

UNIDAD DIDÁCTICA:
ELEMENTOS DE FÍSICA RELATIVISTA



ÍNDICE

1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.	2
2. OBJETIVOS DIDÁCTICOS.	2
2.1 OBJETIVOS DE LA UNIDAD DIDÁCTICA.	2
2.2 RELACION CON LOS OBJETIVOS GENERALES DE LA MATERIA.	2
3. IDEAS PREVIAS.	3
4. PRUEBA INICIAL.	3
5. REVISIÓN DE OBJETIVOS EN FUNCIÓN DE LA PRUEBA INICIAL.	7
6. SELECCIÓN DE CONTENIDOS.	7
7. METODOLOGÍA DIDÁCTICA PROPUESTA.	8
8. PROGRAMA DE ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE.	8
9. EVALUACIÓN.	21
9.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.	21
9.2 MODELOS DE EVALUACIÓN.	21
10. TEMPORALIZACIÓN.	22
11. ACTIVIDADES DESTINADAS A LA ATENCIÓN A LA DIVERSIDAD.	23
12. CONTENIDOS MINIMOS.	24
13. TRANSVERSALIDAD Y COORDINACIÓN CON OTRAS MATERIAS.	25
14. ACTIVIDAD DE LABORATORIO: DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ EN EL VACÍO.	26
15. BIBLIOGRAFÍA Y CITAS.	26
DIAGRAMA CONCEPTUAL.	29

1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.

La unidad didáctica dedicada a relatividad es una de las tres que se dedica a la **Física Moderna** en el 2º curso de Bachillerato. Existen varias razones que aconsejan la introducción de estos temas en Bachillerato (Solbes, 1992):

- Dar una imagen más correcta del desarrollo de la física, dado que la física moderna es un claro ejemplo de cambio conceptual.
- La creciente importancia de sus aplicaciones en nuestra sociedad (como la electrónica o la física nuclear).
- El interés manifiesto de los alumnos no sólo por dichas aplicaciones, sino también por aspectos mas teóricos.
- Y, finalmente, por contribuir la física moderna a una mayor comprensión de la física clásica al mostrar sus límites de validez y las diferencias entre ambos paradigmas.

Por otra parte, si no se incluyera el estudio básico de la relatividad en el bachillerato habría alumnos que, incluso después de realizar estudios universitarios, no sabrían que la mecánica newtoniana es un caso particular de una mecánica más general y aplicable a todos los casos, la mecánica relativista.

2. OBJETIVOS DIDÁCTICOS.

2.1 OBJETIVOS DE LA UNIDAD DIDÁCTICA

1-Comprender que la física clásica no puede explicar una serie de fenómenos como el incumplimiento del principio de relatividad de Galileo por la luz o la existencia de una velocidad límite.

2-Comprender los postulados de la relatividad de Einstein y cómo resuelven los problemas anteriores.

3-Utilizar los principios de relatividad para explicar alguna de sus implicaciones: dilatación del tiempo, contracción de longitud, simultaneidad y relación masa-energía.

4-Mostrar que tanto en la teoría de la relatividad como en la mecánica newtoniana existen magnitudes relativas y absolutas.

5-Conocer la formulación relativista del principio de conservación de la energía.

6-Saber la diferencia entre relatividad general y relatividad especial.

2.2 RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS GENERALES DE LA MATERIA.

OBJETIVOS GENERALES

1-Comprender los principales conceptos de la física y su articulación en leyes, teorías y modelos, valorando el papel que desempeñan en su desarrollo.

Objetivos de la unidad relacionados: 2,5,6

2-Resolver problemas que se planteen en la vida cotidiana, seleccionando y aplicando los conocimientos físicos relevantes.

Objetivos de la unidad relacionados: 2,3

3-Utilizar con autonomía las estrategias características de la investigación científica (plantear problemas, formular y contrastar hipótesis, planificar diseños experimentales etc.) y los procedimientos propios de la física, para realizar pequeñas investigaciones y, en general, explorar situaciones y fenómenos desconocidos para ellos.

Objetivos de la unidad relacionados: **2**

4-Comprender la naturaleza de la física y sus limitaciones, así como sus complejas interacciones con la tecnología y la sociedad, valorando la necesidad de preservar el medio ambiente y de trabajar para lograr una mejora de las condiciones de vida actuales.

Objetivos de la unidad relacionados: **1**

5-Valorar la información proveniente de diferentes fuentes para formarse una opinión propia, que les permita expresarse críticamente sobre problemas actuales relacionados con la física.

Objetivos de la unidad relacionados: **1,2,3,4,5,6**

6-Comprender que el desarrollo de la física supone un proceso cambiante y dinámico, mostrando una actitud flexible y abierta frente a opiniones diversas.

Objetivos de la unidad relacionados: **1,4**

3. IDEAS PREVIAS.

En el trabajo de Posner (1982) se muestra cómo alumnos y profesores consideran la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud como "distorsiones" de la percepción y así pueden mantener hipótesis subyacentes de las transformaciones de Galileo: la identidad de los intervalos temporales y espaciales (es decir, la existencia de un espacio y un tiempo absolutos). En otras palabras, se asimilan las ideas relativistas reconciliándolas con las clásicas.

En algunos textos se sigue transmitiendo la idea errónea de que la masa de una partícula varía con su velocidad. Cabe citar como ejemplo el análisis que el autor de esta unidad didáctica hizo (Sánchez Méndez, 2000) sobre cómo tratan los textos de física el concepto de masa en los temas de relatividad.

En el tema de física nuclear aparecen ideas erróneas acerca del teorema de conservación masa-energía que sustituye a los clásicos de conservación de la masa y de la energía que se aplicaban por separado.

Por otra parte, aunque conocen el carácter límite de la velocidad de la luz (se ha visto como colofón al electromagnetismo y la naturaleza de la luz) desconocen las implicaciones de éste carácter límite, llegando incluso a afirmar que una partícula sometida a una fuerza constante, aumenta linealmente su velocidad con el tiempo (Solbes, 1986).

4. PRUEBA INICIAL.

Desde nuestro punto de vista, una prueba inicial ha de tener una triple finalidad: a) debe permitir conocer el nivel de partida del grupo de alumnos con el que se trabaja; b) ha de detectar las ideas previas (preconcepciones) y c) su comentario posterior puede ser una buena forma de introducir el tema en cuestión.

Las preguntas P.I.1, P.I.2 y P.I.3, están extraídas del cuestionario para alumnos que aparece en el Anexo I en Gil et al. (1989).

P.I.1. El desarrollo de los conocimientos científicos, concretamente en el campo de la física, no ha sido un proceso puramente acumulativo de "más y más conocimientos", sino que estos se han estructurado en grandes cuerpos teóricos claramente diferenciados y el paso de uno a otro ha significado auténticas crisis.

Indica muy brevemente las crisis que se han producido en el desarrollo de la Física.

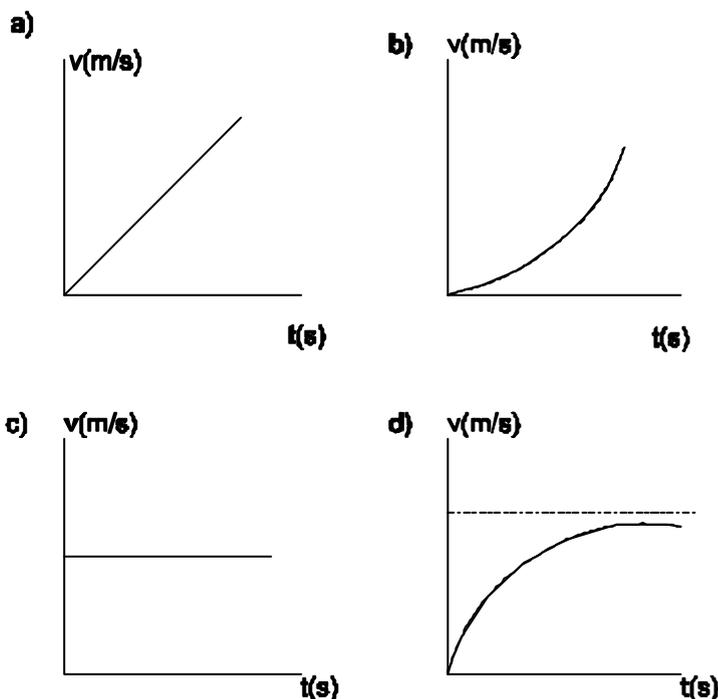
P.I.2. Hacia 1880, los físicos creían que la física había alcanzado su máximo desarrollo y que sólo eran posibles pequeños cambios y avances secundarios. Pero a comienzos del siglo XX se descubrieron una serie de hechos que no encontraron justificación en el marco de la física clásica y que provocaron una crisis que se tradujo en el surgimiento de un nuevo marco teórico (la física moderna).

Cita como mínimo, 3 de esos hechos:

- _____
- _____
- _____

Comentarios a P.I.1 Y P.I.2: Las dos cuestiones se refieren a aspectos generales de la crisis de la física clásica, ya que este tema es el primero de los tres que se dedican a la unidad física moderna. Esta sería la prueba correspondiente a toda la unidad.

P.I.3. Supongamos un cuerpo sobre el que actúa una fuerza constante. Indica qué gráfica representaría mejor la variación de la velocidad que experimenta ese cuerpo según la física clásica y según la física moderna.



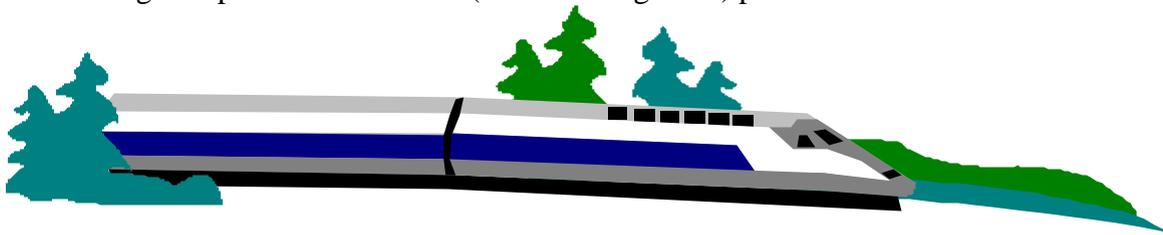
Física clásica: _____

Física moderna: _____

P.I.4. Las leyes de Newton que estudiaste en el curso anterior y que hemos usado en alguno de los temas de este curso, y que constituyen el pilar de la física clásica, ¿son válidas para partículas que se mueven a alta velocidad?

P.I.5. ¿Existe algún límite a la velocidad de propagación de las interacciones?

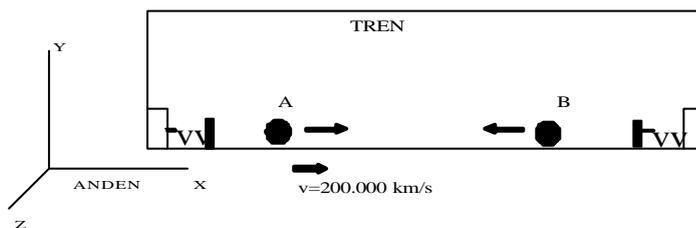
P.I.6. Supón que vas en un tren que se mueve a velocidad constante y que no tiene ventanas. ¿Crees que haciendo algún experimento mecánico (no electromagnético) puede saberse si el tren está en movimiento?



Comentarios a P.I.6.: Se trata de comprobar si los alumnos conocen el principio de relatividad de Galileo.

P.I.7. La figura muestra el interior de uno de los vagones del tren anterior, que está atravesando una estación sin pararse, y a velocidad constante:

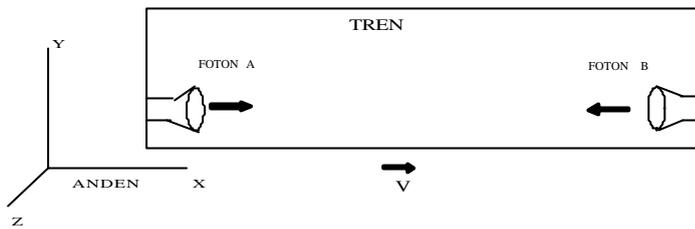
Los viajeros del vagón miden la velocidad de las canicas, y encuentran que es de 1 km/s.
¿Qué velocidad tendrán las canicas A y B respecto al andén de la estación?:



- Las canicas A y B se mueven a 200001 km/s .
- La canica A se mueve a 200001 km/s y la B a 199999 km/s .
- Ambas se mueven a 199999 km/s .

P.I.8. Repitamos el experimento anterior pero en vez de con canicas con fotones:

Los viajeros del vagón miden la velocidad de los fotones, y encuentran que es de $c \text{ km/s}$.
¿Qué velocidad tendrán los fotones A y B respecto al andén de la estación?:



- Los fotones A y B se mueven a c km/s.
- El fotón A se mueve a $(c+v)$ km/s y el B a $(c-v)$ km/s.
- Ambos se mueven a $(c-v)$ km/s.

Comentarios a P.I.7. Y P.I.8.: En el primer ítem los alumnos calculan fácilmente las velocidades de ambas canicas (en realidad aplican la ley de composición de velocidades de Galileo). La mayoría de alumnos reproducirán el resultado para el caso de los fotones, olvidando el conocimiento de la constancia de la velocidad de la luz. Esto se debe a que cuando se introduce esta evidencia experimental no se la hace entrar en conflicto con las ideas clásicas anteriores y no se aborda como un elemento de crisis de la física clásica.

P.I.9. ¿Has oído hablar de la teoría de la relatividad? En caso afirmativo describe en dos o tres líneas su campo de actuación.

P.I.10. A Albert Einstein le dieron el premio Nóbel en 1921 por:

- Encontrar la ecuación $E = mc^2$.
- Por formular la teoría de la relatividad.
- Por descubrir la ley del efecto fotoeléctrico.

Comentarios a P.I.10.: Existen muchos errores acerca de la figura de Einstein (Resnick, 1980) pero el más extendido es el de pensar que le fue concedido el premio Nóbel por la formulación de la teoría de la relatividad. Realmente se le concedió "*por sus servicios a la física teórica y en particular por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico.*" Es significativo que no fuera mencionada para nada la relatividad. A este hecho se le suele dar la explicación de que Alfred Nobel dejó estipulado que el premio debía concederse por un reciente descubrimiento en física del que pudiera derivarse un gran beneficio y había duda si una teoría -que no se consideraba importante- sería idónea. Esto es fácilmente rebatible ya que la ley del efecto fotoeléctrico es consecuencia también de una teoría, la teoría cuántica de la luz de Einstein. La verdad parece ser otra, y es que desde su nacimiento la teoría de la relatividad nace como una teoría polémica (no solo científicamente sino también políticamente) y la academia sueca no quiso pronunciarse en un apoyo directo a la misma.

5. REVISIÓN DE OBJETIVOS EN FUNCIÓN DE LA PRUEBA INICIAL.

En este apartado puede hacerse una revisión de los objetivos didácticos si fuera necesario. Es difícil que nos encontremos con estudiantes que ya tengan superado alguno de los objetivos, ya que académicamente es el primer contacto que van a tener con la relatividad. La prueba inicial si puede descubrir algunos puntos donde incidir de una manera más directa y sobre todo su corrección con los alumnos ha de ser un punto de partida y motivación hacia la unidad didáctica.

6. SELECCIÓN DE CONTENIDOS.

1.SITUACIÓN DE LA FÍSICA CLÁSICA A FINAL DEL SIGLO XIX.

Se empieza por describir la situación de la física en el siglo XIX y los problemas que aparecieron cuando se intentó buscar un sistema de referencia en reposo absoluto. Esta parte permite trabajar los dos temas transversales, aspectos históricos y relaciones CTS. Se muestra a los alumnos el problema que presentaba el electromagnetismo al someter sus leyes a las transformaciones de Galileo.

2. EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD.

Una de las dificultades con que se cuenta a la hora del desarrollo de la unidad es el hecho de que raramente los alumnos han recibido formación sobre relatividad del movimiento en física clásica (en la asignatura de primer curso Física y Química no suele darse) y por lo tanto se ha de empezar introduciendo el principio de relatividad de Galileo y la necesidad de que las leyes de la física sean las mismas tras una transformación de coordenadas. Una vez que los alumnos comprenden que el principio de relatividad de Galileo solo es válido para las leyes de la mecánica, es fácil introducir la generalización de Einstein para fenómenos mecánicos y electromagnéticos.

3. POSTULADOS DE LA TEORÍA DE RELATIVIDAD ESPECIAL.

Se ha de transmitir a los alumnos la idea de la que partió Einstein y que le hizo elegir (dar por buena una de ellas) entre la *mecánica clásica* y la *electrodinámica clásica*. Mientras las leyes de la primera son covariantes bajo una transformación de Galileo, las leyes de Maxwell no lo son. Y en sentido contrario, existe una transformación que deja covariantes las leyes del electromagnetismo (transformaciones de Lorentz) pero no las de la mecánica clásica. La situación exigía una decisión radical. Einstein eligió la electrodinámica clásica y formuló dos postulados que cambiarían radicalmente la mecánica, dando nacimiento a la mecánica relativista.

4. CONSECUENCIAS DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD.

En este apartado, sin hacer uso de las transformaciones de Lorentz, se deben introducir las dos implicaciones más llamativas de la teoría, la dilatación del tiempo y la contracción de longitud.

5. TRANSFORMACIONES DE LORENTZ.

Aunque las consecuencias más importantes se han obtenido sin hacer uso de las transformaciones de Lorentz, éstas se introducen ahora y permiten comprobar que su uso lleva a los mismos resultados anteriores.

6. INVARIANTES EN RELATIVIDAD Y EN MECANICA NEWTONIANA.

Se pretende con este apartado desterrar la idea errónea de que la relatividad propone que todas las magnitudes físicas son relativas al sistema de referencia elegido. Tanto en mecánica newtoniana como en relatividad existen magnitudes absolutas y relativas.

7. MOMENTO LINEAL, ENERGÍA Y MASA EN RELATIVIDAD.

En este apartado mostraremos los resultados que la relatividad aporta a los conceptos de masa y energía, y cómo se necesita una reformulación de las leyes de conservación de ambas.

8. DIFERENCIA ENTRE RELATIVIDAD GENERAL Y RELATIVIDAD ESPECIAL.

Se hará una breve descripción del campo de actuación de la Relatividad General haciendo hincapié en los aspectos que la diferencian de la Especial.

7. METODOLOGÍA DIDÁCTICA PROPUESTA.

La metodología escogida es la del **programa-guía** (Gil y Furió, 1979) en el que el desarrollo del tema se ha programado a base de actividades que han de realizar los alumnos. Con estas actividades se trata, en la medida de lo posible, de colocar a los alumnos en situación de producir conocimientos y explorar alternativas, superando la mera asimilación de conocimientos elaborados. Sin embargo el carácter terminal del curso y su objetivo de preparar para el ingreso en la Universidad, nos ha llevado a introducir algunas actividades de exposición por parte del profesor. No olvidemos que la exposición de clases y seminarios en pizarra suele ser uno de los métodos de transmisión de conocimientos, principalmente en la universidad. Por tanto nos encontramos con los siguientes tipos de actividades:

- Lectura de textos con coloquio posterior
- De pequeño grupo
- Exposiciones del profesor
- Exposiciones del profesor con coloquio posterior
- De grupo
- Individuales
- Individuales para casa

8. PROGRAMA DE ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE.

1.SITUACIÓN DE LA FÍSICA CLÁSICA A FINAL DEL SIGLO XIX.

Actividad.1(Lectura y posterior coloquio). Lee el texto siguiente, en él se explica la situación en que se encontraba la física a final del siglo XIX:

En el siglo XIX la ciencia está dominada por una teoría física tan generalizada que se había convertido en una concepción global del mundo y de su modo de funcionamiento: La Mecánica Clásica. Dicha teoría estaba basada en los postulados de la teoría de Isaac Newton. Estos principios unifican problemas que hasta entonces se habían considerado diferentes, como son el movimiento de los cuerpos celestes o la caída de los graves.

Cualquier objeto en movimiento es definido como un punto material situado en un ESPACIO ABSOLUTO (espacio que conserva sus propiedades en ausencia de materia) y en un TIEMPO ABSOLUTO (tiempo que fluye indefinidamente y a la misma velocidad a pesar de que desaparezcan los objetos que contiene). Según las ideas de la época se sabe que la materia está

compuesta por moléculas, pero esta composición no es tenida en cuenta en el estudio del movimiento de los cuerpos, ya que estos son representados por puntos geométricos dotados de masa.

El universo está regido por otra ley debida a Newton la Ley de Gravitación Universal. Y todo cuerpo está dotado de una propiedad llamada INERCIA que determina la resistencia de todo cuerpo a cambiar su estado de movimiento.

Esquemáticamente acabamos de exponer un sistema de interpretación del mundo que podemos llamar MECANICISTA. Llegado el caso, el resto de las ciencias debían de ser reducidas a dicho paradigma que conoció un éxito creciente hasta final del siglo XIX. Era tal su poder de convicción que sus adversarios -numerosos y notables especialmente Leibniz (1646-1716)- fueron rápidamente oscurecidos.

El optimismo de esta concepción del mundo fue apenas alterado por dos nuevas ciencias que se desarrollaron a lo largo del siglo XIX y hasta entonces irreductibles a los principios de la Mecánica Clásica:

**La Termodinámica, ciencia que estudia las relaciones entre calor y movimiento, que describe fenómenos irreversibles.*

**El Electromagnetismo, ciencia de los fenómenos eléctricos, magnéticos y luminosos, cuyos movimientos ondulatorios, apenas parecen susceptibles de ser reducidos a la descripción de fuerzas tal como aparece en la mecánica newtoniana.*

La mayoría de los científicos estaba convencida de que a más o menos corto plazo, los fenómenos de que trataban estas dos ciencias podrían ser explicados gracias a los movimientos de partículas subyacentes y por lo tanto reducidas a los postulados de la Mecánica Clásica. Numerosos físicos declararon entonces que la física estaba realmente acabada.

Por otra parte en este siglo, y dentro del debate sobre la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz toma ventaja el modelo ondulatorio apoyado por Young y Fresnel. En este contexto hace falta explicar cual es el "soporte" a través del cual se propaga la luz y es aquí donde aparece el misterioso "éter" que todo lo impregna y que es el medio de soporte de las ondas electromagnéticas.

Pero si el éter existía, tarde o temprano debía de ser detectado. En 1881 Albert Michelson y Edward W. Morley intentan medir un "viento de éter" producido por la Tierra en su movimiento. La hipótesis de partida era muy sencilla, al desplazarse la Tierra en un espacio lleno de éter, debía experimentar a causa de su movimiento un "viento de éter" que soplaría en sentido opuesto al del propio movimiento. Un rayo de luz paralelo al movimiento de la tierra y con su mismo sentido debería experimentar una resistencia por parte del viento de éter y aminorar su velocidad. Un segundo rayo perpendicular al movimiento de la tierra no se vería afectado por tal viento de éter. La observación de las interferencias producidas por ambos rayos daría un método para calcular el efecto del éter sobre la velocidad de la luz.

El experimento fue repetido durante casi 20 años y aunque cada vez la precisión de la medida era mayor nunca se encontró diferencia en la velocidad de ambos rayos de luz. Simultáneamente a estos hechos algunos científicos comienzan a cuestionar los cimientos mismos de la Mecánica Clásica. En particular es especialmente importante la obra de Mach para comprender los hechos que sucedieron a continuación. Mach publica en 1883 una obra dedicada a la historia de la mecánica. En ella concluye que la ciencia de la mecánica está basada en axiomas completamente indemostrables y de naturaleza metafísica. Según él, los primeros axiomas de éste género son los presupuestos de Newton sobre la existencia de un espacio y un tiempo absoluto

Preguntas sobre el texto:

- a) Cuál es la teoría que dominaba la física del siglo XIX?
- b) Que concepción tenía Newton del espacio y el tiempo? Crees que esta concepción está basada en evidencias de tipo experimental?

- c) Qué ciencias se resistían a ser explicadas desde los principios de la mecánica?
- d) Según la teoría ondulatoria de la luz ¿cuál era el soporte de las ondas luminosas?
- e) Qué intentaban medir Michelson y Morley?

Comentarios a la Actividad 1. Tras la lectura del texto, y con la ayuda de las preguntas y posteriores explicaciones del profesor, los alumnos han de sacar algunas ideas claras:

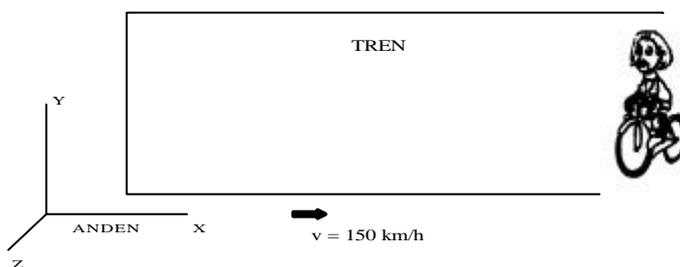
- Que algunos físicos daban la física por acabada.
- El papel hegemónico de las ideas de Newton acerca del espacio y el tiempo.
- Que no existe evidencia experimental alguna que apoye los conceptos de espacio y tiempo absolutos.
- Que a consecuencia del resultado negativo del experimento de Michelson-Morley se puede afirmar que la velocidad de la luz es independiente del movimiento del foco que la produce.

2. EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD.

Actividad.2. (En pequeño grupo). Vamos a estudiar el siguiente fenómeno: Imaginemos un tren que se mueve a velocidad constante a 150 km/h:

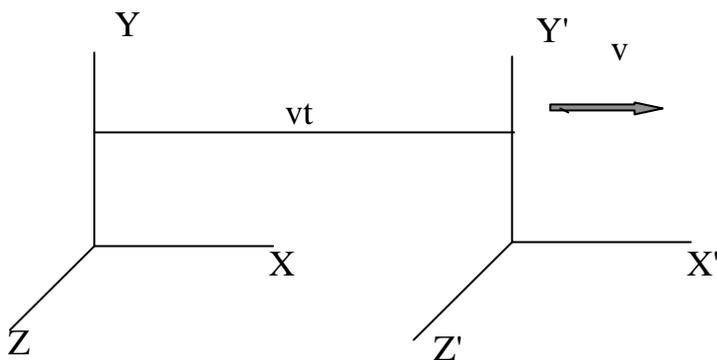
Imaginemos que por el pasillo de nuestro hipotético tren aparece Einstein montando en bicicleta en sentido contrario al de avance del tren. El marcador de velocidad de la misma señala 40 km/h.

- a) ¿Qué velocidad medirán los pasajeros que van en el mismo vagón?
- b) ¿Qué velocidad tendrá respecto al andén?
- c) ¿Cuál es la ley que permite relacionar ambas velocidades?



Comentarios a la Actividad 2. Se trata de un problema clásico de movimiento relativo. El objetivo final de la actividad es plantear las transformaciones de Galileo.

Actividad.3.(Exposición del profesor). En la actividad 2 acabamos de usar la ley de composición de velocidades de Galileo que permite conocer la velocidad de un móvil en un sistema de referencia conocida la que tiene en otro sistema que se mueve respecto a éste a velocidad constante (sistemas inerciales). Suponiendo que uno de los sistemas se desplaza a lo largo del eje x, encontraremos la transformación de coordenadas que nos permite relacionar las posiciones en los dos sistemas inerciales. Estas transformaciones reciben el nombre de *Transformación de Galileo*:



v es la velocidad relativa del sistema $x'y'z'$ respecto a xyz . El sistema con primas se desplaza con movimiento uniforme según el eje x del sistema sin primas. La relación entre las coordenadas sin prima y las coordenadas con prima viene dada por lo que se conoce como Transformación de Galileo.

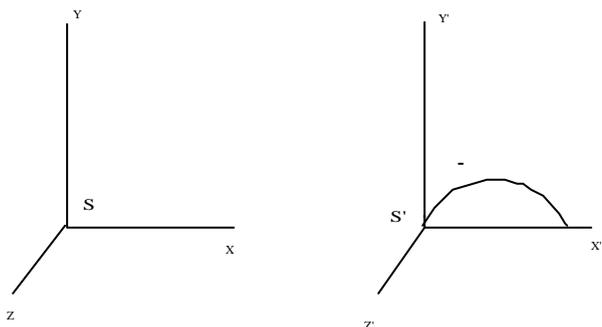
$$\begin{aligned} x &= x' + vt & x' &= x - vt \\ y &= y' & \text{o bien} & y' = y \\ z &= z' & & z' = z \end{aligned}$$

Obsérvese que se ha supuesto en esta transformación que el tiempo tiene un carácter absoluto y es el mismo en todos los sistemas de referencia. La transformación general sería

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}t \quad \vec{V}' = \vec{V} - \vec{v}$$

Ésta última es la ley de composición de velocidades que se obtiene derivando la anterior respecto al tiempo.

Actividad.4.(En grupo). Haciendo uso de la transformación de Galileo debéis realizar el siguiente cálculo:



En el sistema S' se lanza un proyectil cuyo alcance máximo es 100 m. Cuál será el alcance medido en el sistema S .

Datos: En el instante de lanzar el proyectil los sistemas se hallan separados 1000 m y el sistema S' se desplaza respecto a S a 10 m/s. El proyectil tarda 10 s en alcanzar el eje x de nuevo.

Comentarios a las Actividades 3 y 4. Con estas actividades se pretende afianzar el uso de la transformación de Galileo.

Ahora se puede introducir a los alumnos el *Principio de Relatividad de Galileo* que indica que el movimiento rectilíneo y uniforme de un sistema de referencia no influye en los procesos mecánicos que tienen lugar en un sistema físico. O bien que no existe procedimiento mecánico que pueda determinar si un sistema se está moviendo con movimiento rectilíneo y uniforme.

Actividad.5.(Exposición del profesor). Lo que Galileo formuló para la mecánica, Einstein lo generalizó para fenómenos mecánicos y electrodinámicos, en lo que se conoce como *Principio de Relatividad*:

"No existe ningún medio ni mecánico ni electrodinámico que permita averiguar si un sistema de referencia se mueve con movimiento rectilíneo y uniforme"

Pero esto suponía dar un cambio radical en la concepción que hasta entonces se tenía del espacio y el tiempo, así como el usar unas leyes de transformación entre sistemas inerciales distintas (Transformaciones de Lorentz). Pero de esta forma la covarianza de todas las leyes de la física estaba asegurada.

3.POSTULADOS DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL.

Actividad.6.(Exposición por parte del profesor y posterior coloquio). Einstein basó toda su teoría en dos postulados:

- i) **El principio de relatividad (que hemos visto en la actividad 5).**
- ii) **El principio de existencia de una velocidad límite de propagación de las interacciones.**

- a) Recuerdas la crítica que en el texto de la actividad 1 Mach hacía a la obra de Newton?
- b) Crees que estos principios adolecen del mismo mal? O por el contrario se basan en alguna evidencia experimental?

Comentarios a la Actividad 6. Con esta actividad se pretende que los alumnos reflexionen sobre dos cosas:

- a) Que aunque nuestro sentido "común" pueda indicarnos que el tiempo es absoluto y el mismo en todos los sistemas de referencia, no existe base experimental para afirmar tal cosa, sino todo lo contrario (véase en el texto de actividad 1 la crítica de Mach a los principios de la mecánica)..
- b) Que los postulados de Einstein, no son una "ocurrencia matemática" sino que suponen por parte de su autor un conocimiento de la situación en que se encontraba la física de su tiempo, no sólo teórica sino también las evidencias experimentales que podían avalar tales postulados.

Actividad.7. (En grupo). ¿Puede moverse una partícula a través de un medio con una velocidad mayor que la de la luz en dicho medio?

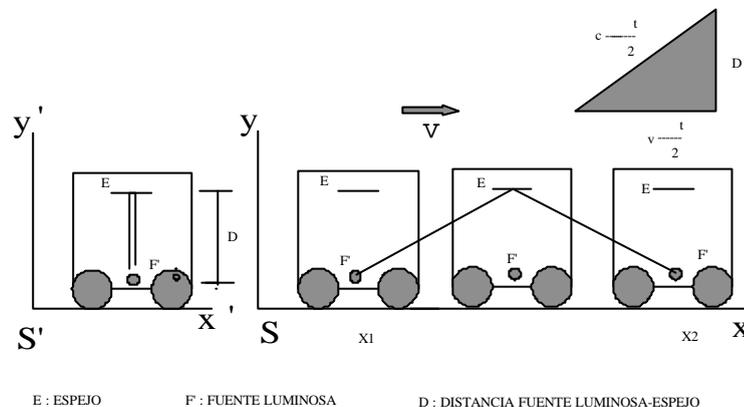
Comentarios a la Actividad 7. Se pretende que los alumnos discutan si el límite a la velocidad de propagación de las interacciones coincide en cualquier medio con la velocidad de la luz o el límite lo establece el valor de aquella en el vacío.

Efectivamente en un medio (no en el vacío) puede darse el caso de que una partícula se mueva a mayor velocidad de la que posee la luz en ese medio, siempre y cuando la velocidad de la partícula no supere la de la luz en el vacío (como predice el segundo postulado de la relatividad). En ese caso la partícula emite una radiación característica denominada de Cerenkov.

4. CONSECUENCIAS DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD.

4.1. Dilatación del tiempo.

Actividad.8. (Exposición por parte del profesor). A continuación y basándonos en sus postulados veremos algunas consecuencias de la teoría de la relatividad. Comenzaremos por la *dilatación del tiempo*. Observa el dibujo que se adjunta:



1. El foco luminoso F' (en reposo en el sistema S') lanza un destello luminoso encontrándose que el mismo tarda un tiempo $\Delta t'$ en volver a su posición de partida tras reflejarse en el espejo E . Ambos sucesos (partida y llegada del destello) ocurren en la misma posición x_1' .

$$\Delta t' = \frac{2D}{c}$$

2. En el sistema S , el foco F' y el espejo se mueven hacia la derecha con velocidad v (en la figura se muestran tres posiciones diferentes). En este sistema los sucesos ocurren en lugares diferentes x_1 y x_2 separados una distancia $v \Delta t$ y la luz recorre un camino $c \Delta t$.

Veamos los siguientes aspectos:

- El camino recorrido por la luz es mayor en S que en S' .
- Pero según el postulado de Einstein la velocidad de la luz es invariante.
- Como recorre mayor distancia con la misma velocidad el intervalo de tiempo Δt que ha transcurrido en ese sistema ha de ser mayor.

Hallemos la relación entre Δt e $\Delta t'$ con la ayuda del triángulo de la figura:

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 \quad \Delta t = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2D}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \Delta t' \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

como $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \geq 1$ entonces $\Delta t > \Delta t'$

Concluimos entonces que el intervalo de tiempo entre dos sucesos (salida y llegada del destello luminoso) depende del sistema de referencia en que se mida, siendo además mayor en cualquier sistema en donde el sistema físico estudiado (en este caso la vagoneta con el espejo, etc.) esté en movimiento rectilíneo y uniforme.

Comentarios a la Actividad 8. Por la dificultad de la actividad hemos pensado que sería conveniente una exposición de la misma por parte del profesor, no obstante y puesto que los conocimientos necesarios para su comprensión no son elevados, se debería buscar siempre la aportación de los alumnos y que sean ellos los que hagan los cálculos. No podemos limitarnos a introducir la dilatación del tiempo como una consecuencia matemática de la teoría sin más, ya que si no se crearía el conflicto entre las "ideas nuevas" y la antiguas. Hay que hacer ver que este resultado rompe drásticamente con la concepción newtoniana de tiempo absoluto, independiente de la materia y que fluye indefinidamente.

También debemos de hacerles ver que los intervalos de tiempo no son cantidades absolutas y que al hablar de ellos ahora deberemos especificar el sistema en que está expresado dicho intervalo. En el sistema en que la vagoneta está en reposo los dos sucesos estudiados ocurren en el mismo lugar, en ese caso hablamos de **tiempo propio**, mientras que cuando los sucesos ocurren en lugares diferentes (en el sistema de referencia S) el tiempo medido siempre es mayor que el tiempo propio. Aunque al introducir posteriormente las transformaciones de Lorentz podía haberse obtenido la dilatación del tiempo de una forma más escueta, esta exposición cuenta con la ventaja de

que al aparecer de una forma geométrica el término $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, cuando vuelve a aparecer en las

transformaciones de Lorentz ya es un término familiar. (Esta actividad y la 10 están extraídas de (Tipler, 1999))

4.2. Contracción de longitud.

Actividad.9. (Exposición por parte del profesor). Siguiendo el razonamiento anterior, encontraremos otra de las consecuencias de la teoría, la *contracción de longitud*. Ésta está estrechamente ligada con el fenómeno estudiado anteriormente.

La longitud de un objeto medida en un sistema de referencia en el cual el objeto está en reposo se denomina *longitud propia*. En el sistema de referencia en el cual el objeto se está moviendo la longitud medida siempre es menor que la longitud propia. Volvamos al dibujo anterior:

Supongamos que x_1 y x_2 están en los extremos de una varilla graduada de longitud $L_0 = x_2 - x_1$ medida en el sistema S en el cual dicha varilla está en reposo. Puesto que S' se mueve respecto a este sistema con velocidad v la distancia recorrida en el tiempo Δt es $v\Delta t$. Puesto que se mueve desde el

punto x_1 al punto x_2 en ese tiempo, esta distancia es $L_0 = x_2 - x_1 = v\Delta t$. Desde el sistema S' la varilla calibrada se mueve con velocidad v y emplea un tiempo $\Delta t'$ para moverse pasando delante de él. La longitud de la varilla en este sistema es $L' = v\Delta t'$. Puesto que el intervalo de tiempo $\Delta t'$ es menor que Δt , la longitud L' es menor que L_0 . Ambas longitudes están relacionadas por

$$L' = v\Delta t' = v\Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Esta contracción suele denominarse *contracción de Lorentz-FitzGerald*.

4.3. Evidencias Experimentales.

Actividad.10. (Exposición por parte del profesor). Hasta ahora hemos visto las dos consecuencias más conocidas de la teoría de la relatividad: "Dilatación del Tiempo" y "Contracción de Longitudes". Vamos a ver si existe alguna evidencia experimental que apoye estas predicciones de la teoría.

Un ejemplo interesante es la aparición de muones como radiación secundaria procedente de los radiación cósmica. Los muones se desintegran según la ley estadística de desintegración radiactiva $N(t) = N_0 e^{-t/T}$ en donde N_0 es el número de muones existente en el instante $t=0$, $N(t)$ es el número en el instante t y T es el tiempo de vida medio que vale aproximadamente $2\mu s$ en el caso de muones en reposo.

Puesto que estos muones se crean (a partir de la desintegración de mesones P) a una gran altura en la atmósfera (a varios millares de metros sobre el nivel del mar) pocos muones deberán llegar al nivel del mar. Un muón típico que se mueve con una velocidad $0,998c$ recorrerá sólo $600m$ en $2\mu s$ aproximadamente. Sin embargo el período de vida medio del muón medido en el sistema de referencia de la Tierra se ve aumentado en el factor

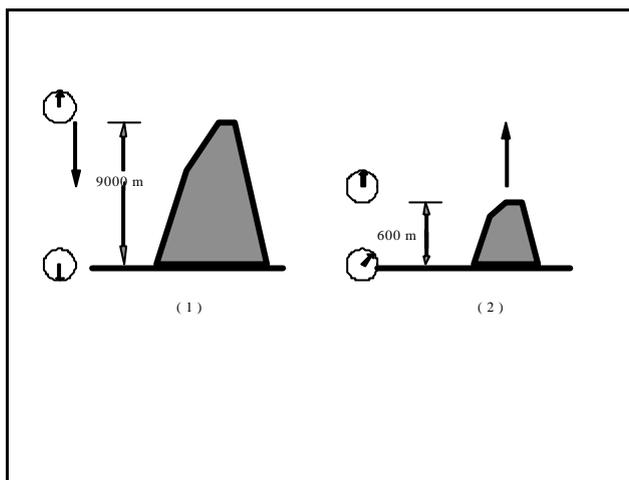
$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

que es 15 en el caso que nos ocupa. Por lo tanto con respecto al sistema de referencia situado en la Tierra el período de vida medio es $30\mu s$, y un muón de esta velocidad recorrerá aproximadamente $9000m$ en ese tiempo. Desde el sistema de referencia del propio muón, vive solamente $2\mu s$. Pero la distancia de $9000m$ sufre la contracción de Lorentz y sería solo de $600m$ (que es lo que recorrería en esos $2\mu s$, tal como se indica en la figura).

Veamos como distinguir entre las predicciones clásicas y relativistas acerca de los muones que han de ser observados a nivel del mar. Supongamos que observamos 10^8 muones a $9000m$ de altura en un cierto intervalo de tiempo mediante un detector de muones. ¿Cuántos se observarán a nivel del mar en el mismo intervalo de tiempo?

La predicción no relativista predice que el tiempo que emplean los muones de $0,998c$ en recorrer $9000m$ es $9000m / 0,998c = 30\mu s$, que es igual a 15 veces la vida media. Usando la ley de desintegración y haciendo $N_0 = 10^8$ y $t = 15T$, obtenemos,

$$N = 10^8 e^{-15} = 30,6$$



Es decir, según la predicción clásica quedarían unos 31 millones de los 100 millones originales.

La predicción relativista nos indica que en el sistema de referencia del muón los 9000m se contraen a 600 m y por tanto los muones emplean en recorrer esta distancia $2\mu\text{s}=T$. El número de muones que llegarían al nivel del mar sería entonces

$$N = 10^8 e^{-1} = 3,68 \cdot 10^7$$

la relatividad predice que debemos observar 36,8 millones de muones en el mismo intervalo de tiempo.

"Experimentos de este tipo han confirmado las predicciones relativistas" !

Comentarios a la Actividad 10. Se trata con esta explicación de mostrar a los alumnos dos cosas:
a) Por una parte puede aprovecharse para introducir uno de los aspectos más importantes del trabajo de los científicos, la contrastación experimental de predicciones teóricas. (Relacionado con el tema transversal 'Aproximación al trabajo científico').

b) Hacerles ver que la 'contracción de longitud' y la 'dilatación del tiempo' son confirmados experimentalmente por el comportamiento de la materia y no se quedan en meras disquisiciones teóricas.

A continuación realizaremos dos actividades relacionadas con estos aspectos en que los alumnos realizarán unos cálculos sencillos.

Actividad.11. (Individual). Una nave espacial tiene una longitud propia de 200m y se mueve a velocidad $0,7c$ respecto a la Tierra. ¿Cual será su longitud respecto a la Tierra?

Comentarios a la Actividad 11. Con esta actividad pretendemos que puedan realizar eventualmente un pequeño cálculo. Aunque no debemos olvidar que no es un curso superior de relatividad y tampoco se pretende profundizar en exceso. El resultado es:

El sistema ligado a la nave es el sistema S' donde la longitud es L' y el sistema situado en la Tierra es S donde la longitud es L . El sistema S' se aleja del S a velocidad $0,7c$. Ambas longitudes están relacionadas por:

$$L = L' (1 - (v^2/c^2))^{1/2} = 200 \text{ m} (1 - 0,7^2)^{1/2} = 142,8 \text{ m}$$

Actividad.12.(Individual). Una partícula posee una vida media en reposo de $5 \mu\text{s}$. Si se mueve a una velocidad $0,95c$ respecto al laboratorio. ¿Cual será su vida media medida respecto al laboratorio?

Comentarios a la Actividad 12. El sistema ligado a la partícula es el sistema S' donde la vida media es $T'=5\mu\text{s}$ y el sistema situado en la Tierra es S donde la vida media es T . El sistema S' se aleja del S a velocidad $0,95c$. Ambas medidas de tiempo están relacionadas por:

$$T = T' (1 - (v^2/c^2))^{-1/2} = 5 \mu\text{s} (1 - 0,95^2)^{-1/2} = 16 \mu\text{s}$$

5. TRANSFORMACIONES DE LORENTZ.

Actividad.13. (Exposición por parte del profesor). La aceptación de los postulados de Einstein hace que las transformaciones que nos permiten pasar de un sistema de referencia inercial a otro no sean las transformaciones de Galileo sino las transformaciones de Lorentz.

Supongamos que el sistema S' se aleja del sistema S a lo largo del eje x a velocidad constante v . La transformación que permite pasar de (x,y,z,t) a (x',y',z',t') es

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

De la misma forma, la transformación que permite pasar de (x',y',z',t') a (x,y,z,t) es

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y = y' \quad z = z' \quad t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

6. INVARIANTES EN RELATIVIDAD Y MECANICA CLASICA.

Actividad.14.(Exposición del profesor y posterior coloquio). Hemos visto que en relatividad los intervalos espaciales y temporales entre sucesos físicos son relativos, es decir dependen del sistema de referencia usado para expresarlos. Veremos ahora que en relatividad existe un concepto que es absoluto, el de intervalo. Para ello definamos cada suceso físico por cuatro coordenadas, las tres espaciales x,y,z y el tiempo t . De forma que cada suceso lo expresaremos en la forma (x,y,z,t) . Por ejemplo supongamos dos sucesos descritos en el sistema S , en la forma (x_1,y_1,z_1,t_1) y (x_2,y_2,z_2,t_2) . Se define el intervalo entre ambos sucesos mediante la expresión:

$$s = \sqrt{c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2}$$

de modo que el intervalo entre dos sucesos es el mismo independientemente del sistema inercial en que éste se exprese. La frase “el intervalo entre los sucesos A y B es s ” tiene carácter absoluto. Ni todas las magnitudes son relativas en relatividad, ni todas absolutas en mecánica newtoniana. Para ilustrar este hecho reproducimos el cuadro 1 página 87 de (Bunge, 1983).

MAGNITUD	FÍSICA CLÁSICA	FÍSICA RELATIVISTA
Posición	Relativa	Relativa
Velocidad	Relativa	Relativa
Longitud	Absoluta	Relativa
Duración	Absoluta	Relativa
Masa	Absoluta	Absoluta

MAGNITUD	FÍSICA CLÁSICA	FÍSICA RELATIVISTA
Energía	Relativa	Relativa
Carga eléctrica	Absoluta	Absoluta
Intensidades del campo electromagnético	Relativa	Relativa
Velocidad de la luz en el vacío	Absoluta	Absoluta
Entropía	Absoluta	Absoluta
Temperatura	Absoluta	Relativa
Tiempo propio	-	Absoluta
Intervalo espacio-temporal	-	Absoluta

7. MOMENTO LINEAL, ENERGÍA Y MASA EN RELATIVIDAD

Actividad.15.(Exposición del profesor). Veremos otra consecuencia importante de la teoría de la relatividad **la relación masa-energía**. Para ello introduzcamos las expresiones relativistas del momento lineal y la energía:

A) Momento lineal.

En Mecánica Clásica el momento lineal viene dado por la expresión $p = mv$, mientras que en física relativista viene dada por

$$p = \frac{m v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \mathbf{g}mv$$

esta expresión coincide con la expresión usada en mecánica clásica para $v \ll c$. Esto parecería indicar que el escalar m coincide con la masa de un cuerpo que se mueve con velocidad pequeña. Sin embargo las propiedades de la masa m en relatividad difieren esencialmente de las que se atribuyen a la masa en mecánica clásica. En particular, la masa no cumple la ley de conservación. En algunos procesos físicos la masa de las partículas antes de que se inicie el proceso no es igual a la masa de las partículas una vez terminado el mismo.

El hecho de que no se conserve la masa resulta particularmente claro por el hecho de que la existencia de una masa no es una propiedad necesaria de las partículas. No cabe duda de que existen en la naturaleza partículas elementales con masa en reposo igual a cero, entre ellas los cuantos de luz (fotones) y los neutrinos, que según los datos experimentales disponibles tienen también masa nula. No obstante cada partícula tiene un valor bien definido de su masa (incluido el valor cero), que no cambia de un ejemplar a otro de la misma. De la misma manera que hablamos de masa en reposo de una partícula elemental, cabe hablar de la masa en reposo de un cuerpo formado por muchas partículas elementales.

B) Energía.

Puede demostrarse que la energía total de una partícula es

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \mathbf{g} m c^2$$

Hasta ahora hemos visto que cuando $v \ll c$ los resultados obtenidos son los clásicos (desaparece la dilatación del tiempo, contracción de longitudes, ambas masas son iguales etc. ya que (v^2/c^2) tiende a cero y la raíz tiende a uno). Veamos que sucede en el caso de la energía, para ello hagamos un desarrollo en serie de la raíz

$$\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) + \dots$$

con lo que

$$E = m c^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

Resultado altamente interesante ya que indica que aunque la velocidad sea cero la energía no lo será, ya que tendrá un valor igual a mc^2 .

Por consiguiente la teoría de la relatividad conduce a una nueva conclusión muy importante: *La energía de una partícula en reposo es $E_0 = m c^2$, mientras que la energía de una partícula que se mueve con velocidad v es $E = \mathbf{g} m c^2$ donde m es la masa y c la velocidad de la luz en el vacío.*

Estas dos últimas ecuaciones se conocen con el nombre de ecuaciones de Einstein. **La energía y la masa están indisolublemente unidas entre sí y son proporcionales** En la actualidad estas predicciones teóricas se hallan confirmadas por un considerable número de resultados experimentales y su validez está fuera de toda duda.

Si sobre una partícula no actúan fuerzas exteriores, se cumple la ley de conservación de la energía y del impulso.

A diferencia de la física clásica en que existen dos leyes independientes de conservación (conservación de la energía y conservación de la masa) en física relativista encontramos únicamente una ley de conservación de la energía.

Para terminar indicamos que a veces se llama energía total a E . Pero en E no está incluida la energía potencial de la partícula en un campo exterior, si ese campo actúa sobre la partícula. Se introduce a veces la energía cinética E_{CIN} definiéndola como la energía asociada al movimiento de la partícula

$$E_{CIN} = E - E_0 = \mathbf{g} m c^2 - m c^2 = (\mathbf{g} - 1) m c^2$$

Comentarios a la Actividad 15. Aunque un poco larga la exposición, resulta muy ilustradora sobre algunos aspectos muy importantes derivados de la teoría relativista:

a) La puesta en escena de una nueva ley de conservación que no distingue entre masa y energía. (en este sentido puede ser interesante recomendar a los alumnos la lectura del artículo "E=mc², la ecuación más famosa de la física una incomprendida" (Gil, 1988).

b) Se puede abundar también en el hecho de que existe una energía mc² que no depende del hecho de que la partícula se mueva a grandes velocidades (de hecho existe aunque no se mueva) y que fue el fundamento teórico de la obtención de energía nuclear.

Actividad 16. (En grupo). La energía de una partícula en movimiento respecto a un sistema inercial es el doble de la que posee en su propio sistema ¿Cuál es la velocidad de dicho cuerpo?

Comentarios a la Actividad 16. Después de la explicación teórica puede ser interesante que los alumnos se sitúen en grupos y con el pretexto de realizar el pequeño cálculo planteado, el profesor intente que se plantee alguna discusión que haga entrar en conflicto las antiguas ideas y las recientemente expuestas. La solución es :

$$E = \gamma mc^2 = 2E_0 = 2mc^2 \rightarrow \gamma = 2 \rightarrow 2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow v = \frac{\sqrt{3}}{2} c = 0,866 c$$

Actividad 17. (Explicación del profesor). Vamos a deducir una nueva forma de expresar la masa a partir de las ecuaciones de Einstein. Despejando la masa en cualquiera de ellas y teniendo en cuenta que si se usa la de la masa total γ es adimensional podremos expresar la masa como E/c^2 y suele expresarse como la unidad de energía elegida (Julios (J) electrón-voltios (eV), megaelectrón-voltios (MeV), etc) dividida por c^2 de forma que al aplicar la relación $E_0 = mc^2$ se eliminen los términos c^2 y se vuelva a obtener unidades de energía. Algunos ejemplos de masas expresadas de esta forma son:

$$m_1 = 3,5 \text{ J}/c^2 \quad m_2 = 0,6 \text{ MeV}/c^2 \quad m_3 = 200 \text{ eV}/c^2$$

Las energías en reposo de esta partículas serian entonces:

$$E_1 = 3,5 \text{ J} \quad E_2 = 0,6 \text{ MeV} \quad E_3 = 200 \text{ eV}$$

8. DIFERENCIA ENTRE RELATIVIDAD GENERAL Y RELATIVIDAD ESPECIAL.

Actividad 18. (Explicación del profesor).

El principio de relatividad que hemos visto a lo largo de la unidad se refiere a transformaciones de coordenadas entre sistemas que se mueven a velocidad constante y en línea recta unos respecto a otros (sistemas inerciales). Por ello toda la teoría desarrollada a partir del mismo recibe el nombre de *Relatividad especial o restringida* (en el sentido de que es válida para un subconjunto de sistemas de referencia).

No contento con la situación Einstein se propuso generalizar su teoría para cualquier tipo de

sistema de referencia, así en 1916 publicó su *Teoría General de la Relatividad* que incluye a todos los sistemas: inerciales y no inerciales. Introdujo el *Principio de Equivalencia* según el cual es imposible resolver si en una región del espacio existe un sistema acelerado sin la influencia de un campo gravitatorio uniforme o si el sistema es inercial y se encuentra dentro de un campo gravitatorio. Este principio constituye la base del *Principio General de Relatividad*.

9. EVALUACIÓN.

9.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.

- Conocer la situación en que se encontraba el electromagnetismo a finales del siglo XIX
- Formular los postulados de la relatividad y conocer sus consecuencias.
- Indicar las diferencias más notables entre mecánica clásica y mecánica relativista.
- Calcular la longitud de un objeto respecto a un sistema de referencia con respecto al que se mueve a una velocidad cercana a la de la luz. Compararla con su longitud propia.
- Calcular intervalos de tiempo en dos sistemas inerciales.
- Calcular el período de semidesintegración o la masa de una partícula con velocidades próximas a las de la luz, comparándolas con las que tendría en reposo.
- Calcular el intervalo entre dos sucesos.
- Conocer las expresiones de la energía en reposo, energía cinética y energía total de una partícula que se mueve a alta velocidad.
- Conocer las transformaciones de Lorentz.
- Conocer los límites de aplicación de la mecánica de Newton.

9.2 MODELO DE EVALUACIÓN.

La estructura de la prueba es similar a la que propone el distrito universitario de la Comunidad Autónoma de Murcia en las pruebas de acceso a la universidad. Consta de 4 preguntas de teoría a elegir 2 (1 punto cada una); cuatro cuestiones, también a elegir 2 (1 punto cada una); y 3 problemas de tres apartados, a elegir 2 (3 puntos cada uno).

TEORIA. Debes contestar a 2 preguntas de teoría a tu elección.

1. Expresión de las transformaciones de Lorentz para dos sistemas que se alejan a lo largo del eje x. (1 punto).
2. Indica las diferencias más notables entre mecánica clásica y mecánica relativista. (1 punto).
3. Postulados de la teoría de la relatividad especial. (1 punto).
4. Expresiones de la energía en reposo, energía cinética y energía total de una partícula de masa m . Relaciones entre ellas. (1 punto).

CUESTIONES. Debes contestar a 2 cuestiones a tu elección.

5. ¿Cuál es la razón por la que la mecánica de Newton da buenos resultados? (1 punto).
6. Explica el conflicto surgido a finales del siglo XIX entre la mecánica de Newton y el electromagnetismo. (1 punto).
7. ¿Puede aumentar indefinidamente la velocidad de una partícula bajo la acción de una fuerza constante? ¿Por qué? (1 punto).
8. ¿Qué diferencia hay entre relatividad especial y general? (1 punto).

PROBLEMAS. Debes realizar dos problemas a tu elección.

9. La longitud de una nave espacial en el sistema ligado a la misma es 50 m y su altura 10 m. Se mueve en

línea recta alejándose de la Tierra a una velocidad $0,95c$. Calcula:

- Valor de γ para la nave. (1 punto).
- Longitud de la nave medida en el sistema Tierra. (1 punto).
- Altura de la nave medida en el sistema Tierra. (1 punto).

10. Un muón se acerca a la Tierra a una velocidad $0,98c$. Si su masa es $m=105,7 \text{ Mev}/c^2$ y su vida media $\tau=2,19 \cdot 10^{-6}\text{s}$. Calcula, en Mev y julios:

- Energía en reposo del muón. (1 punto).
- Energía total del muón. (1 punto).
- Energía cinética del muón. (1 punto).

11. Un cohete que viaja a una velocidad constante $v = \sqrt{0,9999} c$ se dirige hacia el sistema estelar Próxima Centauro (que se encuentra a 4 años-luz de la Tierra*). Calcula:

- Duración del viaje de ida y vuelta medido en un reloj de la Tierra. (1 punto).
- Para cuanto tiempo habrá que preparar alimentos y otros productos de abastecimiento de la nave. (1 punto).
- Reserva de energía cinética que ha de tener el cohete si su masa es de 10 Tm. (1 punto).

*Se denomina año-luz a la distancia recorrida por la luz en el vacío en un año.

10. TEMPORALIZACIÓN.

La presente unidad didáctica junto con otras dos tituladas respectivamente "Elementos de Física Cuántica" y "Elementos de Física Nuclear" forman la unidad temática "Introducción a la Física Moderna" a la que en la programación de la asignatura "Física" se dedica la última evaluación que suele ser mas corta que las anteriores, le supondremos una duración media de dos meses y medio (10 semanas = 40 horas de clase). Puesto que las tres unidades deben tratarse con la misma profundidad, supondría dedicar 13 horas clase a esta Unidad Didáctica.

HORA DE CLASE	ACTIVIDAD A REALIZAR
1	Prueba inicial y entrega del guión de la Unidad Didáctica
2	Actividad 1 y Actividad 2
3	Actividad 3, Actividad 4 y Actividad 5
4	Actividad 6 y Actividad 7
5	Actividad 8
6	Actividad 9 y Actividad 10
7	Actividad 11 Actividad 12 y Actividad 13
8	Actividad 14
9	Actividad 15
10	Actividad 16 , Actividad 17 y Actividad 18

HORA DE CLASE	ACTIVIDAD A REALIZAR
11	Evaluación
12	Corrección de la prueba de evaluación en clase
13	Distribución de las actividades de atención a la diversidad

11. ACTIVIDADES DESTINADAS A LA ATENCIÓN A LA DIVERSIDAD .

Los contenidos desarrollados serían las que realizarían en clase todos los alumnos. A continuación proponemos algunas actividades que podrían proponerse a determinados alumnos que tuvieran un interés especial en profundizar en el tema, y que hubieran superado la prueba de evaluación. A los alumnos que no la hubieran superado se les dará una colección de actividades de recuperación similar a la realizada en clase.

Actividad de AD 1. (Individual para casa). Una nave espacial se aleja en línea recta de la Tierra a una velocidad constante $v=0,9c$.

- Si la nave tiene una longitud propia de 70m. ¿Cuál será la longitud medida en el sistema Tierra?
- Si los astronautas hacen guardias cada 8 h según los relojes de la nave. ¿Cada cuanto tiempo, medido en la Tierra, cambian de guardia?
- La cabina de mandos está separada de la sala de máquinas por una distancia de 20m. En ambas salas se produce un suceso que es simultáneo según el sistema de referencia ligado a la nave. ¿Son simultáneos en la Tierra?
- Calcule el intervalo que separa ambos sucesos y compruebe que es el mismo en la nave que en la Tierra.

Comentarios a la Actividad de atención a la diversidad 1. Las soluciones a la actividad son las siguientes:

a) $L=30,5\text{m}$ b) cada 18,3528 horas c) No son simultáneos están separados por un intervalo temporal de $-1,376 \cdot 10^{-7}\text{s}$ d) $s = \sqrt{-400}$ m

Actividad de AD 2.(Individual para casa). Consideremos la reacción nuclear ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},\text{p}){}^{11}\text{B}$. Calcular la energía asociada a la misma. Datos: Masas atómicas: Be:9,0121855 u ; He:3,0160297 u ; B:11,0093053 u; p:1,0078252 u. $1\text{u}=931,5\text{ MeV}$.

Comentarios a la Actividad de atención a la diversidad 2: Esta actividad en parte se adelanta al tema de física nuclear. Si no se considera conveniente puede aplazarse para entonces. Sin embargo puede ser un buen trabajo de investigación para alumnos aventajados. Actividades como esta y su solución pueden encontrarse en (García, 1977). Su tratamiento teórico en (Burcham, 1974). La solución es:

Aplicamos la ley de conservación de la energía $E = \text{cte}$ o bien $E_{\text{INI}} = E_{\text{FIN}}$.

Por otra parte $E = E_{\text{CIN}} + mc^2$. Por lo tanto podemos escribir

$$(E_{\text{CIN}}(\text{He}) + m(\text{He})c^2) + (E_{\text{CIN}}(\text{Be}) + m(\text{Be})c^2) = (E_{\text{CIN}}(\text{B}) + m(\text{B})c^2) + (E_{\text{CIN}}(\text{p}) + m(\text{p})c^2)$$

La energía asociada a la reacción (llamada a veces calor de reacción) se define como la diferencia entre las energías cinéticas finales e iniciales:

$$Q_0 = E_{\text{CIN}}(\text{B}) + E_{\text{CIN}}(\text{p}) - E_{\text{CIN}}(\text{He}) - E_{\text{CIN}}(\text{Be})$$

Si suponemos que el Be inicialmente está en reposo, $E_{\text{CIN}}(\text{Be}) = 0$ y

$$Q_0 = E_{\text{CIN}}(\text{B}) + E_{\text{CIN}}(\text{p}) - E_{\text{CIN}}(\text{He}).$$

Esta diferencia de energías cinéticas puede obtenerse de la ecuación de conservación,

$$Q_0 = [(m(\text{He}) + m(\text{Be})) - (m(\text{B}) + m(\text{p}))] c^2 = 10,325 \text{ MeV}$$

Actividad de AD 3.(Trabajo bibliográfico en pequeño grupo [2 personas]). Se propone un trabajo bibliográfico sobre la figura de Albert Einstein. Se podrá elegir entre los siguientes temas:

- Infancia y juventud de Albert Einstein.
- Albert Einstein: los años en Berna.
- La visita de Albert Einstein a España.
- Albert Einstein: su trabajo en la Universidad de Princeton.
- Influencia sobre la génesis de la relatividad de experimento de Michelson y Morley.

Se valorará especialmente el uso de fuentes de información en línea (Internet) en la confección del trabajo. Para cada uno de los trabajos se proporcionará una lista de bibliografía seleccionada.

Comentarios a la Actividad de atención a la diversidad 3. Esta actividad la proponemos para que sea realizada de forma interdisciplinar con la materia de Inglés. La mayoría de información en Internet se encuentra en inglés. Además el profesor puede proporcionar artículos de revistas especializadas en Inglés (García y Abril, 1997).

12. CONTENIDOS MINIMOS.

La presente unidad didáctica forma parte de la programación de física de 2º de bachillerato, curso que una vez finalizado se completa con la realización de la Prueba de Acceso a la Universidad (PAU). La presencia de la citada prueba y sobre todo las reuniones de coordinación entre los profesores de Enseñanza Media y el coordinador de la asignatura de física del distrito universitario, determinan los

contenidos mínimos exigibles. Con estas consideraciones anteriores y teniendo en cuenta la situación actual de las PAU podríamos proponer como contenidos mínimos:

- Postulados de la Relatividad Especial.
- Límite de validez de la Mecánica de Newton.
- Cálculo de intervalos de tiempo y longitud en distintos sistemas inerciales.
- Cálculo de la energía en reposo de algunas partículas.

13. TRANSVERSALIDAD Y COORDINACIÓN CON OTRAS MATERIAS.

TRANSVERSALIDAD

El decreto de currículo (RD 1179/1992) establece dos temas transversales para la materia de “Física”:

APROXIMACIÓN AL TRABAJO CIENTÍFICO.

Con los siguientes contenidos y su relación con las actividades desarrolladas:

- Procedimientos que constituyen la base del trabajo científico:
 - Planteamiento de problemas, formulación y contrastación de hipótesis.
Einstein se plantea el problema de la covarianza de las leyes de la física.
 - Diseño y desarrollo de experimentos e interpretación de resultados.
Un paradigma de diseño es el experimento de Michelson-Morley. (Actividad 1)
 - Comunicación científica.
Al introducir los postulados de la Teoría de la Relatividad Especial (Actividades 5 y 6) y en el posterior coloquio se tratará el aspecto de cómo y donde comunica Einstein su teoría.
- Importancia de las teorías y modelos dentro de los cuales se lleva a cabo la investigación.
 - *En la Actividad 10 (desintegración de muones) es interesante comparar las predicciones de ambas teorías, y cómo los resultados experimentales permiten comprobar la validez de las predicciones relativistas.*

FÍSICA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD.

Con los siguientes contenidos y su relación con las actividades desarrolladas:

- Análisis de la naturaleza de la física: sus logros y limitaciones, su carácter tentativo y de continua búsqueda, su evolución, la interpretación de la realidad a través de modelos.
 - *Destacar cómo cuando la física parece acabada por el paradigma newtoniano, los postulados de Einstein muestran las limitaciones de la física clásica. (Actividades 1 y 6).*
- Influencias mutuas entre la sociedad, la física y la tecnología.
 - *Los trabajos propuestos en la Actividad 3 pueden ayudar a los alumnos a comprender la relación entre los científicos y la sociedad.*

COORDINACIÓN CON OTRAS MATERIAS

La coordinación con otras áreas y materias es uno de los aspectos más importantes a la hora de abordar una programación didáctica y una secuenciación de contenidos. Es mucho más necesario en los primeros cursos de la Educación Secundaria que en los últimos. En la materia de física es de especial importancia la coordinación con matemáticas sobre todo en temas en los que el aparato matemático es una herramienta necesaria. La unidad didáctica que nos ocupa aparece prácticamente al final de curso cuando los conocimientos de matemáticas de los alumnos son mayores, dándose además la circunstancia de que la unidad tiene una dificultad más conceptual que matemática. Sin embargo la coordinación con la materia Inglés la proponemos para trabajos de investigación bibliográfica complementaria (véase la actividad 3 de atención a la diversidad).

14. ACTIVIDAD DE LABORATORIO: DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ EN EL VACÍO.

Proponemos como actividad a realizar en el laboratorio la medida indirecta de la velocidad de la luz en el vacío mediante el uso de un circuito resonante (Gimeno et al.,2000).

La experiencia consiste en montar un circuito RCL serie. Cuando la frecuencia es la de resonancia se cumple $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Por otra parte la capacidad del condensador plano es $C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$ siendo S el área de las placas y d la separación entre ellas, mientras que la autoinducción de un solenoide(muy largo) se aproxima por $L = \mu_0 \frac{S'N^2}{l}$ siendo N el número de espiras, S' la sección de la bobina y l su longitud.

Puesto que el producto $LC = \frac{1}{\omega_r^2}$ y $\epsilon_0 \mu_0 = c^2$ puede obtenerse un valor experimental para la velocidad de la luz en el vacío. Para el montaje de la práctica, además de la referencia citada pueden consultarse (Clark, 2001) y (Yuste et al., 1996).

15. BIBLIOGRAFÍA Y CITAS.

Bunge, M. *"Controversias en física"*. Ed. Tecnos. Madrid. 1983.

Burcham, W.E. *Física Nuclear*. Ed. Reverté . Barcelona 1974.

Calatayud, M.L. et al. *"La construcción de las ciencias físico-químicas"*. Nau Llibres. Valencia. 1989.

Clark, G.W. *"An electrical measurement of the speed of light"*. American Journal of Physics, **69**, (2), pp. 110 – 112. February 2001.

Comay, E. *"Lorentz transformation of a system carrying 'Hidden Momentum' "*. American Journal of Physics, **68**, (11), pp. 1007-1013. November 2000.

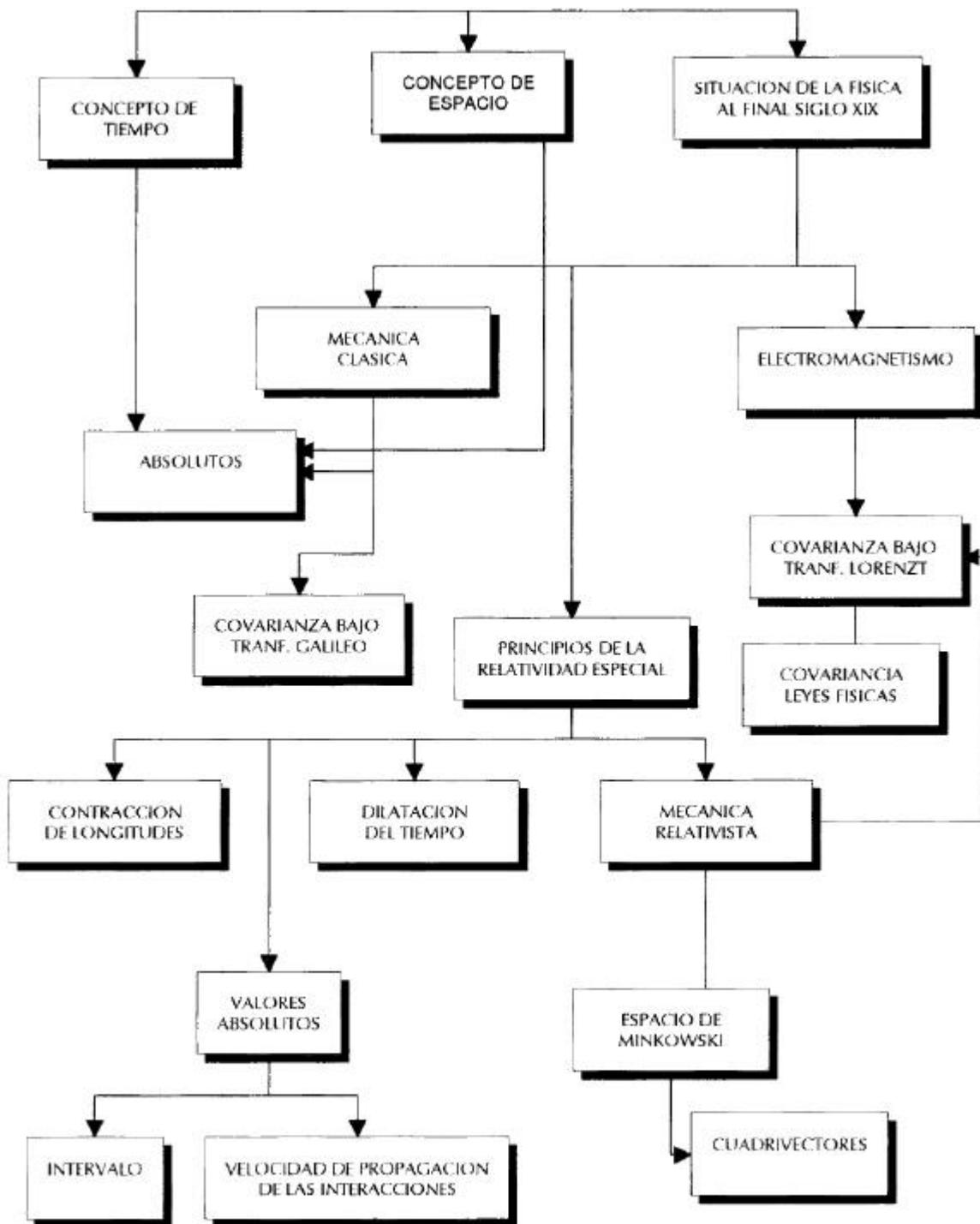
Cranor, M.B., Heider, E.M., Price, R.H. *"A circular twin paradox"*. American Journal of Physics, **68**, (11), pp. 1016-1020. November 2000.

Einstein, A. *"El Significado de la Relatividad"*. Planeta-Agostini. Barcelona. 1985.

Einstein, A. *"Sobre la Teoría de la Relatividad Especial y General"*. Alianza. Madrid. 1984.

-
- Einstein, A., Grünbaum, A. et al. *"La Teoría de la Relatividad"*. Alianza Universidad. Madrid. 1975.
- Enciclopedia Británica. *"Relativity"*. pp. 531-538.
- Farouki, N *"La Relatividad"*. Colección Dominos. Circulo de Lectores. Barcelona. 1994.
- García Alcaine, G. *"Sobre masa y energía"*. Revista Española de Física, **3**, (1) , pp. 59-62. 1989.
- García, A. *Problemas de Física Nuclear*. Ed. AC. Madrid 1977.
- García Molina, R. y Abril, I. *"Una introducción a la literatura científica"*. Enseñanza de las Ciencias, **15** (1) pp. 73-77. 1997.
- Gil, D., Furió, C *"El programa-guía. Una propuesta para la renovación de la didáctica de la física y química en el Bachillerato"*. Capítulo 17 de *"Didáctica de la física y de la química"* (Simposio). INCIE. Madrid. 1979.
- Gil, D., Senent, F. y Solbes, J. *" $E=mc^2$, la ecuación más famosa de la física: una incomprendida"*. Revista Española de Física, **2**, (2) , pp. 53-55. 1988.
- Gil, D., Senent, F. y Solbes, J. *"Física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta comentada y unos resultados"*. Revista Española de Física, **3**, (1) pp. 53-58. 1989.
- Gimeno, B., Martí, I., Sanchis, M.A. y Vergara, M. *"Determinación indirecta de la velocidad de la luz en el vacío mediante un circuito resonante"*. Revista Española de Física, **14**, (4) pp. 41-44. 2000.
- Glick, T.F. *"Einstein y los españoles: aspectos de la recepción de la relatividad"*. Llull, **2** (4) pp. 3-22. Diciembre 1979.
- Hierrezuelo, J., Montero, A, *"La Ciencia de los alumnos". Su utilización en la didáctica de la Física y Química*. Ed. Elzevir. Granada. 1991.
- Hoffmann, B. *"La relatividad y sus orígenes"*. Ed. Labor. Barcelona .1985.
- Holton, G. *"Einstein, Michelson and the 'crucial experiment' "* Isis. **60** (2) 1969.
- Holton, G. *"Thematic Origins of Scientific Thought"*. Harvard University Press. 1973.
- Holton, G. *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona. Reverté. 1976.
- Holton, G. *"Influence on Einsteins's Early work"*. The American Scholar, Winter 1967-68.
- Kuhn, T.S. *"La estructura de las revoluciones científicas"*. Fondo de Cultura Económica. Madrid. 1978.
- Lafuente, A. *"Apuntes sobre relatividad en España"*. Llull **1** (4), pp. 35-43. 1977.
- Landau, L., Rumer, Y. *"Que es la teoría de la relatividad"*. Ed. R. Aguilera. Madrid. 1975.
- Landau, L., Lifshitz, E. *"Teoría Clásica de Campos"*. Vol. 2. Ed. Reverté S.A. Barcelona 1987.
- Levich, B.G. *"Teoría del Campo Electromagnético y Teoría de la Relatividad"*. Ed. Reverté. Barcelona. 1974.

-
- López Valverde, R. "*Fizeau o la pasión por la luz (1819-1896)*". Revista Española de Física, **11**(2), pp. 46-52.1997.
- Nordtvedt, K. "*La Luna, en ayuda de Einstein*". Mundo Científico n° 178. pp. 349-355.Abril. 1997.
- Pais, A. "*Einstein and the press*". Physics Today. pp. 30-36. August 1994.
- Petit, G. y Wolf, P. "*Verificar la relatividad sin salir de casa*". Mundo Científico n° 180. pp. 518-519. Junio.1997.
- Poincaré, H. "*El valor de la ciencia*". Espasa-Calpe.Madrid. 1964.
- Posner,G.S., et al. "*Accomodation of scientific conception: towards a theory of conceptual change*". Science Education, **66** , pp.221-227.1982.
- Proyecto Curricular de Bachillerato. I.E.S. "El Bohío".
- Resnick, R. *Misconceptions about Einstein. His work and his views*. Journal of Chemical Education, **12**, pp. 854,862. 1980.
- Sánchez-Gómez, J.L. "*La paradoja de los gemelos: un enfoque didáctico*". Revista Española de Física. **9**, (3), pp. 46-48. 1995.
- Sánchez Méndez, J.L. "*El concepto relativista de masa inerte en los textos de física del nuevo bachillerato*". Revista Española de Física. **14**, (4), pp. 45-47. 2000.
- Sánchez Ron, J.M. "*Relatividad especial, relatividad general (1905-1923): orígenes desarrollo y recepción por la comunidad científica*". Instituto de Ciencias de la Educación. UAB. Bellaterra.1981.
- Sánchez Ron, J.M. *El poder de la ciencia*. Madrid. Alianza. 1992.
- Solbes, J. *Física cuántica. Recursos y elementos de actualización científica*. Curso de actualización científica y didáctica. Madrid. Ministerio de Educación y Ciencia. 1992.
- Solbes, J. *La introducción de conceptos básicos de física moderna*. Tesis Doctoral. Universitat de Valencia. 1986.
- Solbes, J. *Materiales Didácticos. Física. Bachillerato*. Ministerio de Educación y Ciencia.
- Taylor, J.G. "*La nueva Física*". Alianza Universidad. Madrid. 1981.
- Ten, A. "*El experimento de Michelson-Morley y su influencia en los orígenes de la relatividad restringida*". Llull, **1** (2) , pp. 42-50. 1978.
- Tipler, P. A. "*Física para la ciencia y la tecnología Vol. 2. Electricidad y Magnetismo, Luz, Física Moderna*" Ed. Reverté. Barcelona 1999.
- Warren, J. W. "*The mystery of mass-energy*". Physic Education, 11 pp. 52-54. 1976.
- Yuste M., Carreras C., Blanco M. "*Dos experimentos sencillos para la determinación de la permitividad eléctrica y de la permeabilidad magnética del vacío*". Revista Española de Física **10**, (1), pp. 41-45. 1996.



ELEMENTOS DE FISICA RELATIVISTA