

PROYECTO: TODO Y NADA. ¿Está vacío el vacío?

Vivimos en una sociedad extremadamente dependiente de la ciencia y la tecnología, en que casi nadie tiene unas mínimas nociones sobre ciencia y tecnología.

Carl Sagan

En este documento que vas a encontrar:

Introducción / Objetivo General de la Unidad / Dónde encuadrar esta actividad en el currículo oficial / Metodología a seguir / Productos / Temporalización / Evaluación / Referencias /

1. INTRODUCCIÓN

El actual proyecto se acerca al mundo cuántico y de la física de partículas. El pie inicial lo otorga el vacío. ¿Existe realmente el vacío? ¿Se puede afirmar que existen partes del Universo donde no haya literalmente nada? A pesar de la famosa aversión de Aristóteles al vacío, la historia de la ciencia ha demostrado que no ha sido posible converger en una única idea acerca del vacío. Recurrentemente, los científicos se han ido acercando y alejando por igual de su utilidad conceptual y matemática. En el momento que parecía darse una prueba definitiva de su existencia o inexistencia, pronto aparecería una nueva corriente científica, cuya concepción sobre el vacío era la contraria. Este proyecto recorre parcialmente este desarrollo histórico (para profundizar más, véase la UD *La materia de la libertad* De la asignatura de Filosofía) para desembocar en la idea actual del vacío incluida en el marco de la física cuántica

Según la física cuántica, *el vacío no es la nada y tampoco está vacío* [1]. La teoría cuántica postula el vacío a partir de un remanente de energía que lo permea producto de las interacciones múltiples existentes entre los campos cuánticos. De este modo, resulta posible suponer que el vacío cuántico genera partículas regidas por el principio de incertidumbre de Heisenberg, que, tal como se generan, se destruyen. Entre ellas cabe destacar las partículas de antimateria. ¿Qué es la antimateria? ¿qué la relaciona con la materia? ¿Tiene algo que ver con la materia oscura? Todo lleva el mismo nombre, pero en su apellido radica la diferencia. Las sesiones secuenciadas en el presente proyecto ayudan al docente y al estudiante a realizar unas primeras inferencias significativas en un campo tan abstracto, y la vez, tan enigmático y atractivo

El resultado final del camino de la física de partículas conduce al modelo estándar de partículas. Al menos, hasta este momento. Este modelo es uno de los principales logros de la física actual, que, por otra parte, mantiene una serie de inconsistencias propias de una física no finalizada. Conocer y solventar los problemas de la física más allá del modelo estándar constituye uno de los grandes retos de la ciencia actual, y de la física en particular.

Las últimas sesiones del proyecto se encaminan a describir el modelo estándar de partículas por parte del docente, para que sean los alumnos, quienes indaguen en la física más allá del modelo estándar. A través de píldoras los alumnos deben exponer algunas de las líneas de investigación punteras de la física en este campo. Las píldoras tienen como modelo la estructura realizada por los videos del IFT (Instituto de Física Teórica) [2] donde los investigadores responden a dudas enviadas por la ciudadanía; siempre en vídeos de corta duración y de carácter conciso

2. OBJETIVO GENERAL DE LA UNIDAD DIDÁCTICA

El objetivo general de la Unidad Didáctica consiste en familiarizar al alumnado de segundo de Bachillerato de la asignatura de Física con la física de partículas y la cosmología. Para hacerlo, se establecen tres perspectivas y/o bloques conceptuales, de modo que el docente que pretenda emplear el siguiente material, pueda secuenciar cualesquiera de ellos de una forma indistinta, pero, a su vez, correlativa (siendo en este proyecto conveniente su aplicación conjunta):

- Contextualización histórica del vacío. Efecto Casimir
- Antimateria y materia oscura. ¿Tienen algo que ver?
- Modelo estándar de partículas. Física de vanguardia: más allá del modelo estándar.

La temporalización de cada uno de los bloques no exige de más de una o a lo máximo, dos 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

En este caso, los bloques están fuertemente interrelacionados. Los contenidos se articulan según la lógica interna de los contenidos y su fundamentación histórica, lo que garantiza una mejor comprensión del alumnado y un grado de inferencias de mayor complejidad con la materia descrita en el currículo oficial. Eso no implica que no puedan ofrecerse como píldoras individuales, si bien, el marco competo del proyecto le dota de un carácter más fuerte y compacto

3. ENCUADRE EN EL CURRÍCULO OFICIAL

Los contenidos acerca de la física de partículas 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 física de partículas se enmarca dentro del bloque 6. *Física del siglo XX* de la asignatura de Física de 2º de Bachillerato

A su vez, todo ello se especifica dentro de dicho bloque, en los Criterios de Evaluación 18, 19, 20 y 21, así como en los estándares de aprendizaje 18.1, 18.2, 19.1, 19.2, 20.1, 20.3 y 21.1

18.1 Compara las principales teorías de unificación estableciendo sus limitaciones y el estado en el que se encuentran actualmente

18.2 Justifica la necesidad de la existencia de nuevas partículas elementales en el marco de la unificación de las nuevas interacciones

19.1 Describe la estructura atómica y nuclear a partir de su composición en quarks y electrones, empleando el vocabulario específico de la física de quarks

19.2 Caracteriza algunas partículas fundamentales de especial interés, como los neutrinos y el bosón de Higgs, a partir de los procesos en los que se presentan

20.1 Relaciona las propiedades de la materia y la antimateria con la teoría del Big Bang

20.3 Presenta una cronología del Universo en función de la temperatura y de las partículas que lo formaban en cada periodo, discutiendo la simetría entre materia y antimateria

21.1 Realiza y defiende un estudio sobre las fronteras de la física del siglo XXI

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

Los contenidos se implementan coordinados con criterios de evaluación propios de un bloque más transversal asociados al uso de herramientas tecnológicas y de valoración de la información científica descritos en el Bloque 1. *La actividad científica*

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. La temporalización del proyecto, justo al final del curso, hace que el alumnado ya deba conocer la mayor parte de los conceptos iniciales requeridos; a saber, pequeñas nociones de fuerza, electromagnetismo y cuántica

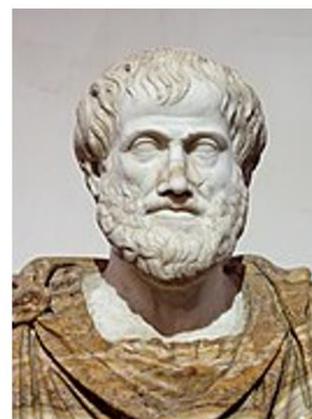
Cada sesión está plantada para una duración de unos 50 minutos, si bien su tiempo de aplicación deberá ser fijado exclusivamente por el docente que aplique estos materiales en el aula

SESIÓN 1. ¿Está vacío el vacío?

Recurrentemente, el concepto físico de vacío ha sido entronado o bien desahuciado. Numerosos científicos de renombre han sustentado gran parte de su física en este concepto (o bien en su ausencia), lo que otorga a la cuestión del vacío un carácter primordial en la historia de la ciencia.

A pesar de ser un concepto largamente establecido en el imaginario popular, la primera escuela científica en hacer uso de él fue la escuela jonia. Los filósofos jonios se preocuparon por la situación que ocupaba la Tierra en el universo, dando cabida por primera vez al concepto de vacío alrededor de esta. Si bien, en el siglo VI a.C fue la primera vez que se pueden encontrar alusiones al vacío, no es hasta Aristóteles donde dicho concepto comienza a alcanzar una importancia significativa. Aristóteles descarta el vacío con argumentos físicos, apelando a una imposible velocidad infinita de los cuerpos. A ello se suma la demostración empírica de Empédocles del aire como sustancia material, lo que condujo a la idea de que el espacio deber ser un plenum.

La teoría de Aristóteles explica el movimiento a través de una causa eficiente que actúa sobre el cuerpo provocando su movimiento. Esta idea puede ser asociada a la noción física de fuerza; si bien, actualmente se entiende la fuerza como la causa física que provoca el cambio del movimiento, el cambio dinámico, pero no la generación del mismo, como en el concepto aristotélico. La necesidad de una fuerza actuando sobre el móvil en su movimiento entronca con la inexistencia del vacío, ya que el móvil en su desplazamiento arrastra el aire dejando un supuesto vacío detrás de él. La inexistencia del vacío hace que el aire complete rápidamente ese supuesto vacío, actuando así de causa eficiente con el cuerpo que sigue su desplazamiento (para ampliar acerca de noción aristotélica de vacío, véase la UD *La materia de la libertad* de Filosofía)



Busto de Aristóteles. Copia romana. Imagen de dominio público

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aristotle_Altemps Inv8575.jpg

La expansión de las ideas atomistas tras la revolución copernicana, así como la refutación de numerosas teorías aristotélicas llevadas a cabo por Galileo y sus discípulos, supusieron la vuelta a la existencia del vacío.

Los experimentos de Torricelli, y sus famosos 76 mm de Hg, demostraron la existencia de la atmósfera y el peso que esta ejerce. Es la presión atmosférica. Años más tarde, Pascal ascenderá el Puy de Dôme con un barómetro de mercurio en la mano, midiendo la presión durante su ascenso. Observó que la columna de mercurio bajaba en su ascenso. Si la presión atmosférica disminuye con la altitud, será que la propia atmósfera debe tener un fin. Por tanto, el resto del espacio debe estar vacío. Vacío que tan solo un pequeño tiempo después empleó Otto Von Guericke frente al emperador Fernando III de Habsburgo en su famoso experimento de las esferas de Magdeburgo, donde los caballos no pudieron separar dos semiesferas en las cuales se había realizado el vacío en su interior.



Imagen de un sello postal donde se representa el experimento de las esferas de Magdeburgo. De dominio público
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stamps_of_Germany_\(DDR\)_1969,_MiNr_1514.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stamps_of_Germany_(DDR)_1969,_MiNr_1514.jpg)

A pesar de la reticencia de algunos destacados científicos como Descartes y de la búsqueda de un soporte “real” a la propagación de las fuerzas como hizo Faraday (véase *el final de la presente sesión*), la idea del vacío se afianza durante, al menos, un par de siglos. Todo parecía haber convergido en la existencia del vacío hasta la unificación de las leyes del electromagnetismo llevadas a cabo por Maxwell.

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 y no ser vacío. Ese medio es el éter (recuperando la idea aristotélica del horror vacui). El hallazgo de Maxwell de la luz como onda electromagnética transversal, donde el campo eléctrico y el campo magnético son perpendiculares a la dirección de 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, y, por tanto, de la ausencia definitiva del vacío, marcará la física de las últimas décadas del siglo XIX.

El intento más notable, y a la postre, principal instigador del destierro del éter y de la vuelta a la idea de vacío fue el experimento de Michelson – Morley [5]. 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

Este fracaso condujo a Einstein a formular los postulados de la teoría de la relatividad especial (véase UD. *Revoluciones científicas. Desde Copérnico al mundo cuántico*) donde la figura del éter resulta superflua y ya no se tiene en cuenta. Es el tejido espacio – tiempo, el que actúa como soporte para la propagación de las ondas electromagnéticas, ya no siendo necesario una estructura material que permee el vacío y que, por tanto, justifique su ausencia

La revolución cuántica supone una última vuelta de tuerca final al concepto de vacío. Como se expuso en la introducción de este proyecto, la física cuántica afirma que *el vacío no es la nada y tampoco está vacío [1]*. La clave de la misma es la interacción existente entre los campos cuánticos y su delimitación por el principio de incertidumbre de Heisenberg

El principio de incertidumbre afirma que la medición simultánea de un par de variables conjugadas no se puede conocer con certeza absoluta, estableciéndose un rango de indeterminación dependiente de la constante de Planck. Así, el principio de incertidumbre rompe con el determinismo clásico denotando la deriva probabilística de la teoría

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

Siempre resulta posible establecer la indeterminación entre dos pares conjugados. Los más conocidos son la posición y el momento lineal, pero también existen otros como la energía y el tiempo. Este último será el que se emplea para definir ese vacío cuántico no tan vacío

Téngase en cuenta que, si se define el vacío como un sistema que no contiene nada, su energía ha de ser nula. Pero resulta que, si la energía del sistema siempre es nula, entonces conoceríamos su valor en todo instante, lo cual es incompatible con el principio de incertidumbre de Heisenberg anteriormente expuesto. Por tanto, se debe conceptualizar el vacío como aquel sistema que tiene continuas fluctuaciones de energía de forma que el valor promedio de su energía es nulo, pero que puede no estar vacío. Ya que se puede generar energía en el vacío, siempre y cuando dicha energía permanezca en un plazo de tiempo lo suficientemente breve como para garantizar el cumplimiento del principio de incertidumbre

Las fluctuaciones del vacío se presentan, generalmente en forma de partículas. Principalmente, presentan el carácter de partícula – antipartícula que finalmente, se puedan aniquilar para devolver la energía prestada al vacío cuántico, haciendo permanecer a este en un promedio nulo

La corroboración experimental de la existencia de partículas en el vacío cuántico es el efecto Casimir. Dicho efecto dice lo siguiente:

<< Si disponemos en el vacío dos espejos perfectos separados por una distancia pequeña estos se atraen entre si >> [6]

De modo que aparece una fuerza de consecuencias no nulas en el propio vacío. Esta fuerza no tiene origen en algún elemento externo al experimento como la suposición de espejos cargados. Es una fuerza que se genera por inducir condiciones de contorno en el vacío (en este caso, los espejos), pero cuyo origen es el mismo vacío [7]. Es decir, el vacío no está vacío como nos indica la física cuántica. El efecto fue teorizado por Casimir en 1948 y demostrado experimentalmente en el año 1997.

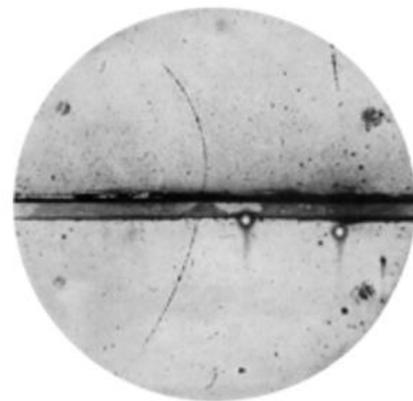
La explicación al efecto Casimir radica en la teoría cuántica de campo (QFT). Esta teoría afirma que todo espacio esta permeado por campos de origen cuántico cuyas fluctuaciones locales dan lugar a las partículas que conocemos. Entre esas partículas se pueden definir las partículas virtuales como aquellas generados por las fluctuaciones de los campos en un rango de tiempo infinitesimalmente pequeño, como se aduce según el principio de incertidumbre [7]. No son reales como tal, pero si pueden provocar efectos reales en ese espacio limitado de tiempo. Entre esos efectos reales se encuentra el efecto mensurable de atracción entre los espejos, que fue cuantificado teóricamente y corroborado experimentalmente.

SESIÓN 2. La materia oscura no es la antimateria

Durante la sesión anterior se ha mencionado ligeramente uno de los fenómenos físicos más pujantes dentro de la divulgación de la física teórica y de partículas: la antimateria. La fluctuación de los campos cuánticos que generan el vacío puede dar lugar a pares partícula – antipartícula. Pero ¿qué son las antipartículas? ¿qué es la antimateria?

La antimateria es una forma de materia menos frecuente que la materia ordinaria y que está compuesta de antipartículas. Las antipartículas son partículas semejantes a las ya conocidas y que nos resultan familiares en los libros de ciencias: protón, neutrón, electrón,... Mientras algunas de sus parámetros descriptores son iguales a los de la materia ordinaria, como la masa; su carga eléctrica y su espín son opuestos. Es decir, son partículas iguales con carga y espín opuestos.

Algunos ejemplos de antipartículas son el positrón para el electrón, el antiprotón para el protón o los antiquarks para los quarks (véase sesión 3) La antimateria fue formulada por primera vez por el físico británico Paul Dirac al resolver la ecuación que lleva su nombre, siendo encontrado el positrón en 1932 por Anderson gracias a las fotografías de rayos cósmicos en una cámara de ionización. El rastro dejado por los positrones era idéntico al de los electrones, dada su igual masa y valor absoluto de su carga, pero con sentido opuesto de giro dado el signo opuesto de la carga



Fotografía del primer positrón observado en la cámara de niebla.
Imagen de dominio público.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PositronDiscovery.png>

Si una partícula de antimateria alcanza a encontrarse con su par conjugado de antimateria, entonces ambos se aniquilan dando lugar a energía en forma de fotones. Esta propiedad es la que hace que no se viole el vacío cuántico explicado anteriormente

El origen de la materia es el mismo que el de la antimateria: el Big Bang. Si ambos tienen el mismo origen ¿cómo es posible que no se aniquilaran mutuamente en los primeros instantes de tiempo? ¿Por qué la proporción de antimateria es tan escasa en el universo comparada con la de materia? Por suerte, todo nuestro universo está formado de materia, ya que, si existiese una proporción semejante de materia y antimateria, en el momento que interactuasen, se aniquilarían en forma de energía

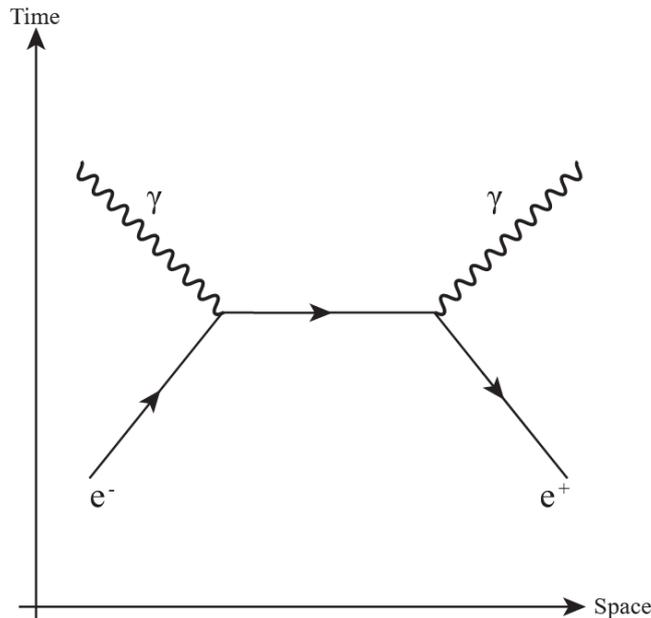


Diagrama de Feynman que muestra la aniquilación de un par electrón – positrón en dos fotones (energía)
Manticorp. CC BY – SA 3.0. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mutual_Annihilation_of_a_Positron_Electron_pair.svg

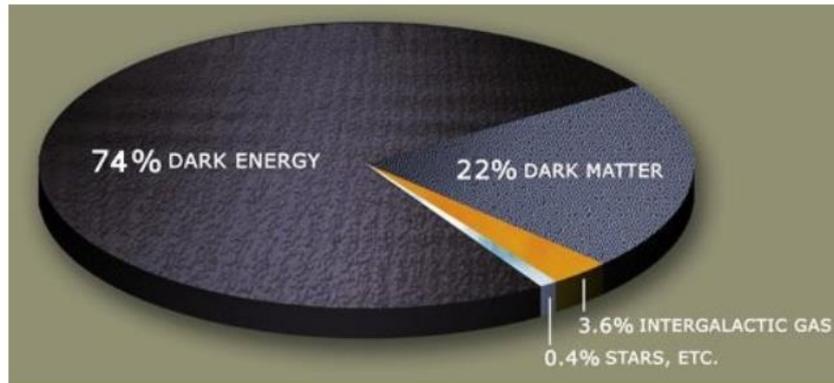
El problema por el que la materia superó a la antimateria en esos instantes iniciales se denomina bariogénesis, y es lo que hace que el universo actual esté conformado de materia y no de antimateria. Se barajan varias posibilidades entre las que cabe destacar la violación de la simetría CP [8].

Las leyes de la naturaleza deberían respetar la simetría CPT. La simetría C consiste en la simetría de carga, mientras que la simetría P consiste en la simetría de paridad (simetría bajo invariancia especular), es decir, invariancia entre giros levógiros y dextrógiros. Por último, la simetría T implica las mismas leyes físicas a pesar de un avance del tiempo hacia adelante o hacia atrás. Es la simetría temporal. Si se realizan esas tres inversiones, las leyes físicas deben tratar el sistema original de un mismo modo antes o después de realizar las transformaciones de simetría. Pues bien, una de las hipótesis postuladas es que las partículas y las antipartículas no tienen propiedades exactamente iguales o simétricas, lo que se denomina violación de la simetría CP, requisito fundamental para explicar el aparente triunfo de la materia sobre la antimateria

La violación de la simetría CP es uno de los requisitos de Shkarov que se deben satisfacer para entender la disparidad materia – antimateria dentro del modelo estándar [9]. A pesar de no conocer el origen de la violación de la simetría CP si se ha observado experimentalmente este fenómeno en varias ocasiones, incluyendo el decaimiento de kaones (otra partícula subatómica) neutros. La hipótesis actual es que la interacción débil no presenta simetría CP, de modo que trata la materia y la antimateria de forma diferente, mientras que la interacción de la gravedad y la electromagnética si tratan por igual por materia y antimateria. La última de las interacciones, la interacción fuerte o de color, se piensa que también puede violar la simetría CP, si bien, no ha sido realizado experimento alguno que lo corroboró (problema CP fuerte) como en el caso de la interacción electrodébil.

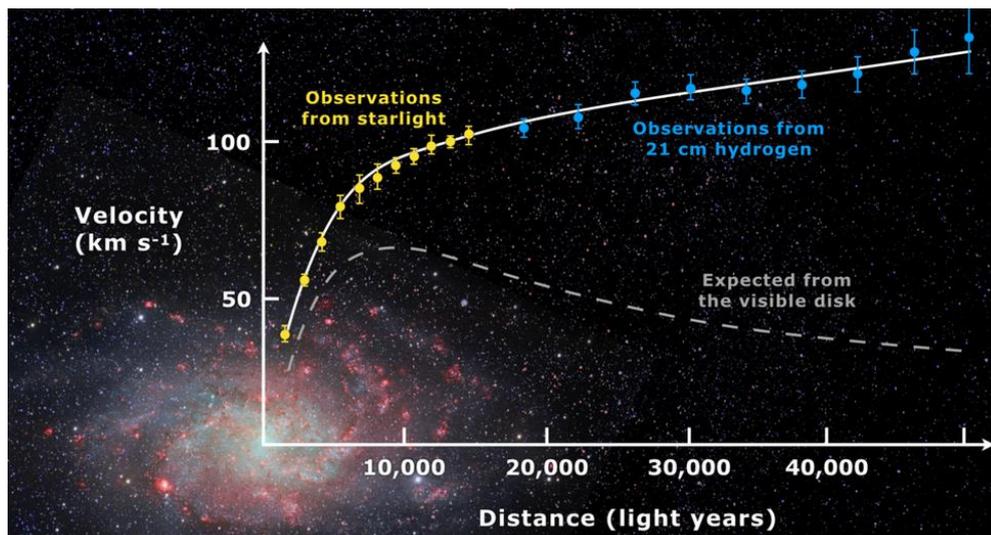
No obstante, el problema de la bariogénesis sigue abierto, ya que lo que se conoce acerca de la interacción débil y la violación de la simetría CP no es suficiente para explicar la diferencia entre materia y antimateria en el universo.

No se debe confundir la antimateria y el problema asociado de la bariogénesis con la materia oscura. Antimateria y materia oscura no son lo mismo. Si la antimateria es una forma de materia menos frecuente, pero si conocida, se puede afirmar que la materia oscura es una forma de materia más frecuente que la materia ordinaria conocida, pero de la que tan solo se conocen escasas propiedades. Se estima que el porcentaje de materia oscura en el universo ronda el 25 % (el gráfico adjunto de la NASA de 2007 muestra un porcentaje algo inferior)



La materia oscura es un tipo de materia que no interacciona con el campo electromagnético, es decir, que no es observable por métodos directos, ni emite o absorbe radiación electromagnética, pero que si sufre la interacción gravitatoria. Los indicios afirman que la proporción de materia oscura es mucho mayor a la de la materia ordinaria, estando, al menos, ambas en proporción de 4 a 1 [10]

La materia oscura viene avalada por varias observaciones científicas que necesitan de su existencia para ser satisfechas. Así ocurre con la velocidad de rotación del gas y las estrellas de las partes más lejanas de las galaxias. Según la predicción de la ley de gravitación universal de Newton, la velocidad de rotación debería decrecer con la distancia al centro de la galaxia, cosa que no sucede así según las observaciones realizadas por Vera Rubin (conviene conocer y reconocer a una de las grandes mujeres de la ciencia). La existencia de materia oscura, en enormes cantidades, explicaría que ese factor se mantenga casi constante con la distancia. Otras pruebas de su presencia se pueden observar en la radiación de fondo de microondas o en las lentes gravitacionales.



Velocidad de rotación de la galaxia Messier 33. Las observaciones siguen la tendencia marcada por las predicciones de velocidad elaboradas con materia oscura. La línea gris punteada refleja las predicciones sin materia oscura
Mario de Leo CC BY – SA 4.0
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotation_curve_of_spiral_galaxy_Messier_33_\(Triangulum\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotation_curve_of_spiral_galaxy_Messier_33_(Triangulum).png)

Uno de los más conocidos candidatos a materia oscura ha sido el neutrino. Actualmente, su papel como constituyente de la materia oscura ha sido descartado. A pesar de que los neutrinos interactúan poco con la materia ordinaria, como debe hacer la materia oscura, se sabe que la materia oscura debe ser fría, es decir lenta y no cercana a las velocidades relativistas, cosa que no ocurre con los neutrinos. La relevancia de la física de neutrinos en las últimas décadas, descubriendo diversas características asombrosas de ellos (y que pueden ser objeto del trabajo final del presente proyecto) los ha catapultado como candidatos a resolver cualquier problema; pero ellos no son la solución a este

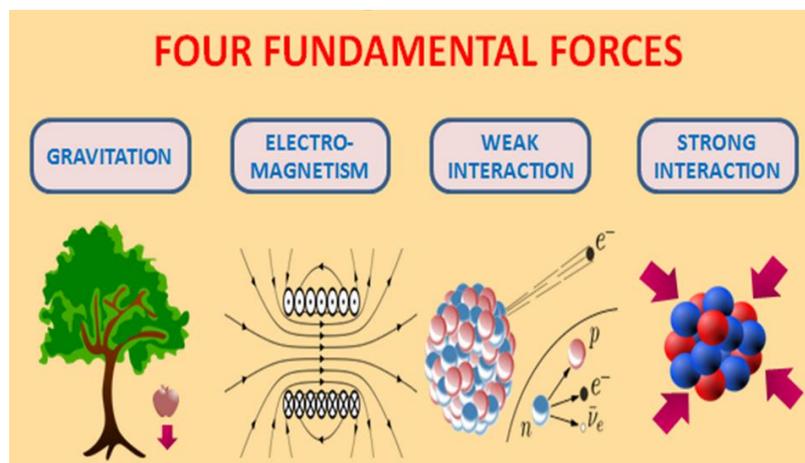
Otras teorías en desarrollo, como la supersimetría [11] (otra de las posibles propuestas de trabajo final), donde cada bosón tiene una partícula supersimétrica asociada en forma de fermión, y viceversa, cada fermión un bosón supersimétrico; presentan candidatos de partícula a la materia oscura. En este caso, el neutralino, una superposición lineal de partículas que den lugar a la partícula supersimétrica estable más ligera (LSP), que correspondería a la partícula que conforma la materia oscura. No obstante, estas teorías son tan solo teorías en desarrollo

En definitiva, a pesar de las pistas acerca de la materia oscura, todavía no se ha encontrado su origen y causa. Para ello existen numerosos experimentos, como el de Canfranc [10], gran parte de ellos establecidos bajo la superficie terrestre. Se trata de que tan solo partículas que interactúen levemente con la materia ordinaria (como es el caso de la materia oscura) alcancen esas profundidades; descartando así al resto de candidatos de antemano

SESIÓN 3. Modelo estándar de partículas

Hasta el siglo XIX, se pensó que los orígenes de la materia conocida eran los átomos. Se los tenía como partículas indivisibles e indestructibles. Los siglos posteriores, especialmente, el final de siglo XIX y el siglo XX manifestaron la existencia de multitud de partículas subatómicas que desterraron la idea de átomo como ladrillo último de la materia. Entre todas estas partículas, cabe destacar, las partículas que conforman tanto la materia como la antimateria, anteriormente mencionadas, además de la desconocida materia oscura.

Tras varios intentos, finalmente, la amplia cascada de nuevas partículas encontradas, especialmente, gracias a los rayos cósmicos, fue catalogada en función de la reacción de dichas nuevas partículas a las interacciones fundamentales, a saber, gravitatoria, electromagnética, fuerza nuclear fuerte (o de color) y fuerza nuclear débil. Como resultado organizativo, Murray Gell-Mann expuso la vía múltiple, semejante a la tabla periódica de Mendeliev, cristalizada finalmente en el denominado Modelo Estándar de la materia



Representación de las cuatro interacciones fundamentales. Kvr.lohith. CC BY – SA 4.0. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FOUR_FUNDAMENTAL_FORCES.png

Así, los físicos clasifican las partículas en dos tipos concretos. Los fermiones y los bosones. Se dice que una partícula elemental es un fermión si mencionadas partículas poseen un espín semientero y cumplen el principio de exclusión de Pauli, de modo que dos partículas no pueden tener todos sus números cuánticos iguales en un mismo estado cuántico. Por el contrario, los bosones, con espín entero, no cumplen el principio de exclusión de Pauli, pudiendo situarse todas en el mismo estado de energía para un mismo sistema cuántico. Las partículas constituyentes de la materia, como son los protones, neutrones y electrones se adscriben a los fermiones, mientras que las partículas mediadoras de las interacciones, el fotón o los bosones W^+ , W^- y Z^0 son todas bosones

Otra clasificación complementaria y no vinculante a la anterior es la de hadrones y no hadrones. Los hadrones son partículas sujetas a la interacción nuclear fuerte, como los nucleones (protones y neutrones) y las partículas no hadrónicas son las no sujetas a dicha interacción, como el electrón, el neutrino o las partículas que rigen las interacciones

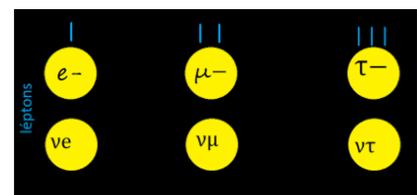
Las partículas que son hadrones y fermiones a la vez, se denominan bariones (o antibariones para las antipartículas) y están constituidas por tres quarks (o antiquark), donde cada uno de los mismos debe mantener un color según la interacción de color (rojo, azul o verde) de modo que la suma salga blanco (uno de cada color). Si se trata de hadrones y bosones, se denominan mesones, y están constituidas por un quark y un antiquark. Aquí se incluyen los piones y los kaones

Finalmente, las partículas que son a su vez no hadrones y fermiones se denominan leptones. No están compuestos por otras partículas, sino que son ya partículas fundamentales. Existen tres familias leptónicas conocidas formadas por la partícula y su neutrino asociado (y a su vez, las antipartículas): electrón y neutrino electrónico, muón y neutrino muónico, tauón y neutrino tauónico. Por último, las partículas que rigen las interacciones fundamentales, que se incluyen dentro de los bosones no hadrónicos

| | Hadrón (sufre la fuerza nuclear fuerte) | No Hadrón (No sufre la fuerza nuclear fuerte) |
|-----------------------------------|---|---|
| Fermión (espín semientero) | Barión. Formado por tres quarks (uno de cada color) o antiquarks | Leptones |
| Bosón (espín entero) | Mesón. Formado por un quark y un antiquark | Partículas mediadoras de las interacciones fundamentales |

Cuadro 1. Resumen de los tipos de partículas fundamentales

Existen tres familias de leptones. La más reconocida es el electrón junto a su par, el neutrino electrónico. Pero existen dos familias de mayor energía, que no acaban formando los átomos: el muón y su par el neutrino muónico y el tauón y el neutrino tauónico. En todas ellas los neutrinos sin carga, y el leptón restante con carga negativa. Para ser realista, este no es el único número de leptones, ya que a ellas se les debe sumar sus antipartículas. Las antipartículas de los leptones con carga negativa tienen carga positiva, mientras que las antipartículas de los neutrinos (antineutrinos) no tienen carga como ellos, lo que, en ocasiones, ha conducido a pensar que los neutrinos son su propia antipartícula.



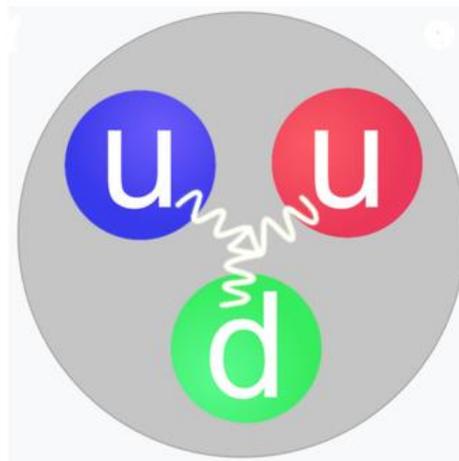
Familias leptónicas. Matheus Viana. CC BY - SA 4.0. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:L%C3%A9ptons.png>

Recientemente se ha descubierto que los neutrinos pueden cambiar de sabor, de modo que los neutrinos pueden transformarse de neutrinos muónicos a leptónicos o tauónicos [12]. Si bien el mecanismo se desconoce, las oscilaciones de neutrinos constituyen uno de los rompecabezas de la física actual, dado que para que puedan oscilar entre familias, deben tener masa, algo que no les asociaba en un principio el modelo estándar; modelo que rige la física actual

La interpretación actual del modelo de partículas se fundamenta en el paradigma de la electrodinámica cuántica, a su vez descrito a través de los diagramas de Feynman. Estos describen la interacción entre dos partículas cargadas (como pueden ser dos electrones) a través del intercambio de un fotón virtual, ya que el fotón, como se ha mencionado es la partícula que rige la interacción entre los electrones (electromagnética). A pesar de parecer un modo pintoresco de describir la interacción, la electrodinámica cuántica es una teoría matemática altamente sofisticada y detallada. En ella se distingue el papel del fotón virtual (véase la sesión 1. para el tratamiento de partículas virtuales) como un medio para describir la interacción del fotón real, partícula observada experimentalmente y tan estudiada durante siglos.

Los éxitos de la electrodinámica cuántica llevaron a convertir dicha teoría en el modelo de descripción de las tres restantes fuerzas de la naturaleza. Cada campo asociado con las demás fuerzas requerirá de distintas clases de partículas. Así, la interacción débil se describe a través de los bosones débiles W^+ , W^- y Z^0 , las dos primeras con carga y la última neutra. Los bosones débiles W^+ , W^- y Z^0 poseen una enorme masa en reposo, del orden de 80 – 90 GeV, lo que convierte a la interacción nuclear débil en una fuerza de corto alcance. La energía “prestada” durante los procesos de desintegración que rige la interacción débil es tan alta que ateniéndonos al principio de incertidumbre de Heisenberg, hace que la vida útil de estas partículas antes de desintegrarse sea muy corta, conduciendo al corto alcance de la interacción

Los bosones débiles rigen el intercambio de partículas, mientras que los ocho gluones conocidos, rigen el intercambio de color, propiedad que caracteriza la fuerza nuclear fuerte como lo hace la carga para el electromagnetismo. La teoría que hay tras la fuerza de color se denomina electrodinámica cuántica. Esta establece que cada especie de quark (cada sabor) debe poseer uno de los tres aspectos denominados colores, y parametrizados como rojo, verde y azul. Tan solo los hadrones están sujetos a la fuerza nuclear fuerte, y por tanto, intercambian gluones para mantener confinados a los quarks dentro de los hadrones. Los piones rigen la interacción residual, a nivel de partículas, que existe tras la interacción de color. Por otra parte, los leptones y el resto de partículas, que rigen las interacciones de la naturaleza no intercambian gluones al no poseer la propiedad del color, y por ende, tampoco sufren la interacción fuerte

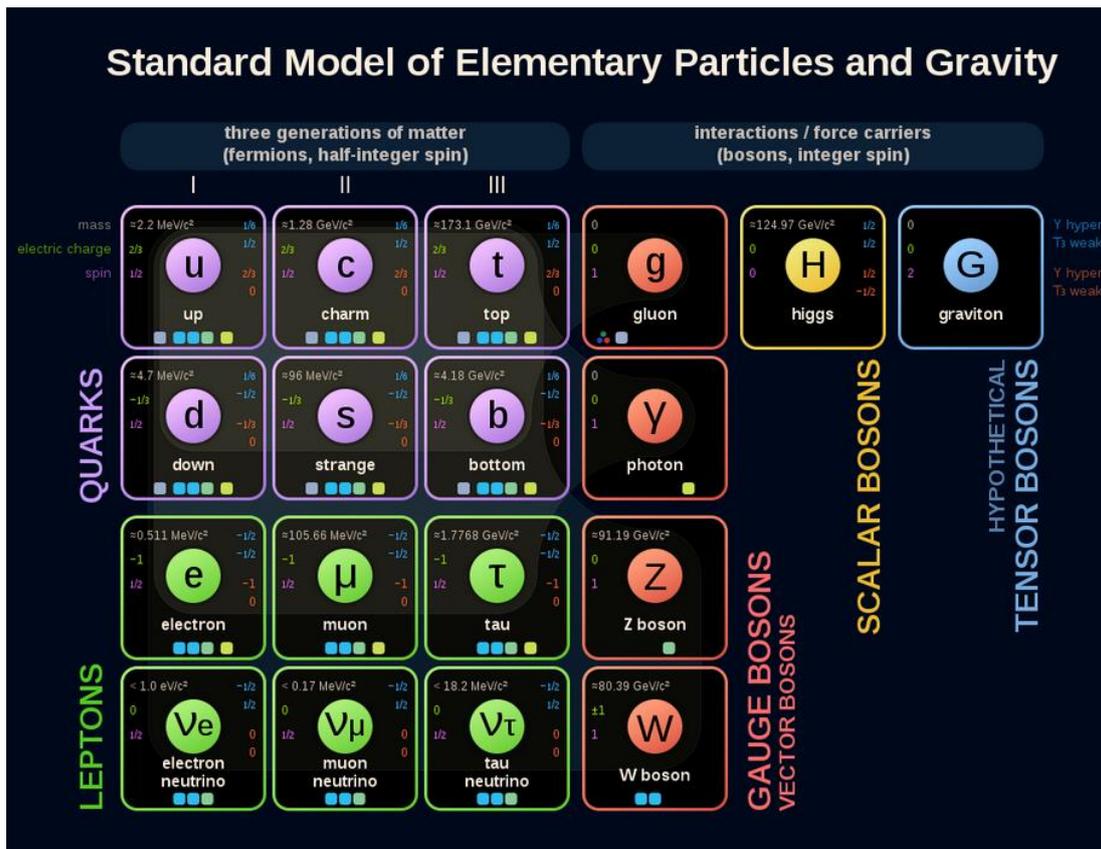


Protón formado por quarks de cada color. Imagen de dominio público https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Proton_Quark_Structure.png

El avance en física de partículas ha permitido catalogar seis tipos de sabores distintos para los quarks. Tan solo los dos primeros forman la materia que conocemos: el quark up (u) y el quark down (d), mientras que las restantes dos familias (de mayor masa, al igual que con los leptones descritos anteriormente) no lo hacen. Se trata del quark strange (s) y el quark charm (c); además del quark bottom (b) y el quark top (t)

La hipótesis de los quarks, de Gell_mann junto a la teoría que describe la unión de la interacción electromagnética y la fuerza nuclear débil, la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica que describe la interacción de color (cuyo reflejo a nivel nuclear es la fuerza nuclear fuerte) forma la base del modelo estándar de las partículas elementales. El modelo estándar se estructura en 62 partículas elementales (suponiendo su no quiralidad)

- 18 quarks más 18 antiquarks (contando sabores y colores) de espín igual a $\frac{1}{2}$
- 6 leptones más seis antileptones de espín igual a $\frac{1}{2}$
- 13 cuantos o partículas mediadoras de las interacciones: bosones débiles W^+ , W^- y Z^0 , el fotón, 8 gluones y el gravitón (esta última no encontrada experimentalmente)
- El bosón de Higgs



Cuadro del modelo estándar de partículas (SIN sus antipartículas). Cush. De dominio público https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles_and_Gravity.svg

Entre las muchas confirmaciones cuantitativas del modelo estándar cabe destacar:

- La existencia de la corriente débil neutra mediada por Z
- El descubrimiento de los bosones débiles W^+ , W^- y Z^0 a sus masas predichas
- La predicción del bosón de Higgs
- El descubrimiento de quarks charm, bottom y top, así como las denominaciones precisas de los parámetros electrodébiles y constantes de acoplamiento que proporcionan ligaduras sobre la masa del bosón de Higgs
- Test de QCD que verifican la dependencia en q^2 de la constante de acoplamiento α_s (q^2). Las evidencias provienen de la dispersión profundamente inelástica electrón – núcleo, de espectroscopía hadrónica y de procesos de alta energía en el que los gluones juegan un papel fundamental

SESIÓN 4. ACTIVIDAD FINAL

El modelo estándar de partículas ha resultado un modelo enormemente efectivo a la hora de predecir y ordenar muchas de las partículas que forman la naturaleza. Si bien, el modelo estándar sigue sin dar explicaciones de otras evidencias, algunas comentadas en el desarrollo de las sesiones y otras no. Entre todas ellas cabe destacar

- El origen de la masa de los fermiones
- El origen de la violación CP
- La base rigurosa del confinamiento y hadronización de los quarks, esencial para conectar el modelo estándar con la física nuclear y de partículas
- La evidencia experimental de una partícula que regule la interacción gravitatoria
- Las oscilaciones de neutrinos, que requieren de un valor no nulo de masa para los neutrinos, incompatible con los resultados otorgados por el modelo estándar

La explicación a todas estas problemáticas enraíza con la búsqueda de una teoría unificada, que, a su vez, también permita entender la interacción gravitatoria desde un punto de vista cuántico. Se trata de la física más allá del modelo estándar

Actividad: Física más allá del modelo estándar

Durante la última sesión los alumnos deberán exponer una pequeña investigación acerca de las posibilidades que presenta la física de vanguardia.

La actividad propuesta para la sesión presenta las siguientes características:

- Se trata de una tarea expositiva
- Elaboración en pequeños grupos (de 4 o 5 personas)
- El formato de entrega será a través de un pequeño vídeo, que, si lo permite la temporalización, será expuesto durante una sesión en la que se expongan todos los vídeos. Será evaluado a través de una rúbrica de evaluación (*Véase apartado 5. Evaluación*)

¿En qué consiste la actividad?

Cada grupo de alumnos debe elaborar un pequeño vídeo, a modo de píldora, sobre una teoría o elemento de la física de vanguardia, es decir, de la física más allá del modelo estándar

La temática de los vídeos abarca un amplio espectro. Pueden ser temas de vanguardia, sin solución actual en la física; vídeos explicativos a conceptos relevantes que se hayan tratado de soslayo durante la unidad didáctica e incluso tema libre propuestos por los alumnos y aprobados por el docente. Algunos ejemplos son:

- Materia oscura
- Supersimetría
- Problema de la gravedad y su convergencia con las interacciones de origen cuántico
- Masa y oscilación de los neutrinos
- Energía oscura
- Problema CP fuerte
- Quiralidad
- Tema libre aprobado por el docente

Las píldoras, o pequeños vídeos explicativos, seguirán el patrón definido por los vídeos del instituto de física teórica disponibles libremente a través de diversas plataformas [2]. Se trata de vídeos visuales, concisos y explicativos, que se restringirán a un máximo de cinco minutos

Con ello se pretende que el alumnado profundice en la ciencia a partir de la digitalización, pero que también aprenda a distinguir entre los elementos con rigor científico y los que no, durante su pequeña investigación. Además de alcanzar un pequeño dominio, siempre de carácter divulgativo, sobre contenidos actuales, para así poder sintetizarlos y explicarlos en un breve periodo de tiempo. El carácter grupal de la actividad debe ayudar a superar parte de las dificultades; si bien, en caso de enquistarse, se contará con la colaboración del docente

5. EVALUACIÓN

La Unidad Didáctica desarrollada se encuentra dentro del bloque de contenidos de Física Moderna, de modo, que deberá ser evaluada mediante las pruebas consensuadas por el departamento de Física y Química para este bloque de contenidos.

De este modo, los contenidos referidos a las primeras sesiones, los cuales constituyen contenidos ordinarios sumandos a contenidos de profundización no requieren de herramientas de evaluación distintas a las establecidas en las programaciones de cada uno de los departamentos.

La actividad final propuesta 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 el vídeo. Por último, también se califica la creatividad

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>Creatividad</u> | El vídeo es creativo. Capta la atención del alumnado, a la vez que instruye a través de la vista | El vídeo resulta creativo. Es capaz de captar la atención, pero no suma visualmente al aprendizaje | El vídeo es correcto. No deslumbra, resultando pesado por momentos. Si bien, en general, si ayuda a la comprensión | El vídeo no es correcto. Su montaje y creatividad no ayudan al aprendizaje. Genera confusión más que aclarar | |
| <u>Dicción y puesta en escena</u> | La puesta en escena del vídeo la dicción en la misma es adecuada. El ponente en el vídeo domina la escena | El ponente domina el vídeo, faltando, en ocasiones concordancia entre imagen y texto | El discurso del vídeo resulta repetitivo. No se puede catalogar de confuso, pero no ayuda a resultar ameno a la par que instructivo | El vídeo resulta confuso en su discurso. No enlaza bien imagen y texto, generando confusión y no aprendizaje | |
| <u>Contenido y comprensión</u> | Comprende la temática, responde a las cuestiones planteadas. Argumenta las ideas durante el discurso | Comprende la temática en su mayor parte. El contenido está bien hilado y elaborado, solo en su mayor parte | Comprende parcialmente el contenido expuesto. No está bien hilado con la presentación. Presenta algunas dificultades al responder a las cuestiones | No comprende el contenido. Presenta fuertes dificultades para responder a las cuestiones planteadas | |
| <u>Límite-tiempo</u> | Tiempo ajustado al previsto, con un final que retoma las ideas principales y redondea la exposición | Tiempo ajustado al previsto, pero con un final precipitado o alargado por falta de control | No ajusta al tiempo. Excesivamente corto | Excesivamente largo o insuficiente para desarrollar correctamente el tema | |
| <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] Entrevista al físico teórico Álvaro de Rújula. Servicio de Información y Noticias Científicas. Entrevista realizada por Enrique Sacristán (2021)

<https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/El-vacio-no-es-la-nada-y-tampoco-esta-vacio>

[2] Vídeos divulgativos del Instituto de Física Teórica: ift Responde

<https://www.youtube.com/c/IFTMadrid>

[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] DREWES, A. y PALMA, H. (2006) “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

[6] El controvertido efecto Casimir (2011). Cuentos cuánticos

<https://cuentoscuanticos.com/2011/11/08/el-controvertido-efecto-casimir/>

[7] ELIZALDE, E. (2009). “El efecto Casimir”. Revista Investigación y ciencia. 390. Pág. 54 – 63

[8] La energía del vacío I El efecto Casimir (2018). Vídeos de ift: Responde

<https://www.youtube.com/watch?v=s6mvrjrsLBQ>

[8] ¿Qué pasa con la antimateria? I Antimateria, simetría CP y simetría CPT (2019). Vídeos de ift: Responde

<https://www.youtube.com/watch?v=ZSkjDG2s6-8>

[9] VIDAL MAROÑO, M. “Violación CP y Cosmología”. Curso de doctorado de Cosmología

[10] LUZÓN MARCO, G. ¿Qué es la materia oscura?”. Las científicas responden. El país

<https://elpais.com/ciencia/2021-01-15/que-es-la-materia-oscura.html>

[11] FIGUEROA - O´FARRILL, J. (2005) “¿Qué es la supersimetría?” IMAFF, CSIC.

[12] ¿Qué son las oscilaciones de neutrinos? (2015) Vídeos de ift

<https://www.youtube.com/watch?v=MHcoFBV5z8s>