Relatividad especial

Test de 10 preguntas y flashcards de este tema en farmeandopau.com ›

Última revisión: 1 de noviembre de 2026.

Escanea y haz el test del tema

LA IDEA EN 30 SEGUNDOS

La relatividad especial sale de dos **postulados de Einstein** (1905): las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas inerciales y la **luz va a c para cualquier observador**. De ahí salen la **dilatación del tiempo** ($\Delta t = \gamma\,\Delta\tau$), la **contracción de la longitud** ($L = L_0/\gamma$) y la **energía relativista** ($E = \gamma m_0 c^2 = E_0 + E_c$). Es un tema corto y que cae poco: **12 de las 68 convocatorias** de 2025 y 2026, en 7 comunidades. Lo que más sale es calcular la masa, la energía total y la cinética de una partícula rápida (9 de esas 12).

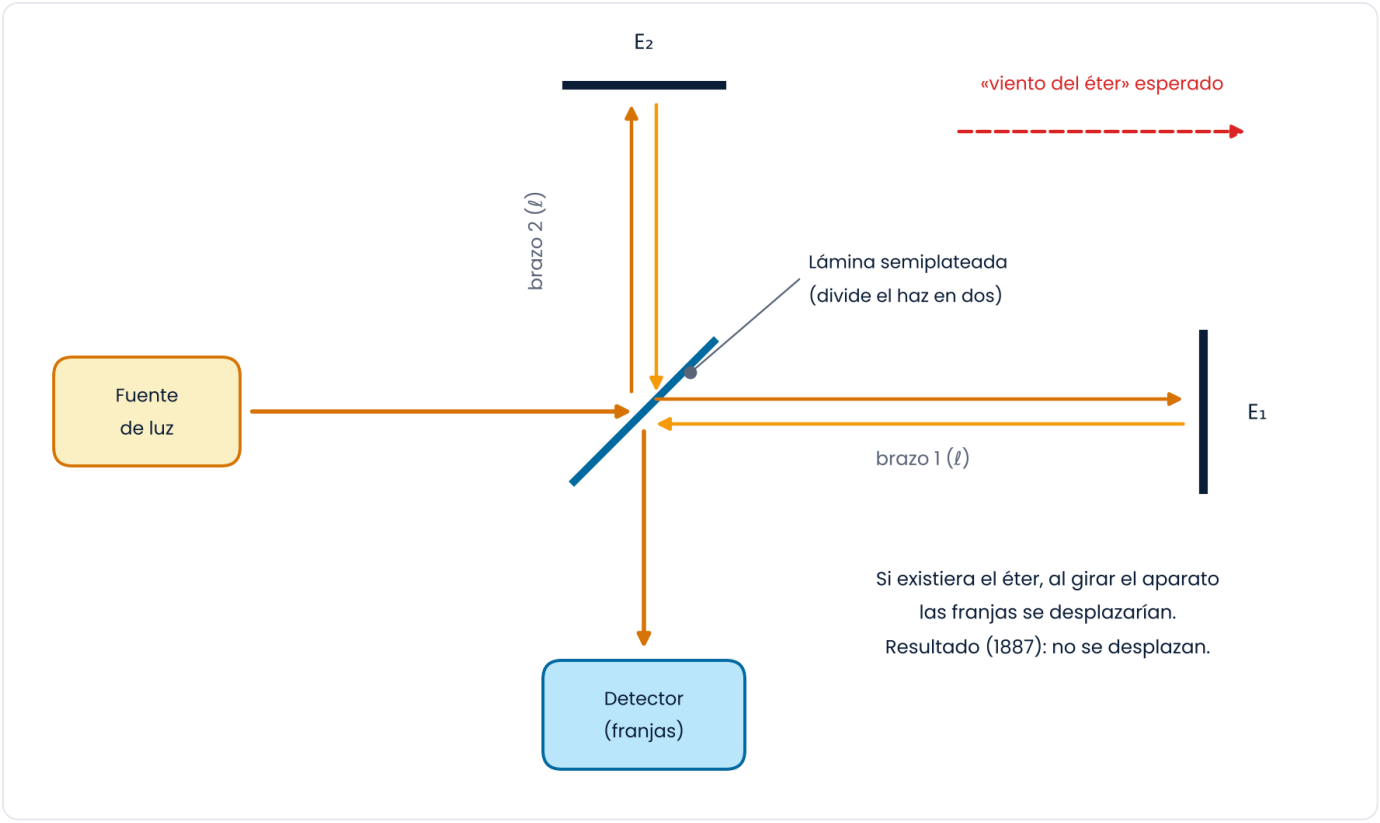
1 Antes de Einstein: Galileo, el éter y Michelson-Morley

Un **sistema de referencia inercial** es el que no está acelerado: en él se cumple el principio de inercia. Desde Galileo se sabe que las leyes de la mecánica son las mismas en todos ellos: dentro de un barco que navega en línea recta y sin balanceo, una pelota cae igual que en tierra. El problema llegó con la luz.

- **Transformaciones de Galileo** (el sistema S' se mueve con velocidad v a lo largo del eje x de S): $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$. El tiempo es **absoluto** (igual para todos) y las velocidades se suman: si algo va a u en S, en S' va a $u' = u - v$.
- Maxwell (1865) dedujo que la luz es una onda electromagnética que se propaga a $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \approx 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s (lo ves en el Tema 15). Pero ¿a c respecto a qué? Con la suma de Galileo, c solo podría valer eso en un sistema privilegiado: el **éter**, el medio en reposo absoluto por el que se suponía que viajaba la luz.
- Si la Tierra se mueve por el éter (unos 30 km/s alrededor del Sol), la luz debería ir algo más rápido o más lento según la dirección. **Michelson y Morley (1887)** lo midieron con un **interferómetro**: dividían un haz en dos brazos perpendiculares y miraban las franjas de interferencia al girar el aparato.
- El **resultado fue nulo**: las franjas no se desplazaban. La velocidad de la luz era la misma en todas las direcciones. Es el gran ejemplo de la **insuficiencia de la física clásica**.
- Lorentz y FitzGerald propusieron que los cuerpos se acortan en la dirección del movimiento justo lo necesario para esconder el efecto: una hipótesis hecha a medida. Einstein, en 1905, cortó por lo sano: **no hay éter ni sistema privilegiado**.

Michelson-Morley con nombre propio en varias comunidades

Lo citan expresamente el Documento de orientación 2026-27 de la **Comunitat Valenciana** («Conoce la importancia del experimento de Michelson-Morley y análisis de las consecuencias que se derivaron sobre el papel que jugó el éter en el desarrollo de la Teoría Especial de la Relatividad»), las Especificaciones 2027 de **Murcia** («Comprender el resultado del experimento de Michelson-Morley»), el Decreto 64/2022 de **Madrid** («Experimento de Michelson-Morley»), el Decret 43/2025 de **Baleares** («Experiment de Michelson i Morley») y la orientación Crue que publica **Castilla-La Mancha**. Las **orientaciones 2026-27 de Andalucía** solo nombran, de este tema, la «Insuficiencia de la Física Clásica» y la equivalencia masa-energía.



Interferómetro de Michelson y Morley. La lámina semiplateada divide la luz en dos haces que van y vuelven por brazos perpendiculares de la misma longitud. Si existiera el «viento del éter», un brazo tardaría más que el otro y, al girar el aparato, las franjas se moverían. No se movieron.

2 Los dos postulados de Einstein (1905)

En junio de 1905 Einstein envió a la revista *Annalen der Physik* el artículo «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Toda la relatividad especial sale de **dos postulados**:

- **1.º Principio de relatividad**: las leyes de la física —no solo las de la mecánica, también las del electromagnetismo— son **las mismas en todos los sistemas inerciales**. Ningún experimento hecho dentro de un sistema inercial permite saber si está en reposo o se mueve con velocidad constante.
- **2.º Invariancia de la velocidad de la luz**: la luz en el vacío se propaga a la **misma velocidad c en todos los sistemas inerciales**, sea cual sea el movimiento de la fuente o del observador.
- Consecuencia: el **tiempo deja de ser absoluto**. La simultaneidad, la duración de un proceso y la longitud de un objeto dependen del observador.
- Consecuencia: c **es una velocidad límite**. Ningún cuerpo con masa puede alcanzarla (haría falta una energía infinita) y ninguna señal la supera.
- Desde 1983 el metro se define a partir de c, que vale **exactamente 299 792 458 m/s** (Sistema Internacional, recogido en España por el Real Decreto 2032/2009). En los problemas, $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s o el valor que dé el enunciado.

CUESTIÓN DE GALICIA (INVARIANCIA DE C)

PAU Galicia 2025 (ordinaria), cuestión 4.1 (obligatoria; 1 punto). Indique y justifique la respuesta correcta. Un astronauta que viaja a una velocidad de 0,9c mide la velocidad de un rayo de luz emitido desde su nave. El resultado que obtiene es: a) 0,1c; b) c; c) 1,9c. Nota: c es la velocidad de la luz.

Respuesta modelo

b) c. Por el **segundo postulado de Einstein**, la velocidad de la luz en el vacío es la misma, c, en todos los sistemas de referencia inerciales, sea cual sea la velocidad de la fuente y la del observador. El astronauta está en reposo respecto a su nave (un sistema inercial) y mide c, igual que un observador en la Tierra. La a) resta velocidades y la c) las suma a lo Galileo: eso no vale para la luz. Además, por el primer postulado, ningún experimento dentro de la nave le diría que se mueve a 0,9c.

Por qué puntúa. Es la respuesta de la solución oficial (en gallego: «A velocidade da luz é unha invariante»). La misma idea cayó en Navarra 2025 (extraordinaria, 4.B d): la luz de un láser enviado desde la Tierra a una nave a 0,9c se mide a c desde la nave.

Cómo se justifica para que puntúe

Nombra el postulado («segundo postulado de Einstein: la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas inerciales») y aplícalo a la situación. En Galicia la cuestión vale 0 sin justificación, y en Navarra una ley mal identificada puede dejar la pregunta a 0.

3 Simultaneidad y transformaciones de Lorentz

Si la luz va a c para todos, dos sucesos que son simultáneos para un observador no lo son para otro que se mueve respecto a él.

- **El tren de Einstein**: una lámpara en el centro de un vagón que avanza a v emite un destello. Para el viajero la luz llega **a la vez** a las dos puertas: están a la misma distancia y la luz va a c en los dos sentidos. Para quien está en el andén, la puerta trasera va al encuentro de la luz y la delantera se aleja: la luz **llega antes a la trasera**. Los dos tienen razón: **la simultaneidad es relativa**.
- Solo es absoluta la simultaneidad de dos sucesos que ocurren **en el mismo lugar**.
- **Transformaciones de Lorentz** (el sistema S' se mueve a v a lo largo del eje x): $x' = \gamma\,(x - vt)$, $t' = \gamma\left(t - \dfrac{vx}{c^2}\right)$, $y' = y$, $z' = z$, con $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$. Si $v \ll c$, $\gamma \approx 1$ y $vx/c^2 \approx 0$: vuelven las de Galileo.
- De la segunda sale la simultaneidad relativa: dos sucesos con $\Delta t = 0$ pero separados Δx cumplen $\Delta t' = -\gamma\, v\, \Delta x/c^2 \neq 0$.
- **Suma relativista de velocidades**: $u' = \dfrac{u - v}{1 - uv/c^2}$. Si $u = c$, sale $u' = \dfrac{c - v}{1 - v/c} = c$: es el segundo postulado. Si u, $v \ll c$, queda $u' = u - v$ (Galileo).

Lorentz: mira lo que dice tu comunidad

Canarias (matriz de especificaciones PAU 2027): «Principios fundamentales de la Relatividad Especial: Transformaciones de Galileo y Lorentz». **La Rioja** (matriz de la guía 2025-26): «Reconoce las transformaciones de Lorentz», y su currículo (Decreto 43/2022) añade la «simultaneidad de sucesos». En cambio, **Cataluña** (Orientacions 2026-27): «No es demanarà: […] Les transformacions de Lorentz» (no se pedirán), y **Extremadura** (aspectos curriculares del bloque D de 2025-26, acuerdos de 12-03-2026; pendiente de confirmar para 2027): «No se incluye: transformaciones de Galileo, transformaciones de Lorentz». En las demás no hay ni mención expresa ni exclusión.

4 El factor γ y cuándo hay que usar la relatividad

Todas las fórmulas del tema llevan el **factor de Lorentz**: $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, con $\beta = v/c$.

Siempre es $\gamma \geq 1$, y vale 1 solo si $v = 0$.

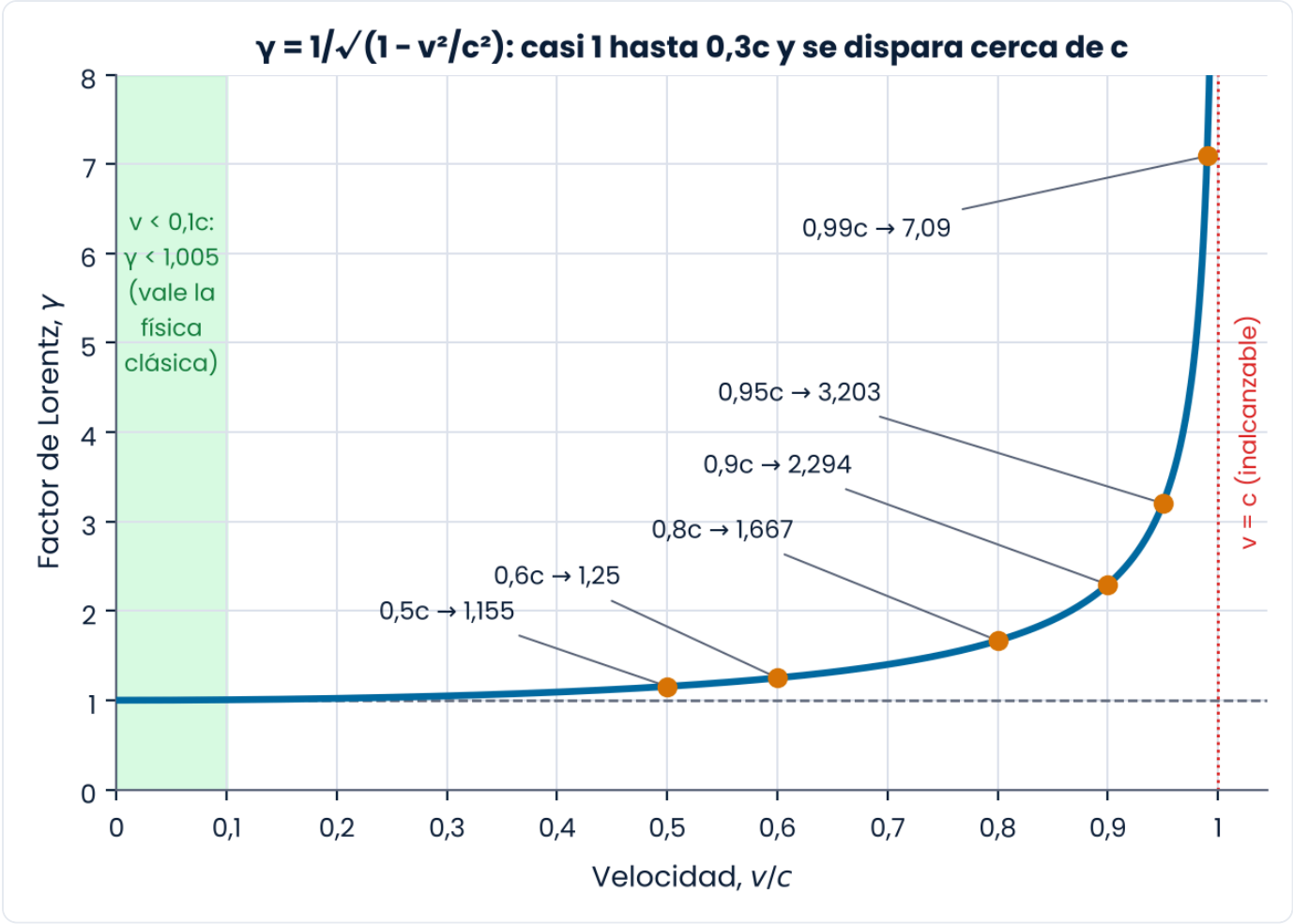
- **Despejar v a partir de γ**: $\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$. Es el paso que más se repite (Asturias 2025: energía total triple que la de reposo → $\gamma = 3$ → $v = 0{,}943c$).
- **Manda el enunciado.** Cataluña 2026 (ordinaria, ejercicio 2, tubo de rayos X de 70,0 kV) añade: «Desprecie los efectos del campo magnético terrestre y los efectos relativistas», y su solución oficial da $1{,}57 \cdot 10^8$ m/s, unos 0,52c, con la fórmula clásica. Con relatividad saldría $1{,}43 \cdot 10^8$ m/s. Si te dicen que no uses la relatividad, no la uses.
- Asturias (ficha 2025-26, indicador 66) pide, en la longitud de onda de De Broglie (Tema 18), «considerar correcciones relativistas para velocidades superiores a 10^7 m s^{-1}»; aun así, el enunciado de 2026 extraordinaria decía «No es necesario aplicar correcciones relativistas». En Murcia (junio de 2025, un protón a 0,79c) la resolución que publica el coordinador de Física de la PAU de la Universidad de Murcia dice que «en la corrección de la PAU se dio por buena ambas versiones», la clásica y la relativista.

v	γ	Qué significa
0,1c	1,005	Un 0,5 % de diferencia: vale la física clásica
0,3c	1,048	Ya pasa del 4 %
0,5c	1,155	Un 15 %: hay que usar la relatividad
0,6c	1,25 (= 5/4)	Número redondo: sale mucho en los exámenes
0,8c	1,667 (= 5/3)	Otro número redondo
0,866c	2,000	$v = \frac{\sqrt{3}}{2}c$: el tiempo se dilata al doble
0,9c	2,294	
0,95c	3,203	
0,99c	7,09	Cerca de c, γ se dispara

Valores calculados con $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$.

Trabaja con β

Si la velocidad viene como fracción de c (0,6c, 0,95c), no la pases a m/s: calcula γ con β y los números salen limpios (0,6c → 5/4; 0,8c → 5/3). Si la distancia está en años-luz y la velocidad en fracción de c, el tiempo sale directamente en años.



El factor de Lorentz. Hasta 0,1c es prácticamente 1 (zona verde): ahí la física clásica basta. A partir de 0,5c crece deprisa y tiende a infinito cuando $v \to c$.

5 Dilatación del tiempo y tiempo propio

Un reloj que se mueve respecto a ti marcha más despacio que los tuyos. Se ve con un **reloj de luz**: un destello que va y viene entre dos espejos separados una distancia L.

- En el sistema del reloj, la luz recorre $2L$: $\Delta\tau = 2L/c$. Desde la Tierra, $(c\,\Delta t/2)^2 = L^2 + (v\,\Delta t/2)^2$, y despejando: $\Delta t = \dfrac{2L/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma\,\Delta\tau$.
- **Tiempo propio** ($\Delta\tau$, también Δt_0): el que mide un reloj que está **presente en los dos sucesos** (están en el mismo lugar de su sistema). Es **siempre el menor**. Cualquier otro observador mide $\Delta t = \gamma\,\Delta\tau > \Delta\tau$, y para ello necesita dos relojes sincronizados en lugares distintos.
- Cómo encontrarlo: pregúntate «¿qué reloj está en la salida y en la llegada?». En un viaje de la Tierra a una estrella, el de la nave. En la vida de una partícula, el de su propio sistema (el enunciado dice «vida media propia» o «medida en su propio sistema de referencia»).
- El efecto es **recíproco**: para la nave, los relojes lentos son los de la Tierra. No hay contradicción, porque cada uno compara su único reloj con dos relojes distintos del otro sistema. (En la «paradoja de los gemelos» el que viaja cambia de sistema inercial al dar la vuelta: por eso es él quien vuelve más joven.)
- **Prueba experimental: los muones.** Los rayos cósmicos producen muones a unos 10–15 km de altura; su vida media en reposo es $\tau = 2{,}197$ µs. A $0{,}998c$, sin relatividad recorrerían en una vida media $0{,}998 \cdot 3{,}00 \cdot 10^8 \cdot 2{,}197 \cdot 10^{-6} \approx 658$ m y casi ninguno llegaría al suelo. Con $\gamma = 15{,}8$, su vida media vista desde la Tierra es de 34,8 µs y recorren unos **10,4 km**: llegan muchos, como midieron Rossi

y Hall (1941) y Frisch y Smith (1963). Con relojes atómicos en aviones lo comprobaron Hafele y Keating (1971).

VIAJE A LA ESTRELLA DE BARNARD

PAU Comunitat Valenciana 2025 (ordinaria), Pregunta 6, opción B (cuestión, a elegir entre A y B; 1,5 puntos). Una nave espacial viaja con velocidad v = 2,1 · 10⁸ m/s desde la Tierra hasta la estrella de Barnard, situada a una distancia d = 5,98 años luz. Se mide la duración del viaje en la Tierra y en la nave, ¿en cuál de estos dos sistemas de referencia inerciales se mide el tiempo propio? ¿Qué duración tiene el viaje en cada uno de estos dos sistemas? Razona las respuestas. Dato: velocidad de la luz en el vacío, c = 3 · 10⁸ m/s

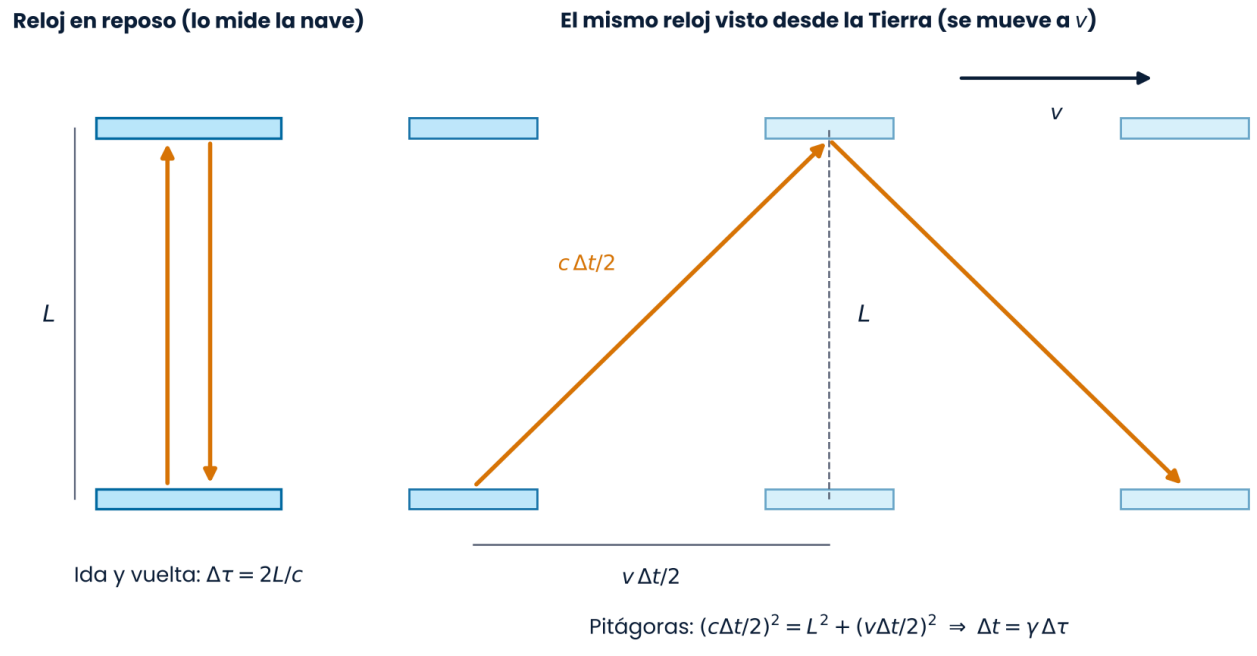
Respuesta modelo

El tiempo propio se mide en la nave: la salida de la Tierra y la llegada a Barnard ocurren en el mismo punto de la nave y un solo reloj (el suyo) está en los dos sucesos; en el sistema Tierra hacen falta dos relojes, uno en la Tierra y otro en la estrella. **Sistema Tierra**: la distancia de 5,98 años-luz es la propia (Tierra y estrella están en reposo); $\beta = 2{,}1 \cdot 10^8 / 3 \cdot 10^8 = 0{,}70$ y $\Delta t = d/v = 5{,}98/0{,}70 = 8{,}54$ años. **Sistema nave**: $\gamma = 1/\sqrt{1 - 0{,}70^2} = 1{,}400$ y $\Delta\tau = \Delta t/\gamma = 8{,}54/1{,}400 = 6{,}10$ años.

Por qué puntúa. Criterios oficiales: «0,5 razonar en qué sistema inercial se mide el tiempo propio, 0,5 calcular la duración del viaje según el sistema de la Tierra y 0,5 calcular la duración del viaje según el sistema de la nave». El razonamiento vale lo mismo que cada cálculo.

Cataluña: dilatación y contracción, cualitativas

El documento catalán de la PAU 2025 («Nou curriculum de la matèria de Fisica PAU 2025», 25-10-2024), que sigue enlazado, dice «Cal conèixer de forma qualitativa el fenomen de la dilatació temporal, el de la contracció de la longitud» (hay que conocerlos de forma cualitativa); las Orientacions 2026-27 no lo repiten ni lo desmienten (documento PAU 2025; pendiente de confirmar para 2027). En el resto de comunidades no hay límite: los problemas numéricos de dilatación han caído en la Comunitat Valenciana (2025 y 2026) y en Murcia (2025 y 2026).



Reloj de luz. En el sistema del reloj la luz sube y baja en vertical: $\Delta\tau = 2L/c$. Desde la Tierra el reloj avanza y la luz recorre una diagonal más larga; como va a c (segundo postulado), tarda más: $\Delta t = \gamma\,\Delta\tau$.

6 Contracción de la longitud y longitud propia

Un objeto que se mueve respecto a ti mide menos, **solo en la dirección del movimiento**.

- **Longitud propia** (L_0): la medida en el sistema en que el objeto —o los dos extremos, como la Tierra y una estrella— está **en reposo**. Es **la mayor**.
- Un observador respecto al que el objeto se mueve a v mide $L = \dfrac{L_0}{\gamma} = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2} < L_0$.
- Las dimensiones perpendiculares al movimiento **no cambian**: una nave en movimiento es más corta, no más estrecha.
- Dilatación y contracción son dos caras de lo mismo (figura). Desde la Tierra, la nave tarda $\Delta t = L_0/v$ (distancia propia, tiempo dilatado); desde la nave, la distancia está contraída y tarda $\Delta\tau = L/v = L_0/(\gamma v)$. Las dos cuentas cuadran.
- Los muones otra vez: en su sistema viven solo 2,197 μs, pero para ellos la atmósfera se mueve y 10 km se contraen a $10/15{,}8 \approx 0{,}63$ km, que sí recorren en ese tiempo.
- A velocidades cotidianas no se nota: un coche a 30 m/s se acorta una fracción $\approx v^2/2c^2 = 5 \cdot 10^{-15}$.

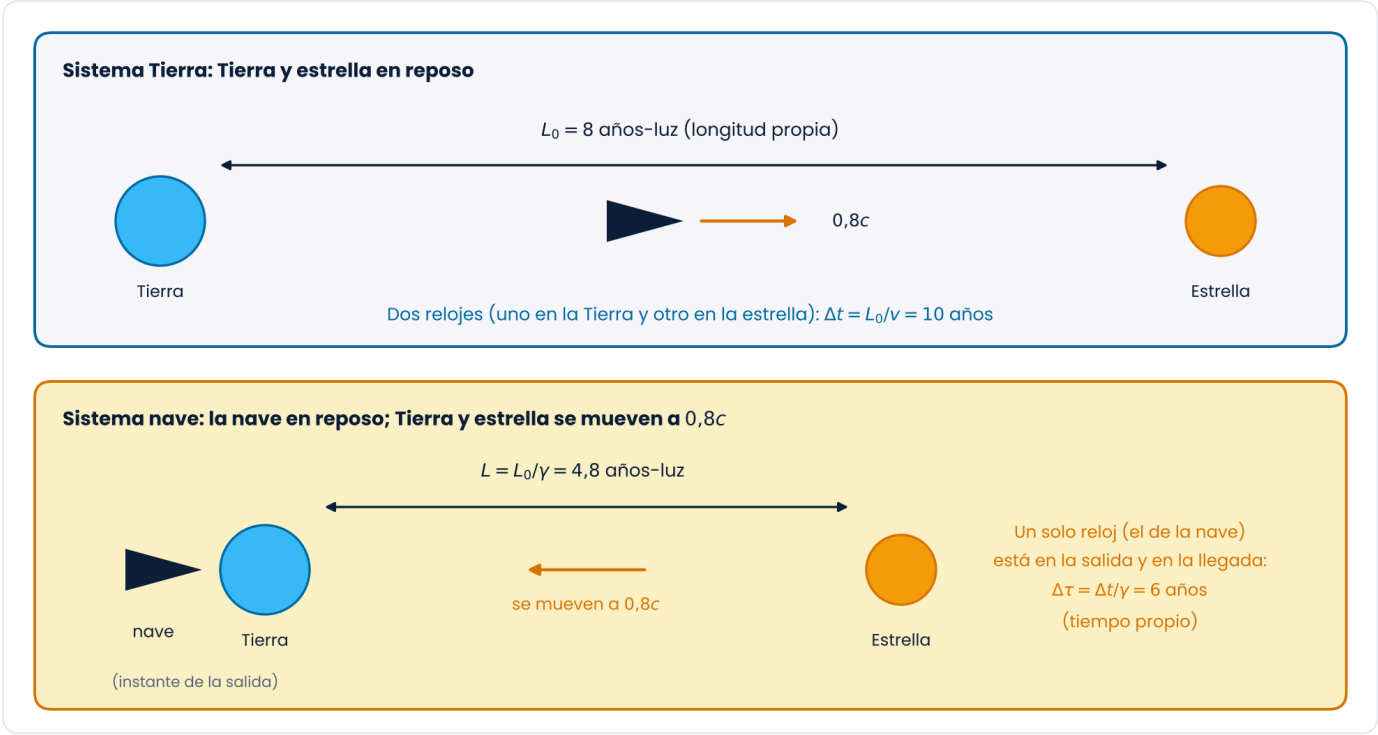
UN MÓDULO ESPACIAL MÁS CORTO

PAU Comunitat Valenciana 2025 (extraordinaria), Pregunta 6, opción B (cuestión, a elegir entre A y B; 1,5 puntos). El hipotético módulo espacial de la figura tiene una masa en reposo $M_0 = 10^4$ kg y una longitud propia $L_0 = 11{,}0$ m. Se mueve en una dirección a lo largo de su longitud con una velocidad v relativa a la base de control situada en la Tierra. Respecto a dicha base, se mide la longitud del módulo espacial y su resultado es L = 10,0 m. ¿Cuál es la velocidad v con la que se mueve el módulo espacial respecto a la base de control? ¿Y su energía total relativista? Dato: velocidad de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s [Figura: foto de un módulo espacial con su longitud, 11 m, y una flecha v en la dirección de su eje].

Respuesta modelo

La base ve moverse el módulo: mide la longitud contraída, $L = L_0/\gamma$, así que $\gamma = L_0/L = 11{,}0/10{,}0 = 1{,}10$. Despejando: $\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} = \sqrt{1 - 1/1{,}21} = 0{,}417$ y $v = 0{,}417 \cdot 3 \cdot 10^8 = 1{,}25 \cdot 10^8$ m/s. Energía total: $E = \gamma M_0 c^2 = 1{,}10 \cdot 10^4 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9{,}9 \cdot 10^{20}$ J.

Por qué puntúa. Criterios oficiales: «0,3 puntos la relación entre las longitudes en los dos sistemas de referencia, 0,5 el cálculo razonado de la velocidad y 0,7 el cálculo razonado de la energía total relativista». Fíjate en que una contracción del 9 % ya exige 0,42c.



Quién mide lo propio. Viaje a 0,8c ($\gamma = 5/3$) a una estrella a 8 años-luz. La Tierra mide la longitud propia (8 años-luz) y un tiempo dilatado (10 años, con dos relojes). La nave mide el tiempo propio (6 años, con un solo reloj) y la distancia contraída (4,8 años-luz).

7 Masa, momento y energía relativistas

Con la mecánica de Newton, una fuerza constante acabaría llevando cualquier cuerpo por encima de c. La relatividad lo impide: cuanto más deprisa va un cuerpo, más cuesta acelerarlo.

- **Masa en reposo** m_0: la de las tablas. **Masa relativista**: $m = \gamma\, m_0$. Es la que piden los exámenes con ese nombre (Madrid, Navarra, Canarias; Cataluña: «La dependència de la massa en funció de la velocitat»). En la física actual se prefiere hablar solo de m_0 (masa invariante) y poner γ en el momento y en la energía; en la PAU usa la notación del enunciado.
- **Momento lineal**: $p = \gamma\, m_0\, v = m\, v$.
- **Energía total**: $E = \gamma\, m_0 c^2 = mc^2$. **Energía en reposo**: $E_0 = m_0 c^2$. **Energía cinética**: $E_c = E - E_0 = (\gamma - 1)\, m_0 c^2$.
- **Relación energía-momento**: $E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$. Sirve cuando te dan la energía y te piden el momento (o la longitud de onda de De Broglie, Tema 18).
- Límite clásico: si $v \ll c$, $\gamma - 1 \approx \frac{1}{2}\beta^2$ y $E_c \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$. **Nunca** combines $\frac{1}{2}mv^2$ con la masa relativista: es un error de concepto.
- Unidades de partículas: $1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J, $1\ \text{MeV} = 1{,}602 \cdot 10^{-13}$ J; las masas se dan en MeV/c². Electrón: $m_e c^2 = 0{,}511$ MeV; protón: $m_p c^2 = 938{,}3$ MeV (CODATA 2018).

Escribe qué te dan: v, E, E_c, p o un cociente (E/E_0, m/m_0).

↓

Si te dan v: calcula γ y de ahí $m = \gamma m_0$, $p = \gamma m_0 v$, $E = \gamma m_0 c^2$ y $E_c = (\gamma - 1) m_0 c^2$.

↓

Si te dan E_c: $E = E_0 + E_c$, $\gamma = E/E_0$ y $v = c\sqrt{1 - 1/\gamma^2}$.

↓

Si te dan E/E_0 o m/m_0: eso **es** γ.

↓

Pasa eV ↔ J solo cuando haga falta y comprueba que $v < c$ y $\gamma \geq 1$.

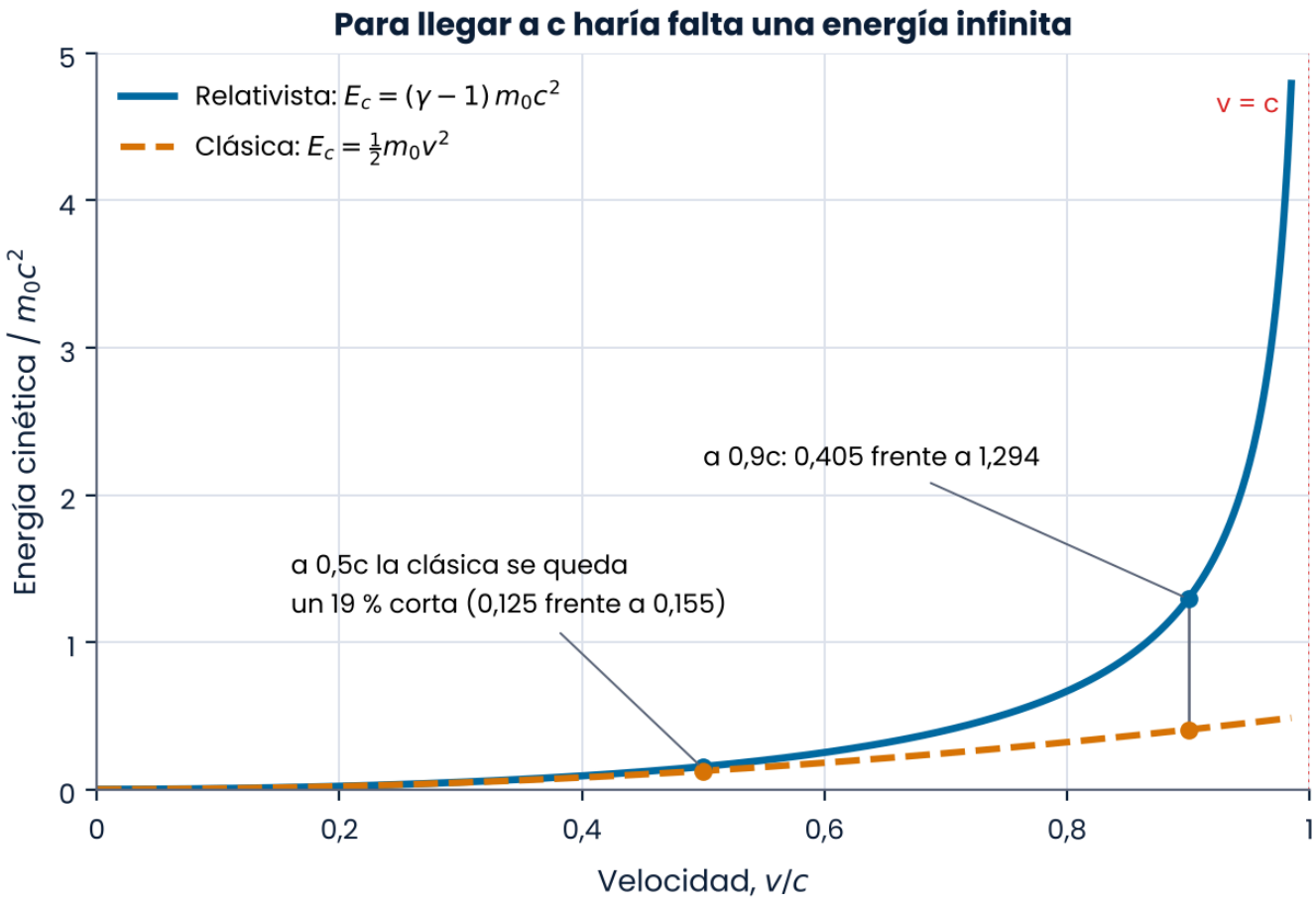
ELECTRÓN A $0{,}75c$ (CANARIAS)

PAU Canarias 2025 (extraordinaria), Bloque IV, opción B, cuestión 10 (1 punto). En un experimento realizado en un acelerador de partículas se ha originado un electrón de velocidad 0,75c, siendo c la velocidad de la luz. Calcule la masa y la energía cinética relativistas del electrón. Datos: m_e = 9,11·10⁻³¹ kg; c = 3·10⁸ m/s.

Respuesta modelo

$\gamma = 1/\sqrt{1-0{,}75^2} = 1/\sqrt{0{,}4375} = 1{,}512$. Masa relativista: $m = \gamma m_0 = 1{,}512 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31} = 1{,}38 \cdot 10^{-30}$ kg. Energía cinética: $E_c = (\gamma - 1)m_0c^2 = 0{,}512 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 4{,}20 \cdot 10^{-14}$ J (unos 0,262 MeV).

Por qué puntúa. Con $\frac{1}{2}m_0v^2$ saldría $2{,}31 \cdot 10^{-14}$ J, un 45 % menos. En Canarias se resta por unidades y por redondeo; en 2027 se piden **tres cifras significativas** (-0,05 por error, máximo -0,1 por bloque).



Energía cinética relativista frente a clásica. Coinciden a velocidades pequeñas; a 0,5c la clásica ya se queda un 19 % corta y a 0,9c da menos de un tercio. La relativista tiende a infinito cuando $v \to c$: por eso nada con masa alcanza la velocidad de la luz.

8 E = mc²: la masa es una forma de energía

En septiembre de 1905 Einstein envió a la misma revista una nota de tres páginas: «¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?». Respuesta: sí. Si un sistema pierde una energía ΔE, su masa disminuye $\Delta m = \Delta E/c^2$.

- $c^2 \approx 9 \cdot 10^{16}$ J/kg: **1 g de masa equivale a $9 \cdot 10^{13}$ J**, la energía de unas 21 kilotoneladas de TNT.

- En las **reacciones nucleares** (Tema 19) la masa de los productos es menor que la de los reactivos y ese **defecto de masa** se libera como energía. En el Sol, al pasar de cuatro núcleos de hidrógeno a uno de helio se convierte en energía un **0,7 %** de la masa (con las masas atómicas de la AME2020: 1,007 825 u para el ^{1}H y 4,002 603 u para el ^{4}He).
- En química también cambia la masa, pero no se nota: al quemar 80 g de metano y oxígeno ($\Delta H = -890$ kJ/mol) se pierden unos 10^{-11} kg, una parte en diez mil millones.
- **Creación de pares**: un fotón con energía mayor que $2m_e c^2 = 1{,}022$ MeV puede convertirse, cerca de un núcleo, en un electrón y un positrón. Al revés, la **aniquilación** de un electrón con un positrón da dos fotones de 0,511 MeV: son los que detecta la **PET** (Tema 19). Asturias lo pide en su indicador 63: «Aplicar el principio de conservación masa y energía relativista en procesos de pares de partículas».

CUÁNTA MASA PIERDE EL SOL

PAU Castilla-La Mancha 2027 (modelo), Pregunta 4B (a elegir entre 4A y 4B; 2 puntos). El Sol emite energía de forma continua debido a reacciones nucleares en su interior, transformando parte de su masa en energía según la ecuación de Albert Einstein. Esta energía es fundamental para la vida en la Tierra. Se sabe que el Sol emite aproximadamente 3.6·10²⁶ J cada segundo. Se pide: a) (1.5 puntos) Calcular el tiempo que tardaría el Sol en reducir su masa a la mitad, suponiendo que la potencia radiada se mantiene constante. b) (0.5 puntos) Comparar el resultado con la edad del universo (~1.4·10¹⁰ años) e interpreta el resultado. Datos: Masa del sol, M = 1.99 · 10³⁰ kg; c = 3 · 10⁸ m·s⁻¹.

Respuesta modelo

a) Cada segundo pierde $\Delta m/\Delta t = P/c^2 = 3{,}6 \cdot 10^{26}/(3 \cdot 10^8)^2 = 4{,}0 \cdot 10^9$ kg/s (cuatro millones de toneladas por segundo). Perder la mitad, $9{,}95 \cdot 10^{29}$ kg, le llevaría $t = 9{,}95 \cdot 10^{29}/4{,}0 \cdot 10^9 = 2{,}49 \cdot 10^{20}$ s $\approx 7{,}9 \cdot 10^{12}$ años. **b)** Es unas **560 veces la edad del universo**: aunque pierde masa a un ritmo enorme, su masa es tan grande que la pérdida es insignificante.

Por qué puntúa. Para la interpretación: en realidad el Sol nunca perderá la mitad de su masa así, porque solo fusiona el hidrógeno de su núcleo y en la fusión solo un 0,7 % de la masa se convierte en energía; su vida estable ronda los 10¹⁰ años (Tema 6). Castilla-La Mancha no publica la solución del modelo.

9 Relatividad en la tecnología: GPS y aceleradores

La relatividad no es una curiosidad: sin ella no funcionarían el GPS ni Galileo, y los aceleradores de partículas se diseñan con sus fórmulas. Son los contextos de las preguntas competenciales.

- **GPS**: los satélites (órbita de unos 26 560 km de radio, a unos 3,87 km/s) llevan relojes atómicos. Por la relatividad especial, al moverse, atrasan unos **7,2 µs al día**; por la relatividad general, al estar más arriba en el campo gravitatorio, adelantan unos **45,7 µs**. En total, adelantan **unos 38 µs al día** (+38,5 µs con este cálculo sencillo). Como las distancias a los satélites se calculan con $d = c\,t$, esos 38 µs equivalen a unos 11,5 km de recorrido de la luz por día: sin corregir los relojes, las posiciones acumularían errores de kilómetros en un solo día.
- **Aceleradores**: en un ciclotrón (Tema 9) la frecuencia de giro es $f = qB/(2\pi\gamma m_0)$; al crecer γ, las partículas se desfasan. Por eso a energías altas se usan **sincrotrones** como el LHC o ALBA.
- La **relatividad general** (gravedad como curvatura del espacio-tiempo, ondas gravitacionales) no está en los saberes del RD 243/2022; Aragón invita en su currículo a «realizar una introducción de la Teoría de la Relatividad General». No ha caído en ninguna convocatoria.

Instalación	Partícula y energía	γ	v
LHC (CERN, Ginebra), Run 3 (2022 – junio de 2026)	Protones de 6,8 TeV	≈ 7250	$1 - v/c \approx 9{,}5 \cdot 10^{-9}$
ALBA (Cerdanyola del Vallès)	Electrones de 3 GeV	≈ 5870	$1 - v/c \approx 1{,}5 \cdot 10^{-8}$
ESS (Lund; Madrid 2025)	Protones de 2 GeV (cinética)	3,13	0,948c
PS Booster (CERN; modelo de Madrid, resuelto en el Tema 20)	Protones de 1,4 GeV (cinética)	2,49	0,916c

$\gamma = E/(m_0c^2) = 1 + E_c/(m_0c^2)$ con $m_pc^2 = 938{,}27$ MeV y $m_ec^2 = 0{,}511$ MeV (CODATA 2018). Energías: CERN, ALBA y los enunciados de Madrid.

Lee el contexto, resuelve la física

En una pregunta competencial (la Fuente Europea de Neutrones de Madrid 2025, el LHC del modelo 2025 de Asturias, que tienes en el Tema 20) el texto largo solo sitúa: busca el dato (energía cinética, velocidad) y aplica las mismas fórmulas. Si te dan la energía «de los protones del acelerador», casi siempre es la **cinética**.

10 Qué te piden en tu comunidad

La relatividad sale en **12 de las 68 convocatorias** ordinarias y extraordinarias de 2025 y 2026, en 7 comunidades. Que no haya caído en tu comunidad no quiere decir que no entre: solo está fuera lo que un documento oficial excluye.

Comunidad	Qué dice el documento oficial	Qué ha caído en 2025–2026
Andalucía	Orientaciones 2026-27: no citan la relatividad (del bloque solo nombran la «Insuficiencia de la Física Clásica» y «Establecer la equivalencia entre masa y energía, y sus consecuencias en la energía nuclear»), pero está en el currículo andaluz y en el RD 243/2022; ningún documento la excluye.	No ha caído (tampoco en 2024 ni en los modelos).
Aragón	Currículo: «la contracción de la longitud, la dilatación del tiempo y la famosa fórmula E=mc2». Sin exclusiones.	No ha caído.
Asturias	Ficha 2025-26: relatividad especial; correcciones relativistas en De Broglie por encima de 10^7 m/s; pares de partículas.	2025 ordinaria (energía total triple que la de reposo).
Baleares	Decret 43/2025: añade «Experiment de Michelson i Morley».	No ha caído.
Canarias	Matriz 2027: transformaciones de Galileo y Lorentz, dilatación, contracción, masa y energía relativistas.	2025 extraordinaria (electrón a 0,75c).
Cantabria	Matriz: la relatividad está en negro (no prioritaria), pero entra.	No ha caído.
Castilla-La Mancha	Orientación Crue: Michelson-Morley. Modelo 2027 con E = mc² en el Sol.	No ha caído (solo en el modelo 2027).
Castilla y León	Matriz: postulados, aparentes paradojas y evidencia experimental; masa relativista y energía.	No ha caído.
Cataluña	Orientacions 2026-27: no se pedirán las transformaciones de Lorentz; sí «La dependència de la massa en funció de la velocitat». Documento de la PAU 2025 (25-10-2024): «Cal conèixer de forma qualitativa» la dilatación y la contracción (documento PAU 2025; pendiente de confirmar para 2027).	No ha caído en ordinarias ni extraordinarias (sí en el examen de incidencias de 2025: masa relativista de un fotoelectrón); 2026 ordinaria pide despreciar los efectos relativistas.
C. Valenciana	Documento de orientación: Michelson-Morley, postulados y «aparentes paradojas».	2025 ordinaria (Barnard), 2025 extraordinaria (módulo de 11 m) y 2026 extraordinaria (mesón).

Comunidad	Qué dice el documento oficial	Qué ha caído en 2025–2026
Extremadura	Aspectos curriculares de 2025-26 (bloque D, 12-03-2026; pendiente de confirmar para 2027): «No se incluye: transformaciones de Galileo, transformaciones de Lorentz». El resto entra.	No ha caído (2024: V/F de contracción).
Galicia	Orientaciones: relatividad en las cuestiones.	2025 ordinaria (invariancia de c) y 2026 extraordinaria (avión supersónico), siempre en la cuestión 4.1.
La Rioja	Matriz: «Reconoce las transformaciones de Lorentz»; currículo: simultaneidad. «No se pedirán demostraciones» (guía 2025-26; pendiente de confirmar para 2027).	No ha caído (sí en el modelo 2025-26).
Madrid	Directrices 2025-26: «Sí masa y energía relativistas». Decreto 64/2022: sistemas inerciales y Michelson-Morley.	2025 extraordinaria (ESS de Lund); también en los modelos 2025-2027.
Murcia	Especificaciones 2027: Michelson-Morley, postulados, contracción, dilatación y energía.	2025 ordinaria (protón en un tubo) y 2026 ordinaria (viaje a Alfa Centauri).
Navarra	Guía 2025-26: sin exclusiones.	2025 extraordinaria (nave a 0,9c) y 2026 extraordinaria (partícula de 1 mg).
País Vasco	La presentación 2027 llama al bloque D «Nuclear · Cuántica» sin nombrar la relatividad, pero no la excluye.	No ha caído.

Fuente: documentos oficiales 2026-27 de cada comisión (o los últimos publicados) y exámenes de 2025 y 2026.

11 Ejercicio resuelto: masa relativista de los protones de la Fuente Europea de Neutrones (Madrid 2025)

PAU COMUNIDAD DE MADRID 2025 · CONVOCATORIA EXTRAORDINARIA · PREGUNTA 1 (BLOQUE «FÍSICA RELATIVISTA, CUÁNTICA, NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS»; OBLIGATORIA Y COMPETENCIAL, SIN OPCIONALIDAD; 2,5 PUNTOS)

En Lund, Suecia, se está construyendo la futura Fuente Europea de Neutrones por Espalación. Los neutrones, por las características de la interacción neutrón-materia, son una herramienta muy eficiente para estudiar, analizar y comprender la estructura y propiedades de la materia. Las instalaciones de la Fuente Europea de Neutrones constan de un acelerador lineal en el que se aceleran protones, H^+, hasta alcanzar, al final del acelerador, una energía cinética de 2 GeV. Posteriormente, se hace impactar el haz de protones sobre un blanco, consistente en un bloque giratorio de tungsteno mantenido a baja temperatura. Como consecuencia del choque el blanco emite neutrones. A los neutrones se les hace pasar por diferentes moderadores, áreas a una determinada temperatura, para modificar su energía cinética. Datos: Velocidad de la luz en el vacío, $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m s^{-1}; Valor absoluto de la carga del electrón, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; Masa del protón en reposo, $m_{p0} = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg; Masa del neutrón, $m_n = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg; Constante de Planck, $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J s.

a) Determine la masa relativista de los protones al final del acelerador lineal, cuando su energía cinética es de 2 GeV. (1,5 puntos)

b) Si se obtienen neutrones con una energía cinética de 25 meV (no relativista), ¿cuál es el valor de su velocidad y de la longitud de onda de de Broglie? (1 punto)

Apartado a)

1. **La idea:** te dan la **energía cinética**, no la total ni la velocidad. La energía total es la de reposo más la cinética, $E = m_p c^2 = m_{p0} c^2 + E_c$, así que la masa relativista sale directamente: $m_p = m_{p0} + \dfrac{E_c}{c^2}$.
2. Pasa la energía a julios con el dato de e: $E_c = 2 \cdot 10^9\ \text{eV} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J/eV} = 3{,}2 \cdot 10^{-10}\ \text{J}$.
3. $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27} + \dfrac{3{,}2 \cdot 10^{-10}}{(3{,}0 \cdot 10^8)^2} = 1{,}67 \cdot 10^{-27} + 3{,}56 \cdot 10^{-27} = 5{,}23 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$.
4. Comprueba que tiene sentido: $\gamma = m_p / m_{p0} = 3{,}13$ y $v = c\sqrt{1 - 1/\gamma^2} = 0{,}948c$. Con la fórmula clásica, $\frac{1}{2} m_{p0} v^2 = E_c$ daría $v = 6{,}2 \cdot 10^8$ m/s, más que c: imposible. Aquí la relatividad es obligatoria.

SOLUCIÓN $m_p = 5{,}23 \cdot 10^{-27}$ kg: unas 3,1 veces la masa en reposo. Coincide con la solución oficial.

Apartado b)

1. **La idea:** el enunciado avisa de que los neutrones son **no relativistas** (25 meV es nada frente a su energía en reposo, unos 939 MeV), así que valen $E_c = \frac{1}{2} m_n v^2$ y la longitud de onda de De Broglie $\lambda = h/(m_n v)$ (Tema 18).
2. $E_c = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 4{,}0 \cdot 10^{-21}$ J, y $v = \sqrt{\dfrac{2E_c}{m_n}} = \sqrt{\dfrac{2 \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-21}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}}} = 2{,}19 \cdot 10^3$ m/s.
3. $\lambda = \dfrac{h}{m_n v} = \dfrac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 2{,}19 \cdot 10^3} = 1{,}81 \cdot 10^{-10}$ m.
4. Comprobación: $v/c = 7{,}3 \cdot 10^{-6}$, así que $\gamma = 1$ a todos los efectos: bien hecho con la fórmula clásica.

SOLUCIÓN $v = 2{,}19 \cdot 10^3$ m/s y $\lambda = 1{,}81 \cdot 10^{-10}$ m (0,18 nm, como la distancia entre átomos: por eso sirven para estudiar la estructura de la materia). Coincide con la solución oficial.

Lo que puntúa. Los criterios específicos de Madrid son generales: «En la corrección de las preguntas se tendrá en cuenta el proceso seguido en la resolución de las mismas, valorándose positivamente la identificación de los principios y leyes físicas involucradas» y «Se valorará la destreza en la obtención de resultados numéricos y el uso correcto de las unidades en el Sistema Internacional». En 2025 cada apartado se puntuaba en múltiplos de 0,25 (desde 2026, de 0,1). No hay reparto oficial dentro de cada apartado; la solución oficial («Documento de trabajo orientativo») escribe primero $E = m_p c^2 = m_{p0} c^2 + E_c$ y después sustituye: haz lo mismo.

Error típico que te quita puntos. Tomar los 2 GeV como energía **total**: $m = E/c^2 = 3{,}56 \cdot 10^{-27}$ kg, que se queda corto porque olvida la energía en reposo (el resultado correcto es $5{,}23 \cdot 10^{-27}$ kg). También quita puntos olvidar pasar los GeV a julios o usar $\frac{1}{2} m v^2$ con la masa relativista.

12 Ejercicio resuelto: vida media y energía de un mesón en un acelerador (Comunitat Valenciana 2026)

PAU COMUNITAT VALENCIANA 2026 · CONVOCATORIA EXTRAORDINARIA · APARTADO 4, OPCIÓN 4A (FÍSICA RELATIVISTA, CUÁNTICA, NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS; A ELEGIR ENTRE 4A Y 4B;

2 PUNTOS)

En un acelerador de partículas se produce un mesón con una velocidad v = 0,95 c. Estos mesones tienen un tiempo de vida media de 2,6 · 10^{-8} s, medida en su propio sistema de referencia. Calcula razonadamente: Dato: velocidad de la luz en el vacío, c = 3,0 · 10^{8} m/s.

a) La vida media del mesón medida por un observador que se encuentre en el laboratorio. (1 punto)

b) La energía total y la energía cinética del mesón, sabiendo que su energía en reposo es de 139,6 MeV. (1 punto)

Apartado a)

1. **La idea:** la vida media «medida en su propio sistema de referencia» es el **tiempo propio** $\Delta\tau$: el nacimiento y la desintegración del mesón ocurren en el mismo punto de su sistema. El laboratorio ve moverse el mesón y mide un tiempo dilatado: $\Delta t = \gamma\,\Delta\tau$.
2. $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-0{,}95^2}} = \dfrac{1}{\sqrt{0{,}0975}} = 3{,}20.$
3. $\Delta t = \gamma\,\Delta\tau = 3{,}20 \cdot 2{,}6 \cdot 10^{-8} = 8{,}3 \cdot 10^{-8}$ s.
4. Sentido físico: en ese tiempo el mesón recorre en el laboratorio $v\,\Delta t = 0{,}95 \cdot 3{,}0 \cdot 10^{8} \cdot 8{,}3 \cdot 10^{-8} \approx 24$ m, y no los 7,4 m que saldrían sin relatividad. Es el mismo efecto que deja llegar los muones al suelo.

SOLUCIÓN $\Delta t \approx 8{,}3 \cdot 10^{-8}$ s: en el laboratorio el mesón vive 3,2 veces más que en reposo.

Apartado b)

1. **La idea:** la energía total es γ veces la de reposo, $E = \gamma E_0$, y la cinética es lo que sobra: $E_c = E - E_0 = (\gamma - 1)E_0$. Como E_0 viene en MeV, trabaja en MeV.
2. $E = \gamma E_0 = 3{,}203 \cdot 139{,}6\ \text{MeV} = 447\ \text{MeV}.$
3. $E_c = E - E_0 = 447{,}1 - 139{,}6 \approx 307\ \text{MeV}$ (lo mismo que $(\gamma - 1)E_0 = 2{,}203 \cdot 139{,}6$).
4. Si te los piden en julios ($1\ \text{MeV} = 1{,}602 \cdot 10^{-13}$ J): $E \approx 7{,}16 \cdot 10^{-11}$ J y $E_c \approx 4{,}93 \cdot 10^{-11}$ J.
5. Curiosidad: con 139,6 MeV y 2,6·10^{-8} s, el «mesón» es un **pion cargado** (π^+ o π^-); el Particle Data Group da 139,57 MeV y 2,603·10^{-8} s.

SOLUCIÓN $E \approx 447$ MeV y $E_c \approx 307$ MeV: más de dos tercios de su energía es cinética.

Lo que puntúa. Criterios oficiales: a) «0,6 el razonamiento y relación tiempo propio-impropio, y 0,4 el cálculo numerico»; b) «0,6 el cálculo razonado de la energía total y 0,4 el de la energía cinética». Criterios generales: «el planteamiento con cálculo simbólico y su explicación vale un 60 % y el resultado numérico correcto, un 40 %», y «la correcta utilización de las unidades se califica con 0,1 puntos». El examen avisa: «Realiza primero el cálculo simbólico y después obtén el resultado numérico». No se publican resultados numéricos.

Error típico que te quita puntos. Dividir en vez de multiplicar: $\Delta t = \Delta\tau/\gamma = 8{,}1 \cdot 10^{-9}$ s. El observador que ve moverse la partícula mide **más** tiempo, nunca menos. En b), dar $E = \gamma E_0$ como si fuera la energía cinética.

13 Ejercicio resuelto: velocidad y energía de un protón con energía total triple (Asturias 2025)

PAU PRINCIPADO DE ASTURIAS 2025 · CONVOCATORIA ORDINARIA · PREGUNTA 8 (BLOQUE D; SE ELIGEN 5 PREGUNTAS CUALESQUIERA DE LAS 8; 2 PUNTOS)

Si la energía total relativista de un protón es el triple de su energía en estado de reposo, determina: Datos (tabla de constantes del examen): mp+ = 1.7x10⁻²⁷ kg; c = 3.0x10⁸ m·s⁻¹.

a) ¿Cuál es el valor de la energía en reposo del protón? (0,5 puntos)

b) ¿Qué velocidad lleva el protón? (1 punto)

c) ¿Que energía cinética tiene el protón? (0,5 puntos)

Apartado a)

1. **La idea:** la energía en reposo es la que tiene la masa por el hecho de existir: $E_0 = m_0 c^2$ (Einstein).
2. $E_0 = 1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot (3{,}0 \cdot 10^8)^2 = 1{,}53 \cdot 10^{-10}$ J.
3. En MeV: $1{,}53 \cdot 10^{-10} / 1{,}602 \cdot 10^{-13} \approx 955$ MeV. Con los valores CODATA ($m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ kg y $c = 2{,}998 \cdot 10^8$ m/s) sale 938 MeV: la diferencia viene sobre todo del dato redondeado 1,7.

SOLUCIÓN $E_0 = 1{,}53 \cdot 10^{-10}$ J (con las dos cifras del dato, $1{,}5 \cdot 10^{-10}$ J).

Apartado b)

1. **La idea:** $E = \gamma E_0$. Si $E = 3E_0$, entonces $\gamma = 3$, y no hace falta la masa.
2. $$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = 3 \;\Rightarrow\; 1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{9} \;\Rightarrow\; v = c\sqrt{\frac{8}{9}} = \frac{2\sqrt{2}}{3}\, c = 0{,}943\, c.$$
3. $v = 0{,}943 \cdot 3{,}0 \cdot 10^8 = 2{,}83 \cdot 10^8$ m/s.

SOLUCIÓN $v = 2{,}83 \cdot 10^8$ m/s (el 94 % de c), como en la solución oficial.

Apartado c)

1. **La idea:** la energía cinética es la total menos la de reposo: $E_c = E - E_0 = 3E_0 - E_0 = 2E_0$.
2. $E_c = 2 \cdot 1{,}53 \cdot 10^{-10} = 3{,}06 \cdot 10^{-10}$ J.
3. Si usaras $\frac{1}{2} m_0 v^2$ saldría $6{,}8 \cdot 10^{-11}$ J, menos de la cuarta parte: a 0,94c la fórmula clásica no vale.

SOLUCIÓN $E_c = 3{,}06 \cdot 10^{-10}$ J, el doble de la energía en reposo. Coincide con la solución oficial.

Lo que puntúa. Criterios comunes de Asturias 2025: «se penalizará con 0.25 puntos no expresar la unidad correcta de la magnitud calculada»; «Se valorará positivamente el planteamiento correcto, la justificación de las respuestas, la coherencia con los conceptos físicos y el correcto empleo de la terminología científica propia de la materia»; «Empleo de cifras significativas adecuadas en la expresión de magnitudes y redondeo». El acta de coordinación 2025-26 pide además poner las unidades al sustituir, no solo en el resultado. Resultados oficiales: $E_0 \approx 1{,}53 \cdot 10^{-10}$ J, $v \approx 2{,}83 \cdot 10^8$ m/s y $E_c \approx 3{,}06 \cdot 10^{-10}$ J.

Error típico que te quita puntos. Responder en c) $E_c = 3E_0$ (confundir energía total y cinética) o calcularla con $\frac{1}{2} m_0 v^2$. En b), dejar $\gamma = 3$ sin despejar la velocidad.

Conceptos clave

Sistema de referencia inercial

El que no está acelerado: en él se cumple el principio de inercia. Todos se mueven entre sí con velocidad constante.

Éter

Medio en reposo absoluto por el que la física del siglo XIX suponía que viajaba la luz. El experimento de Michelson y Morley (1887) no lo detectó y la relatividad lo hizo innecesario.

Principio de relatividad

Primer postulado de Einstein: las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas inerciales.

Invariancia de la velocidad de la luz

Segundo postulado de Einstein: la luz en el vacío va a c en todos los sistemas inerciales, sea cual sea el movimiento de la fuente o del observador.

Simultaneidad relativa

Dos sucesos simultáneos en un sistema no lo son en otro que se mueve respecto al primero, salvo que ocurran en el mismo lugar.

Factor de Lorentz

$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \geq 1$. Mide cuánto se dilata el tiempo, se contrae la longitud y crecen la masa y la energía.

Transformaciones de Lorentz

Relacionan las coordenadas de un suceso en dos sistemas inerciales: $x' = \gamma(x - vt)$, $t' = \gamma(t - vx/c^2)$. Sustituyen a las de Galileo.

Tiempo propio

El intervalo medido por un reloj presente en los dos sucesos (los dos ocurren en el mismo lugar de su sistema). Es el menor de todos.

Dilatación del tiempo

Un observador que ve moverse un reloj mide un intervalo mayor que el propio: $\Delta t = \gamma\, \Delta\tau$.

Longitud propia

La longitud medida en el sistema en que el objeto (o sus dos extremos) está en reposo. Es la mayor.

Contracción de la longitud

Un observador que ve moverse un objeto mide una longitud menor que la propia, solo en la dirección del movimiento: $L = L_0/\gamma$.

Masa relativista

$m = \gamma\, m_0$, siendo m_0 la masa en reposo. Crece sin límite al acercarse a c.

Energía en reposo

$E_0 = m_0 c^2$: la energía que tiene un cuerpo por tener masa.

Energía cinética relativista

$E_c = (\gamma - 1)\, m_0 c^2 = E - E_0$. Para $v \ll c$ se reduce a $\frac{1}{2} m_0 v^2$.

Equivalencia masa-energía

Masa y energía son equivalentes: una variación de energía ΔE supone una variación de masa $\Delta m = \Delta E/c^2$.

Electronvoltio

Energía que gana un electrón al acelerarse con una diferencia de potencial de 1 V: $1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J.

Creación de pares

Conversión de un fotón de más de $2 m_e c^2 = 1{,}022$ MeV en un electrón y un positrón, cerca de un núcleo.

MODO PAU

Siete claves que valen puntos

γ lo primero

Escribe $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ con su valor antes de nada. Para volver a v: $\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$. Si E/E_0 o m/m_0 es un número, **ese número es γ**.

Tiempo propio

El del reloj que está **en los dos sucesos** (la nave, la propia partícula). Es el **menor**: $\Delta t = \gamma\,\Delta\tau$. Razónalo por escrito: en la Comunitat Valenciana vale 0,5 o 0,6 puntos.

Longitud propia

La del sistema donde el objeto (o Tierra y estrella) está **en reposo**. Es la **mayor**: $L = L_0/\gamma$, y solo en la dirección del movimiento.

Total no es cinética

$E = \gamma m_0 c^2 = E_0 + E_c$. Si te dan la «energía cinética de 2 GeV», súmale la de reposo; si te dan la total, réstasela.

Nada de ½mv²

A partir de ~0,1c, $E_c = (\gamma - 1)m_0c^2$. **Nunca** $\frac{1}{2}mv^2$ con la masa relativista. Pero si el enunciado dice «no relativista» o «desprecie los efectos relativistas», usa la clásica.

Unidades

Pasa eV ↔ J ($1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J). Años-luz y fracción de c dan años directamente. Asturias resta 0,25 sin unidad; Canarias 2027 pide tres cifras significativas.

Postulado con nombre

En las cuestiones, cita «segundo postulado de Einstein: c es igual en todos los sistemas inerciales». En Galicia, sin justificación la cuestión vale 0.

Cómo te lo pueden preguntar

- Masa relativista, energía total, energía en reposo y energía cinética de una partícula o una nave a partir de su velocidad, o la velocidad a partir de la energía: es lo que más cae, en 9 de las 12 convocatorias en que sale la relatividad (de las 68 ordinarias y extraordinarias de 2025 y 2026), en 6 comunidades: Asturias, Canarias, Comunitat Valenciana, Madrid, Murcia y Navarra.
- Dilatación del tiempo: tiempo propio de un viaje a una estrella o vida media de una partícula rápida (mesón, protón en un tubo): 4 de esas 12 convocatorias, en 2 comunidades (Comunitat Valenciana y Murcia).
- Contracción de la longitud (un módulo espacial, un avión en vuelo): 2 convocatorias, en 2 comunidades (Comunitat Valenciana y Galicia).
- Segundo postulado: qué velocidad mide para la luz alguien que viaja a 0,9c: 2 convocatorias, en Galicia y Navarra.
- Relatividad mezclada con De Broglie (momento relativista $p = \gamma m_0 v$): Murcia 2025 y Navarra 2026; lo ves en el Tema 18.
- En total, la relatividad sale en 12 de las 68 convocatorias, en 7 comunidades. En las otras 10 (Andalucía, Aragón, Baleares, Cantabria, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Cataluña, Extremadura, La Rioja y País Vasco) no ha caído en 2025-2026, lo que no quiere decir que no entre: mira tu fila en la tabla. También aparece en los modelos de Madrid (2025, 2026 y 2027: protones de 938,2 MeV y del PS Booster del CERN), La Rioja 2025-26, Murcia 2026 (el mismo protón de junio de 2025), Castilla-La Mancha 2027, Canarias y Galicia.

No lo confundas

- Tiempo propio con «el tiempo de la Tierra»: el propio es el del reloj que está en los dos sucesos. En un viaje a una estrella es el de la nave, no el de la Tierra (hasta un solucionario oficial de La Rioja lo dice al revés).
- Longitud propia con longitud contraída: la propia se mide donde el objeto está en reposo y es la mayor; quien lo ve moverse mide menos.
- Energía total con energía cinética: $E = \gamma m_0 c^2$ incluye la de reposo; $E_c = (\gamma - 1) m_0 c^2$ no.
- Masa en reposo con masa relativista: la de las tablas es m_0; $m = \gamma m_0$ depende de la velocidad.
- Dilatación del tiempo con «el reloj funciona mal»: no es un defecto del reloj, es el tiempo mismo; afecta a todos los procesos (relojes, latidos, desintegraciones).
- Contracción con «se encoge entero»: solo se acorta la dimensión paralela al movimiento.
- Año-luz con año: el año-luz es una distancia (la que recorre la luz en un año, unos 9,46·10¹⁵ m), no un tiempo.

Ponte a prueba

PAU Navarra 2026 (extraordinaria), Pregunta 5 (Apartado 5, obligatorio y sin opción; 1,5 puntos). Una partícula de 1 mg de masa en reposo es acelerada desde el reposo hasta que alcanza una velocidad de v = 0,6c, siendo c la velocidad de la luz en el vacío. a) (0,5 puntos) ¿Cuál es la masa de la partícula cuando se mueve a la velocidad v? b) (0,5 puntos) ¿Qué energía ha sido necesaria suministrar a la partícula para que alcance esa velocidad? c) (0,5 puntos) ¿Cuál es la longitud de onda asociada a la partícula? Datos: c = 3 ·10⁸ m/s; h = 6,63·10⁻³⁴ J·s

Solución: a) $\gamma = 1/\sqrt{1 - 0{,}6^2} = 1/0{,}8 = 1{,}25$; $m = \gamma m_0 = 1{,}25$ mg $= 1{,}25 \cdot 10^{-6}$ kg. **b)** Parte del reposo: la energía suministrada es la cinética final, $E_c = (\gamma - 1) m_0 c^2 = 0{,}25 \cdot 10^{-6} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 2{,}25 \cdot 10^{10}$ J (¡para un miligramo!). **c)** Con el momento relativista (Tema 18): $p = \gamma m_0 v = 1{,}25 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}6 \cdot 3 \cdot 10^8 = 225$ kg·m/s y $\lambda = h/p = 6{,}63 \cdot 10^{-34}/225 = 2{,}95 \cdot 10^{-36}$ m, demasiado pequeña para notar ningún efecto ondulatorio. Con el momento clásico saldría $3{,}68 \cdot 10^{-36}$ m, un 25 % más: a 0,6c usa el relativista. Navarra no publica la solución de este examen.

PAU Galicia 2026 (extraordinaria), cuestión 4.1 (obligatoria; 1 punto). Indique y justifique la respuesta correcta. Desde la plataforma de un aeropuerto medimos la longitud de un avión supersónico que resulta ser de l m. Si repitiésemos la medida cuando el avión está en vuelo con una velocidad v. El resultado obtenido sería: a) una longitud mayor que l; b) una longitud menor que l; c) una longitud igual que l; d) depende de si el movimiento es acelerado o no.

Solución: b) una longitud menor que l. Con el avión parado en la plataforma medimos su **longitud propia** l (está en reposo respecto a nosotros). En vuelo, el avión se mueve respecto a nosotros y, por la **contracción de la longitud**, en la dirección del movimiento mide $l' = l/\gamma = l\sqrt{1 - v^2/c^2} < l$. A velocidad supersónica el efecto es minúsculo: con $v = 700$ m/s se acorta una fracción $\approx v^2/2c^2 = 2{,}7 \cdot 10^{-12}$, imposible de medir; pero la respuesta física es la b). La c) es lo que diría la física clásica, y la d) no vale porque la contracción depende de la velocidad en el momento de medir, no de que haya aceleración. Criterios oficiales: «Si no se justifica la elección de la respuesta, la puntuación será de 0 puntos». La CiUG no publica la solución de esta convocatoria.

PAU La Rioja 2026 (modelo), Problema 4.1 (Grupo 4, a elegir entre 4.1 y 4.2; 2 puntos). Una nave espacial parte desde la Tierra hacia la estrella X con una velocidad v=0,6c. Respecto a los relojes de la Tierra, la nave tarda 10 años en llegar a la estrella X. a) (0,5 puntos) Calcular en años-luz la distancia respecto a la Tierra a la que se encuentra la estrella X. b) (0,75 puntos) Calcular en años-luz la distancia respecto a la nave a la que se encuentra la estrella X. c) (0,75 puntos) Calcular en años el tiempo que los relojes de la nave atrasarán medidos respecto de la Tierra cuando la nave llegue a la estrella X.

Solución: a) En el sistema Tierra, Tierra y estrella están en reposo: la distancia es la **longitud propia**. $S_T = v\,t_T = 0{,}6c \cdot 10$ años $= 6$ años-luz. **b)** Para la nave la distancia está contraída: $\gamma = 1{,}25$ y $S_N = S_T/\gamma = 6/1{,}25 = 4{,}8$ años-luz. **c)** El reloj de la nave está en la salida y en la llegada: mide el **tiempo propio**, $t_N = t_T/\gamma = 10/1{,}25 = 8$ años, y atrasa $10 - 8 = 2$ años respecto a los de la Tierra. Comprobación desde la nave: $t_N = S_N/v = 4{,}8/0{,}6 = 8$ años. Los resultados coinciden con el solucionario oficial, que tiene dos erratas: en c) dice «el tiempo propio es el medido en la Tierra» (es al revés: el propio es el de la nave) y en b) escribe «más corta que la distancia S_N» donde debería decir S_T.

Fuentes

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato (Física, bloque D: «Principios fundamentales de la Relatividad especial y sus consecuencias»)
2. Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida (texto consolidado: definición del metro a partir de c)
3. A. Einstein, «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», Annalen der Physik 17 (1905), 891-921
4. A. Einstein, «Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?», Annalen der Physik 18 (1905), 639-641
5. A. A. Michelson y E. W. Morley, «On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether», American Journal of Science 34 (1887), 333-345
6. NIST, CODATA 2018: valores recomendados de las constantes físicas (c, masas y energías en reposo del electrón y del protón, eV)
7. Particle Data Group, Review of Particle Physics (vida media del muon y masa y vida media del pion cargado)
8. IAEA, Atomic Mass Evaluation AME2020 (masas atómicas del ^{1}H y del ^{4}He)
9. N. Ashby, «Relativity in the Global Positioning System», Living Reviews in Relativity 6 (2003)
10. CERN: el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), energía de los haces
11. Sincrotrón ALBA (Cerdanyola del Vallès): anillo de almacenamiento de electrones de 3 GeV
12. Universitats de Catalunya: Orientacions per a l'examen de Física, PAU 2026-2027

13. Universitats de Catalunya: Relació de conceptes que seran objecte d'avaluació a les proves PAU de Física (2024; dilatación y contracción cualitativas)
14. Universidad de Extremadura: Aspectos curriculares orientativos, Bloque D (acuerdos de 12-03-2026)
15. Gobierno de Canarias: Matriz de especificaciones de Física, PAU 2027
16. Gobierno de Canarias: Estructura y criterios de corrección de la prueba de Física, PAU 2027
17. UAM: Presentación de la Comisión de Materia de Física, PAU 2025-2026 (Madrid)
18. Universidad de Murcia: Especificaciones para el ejercicio de Física, PAU 2027
19. Comunitat Valenciana: Documento de orientación de Física, PAU 2026-2027
20. Universidad de Oviedo: Información sobre la PAU 2025-2026, Física (ficha con la concreción de indicadores)
21. Junta de Andalucía: Directrices y orientaciones generales de Física, PAU 2026-27
22. Universidad de La Rioja: Guía de calificación de Física, PAU 2025-2026 (matriz de especificaciones)
23. Examen PAU Física Madrid 2025 (extraordinaria), con criterios y soluciones
24. Examen PAU Física Comunitat Valenciana 2026 (extraordinaria)
25. Criterios de corrección PAU Física Comunitat Valenciana 2026 (extraordinaria)
26. Examen PAU Física Asturias 2025 (ordinaria)
27. Examen resuelto y criterios PAU Física Asturias 2025 (ordinaria)
28. Examen PAU Física Navarra 2026 (extraordinaria)
29. Examen PAU Física Galicia 2026 (extraordinaria) y sus criterios
30. Modelo, criterios y solucionario PAU Física La Rioja 2025-2026
31. Examen PAU Física Galicia 2025 (ordinaria) y criterios con solución (en gallego)
32. Examen PAU Física Comunitat Valenciana 2025 (ordinaria)
33. Examen PAU Física Comunitat Valenciana 2025 (extraordinaria)
34. Examen PAU Física Canarias 2025 (extraordinaria)
35. Modelo PAU Física Castilla-La Mancha 2027
36. Examen PAU Física Cataluña 2026 (ordinaria), versión en castellano

Imágenes: Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib).

Apuntes de Farmeando PAU · farmeandopau.com · Revisados frente a fuentes. Última revisión: 1 de noviembre de 2026. Licencia CC BY-NC-ND 4.0: puedes copiarlo y compartirlo citándonos, sin uso comercial ni cambios (las imágenes, con su propia licencia). ¿Un error? Avísanos desde la página del tema. Cómo los hacemos: farmeandopau.com/metodologia.