

Bloque 4.1

Relatividad Especial

Apuntes completos para la PAU: relatividad de Galileo y experimento de Michelson-Morley, postulados de Einstein, factor de Lorentz, dilatación del tiempo, contracción de longitudes, masa relativista, dinámica relativista y equivalencia masa-energía. Diagramas, cuadros resumen y doce ejercicios del tipo de la PAU resueltos paso a paso.

Contenido

4.1 Relatividad Especial

Michelson-Morley, postulados, factor de Lorentz, dilatación temporal, contracción de longitudes, masa relativista, $E = mc^2$, dinámica relativista

Apuntes de preparación para la PAU · 2.º de Bachillerato

Ejemplar de muestra gratuito, igual para todos. Prohibida su venta o redistribución sin permiso escrito del titular.

© 2026 PAUmode. Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial, la distribución, la comunicación pública y la transformación de esta obra sin autorización escrita del titular. El incumplimiento podrá dar lugar a las acciones civiles y penales previstas en la legislación sobre propiedad intelectual.

4.1 Relatividad Especial

4.1 Relatividad · Michelson-Morley · Postulados · Cinemática · Dinámica relativista.

4.1.1 · La relatividad de Galileo y el experimento de Michelson-Morley

Un **sistema de referencia inercial** es el que no tiene aceleración: en él se cumple la primera ley de Newton (un cuerpo sin fuerzas sigue en reposo o con velocidad constante). Un sistema **no inercial** está acelerado (un coche que frena, una plataforma que gira) y en él aparecen fuerzas ficticias que ningún cuerpo ejerce. Galileo ya enunció que las leyes de la mecánica son las mismas en todos los sistemas inerciales: dentro de un barco que navega sin balancearse, ningún experimento mecánico dice si el barco se mueve.

Para pasar de un sistema S a otro S' que se mueve respecto a él con velocidad v a lo largo del eje x , la mecánica clásica usa la **transformación de Galileo**:

$$x' = x - v t, y' = y, z' = z$$

$$t' = t \text{ (el tiempo es absoluto: el mismo para todos)}$$

$$u' = u - v \text{ (las velocidades se suman o se restan)}$$

El problema llegó con la luz. Las ecuaciones de Maxwell dan para la luz una velocidad fija, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Como se pensaba que toda onda necesita un medio, se supuso que la luz viajaba por el **éter**, un medio invisible que llenaría todo el espacio. Si la Tierra se mueve a través del éter, la transformación de Galileo dice que la luz debería medirse más rápida o más lenta según la dirección en que viaje respecto a ese movimiento.

En 1887, en Cleveland (Estados Unidos), **Albert Michelson y Edward Morley** lo comprobaron con un interferómetro: un haz de luz se divide en dos que recorren brazos perpendiculares, se reflejan en dos espejos y vuelven a juntarse en una pantalla, donde forman franjas de interferencia. Si la luz tardara distinto en cada brazo, al girar el aparato 90° las franjas se desplazarían. Esperaban un desplazamiento de unas 0,4 franjas y midieron como máximo 0,02: el **resultado fue nulo**.

Interferómetro de Michelson (vista desde arriba)

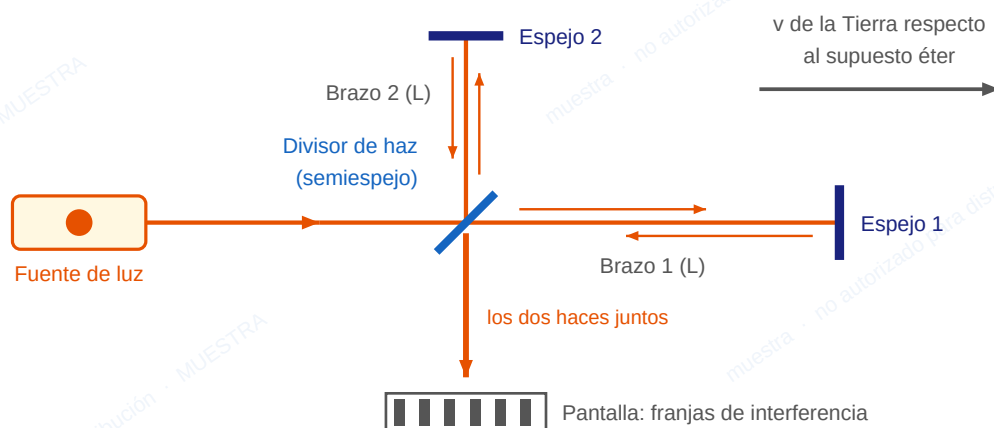


Figura 1 - Interferómetro de Michelson visto desde arriba. El divisor de haz manda la luz a dos brazos perpendiculares; al volver, los dos haces se superponen en la pantalla. Si la luz fuese más lenta en un brazo que en el otro, al girar el aparato se moverían las franjas. No se movieron.

Qué se concluye. No se detecta ningún movimiento de la Tierra respecto al éter: la luz va a la misma velocidad en todas las direcciones. Para salvar el éter, FitzGerald (1889) y Lorentz (1892) propusieron que los cuerpos se acortan en la dirección del movimiento justo lo necesario para anular el efecto. Einstein resolvió el problema de otra forma: el éter no hace falta y la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores.

PAU - Atención. Cuando preguntan por Michelson-Morley se piden tres cosas: qué se buscaba (el movimiento de la Tierra respecto al éter), qué se obtuvo (resultado nulo: ningún desplazamiento de franjas) y qué significa (no hay éter detectable y c no depende del movimiento del observador, que es el segundo postulado de Einstein).

4.1.2 · Postulados de la Relatividad Especial (Einstein, 1905)

La mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell no encajaban: con la transformación de Galileo, la velocidad de la luz dependería del observador, y el experimento de Michelson-Morley decía que no. En 1905, Albert Einstein publicó en la revista *Annalen der Physik* el artículo «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento» (recibido el 30 de junio y publicado el 26 de septiembre), que es la **Teoría de la Relatividad Especial**. Se basa en dos postulados:

1.er Postulado (Principio de Relatividad): Las leyes de la física tienen la misma forma matemática en todos los sistemas de referencia inerciales (sistemas que se mueven a velocidad constante entre sí).

2.º Postulado (Invariancia de c): La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores inerciales, independientemente del movimiento de la fuente o del observador. $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Consecuencias revolucionarias. Estos dos postulados, aparentemente sencillos, llevan a conclusiones radicales: el tiempo no es absoluto (un reloj que se mueve respecto a un observador marcha más despacio según ese observador), las longitudes se contraen en la dirección del movimiento, y la masa y la energía son equivalentes ($E = mc^2$, que Einstein dedujo en un segundo artículo publicado en noviembre de 1905).

4.1.3 · Factor de Lorentz

Todas las transformaciones relativistas se expresan en términos del **factor de Lorentz** γ (gamma), que depende de la velocidad v de un objeto respecto al observador:

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \text{ (factor de Lorentz)}$$

$$v = 0 \Rightarrow \gamma = 1 \text{ (mecánica clásica, sin efecto relativista)}$$

$$v = 0,6c \Rightarrow \gamma = 1,25$$

$$v = 0,8c \Rightarrow \gamma = 5/3 \approx 1,667$$

$$v = 0,9c \Rightarrow \gamma \approx 2,29$$

$$v = 0,99c \Rightarrow \gamma \approx 7,09$$

$$v \rightarrow c \Rightarrow \gamma \rightarrow \infty \text{ (ningún objeto con masa puede alcanzar } c \text{)}$$



Figura 2 - Factor de Lorentz γ en función de v/c . Para $v < 0,3c$ los efectos relativistas son menores del 5%. La curva se dispara hacia infinito cuando v se acerca a c .

Truco. Para calcular γ rápidamente: primero calcula $1-v^2/c^2$, saca la raíz cuadrada y haz el recíproco. Solo 0,6c y 0,8c dan números exactos ($\gamma = 5/4$ y $\gamma = 5/3$); con 0,5c, 0,9c o 0,99c hay que tirar de calculadora y redondear al final.

4.1.4 · Dilatación del tiempo

Un reloj que se mueve respecto a un observador marcha más despacio, medido por ese observador. El **tiempo propio** Δt_0 es el que mide un reloj para el que los dos sucesos ocurren en el mismo lugar: el reloj que está en reposo respecto a lo que se estudia (por ejemplo, el de la nave para algo que pasa dentro de la nave). Cualquier observador respecto al cual ese reloj se mueve mide un tiempo mayor Δt .

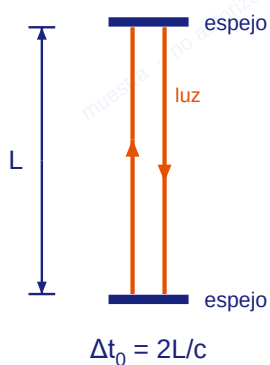
$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0 \text{ (tiempo dilatado} = \gamma \times \text{tiempo propio)}$$

$$\Delta t_0 = \text{tiempo propio (medido en el sistema en reposo del objeto)}$$

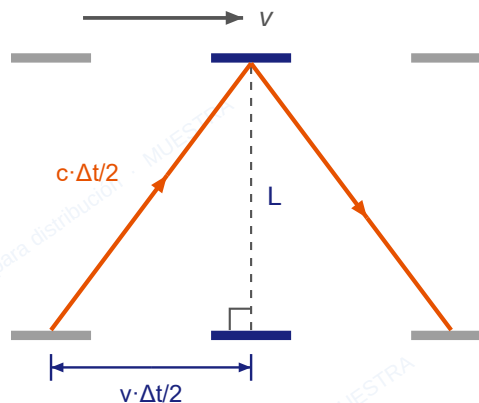
$$\Delta t = \text{tiempo dilatado (medido por el observador que ve el objeto moverse)}$$

$$\text{Como } \gamma \geq 1 \text{ siempre: } \Delta t \geq \Delta t_0 \text{ (el tiempo propio es SIEMPRE el menor)}$$

Visto por quien viaja con el reloj



Visto desde tierra: el reloj va a v



$$\text{Pitágoras: } (c \cdot \Delta t / 2)^2 = L^2 + (v \cdot \Delta t / 2)^2 \rightarrow \Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$$

Figura 3 - Reloj de luz. A la izquierda, para quien viaja con el reloj, el pulso sube y baja entre los dos espejos: tarda $\Delta t_0 = 2L/c$. A la derecha, el mismo reloj visto desde tierra en tres instantes: mientras el pulso sube, el reloj avanza $v \cdot \Delta t / 2$, así que la luz recorre una diagonal más larga a la misma velocidad c y tarda más: $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$. Dibujado a escala para $v = 0,6c$ ($\gamma = 1,25$).

Error típico. El error típico es invertir la fórmula. El tiempo propio Δt_0 es el que mide el reloj que acompaña al objeto (la nave, el muón...), y es siempre el menor de los dos. Si el dato es el tiempo medido desde tierra, ese es Δt y hay que dividir entre γ , no multiplicar.

La paradoja de los gemelos. El efecto es recíproco: para el astronauta, son los relojes de la Tierra los que se mueven y marchan despacio. Entonces, si un gemelo viaja y vuelve, ¿quién es más joven? El viajero. Los dos casos no son simétricos: para dar la vuelta, la nave tiene que frenar y acelerar, así que el viajero no está todo el tiempo en un sistema inercial, y el que se queda en la Tierra sí. La dilatación del tiempo está medida: los muones creados en la alta atmósfera llegan al suelo gracias a ella (ejercicio 2), y en 1971 Hafele y Keating dieron la vuelta al mundo en aviones comerciales con relojes atómicos: respecto a los de tierra, los que fueron hacia el este volvieron unos 59 nanosegundos atrasados y los que fueron hacia el oeste, unos 273 adelantados, por la suma del efecto de la velocidad y del de la gravedad.

4.1.5 · Contracción de longitudes (Lorentz-FitzGerald)

Un objeto en movimiento se mide más corto en la dirección del movimiento. La **longitud propia** L_0 es la longitud medida cuando el objeto está en reposo. El observador que ve pasar el objeto a velocidad v mide una longitud menor L .

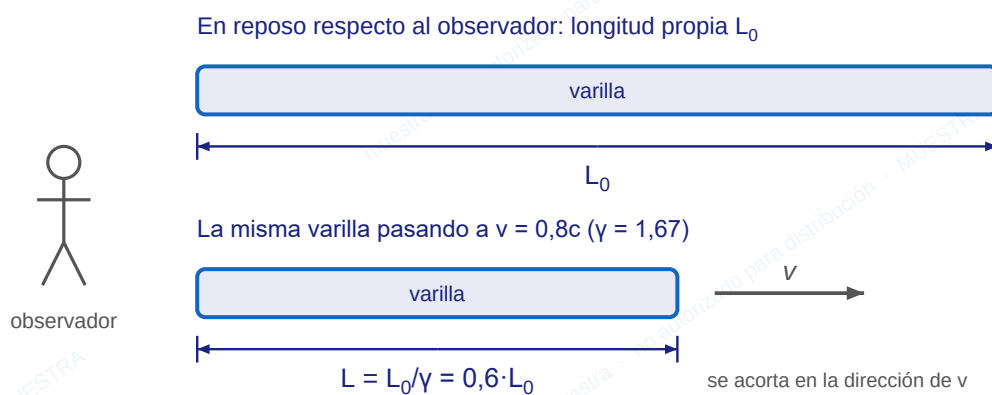
$$L = L_0 / \gamma \text{ (longitud contraída = longitud propia / } \gamma \text{)}$$

L_0 = longitud propia (en el sistema de reposo del objeto)

L = longitud contraída (medida por el observador que ve pasar el objeto)

Como $\gamma \geq 1$: $L \leq L_0$ (la longitud propia es siempre la MAYOR)

La contracción solo afecta a la dirección del movimiento.



El grosor no cambia: solo se contrae la dimensión paralela al movimiento

Figura 4 - Contracción de Lorentz. Una varilla en reposo tiene longitud L_0 . Cuando pasa a $v = 0,8c$ ($\gamma = 1,67$), el observador mide $L = L_0 / 1,67 = 0,6 \cdot L_0$. Solo se contrae en la dirección del movimiento.

Truco. Dilatación y contracción son complementarias: si $\gamma = 2$, el tiempo se duplica Y la longitud se reduce a la mitad. Para la PAU: siempre identifica primero quién mide el tiempo o la longitud propios.

4.1.6 · Masa relativista, dinámica relativista y equivalencia masa-energía

La mecánica de Newton también se modifica a altas velocidades. La **masa en reposo** m_0 es la que se mide con el cuerpo parado. Visto desde un sistema en el que el cuerpo se mueve, se comporta como si tuviera una masa mayor, la **masa relativista** $m = \gamma m_0$: cuanto más rápido va, más cuesta acelerarlo, y por eso ningún cuerpo con masa llega a c . La cantidad de movimiento y la energía tienen expresiones relativistas:

Masa relativista: $m = \gamma m_0$

Momento relativista: $p = m v = \gamma m_0 v$

Energía en reposo: $E_0 = m_0 c^2$

Energía total: $E = \gamma m_0 c^2 = m c^2$

Energía cinética relativista: $E_k = (\gamma - 1) m_0 c^2$

Relación E-p: $E^2 = (m_0 c^2)^2 + (pc)^2$

Equivalencia masa-energía: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

Masa en reposo y masa relativista. La masa en reposo m_0 es la misma para todos los observadores; la masa relativista depende de quién mide. Los libros universitarios actuales prefieren hablar solo de la masa en reposo y escribir $p = \gamma m_0 v$, pero los temarios de la PAU (Murcia, Madrid, Comunitat Valenciana, Castilla y León) nombran la masa relativista, así que hay que saber usarla.

La energía en reposo es enorme. 1 g de masa equivale a:

$$\Delta E = 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J (unos 21,5 kilotones de TNT).}$$

PAU - Atención. En la PAU la equivalencia masa-energía $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ aparece en problemas de física nuclear (fisiones, fusiones) donde el defecto de masa se convierte en energía. La equivalencia práctica es: 1 u (unidad de masa atómica) equivale a 931,5 MeV.

Unidades prácticas en física de altas energías. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$. Energía en reposo del electrón: $m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV}$. Energía en reposo del protón: $m_0 c^2 = 938,3 \text{ MeV}$.

Ejercicios - Sección 4.1

Doce ejercicios tipo PAU de relatividad especial. En rojo el método y la razón; en azul los cálculos numéricos paso a paso.

1. Una nave espacial viaja a $v = 0,8c$. La tripulación mide que tarda 6,0 minutos en recorrer cierto tramo. ¿Cuánto tiempo mide un observador en la Tierra?

La tripulación está en reposo respecto a la nave: mide el tiempo propio $\Delta t_0 = 6 \text{ min}$. El observador en tierra mide el tiempo dilatado $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$.

Calculamos γ : $1 - v^2/c^2 = 1 - (0,8)^2 = 1 - 0,64 = 0,36 \Rightarrow \gamma = 1/\sqrt{0,36} = 1/0,6 = 5/3 \approx 1,667$

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0 = 1,667 \cdot 6,0 = 10,0 \text{ min}$$

Resultado final: $\Delta t = 10,0 \text{ min}$ (el observador en tierra mide más tiempo)

2. Un muón se crea en la atmósfera a una altitud de 10 km y viaja hacia el suelo a $v = 0,998c$. Su vida propia es $\Delta t_0 = 2,2 \mu\text{s}$. ¿Cuánto dura según observadores en tierra? ¿Cuántos km recorre? ¿Llega al suelo?

La vida de $2,2 \mu\text{s}$ la mide un reloj que viaja con el muón: es el tiempo propio. Desde tierra el muón se mueve, así que se mide un tiempo dilatado $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$, y la distancia recorrida es $v \cdot \Delta t$.

$$\gamma = 1/\sqrt{1-0,998^2} = 1/\sqrt{1-0,996004} = 1/\sqrt{0,003996} = 1/0,06321 \approx 15,8$$

$$\Delta t = 15,8 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} = 34,8 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 34,8 \mu\text{s}$$

$$d = v \cdot \Delta t = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 34,8 \cdot 10^{-6} = 10\,400 \text{ m} \approx 10,4 \text{ km}$$

Como 10,4 km es más que los 10 km de altitud, el muón llega al suelo. Sin relatividad solo recorrería $0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} = 659 \text{ m}$ y se desintegraría muy arriba. Por eso detectar muones en el suelo es una prueba de la dilatación del tiempo.

Resultado final: $\Delta t = 34,8 \mu\text{s}$ | $d \approx 10,4 \text{ km}$: llega al suelo

3. Una varilla tiene longitud propia $L_0 = 2,0 \text{ m}$. Calcula su longitud medida por un observador cuando pasa a $v = 0,6c$.

El observador mide la longitud contraída $L = L_0/\gamma$. La varilla se contrae en la dirección del movimiento.

$$\gamma = 1/\sqrt{1-0,36} = 1/\sqrt{0,64} = 1/0,8 = 1,25$$

$$L = L_0 / \gamma = 2,0 / 1,25 = 1,6 \text{ m}$$

Resultado final: $L = 1,6 \text{ m}$ (reducida al 80% de su longitud propia)

4. ¿A qué velocidad mínima debe viajar una nave para que su longitud, medida desde tierra, se reduzca al 60% de su longitud propia?

$L/L_0 = 1/\gamma = 0,60$. Despejamos γ y luego v .

$$\gamma = L_0/L = 1/0,60 = 5/3$$

$$\gamma^2 = 1/(1-v^2/c^2) = 25/9 \Rightarrow 1 - v^2/c^2 = 9/25$$

$$v^2/c^2 = 1 - 9/25 = 16/25 \Rightarrow v = 4c/5 = 0,8c$$

Resultado final: $v = 0,8c \approx 2,4 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

5. Calcula la energía en reposo de un electrón ($m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$). Expresa el resultado en julios y en MeV.

Aplicamos $E_0 = m_0 c^2$. Para convertir a MeV usamos $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, por tanto $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

$$E_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}$$

$$E_0 = 82,0 \cdot 10^{-15} \text{ J} = 8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$\text{En MeV: } 8,20 \cdot 10^{-14} / 1,6 \cdot 10^{-13} = 0,512 \text{ MeV}$$

Con los valores exactos ($c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ y $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) sale 0,511 MeV, el valor de las tablas. La diferencia es solo del redondeo de las constantes.

$$\text{Resultado final: } E_0 = 8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0,512 \text{ MeV}$$

6. Un electrón ($m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV}$) viaja a $v = 0,9c$. Calcula su factor de Lorentz y su energía cinética relativista.

La energía cinética relativista es $E_k = (\gamma - 1) \cdot m_0 c^2$. A $v = 0,9c$ el efecto relativista es notable y E_k clásica ya no es válida.

$$\gamma = 1/\sqrt{1-0,81} = 1/\sqrt{0,19} = 1/0,4359 \approx 2,294$$

$$E_k = (\gamma - 1) \cdot m_0 c^2 = (2,294 - 1) \cdot 0,511 \text{ MeV}$$

$$E_k = 1,294 \cdot 0,511 = 0,661 \text{ MeV} = 1,06 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Con la fórmula clásica $E_k = (1/2)m_0 v^2$ se obtendría solo 0,207 MeV: incorrecto a esta velocidad.

$$\text{Resultado final: } \gamma = 2,294 \mid E_k = 0,661 \text{ MeV}$$

7. La energía total de una partícula es $E = 5 \cdot m_0 c^2$. ¿Cuánto vale su velocidad?

$E = \gamma \cdot m_0 c^2 = 5 \cdot m_0 c^2 \Rightarrow \gamma = 5$. Despejamos v de la definición de γ .

$$\gamma = 5 \Rightarrow 1 - v^2/c^2 = 1/\gamma^2 = 1/25$$

$$v^2/c^2 = 1 - 1/25 = 24/25$$

$$v = c \cdot \sqrt{24/25} = c \cdot \sqrt{0,96} \approx 0,980c$$

$$\text{Resultado final: } v \approx 0,980c$$

8. Una nave viaja a $0,5c$. Desde la Tierra se mide que el viaje dura 10 años. ¿Cuánto envejece el astronauta durante el viaje?

Los 10 años los mide el observador en Tierra: ese es el tiempo dilatado Δt . El astronauta (en reposo respecto a la nave) mide el tiempo propio $\Delta t_0 = \Delta t/\gamma$.

$$\gamma = 1/\sqrt{1-0,25} = 1/\sqrt{0,75} = 1/0,866 \approx 1,155$$

$$\Delta t_0 = \Delta t / \gamma = 10 / 1,155 \approx 8,66 \text{ años}$$

Resultado final: El astronauta envejece 8,66 años (1,34 años menos que en la Tierra)

9. Un electrón y un positrón se aniquilan: $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$. Cada partícula tiene $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg y están casi en reposo. Calcula la energía de cada fotón emitido.

Por conservación de la energía, la energía total del par (solo energía en reposo, ya que están casi en reposo) se reparte entre los dos fotones. Como el par está en reposo, su momento total es cero, así que los fotones salen en sentidos opuestos con la misma energía.

Energía total del par = $2 \cdot m_0 c^2$, y cada fotón se lleva la mitad:

$$E_{\text{fotón}} = m_0 c^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$\text{En MeV: } 8,20 \cdot 10^{-14} / 1,6 \cdot 10^{-13} = 0,512 \text{ MeV (rayos gamma)}$$

Resultado final: $E(\text{fotón}) = 8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0,512 \text{ MeV}$

10. En una reacción nuclear se consumen $\Delta m = 5,0 \cdot 10^{-3}$ kg de masa. ¿Cuánta energía se libera?

Aplicamos directamente la equivalencia masa-energía. Esta fórmula explica la enorme energía liberada en fisiones y fusiones nucleares.

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2$$

$$\Delta E = 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 4,5 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

Equivale a unos 108 kt de TNT, o a 125 GWh: lo que consume de electricidad toda España en unas 4 horas (en 2024 la demanda fue de unos 249 000 GWh al año).

Resultado final: $\Delta E = 4,5 \cdot 10^{14} \text{ J} = 450 \text{ TJ}$

11. ¿Qué pretendían Michelson y Morley con su experimento de 1887, qué resultado obtuvieron y qué consecuencia tuvo para la física?

Es una cuestión teórica. Se contesta en tres partes: el objetivo, el resultado y la interpretación, enlazando con el segundo postulado de Einstein.

Objetivo. Medir la velocidad de la Tierra respecto al éter, el medio que se suponía que transportaba la luz. Si existiera, la luz debería ir a distinta velocidad en un brazo del interferómetro paralelo al movimiento de la Tierra y en otro perpendicular.

Resultado. Al girar el interferómetro no se desplazaron las franjas de interferencia (se esperaban unas 0,4 franjas y se midió como máximo 0,02). El resultado fue nulo.

Consecuencia. No hay movimiento detectable respecto al éter: la luz va a la misma velocidad en todas las direcciones. La transformación de Galileo ($u' = u - v$) no vale para la luz. Einstein lo convirtió en su segundo postulado: c es la misma para todos los observadores inerciales, y el éter deja de ser necesario.

Resultado final: Buscaban el éter; resultado nulo; c no depende del observador (2.º postulado)

12. Un protón ($m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg) se mueve a $v = 0,6c$. Calcula su masa relativista, su cantidad de movimiento y su energía total.

Con $v = 0,6c$, $\gamma = 1,25$. La masa relativista es $m = \gamma m_0$; el momento, $p = mv$; la energía total, $E = mc^2$. Al final se comprueba con la relación entre energía y momento.

$$\gamma = 1/\sqrt{1-0,36} = 1/0,8 = 1,25$$

$$m = \gamma m_0 = 1,25 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} = 2,09 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$p = m v = 2,0875 \cdot 10^{-27} \cdot 0,6 \cdot 3 \cdot 10^8 = 3,76 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$E = m c^2 = 2,0875 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 1,88 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

Comprobación: $m_0 c^2 = 1,503 \cdot 10^{-10} \text{ J}$ y $pc = 1,127 \cdot 10^{-10} \text{ J}$, así que $\sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2} = 1,88 \cdot 10^{-10} \text{ J}$. Coincide.

Resultado final: $m = 2,09 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ | $p = 3,76 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ | $E = 1,88 \cdot 10^{-10} \text{ J}$