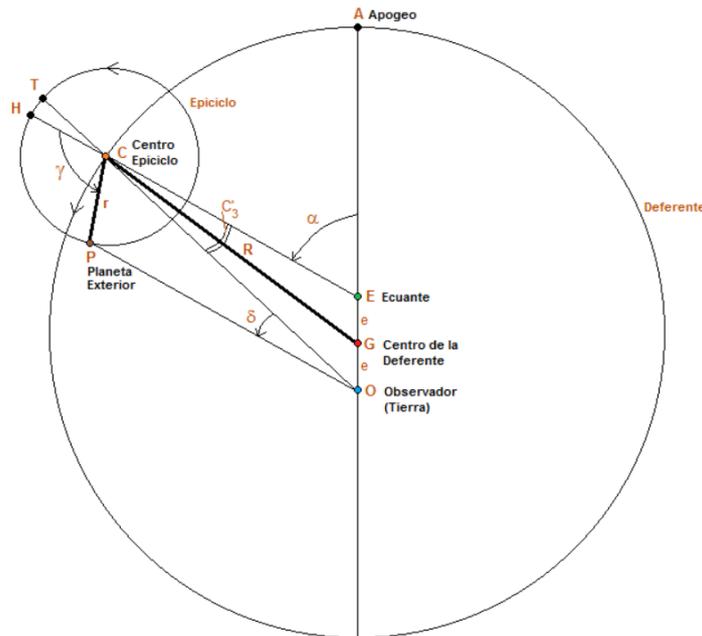
Movimiento retrógrado de Marte. Patrón observado en 2003. Ilustración de la Nasa/JPL – Caltech <http://mars.jpl.nasa.gov/allabout/nightsky/nightsky04.html>

En la figura se ilustra el movimiento retrógrado de Marte. Se puede observar como el planeta “aparentemente” retrocede en su movimiento orbital para luego retomar la dirección habitual del movimiento

De nuevo, bajo la predominancia de la concepción circular como movimiento perfecto asociado a la quintaesencia aristotélica, Ptolomeo define los siguientes conceptos:

- Deferente → órbita circular mayor del planeta respecto de la Tierra
- Epiciclo → órbita circular menor que realiza el planeta en torno a la deferente
- Excéntrica → centro de la deferente. Según la concepción ptolemaica, es un punto vacío

Para poder satisfacer las observaciones, Ptolomeo debe sacar a la Tierra del centro de la deferente. Si bien los planetas giran en torno a la Tierra, esta no ocupa el centro de dicha órbita circular. Este pequeño inciso, supuso una primera incoherencia sobre la teoría aristotélica, donde la Tierra debía ser el centro del Universo, y, por tanto, de la órbita de todos los astros celestes. Si bien, en predominio de explicar las observaciones, Ptolomeo debe sacar a la Tierra del centro de la órbita, estableciendo la excéntrica



*Epíclito, deferente y excéntrica. Se puede observar que la Tierra (observador) no es el centro
Imagen tomada de la obra "The Exact Sciences in Antiquity" [6]*

El sistema ptolemaico perdurará durante más de 1500 años, hasta el inicio de la revolución copernicana en el año 1543.

En su obra *De revolutionibus orbis coelestium* [7], Copérnico retoma el sistema heliocéntrico ya propuesto por Aristarco de Samos (S. III a.C). Copérnico propone un sistema celeste donde los astros orbitan en torno al Sol a una velocidad constante. En su texto, Copérnico, además de citar a Eudoxo (S. IV a.C) (primer modelo astronómico en tener en cuenta las observaciones), busca la geometría circular y de sencillez platónica, como se observa de mantener la velocidad constante y las órbitas circulares. Entre sus axiomas se incluye:

- No todos los cuerpos giran en torno al mismo centro. La Tierra solo es el centro de la órbita lunar y de la gravedad terrestre
- Desplaza al Sol del centro de las órbitas circulares, manteniendo el concepto teórico de excéntrica
- Mantiene los epiciclos ptolemaicos, reduciendo su número a 34

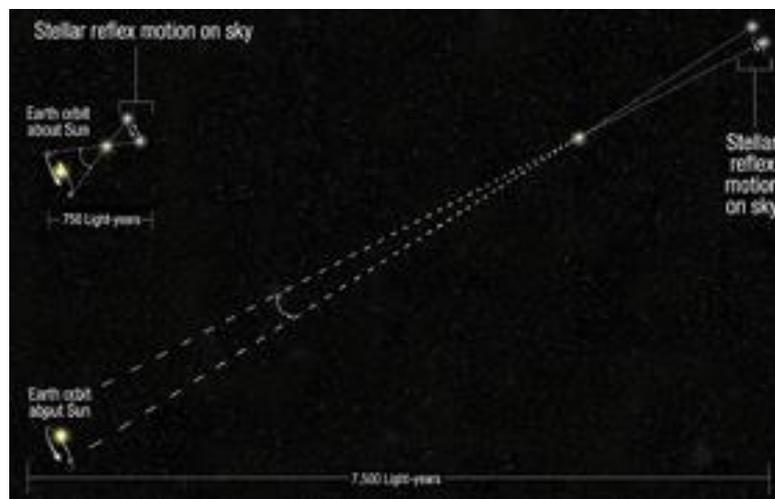
El texto de Copérnico no fue tan polémico como el quorum popular podrían suponer. Copérnico se cuidó bien de explicar que su modelo heliocéntrico tan solo era una representación teórico – matemática que respondiese a las observaciones, y no una realidad tangible contraria a los designios bíblicos. Una gran parte de los astrónomos de la época aceptaron las teorías copernicanas bajo este precepto, no llegando a asociar el modelo copernicano con un nuevo sistema físico. El prólogo del libro dedicado al Papa Pablo III también ayudó en ese sentido

No obstante, la semilla heliocéntrica copernicana (que, a su vez, ya formaba parte de la sociedad científica puntera de la época) germinó, dando lugar a un enfrentamiento científico entre los defensores de ambas teorías

El punto de partida incluye

A favor de la teoría geocéntrica de Ptolomeo

- Mayor correspondencia con las observaciones realizadas. El sistema ptolemaico predecía mejor el comportamiento de los astros
- Causas de sentido común. Numerosas preguntas cuestionaban el movimiento de la Tierra. Si la Tierra se mueve ¿por qué los objetos no caen detrás al dejarlos caer? ¿por qué no notamos el viento en el rostro?
- Autoridad moral de Aristóteles. En consonancia con la iglesia católica gracias a la unión de la filosofía aristotélica y el dogma cristiano llevado a cabo por Santo Tomás de Aquino
- Paralaje. Se trata del movimiento relativo de las estrellas. Si la Tierra se mueve ¿por qué no se nota el movimiento relativo entre las estrellas?



Paralaje. Imagen del paralaje estelar medido por Hubble. De dominio público <http://www.nasa.gov/hubble>

A favor de la teoría heliocéntrica de Copérnico

- Menor complejidad del sistema. También incluye epiciclos, pero lo hace en mucho menor número
- Fenómenos celestes como las fases de Venus o Mercurio al amanecer solo se explican desde la visión heliocéntrica

SESIÓN 2. Geocentrismo vs Heliocentrismo

A pesar de que las causas a favor de la concepción geocéntrica eran más y de mayor calado, finalmente la teoría heliocéntrica es la que se impone. Todo ello ocurre gracias a la labor de diversos científicos de generaciones sucesivas a la de Copérnico que van dando respuesta a las causas geocéntricas, incluyéndolas dentro de las causas a favor del heliocentrismo. Entre ellos, cabe destacar a Kepler, a Galileo y finalmente, a Newton

Johannes Kepler (1571 -1630) fue un niño prodigio de dura infancia. Aquejado de viruela durante la misma, llegó a convertirse en un científico de primer nivel gracias a las becas privadas que le permitieron estudiar.

Desde un primer momento, Kepler aceptó las tesis heliocéntricas debido a su mayor valor matemático y de simplicidad. Tras heredar los datos astronómicos de Tycho Brahe (principal científico observacional del momento), se puso a la labor de cohesionar los datos con la teoría astronómica copernicana

En su primer intento plasmado en el *Mysterium Cosmographicum* de 1596 no consigue desprenderse del idealismo platónico, entendiéndolo cada planeta como un sólido regular circunscrito a una esfera. Finalmente, al liberarse de la influencia platónica de la belleza de la forma circular consigue dar cuenta de las medidas astronómicas, en especial, de la órbita de Marte, la más excéntrica de todos los planetas, y hasta el momento, el principal quebradero de cabeza de los antiguos astrónomos.

En sus obras *Astronomia Nova* y *Harmonices Mundi*, Kepler establece las leyes de la cinemática celeste que llevan su nombre. Con ellas consigue explicar todas las observaciones realizadas, además de eliminar los epiciclos ptolemaicos simplificando mucho la interpretación del movimiento de los astros. Su obra sugiere una nueva idea: se puede demostrar la naturaleza por elementos matemáticos

- *Primera ley de Kepler.* << Todos los planetas giran en órbitas elípticas con el Sol en uno de sus focos >> Con ella rompe con la circularidad, además de mantener la concepción de la excéntrica, no existiendo nada en el centro estricto de la órbita de los planetas
- *Segunda ley de Kepler.* << El radio vector que une el planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales >>. Con ello rompe con la velocidad constante
- *Tercera ley de Kepler.* << Para cualquier planeta, el cuadrado de su periodo orbital es directamente proporcional al semieje mayor de la órbita elíptica >> Con ella establece una relación cuantitativa contrastable mediante la observación

Si Kepler había conseguido explicar todas las observaciones bajo la concepción copernicana, incluida la, a priori, insalvable órbita de Marte, *Galileo Galilei* (1564 -1642), socaba aun más las causas a favor de la teoría geocéntrica, por una parte, refutando gran parte de la ciencia aristotélica, y así minando su autoridad (lo que le condujo a su famosa disputa con la Iglesia), y por otra respondiendo a las preguntas asociadas al sentido común

La mejora en la fabricación de telescopios, a partir del pulido de sus lentes, arte donde Galileo era un maestro, permitió a este realizar una serie de descubrimientos astronómicos que contradecían las tesis aristotélicas. Entre ellos, se incluían

- La luna tiene una orografía semejante a la de nuestro planeta, con valles y montañas. Idea ya propuesta por Anaxágoras de Clazómenas (S. V. a.C.), maestro de Pericles. Es decir, la quintaesencia no es tal
- La vía láctea contiene innumerables estrellas, lo que se asocia a la profundidad del cosmos y a la inexistencia de la esfera de las estrellas fijas
- Júpiter tiene cuatro satélites, Io, Ganímedes, Europa y Calisto. No todos los planetas orbitan en torno al mismo astro
- Venus tiene fases que solo pueden explicarse bajo la teoría heliocéntrica

Las presentes observaciones permitieron minar la autoridad científica de Aristóteles, que, por otra parte, ya se había visto socavada por los descubrimientos de los científicos árabes durante la Edad Media. Entre ellos, cabe destacar la contribución de Alhazen (S. X) en anatomía, describiendo al ojo como un órgano receptor de la luz y no emisor, así como Azarquiel, quien en el siglo XI ya indica la posibilidad de órbitas elípticas en las tablas toledanas [8]

No obstante, la principal contribución de Galileo a la física proviene de su concepto de movimiento relativo [9]. Con él, es capaz de responder a todas las preguntas de sentido común auspiciadas por los geocentristas. No se nota el aire en el rostro, a pesar del movimiento de la Tierra, debido a que el movimiento relativo entre la Tierra y nosotros es nulo, y, por tanto, las consecuencias físicas son las mismas que si estuviésemos en estado de reposo. No importa la existencia de un movimiento neto en sí, si no que las consecuencias físicas del movimiento se establecen a partir de la relación del sujeto de estudio con el Sistema de Referencia. Si la velocidad relativa entre ambos es nula no aparece consecuencia alguna

La película de *Ágora* dirigida por Alejandro Amenábar explica perfectamente los puntos cruciales del paso del geocentrismo al heliocentrismo en la personificación de Hipatia de Alejandría. Parece difícil suponer que Hipatia, 1200 años antes de la llegada de Kepler y Galileo pudiese deducir la física que subyace a la teoría heliocéntrica, si bien, muchas de sus escenas son ideales para el estudio en las clases. Muestran en pequeños cortes, cómo se deduce y que significado tiene tanto el concepto de movimiento relativo como el de las órbitas elípticas



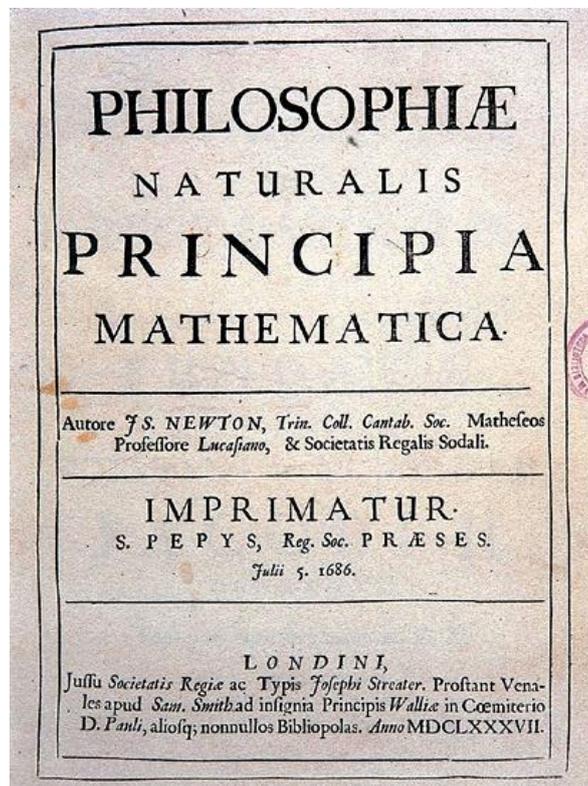
*Fotograma extraído de la película *Ágora*. En esta escena, Hipatia alude al concepto de movimiento relativo para demostrarle a Orestes que la Tierra puede estar en movimiento*

<https://www.youtube.com/watch?v=qtSD8ShDxEc>

Finalmente, será Newton quien responda a la causa subyacente al movimiento de los planetas. Si ya queda demostrado que los planetas orbitan en torno al Sol en órbitas elípticas con este en uno de sus focos ¿Cuál es la razón que los lleva a comportarse así? La razón es la fuerza de la gravedad [10]

Newton, no solo define el concepto de fuerza de la gravedad, si no que su respuesta también incluye la definición clásica del concepto de fuerza. Según se deduce de sus leyes de la dinámica puntual una fuerza no es el generador del movimiento. En su primera ley de la dinámica puntual establece que la resultante de una suma de fuerzas externas no nulas aplicadas sobre un cuerpo da lugar al cambio en las condiciones del movimiento.

A todo ello debe sumarse el desarrollo de las herramientas matemáticas del cálculo diferencial e integral. Base que servirá, tanto para la aplicación de sus leyes, como para el desarrollo progresivo de las mismas. (véase la **Unidad Didáctica micro o macro, depende de la lente**; donde se define, debate y articula las necesidades de un paradigma científico)



Philosophiæ naturalis principia mathematica de Isaac Newton. Compuesto de 3 volúmenes: definiciones, axiomas y leyes de movimiento.. De dominio público
[File:Principia Mathematica. Newton.jpg - Wikimedia Commons](#)

El paralaje no fue observado y medido hasta el siglo XIX, gracias a la mejora del instrumental. Aun existen diversos estudios, especialmente e internet, que mantienen su defensa del geocentrismo en base al argumento del paralaje

REVOLUCIÓN RELATIVISTA. VIVIENDO EN UN UNIVERSO CUATRIDIMENSIONAL

SESIÓN 1. Limitaciones de la física clásica

Lord Kelvin afirmó a finales del siglo XIX que la física era una ciencia prácticamente concluida a falta de algunos pequeños detalles a resolver. Estos pequeños detalles, entre los que cabe destacar, la catástrofe del ultravioleta o el fracaso del experimento de Michelson – Morley, se fueron enrocando hasta concebir las dos mayores revoluciones científicas de comienzos del siglo XX: la mecánica cuántica y la relatividad general. A continuación, abordaremos el segundo de ellos, contextualizándolo en la historia, exponiendo sus principales tesis y aportando algunas de sus implicaciones más importantes

Antes de la revolución relativista, la mecánica clásica era capaz de explicar la mayor parte de las observaciones, así como de la predicción de sucesos, ejemplificados en el descubrimiento de Urano. Sus raíces descansan en un núcleo conceptual compuesto por las leyes de Newton de la dinámica, el concepto de Sistema de Referencia y las transformaciones de Galileo para movimientos inerciales.

El núcleo hermenéutico no está aislado, sino que se haya entrelazado. La primera ley de Newton permite definir los sistemas inerciales, únicos para los cuales las transformaciones de Galileo están bien definidas. A su vez, las transformaciones de Galileo compilan en sí la necesidad de un sistema de referencia que permita cuantificar el movimiento. El movimiento no es un concepto absoluto, si no que la medida del espacio y del tiempo en base a la cual se interpreta debe realizarse conforme a una situación inicial definida y conocida que se llamará sistema de referencia. Por el contrario, el espacio y el tiempo si son magnitudes absolutas en el paradigma newtoniano.

El punto álgido del desarrollo newtoniano fue alcanzado por Laplace y Hamilton. Laplace demostró la posibilidad de conocer todo el futuro y el pasado de cualquier acontecimiento dadas una serie de medidas iniciales y la aplicación de la mecánica newtoniana. La euforia del determinismo laplaciano fue descartada al refutarse la validez de las tesis newtonianas bajo determinadas condiciones, pero también, por la irrupción de la probabilidad en el nuevo paradigma cuántico, así como por la teoría del caos de Lorenz, que se hizo patente en su famosa mariposa



La mariposa de Lorenz. Un icono de la teoría del caos. CC BY - SA 3.0

[File:Lorenz attractor yb.svg - Wikimedia Commons](#)

Los planteamientos de Newton en la mecánica se extendieron a otros campos como la electricidad y el magnetismo. El desarrollo formal de Newton, integral y diferencial, se expandió para dar cabida a nuevos operadores que se aplicaron sobre el campo eléctrico y magnético. Los avances derivaron en la fusión de ambas disciplinas en el electromagnetismo. Entre los resultados obtenidos finalmente por Maxwell destaca la naturaleza ondulatoria de la luz; la luz es una onda electromagnética.

En el siglo XIX, la confirmación de la naturaleza ondulatoria de la luz condujo a un gran problema: las ondas solo se propagan por medios materiales; si la luz es capaz de propagarse por el espacio, éste debe estar compuesto de un medio, el éter. El hallazgo de Maxwell de la luz como onda electromagnética transversal, donde el campo eléctrico y el campo magnético son perpendiculares a la propagación de la onda añadió aún un mayor nivel de complejidad, ya que las ondas transversales solo se propagan por medios sólidos. El éter debía ser lo suficientemente rígido como para permitir la propagación de la luz, sin enturbiar el movimiento de los astros, perfectamente explicado por la física newtoniana sin la presencia del éter. La búsqueda de la comprobación experimental del éter marcará la física de las últimas décadas del siglo XIX

El intento más notable, y a la postre, principal instigador del destierro de del éter fue el experimento de Michelson-Morley [11]. Michelson pretendía medir la velocidad relativa del éter respecto a la Tierra con un interferómetro. No se sabía si el éter estaría en reposo o la velocidad que tendría, pero dado que la Tierra gira en torno al Sol, la velocidad del éter respecto de la Tierra cambiaría a lo largo del año; y eso produciría ligeros cambios en el interferómetro. Como demuestra la simulación adjunta, en caso de existir el desplazamiento debido al éter (simulación de la derecha) los rayos no llegan al mismo tiempo al receptor, dando lugar a un fenómeno de interferencia. Los resultados arrojados por el experimento de Michelson-Morley fueron nulos: la velocidad de la luz no varía, o lo que es lo mismo, el éter no tiene ninguna velocidad apreciable.



*Pequeña simulación del experimento de Michelson – Morley.
Sacada de la versión inglesa de Wikipedia. CC BY - SA 3.0
[File:MichelsonMorleyAnimationDE.gif - Wikimedia Commons](#)*

SESIÓN 2. Cinemática relativista. Transformadas de Lorentz

El fracaso del experimento de Michelson - Morley condujo a Einstein a formular los postulados de la teoría de la relatividad especial

1. Las leyes de la física son las mismas en TODOS los sistemas de referencia inerciales
2. La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los sistemas de referencia inerciales

Estos postulados tuvieron como *consecuencias principales*:

- Las transformaciones cinemáticas de Galileo NO son correctas. Son tan solo aproximaciones para $v \ll c$
- El espacio y el tiempo NO son absolutos
- La velocidad de la luz en el vacío es un límite de la naturaleza

Las ecuaciones clásicas de Galileo se demostraron ineficientes para explicar los nuevos experimentos como el de Michelson-Morley. Con la necesidad de explicar ese experimento, Lorentz y Fitzgerald postularon la existencia de unas ecuaciones de contracción longitudinal, que a posteriori, Einstein integró bajo el paraguas de la teoría de la relatividad especial con el nombre de transformadas de Lorentz

Las transformadas de Lorentz se trata de las ecuaciones que describen el movimiento bajo condiciones cercanas a la velocidad de la luz. Se representan a través del factor γ , el cual se denomina factor de Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \quad \text{siendo } \beta = v/c$$

Para un movimiento relativo rectilíneo uniforme sobre el eje X, las transformaciones de Lorentz quedarían

$$\begin{array}{ccc} x' = \gamma \cdot (x - v \cdot t) & & x = \gamma \cdot (x' + v \cdot t') \\ y' = y & & y = y' \\ z' = z & \rightarrow\rightarrow\rightarrow & z = z' \\ t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{v}{c^2} \cdot x \right) & & t = \gamma \cdot \left(t' + \frac{v}{c^2} \cdot x' \right) \end{array}$$

Donde las variables con prima representan las variables asociadas al nuevo sistema de referencia y las variables sin prima representan las variables asociadas al antiguo sistema de referencia. Téngase en cuenta que al darse un movimiento exclusivo en el eje X, tan solo las coordenadas asociadas al eje X y al tiempo varían (el espacio y el tiempo ya no son absolutos, NO siempre valen lo mismo). También téngase en cuenta que para aproximaciones de $v \ll c$, se recuperan las transformadas de Galileo de la mecánica clásica

Las transformadas de Lorentz pueden expandirse a otros conceptos de la mecánica clásica como la velocidad, el momento lineal o la energía. Las velocidades se obtienen a través de su definición, es decir, su derivada en función del tiempo

$$v_x' = \frac{v_x + V}{1 + V \cdot v_x / c^2}$$
$$v_y' = \frac{v_y \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + V \cdot v_x / c^2}$$
$$v_z' = \frac{v_z \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + V \cdot v_x / c^2}$$

Se puede observar que las velocidades dependen del sistema de referencia, mas si se aproxima al caso no relativista (donde $v \ll c$) entonces se recuperan las velocidades producto de las transformadas de Galileo

Resulta conveniente definir una cuadrivelocidad, sin dimensiones, a partir de la longitud del cuadvivector

$$u^i = \frac{dx^i}{ds} \rightarrow u^i = \frac{v^i}{c \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}$$

Donde el superíndice describe la notación empleada en relatividad. Se denominan coordenadas contravariantes

La relatividad especial aportó una nueva manera de entender la física, posteriormente ampliada en la relatividad general. La teoría de la relatividad general prepondera la inercia sobre la gravedad, entendiendo esta última no como una fuerza, si no como una reacción natural presente en aquellos sistemas no inerciales que se oponen al movimiento natural. De este modo, resulta imposible distinguir entre la acción de la gravedad y las fuerzas de inercia provocadas por la aceleración

Los efectos de la contracción espacial y la dilatación temporal, así como la dinámica relativista clásica y su estudio energético pueden ser desarrollados por el docente en sesiones posteriores. Estos contenidos ya si son recurrentes en la mayor parte de los libros de texto del curso. Su estudio es asiduo, no redundando en la introducción histórica de la teoría o paradigma, constitutiva de este proyecto

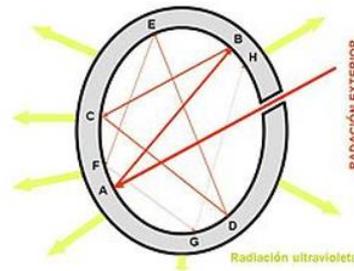
REVOLUCIÓN CUÁNTICA. EL LADRILLO DE LO ÍNFIMO

SESIÓN 1. Limitaciones de la física clásica. El cuerpo negro

A finales del siglo XIX, Lord Kelvin aseguró que la física era un campo prácticamente completado. Su valoración fue excesivamente positiva, dejando tan solo dos “sencillas” incógnitas a resolver: la explicación de emisión de un cuerpo en equilibrio térmico (cuerpo negro) y el fracaso experimental de Michelson y Morley. De los “pequeños” fallos de la física clásica surgieron la teoría cuántica y la teoría relativista, respectivamente. De Lord Kelvin se aprendió que no se debe subestimar el conocimiento físico de la naturaleza

Los experimentos acerca de la radiación del cuerpo negro, junto a la interacción entre la materia y la electricidad, fueron pioneros en poner de relevancia los límites de la física clásica. *Se define la radiación del cuerpo negro como la radiación electromagnética emitida por un cuerpo a una cierta temperatura T* como consecuencia de su agitación térmica, supuesto el estado de equilibrio térmico. La radiación del cuerpo negro se manifiesta tanto por absorción como por emisión

Un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación térmica que le llega. Es, por tanto, un absorbente perfecto, pero también, un emisor perfecto. Para cuantificar el poder emisor del cuerpo negro se define la irradiancia como la energía por unidad de tiempo (potencia) emitida por la superficie de un objeto por unidad de frecuencia y unidad de superficie, a una temperatura, T. La emisión de un cuerpo negro solo depende de su temperatura; y NO de su naturaleza (color, propiedades,)

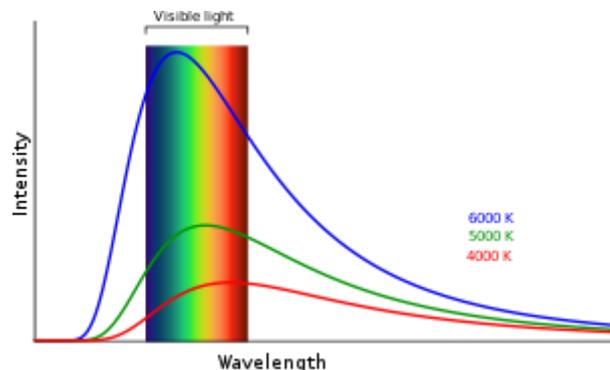


Pequeña simulación del cuerpo negro.
Creado por el usuario Think Tank CC BY - SA 4.0
[File:HORNQ CUERPO NEGRO TT.jpg - Wikimedia Commons](#)

Irradiancia o radiancia espectral

$$[R]_{SI} = J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$$

Los resultados experimentales otorgaron algunos resultados poco predecibles para la física clásica: la radiación solo dependía de la temperatura del cuerpo, pero no de su composición o estructura, arrojando una distribución de energía en función de la longitud de onda con un máximo; siendo nula en cero y tendiendo a cero en el infinito



Representación de las curvas del cuerpo negro. Irradiancia en función de λ . De dominio público
[File:Blackbody radiation.svg - Wikimedia Commons](#)

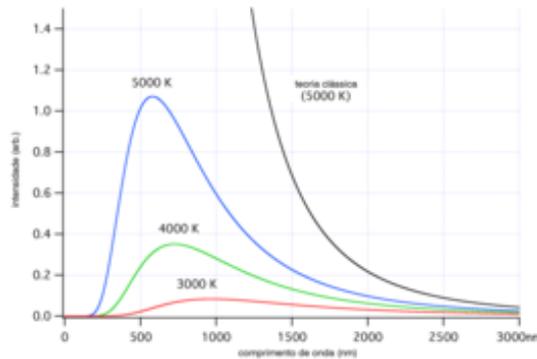
La solución clásica al problema está escrita en los nombres de Rayleigh y Jeans. Ellos obtienen el valor de la irradiancia en función de la frecuencia a través del conocimiento del número de nodos normales en la cavidad del cuerpo para la radiación electromagnética, multiplicado por la energía media que conlleva cada nodo de vibración

Estrictamente, obtienen el valor de la densidad de energía espectral (I), variable relacionada proporcionalmente con la irradiancia

$$I(\nu, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot \nu^2}{c^3} \cdot K_B \cdot T$$

Donde la constante K_B se demostró como constante universal. Se trata de la constante de Boltzmann $K_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

El resultado es conocido como *la catástrofe del ultravioleta*. La aproximación es buena para bajos valores de la frecuencia (o altos de λ) pero en cuanto aumenta esta (en el ultravioleta) la curva diverge, dando lugar a un valor infinito de energía, es decir, un sinsentido. Una energía infinita supone violar el principio de conservación de la energía



Representación de Rayleigh – Jeans (curva negra) frente a las curvas de Planck.
 Dominio público. [File:Blackbody-pt.png - Wikimedia Commons](#)

A finales de 1899, en un nuevo intento de analizar el problema, Planck supuso que la energía de la radiación electromagnética está discretizada en pequeños paquetes de energía denominados cuantos. Este es el origen de la física cuántica

La energía no puede tomar cualquier valor, sino que depende proporcionalmente de la frecuencia a través de una constante h , posteriormente denominada, constante de Planck

$$E = h \cdot \nu$$

Donde la constante h se demostró como constante universal. Se trata de la constante de Planck $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Con ellos, Planck pudo resolver el problema del cuerpo negro. El razonamiento de Rayleigh y Jeans era correcto en el número de nodos normales en la cavidad del cuerpo. El error se haya en la energía media de cada uno de ellos. La energía está cuantizada.

$$I(\nu, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot \nu^2}{c^3} \cdot \frac{h \cdot \nu}{e^{h \cdot \nu / K_B \cdot T} - 1}$$

SESIÓN 2. Fenómenos precuánticos. Mecánica cuántica

Todos los fenómenos precuánticos se basan en las dificultades de la interpretación para la interacción entre la radiación y la materia. De entre todos los fenómenos estudiados, como son el efecto fotoeléctrico, el modelo atómico de Bohr y la dualidad onda – corpúsculo, este proyecto, como temario de ampliación, se centra exclusivamente en el efecto Compton. El resto de fenómenos son tratados en la mayor parte de los libros de texto, asociados a la temporalización estándar del curso

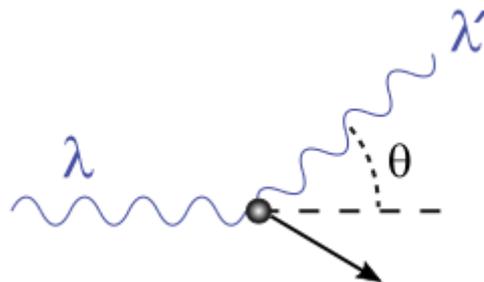
El efecto Compton constituye un nuevo problema de la interpretación en la física clásica para la interacción radiación – materia. Este consiste en la dispersión elástica de rayos X o muy energéticos por electrones libres o cuasilibres, donde los rayos dispersados tienen una longitud de onda menor

Clásicamente, era esperable que la longitud de onda de la radiación dispersada no cambiase respecto a la incidente. Por el contrario, las propiedades del efecto se contraponen a lo predicho por la física clásica. La frecuencia dispersada es independiente del material, dependiendo la distancia entre los máximos de las longitudes de onda dispersadas e incidente del ángulo de dispersión

La solución está, de nuevo, en tratar a la radiación incidente en forma discreta a través de fotones. De este modo, el efecto Compton se reduce a una interacción partícula – partícula, como el efecto fotoeléctrico, pero sin función de trabajo (al ser electrones libres) y relativista, dadas las altas energías en juego. Compton llegó a la siguiente expresión

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_{e^-} \cdot c} \cdot (1 - \cos\theta)$$

Donde λ' representa la longitud de onda del fotón después del choque y λ antes de la colisión y θ representa el ángulo de desviación



Efecto Compton. Sacada de la versión inglesa de Wikipedia.
CC BY - SA 3.0 <File:Compton-scattering.svg> - [Wikimedia Commons](#)

Finalmente, durante las primeras décadas del siglo XX comenzaron a sentarse las bases de una mecánica cuántica aún en desarrollo. Numerosos científicos ayudaron a su construcción, pero fueron, final y paralelamente, Schrödinger y Heisenberg quienes sentaron las bases del desarrollo de la mecánica ondulatoria y matricial respectivamente. Ambas son el reflejo de los mismos postulados tratados de forma matemática distinta, pero que otorgan resultados similares.

Schrödinger obtuvo su ecuación de ondas, en la cual describe cual es la evolución de las ondas que lleva aparejada toda partícula material, a partir de la aplicación de las leyes cuánticas de Planck y de De Broglie, a una onda plana

$$i \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{\partial \Psi_P}{\partial t} = \left[-\frac{h^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot m} \cdot \nabla^2 + V(\vec{r}) \right] \cdot \Psi_P(\vec{r}, t)$$

Realmente, la función de onda Ψ_P no tiene interpretación física. Pero si la tiene su cuadrado. Se trata de la probabilidad de encontrar una partícula en el espacio. Esta interpretación se denomina *interpretación de Copenhague*, admitida por la comunidad científica. No obstante, existen otras tesis defendidas por un menor número de científicos (aunque algunos muy relevantes) como la interpretación en función de variables ocultas

La resolución de la ecuación de Schrödinger, ligada a la interpretación de Copenhague del cuadrado de la función de onda, ha dado lugar a formulación de los orbitales atómicos; regiones del espacio donde existe cierta probabilidad de encontrar al electrón orbitando alrededor del núcleo atómico

En suma, los postulados de la mecánica cuántica se pueden resumir en tres:

- El estado de un sistema físico se representa por una función de onda Ψ , que pertenece al espacio H de estados, el cual es un espacio lineal
- Cada observable físico se representa por un operador hermítico $\hat{Q} = \hat{Q}^T$ con autovalores reales q_n asociado a su problema de autovalores $\hat{Q}_n \cdot \Psi_n = q_n \cdot \Psi_n$
 - El conjunto de los valores observables experimentalmente al medir \hat{Q} son $\{q_n\}$, no pudiendo medir nada que no esté en su espectro
 - La probabilidad de medir \hat{Q} y obtener un q_n es $P_\Psi(q_n) = |a_n|^2$, donde $\Psi = \sum_n a_n \cdot \Psi_n$ es la función de ondas a medir
- La evolución temporal de la función de ondas de un sistema cuántico se sigue por la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo

Por otra parte, el principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que la medición simultánea de la posición y el momento lineal de una partícula no se pueden conocer con certeza absoluta, estableciéndose un rango de indeterminación dependiente de la constante de Planck. El principio de incertidumbre rompe con el determinismo clásico denotando la deriva probabilística de la teoría

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4 \cdot \pi}$$

Partiendo del principio de incertidumbre es posible establecer otras relaciones de incertidumbre entre dos pares distintos. Así resulta posible relacionar la energía y el tiempo de un modo análogo. Las relaciones de incertidumbre son consecuencia del propio proceso de medición, es decir, de la naturaleza de la interacción entre el sistema y el dispositivo de medida. Es una propiedad de la naturaleza, es decir, no depende de las precisiones que se puedan obtener con los distintos dispositivos de medida

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4 \cdot \pi}$$

ACTIVIDAD.

SESIÓN EXTRA. Debate parlamentario

La actividad propuesta se puede enmarcar al finalizar cada uno de los tres bloques que articulan el proyecto. Se deja a la conveniencia del docente

Durante una revolución científica siempre existen dos visiones de la realidad. Solo una de esas dos visiones puede ser considerada válida desde el punto de vista científico; de modo que puede establecerse la analogía con dos partidos políticos de distinto tinte ideológico. El partido conservador representaría el paradigma científico precedente (por ejemplo, el geocentrista) mientras que el partido político progresista representa la nueva visión (en este caso, la heliocéntrica)

¿Cómo se plantea la actividad?

Se trata de dividir a la clase en dos grupos. Cada uno de los grupos debe defender su marco en base a argumentos científicos.

- 1) En primer lugar, se forman cada uno de los grupos (o partidos) al azar. Así se fomenta el juicio crítico y la colaboración con los iguales
- 2) Posteriormente, en cada uno de los partidos se asignan roles
 - i. Un *portavoz*, que defienda y exponga las argumentaciones
 - ii. Un *secretario*, que debe registrar el proceso en un cuaderno de actas. Indicará que se realiza cada uno de los días
 - iii. La *comisión de búsqueda de información*. Deben documentarse sobre las pruebas empíricas o teóricas que respalden su paradigma científico
 - iv. La *comisión de resolución de conflictos*. Se trata de un grupo de soporte, que apoye al resto de equipos y resuelva los posibles conflictos que surjan. *Estará liderada por el responsable de campaña*
 - v. Un *responsable de campaña*. Actúa en coordinación permanente con el portavoz, liderando la comisión de resolución de conflictos
 - vi. La *comisión de gestión documental*. Se trata del equipo que realiza el material que posteriormente defenderá el portavoz. Se puede emplear cualquier tipo de soporte
- 3) Finalmente, se establece una sesión de exposición, donde cada uno de los portavoces defiende su paradigma científico

¿Cómo se evalúa la actividad?

La evaluación se realiza de un modo conjunto para todo el grupo a partir de la rúbrica adjunta (véase apartado de Evaluación). En ella se califica cada uno de los espectros del partido, estableciendo una misma valoración conjunta para todos los miembros. Así se pretende potenciar el trabajo colaborativo

Si le es posible al docente, resulta muy conveniente abordar la actividad de la presente Unidad Didáctica en **colaboración con el departamento de Historia y Geografía y el de Biología y Geología**, donde se coordinan actividades semejantes en este proyecto

5. EVALUACIÓN

La Unidad Didáctica desarrollada se articula para dos cursos distintos. Parte de la misma, se enfoca en primero de Bachillerato y la otra, en segundo. El método de evaluación de cada una de ellas se hará mediante las herramientas de evaluación y calificación adjunta a cada bloque de contenidos, que deben ser realizadas y consensuadas por el Departamento

El proyecto se articula en contenidos ordinarios sumandos a contenidos de profundización que no requieren de herramientas de evaluación distintas a las establecidas en las programaciones de cada uno de los departamentos. La mayor parte de las actividades se asocian a la escucha activa y la participación del alumnado en el seguimiento de los descubrimientos científicos, de modo que sirven más para construir un aprendizaje significativo futuro de la UD asociada que para que sea evaluada

No obstante, la actividad de la sesión, enmarcada en la sesión que prefiera el docente, sí que requiere de un método de evaluación distinto. Para ello se adjunta a continuación una rúbrica de exposición que contiene los principales ítems a valorar por el docente. Esta herramienta puede ser empleada por el docente, o bien adaptada según su necesidad. Tan solo constituye un borrador orientativo a uso según la conveniencia del docente que palpa su aula desde dentro

La rúbrica valora aspectos expositivos, como la dicción o la postura gestual, combinada con aspectos argumentativos y de búsqueda de información ajustada al discurso a defender

En la rúbrica, cada categoría puntuará dos puntos sobre la nota final. A su vez, dentro de cada categoría, la puntuación aumentará en 0,5 puntos por cada nivel asignado

RÚBRICA PARA EVALUAR: DEFENSA Y EXPOSICIÓN ORAL

Alumno:

Calificación Final:

| CATEGORÍA | 4 | 3 | 2 | 1 | TOTAL |
|---------------------------------|---|---|--|---|-------|
| <u>Gestión documental</u> | La presentación es creativa. Argumenta clara y convincentemente las tesis | Argumenta y defiende claramente las tesis. La presentación resulta plana y poco creativa | La argumentación no está bien cohesionada, a pesar de establecer una correcta presentación | La presentación carece de originalidad. Las ideas no tienen un hilo argumental que seguir | |
| <u>Portavoz</u> | La puesta en escena y la posición del cuerpo es la adecuada. El ponente domina la escena | El ponente domina la escena, pero, en ocasiones, no alude lo suficiente a la presentación. No existe una concordancia plena | La posición del ponente es la adecuada sin dominar la escena, siendo la presentación repetitiva por momentos | El discurso y la presentación no concuerdan. El ponente se esconde, sin dominar la escena | |
| <u>Resolución de conflictos</u> | La organización del grupo ha sido la adecuada. Los posibles conflictos se han resuelto en el seno del grupo | El grupo se ha organizado convenientemente, con distractores puntuales o miembros no participativos | La organización del grupo ha sido intermitente. Ha sido necesaria la intervención puntual del docente | El grupo no ha sabido organizarse. Ha sido necesaria la continua intervención del docente | |
| <u>Secretario</u> | Se presenta un acta de las sesiones completo, bien estructurado y organizado | El acta de las sesiones está completo, pero carece de limpieza y/o una buena estructura | El acta de las sesiones se encuentra incompleto. Existen incoherencia en el mismo | No existe un acta de sesiones que permita seguir el trabajo realizado por el grupo | |
| <u>Búsqueda de información</u> | Realiza una búsqueda de información ajustada al discurso. Cita las fuentes | Realiza una contrastada búsqueda de información, que, en ocasiones, no cita | En algunas ocasiones las citas o fuentes de información empleadas son de dudosa certeza científica | No recurre a fuentes de información ajustadas a criterios científicos. | |

6. REFERENCIAS Y PÁGINAS WEB

- [1] J.C. Otero. (1985) *Assimilation problems in traditional representations of scientific knowledge*. European Journal of Science Education, 7, 361-369.
- [2] J.M Campanario (1998) *Ventajas e inconvenientes de la historia de la ciencia como recurso de la enseñanza de las ciencias*. Revista de la Enseñanza de la Física. Vol 11, Nº 1, 5 -14
- [3] Boletín oficial del Estado (2015). Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato
- [4] Boletín oficial de la Comunidad de Madrid (2015). Decreto 52/2015, de 21 de mayo, del Consejo de Gobierno, por el que se establece para la Comunidad de Madrid el currículo del Bachillerato.
- [5] Otto E. Neugebauer. *The Exact Sciences in Antiquity*. Dover Publications, Inc. Segunda Edición. New York. 1957
- [6] Caratini, Roger. *Los matemáticos de Babilonia*. Ediciones Bellaterra S.L., 2004
- [7] Mínguez Pérez, Carlos. *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes)*. Tecnos. 2009
- [8] Claret dos Santos, Antonio. *Azarquiel y otras historias: la astronomía en Al – Andalus*. Granada: CSIC. 2005
- [9] Galilei, Galileo. *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, ptolemaico y copernicano*. Madrid: Alianza. 1994
- [10] J. Evans (1996). *Fraud and illusion in the anti-newtonian rear guard*. Isis, 87, 74-107.
- [11] A. Drewes y H. Palma. *Crítica al experimento crucial: Michelson y la hipótesis del éter (1887 -1930). Algunas implicaciones para la enseñanza de la física (15/17 años)*. Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias. 3 (3), pág. 430 – 451 2006