Partículas e interacciones fundamentales

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

Toda la materia ordinaria está hecha de **quarks** u **y** d **y electrones**. El **modelo estándar** reparte las partículas elementales en **fermiones** (6 quarks y 6 leptones: la materia) y **bosones** (fotón, W y Z, gluones y el Higgs). De las **cuatro interacciones** describe tres como intercambio de bosones; la **gravitatoria se queda fuera**. Cada partícula tiene su **antipartícula**, y los **aceleradores** (LHC, ALBA) las producen y estudian. Es el tema que menos cae: **3 de las 68 convocatorias**, en 2 comunidades (Extremadura y Murcia), siempre como teoría breve.

1 Qué es una partícula elemental

Una partícula es **elemental** si no tiene estructura interna conocida: no está hecha de piezas más pequeñas. La lista ha ido cambiando: el átomo resultó tener núcleo y electrones; el núcleo, protones y neutrones (Tema 19); y estos, a su vez, están hechos de **quarks**.

- **El electrón** (descubierto por J. J. Thomson en 1897) sigue siendo elemental: no se le ha encontrado estructura.
- **El protón y el neutrón no son elementales:** cada uno está formado por **tres quarks**. El modelo de quarks lo propusieron **Gell-Mann y Zweig en 1964**, y los experimentos de choque de electrones de alta energía contra protones del SLAC (Stanford), desde 1968, mostraron que dentro del protón hay partículas puntuales (Nobel de 1990 a Friedman, Kendall y Taylor).
- **Los quarks no se pueden aislar** (**confinamiento**): solo se observan agrupados. Si intentas separar dos quarks, la energía que pones crea nuevos pares quark-antiquark.
- En partículas, la masa se da como **energía en reposo** mc^2, en MeV o GeV (Tema 17): $m_p c^2 = 938{,}3$ MeV y $m_e c^2 = 0{,}511$ MeV. Por eso las tablas escriben «MeV/c²».

Hasta dónde llega en cada comunidad

Asturias (ficha de la Universidad de Oviedo 2025-26, indicadores 68-70) lo concreta: «Conocer el criterio de clasificación de las partículas elementales y sus tipos para completar tablas de partículas ya clasificadas o diferenciar partículas dadas según su tipo», «Relacionar las Interacciones fundamentales con las partículas asociadas a cada una de ellas» y «Determinar la carga u otra característica de una partícula elemental a partir de los datos proporcionados sobre su comportamiento en un acelerador de partículas». **Murcia** (Especificaciones 2027, saber D3) cita las cuatro interacciones (el modelo estándar «no explica la interacción gravitatoria»), fermiones (quarks y leptones) y bosones (fotón, W, Z, gluón y Higgs, todos en la lista de los que «median en las interacciones»), la estructura en quarks y los aceleradores lineales y circulares tratados de forma elemental. **La Rioja** (guía 2025-26; pendiente de confirmar para 2027): «En los problemas de la prueba no se pedirán demostraciones y ningún problema tendrá carácter teórico», así que saldría dentro de un problema. **Aragón**: su currículo (Orden ECD/1173/2022) recoge el modelo estándar y las partículas, pero no los aceleradores. **Cataluña**: su currículo cita las «principals partícules involucrades en la física atòmica i nuclear», pero no nombra el modelo estándar, los bosones ni los aceleradores. Ningún documento de estas dos comunidades lo excluye, y no ha caído en 2024-2026. **Extremadura** y **Andalucía**: mira los avisos de «Las cuatro interacciones fundamentales» y de los aceleradores. En el resto, está en el RD 243/2022 y ningún documento oficial lo limita.

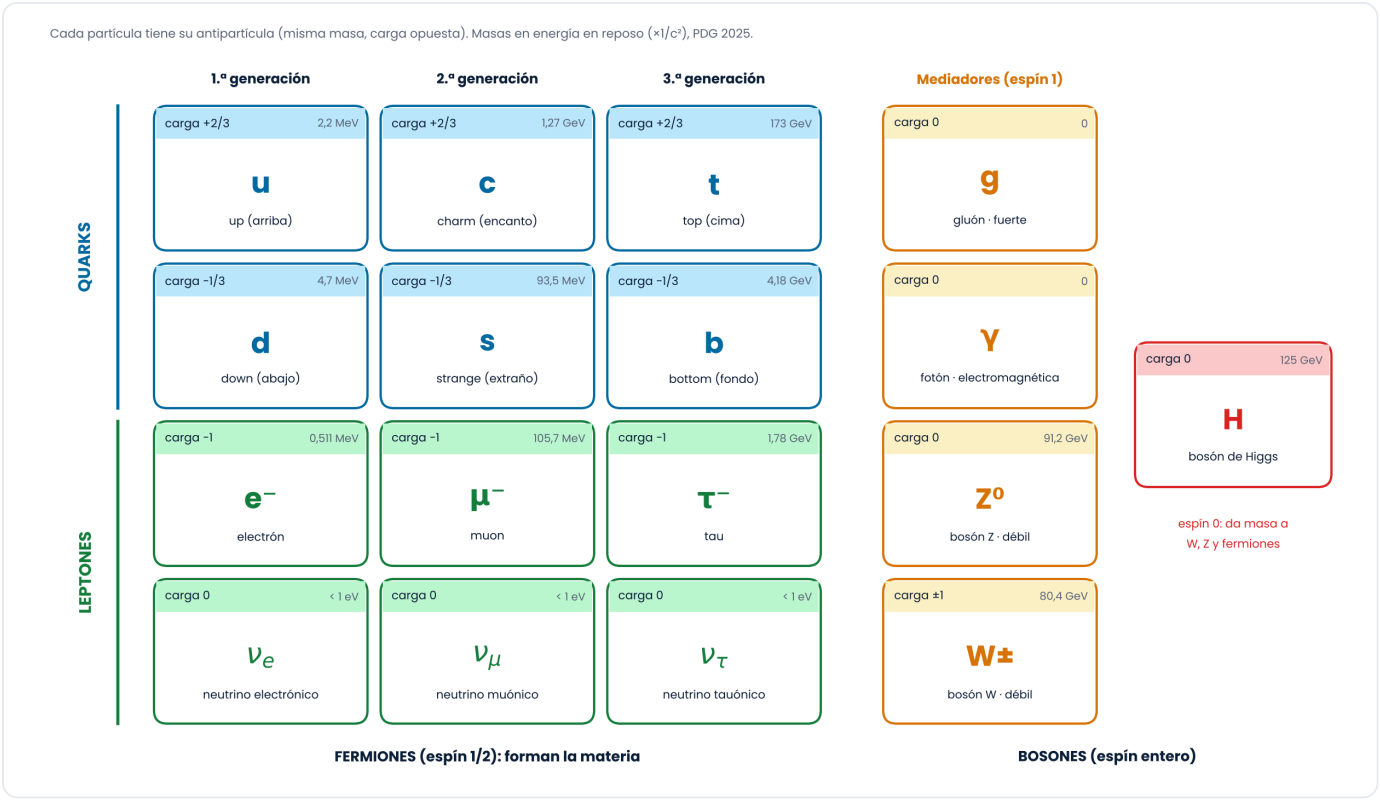
2 El modelo estándar: fermiones y bosones

El **modelo estándar** es la teoría que clasifica las partículas elementales y explica tres de las cuatro interacciones. El criterio para clasificarlas es el **espín** (un momento angular intrínseco): semientero o entero.

- **Fermiones** (espín $\frac{1}{2}$): son las partículas de **materia**. Cumplen el **principio de exclusión de Pauli** (dos fermiones iguales no pueden estar en el mismo estado), y por eso la materia ocupa sitio. Son **6 quarks y 6 leptones**.
- **Bosones** (espín entero): los **mediadores** de las interacciones —fotón, W^+, W^-, Z^0 y los ocho gluones, de espín 1— y el **bosón de Higgs**, de espín 0.
- **Quarks:** seis «sabores» en tres generaciones: u (up) y d (down); c (charm) y s (strange); t (top) y b (bottom). Carga $+\frac{2}{3}e$ los de tipo up (u, c, t) y $-\frac{1}{3}e$ los de tipo down (d, s, b). Tienen además **carga de color** (tres «colores»), que es la carga de la interacción fuerte.
- **Leptones:** el electrón e^-, el muon μ^- y el tau τ^- (carga $-e$) y sus tres **neutrinos** (ν_e, ν_μ, ν_τ), sin carga y con una masa diminuta (menos de 1 eV/c²). Los leptones **no sienten la interacción fuerte**.
- **Tres generaciones:** cada una repite la anterior con más masa. **Toda la materia estable** está hecha de la primera (u, d y electrón); las de la 2.ª y la 3.ª se crean en colisiones y se desintegran enseguida (el muon vive de media $2{,}2\ \mu$s).

Grupo	Partículas	Carga (en e)	Interacciones que siente
Quarks tipo up	u, c, t	$+\frac{2}{3}$	Las cuatro
Quarks tipo down	d, s, b	$-\frac{1}{3}$	Las cuatro
Leptones cargados	e^-, μ^-, τ^-	-1	Gravitatoria, electromagnética y débil
Neutrinos	ν_e, ν_μ, ν_τ	0	Gravitatoria y débil

Los mediadores no son materia: el fotón, el W, el Z y los gluones son bosones.



El modelo estándar. Doce fermiones en tres generaciones (quarks arriba, leptones abajo) y los bosones: cuatro mediadores y el Higgs. Masas redondeadas de las tablas del Particle Data Group (2025).

3 Hadrones: bariones y mesones

Los quarks se agrupan en **hadrones**: partículas **compuestas** que sienten la interacción fuerte. La carga total siempre sale un número entero de veces e.

- **Bariones** (tres quarks). **Protón** $= uud$: $+\frac{2}{3}+\frac{2}{3}-\frac{1}{3}=+1$. **Neutrón** $= udd$: $+\frac{2}{3}-\frac{1}{3}-\frac{1}{3}=0$. Otros: $\Delta^{++}=uuu$ (carga $+2$) y $\Lambda^0=uds$ (carga 0).
- **Mesones** (un quark y un antiquark). **Pion** $\pi^+=u\bar{d}$: $+\frac{2}{3}+\frac{1}{3}=+1$; $\pi^-=d\bar{u}$ (carga -1); kaón $K^+=u\bar{s}$ (carga $+1$). Todos los mesones son inestables.
- **Los bariones son fermiones** (tres espines $\frac{1}{2}$ dan espín semientero) y **los mesones son bosones** (dos dan espín entero). Que el pion sea un bosón no lo convierte en mediador fundamental: es una partícula compuesta.
- **La masa del protón casi no viene de sus quarks:** $2m_u+m_d\approx 2\cdot 2{,}16+4{,}70=9{,}02$ MeV/c², alrededor del **1 %** de 938,3 MeV/c². El resto es energía de la interacción fuerte (gluones y movimiento de los quarks), por $E=mc^2$.
- **Leptones frente a hadrones:** los leptones son elementales y no sienten la fuerte; los hadrones son compuestos y sí la sienten.

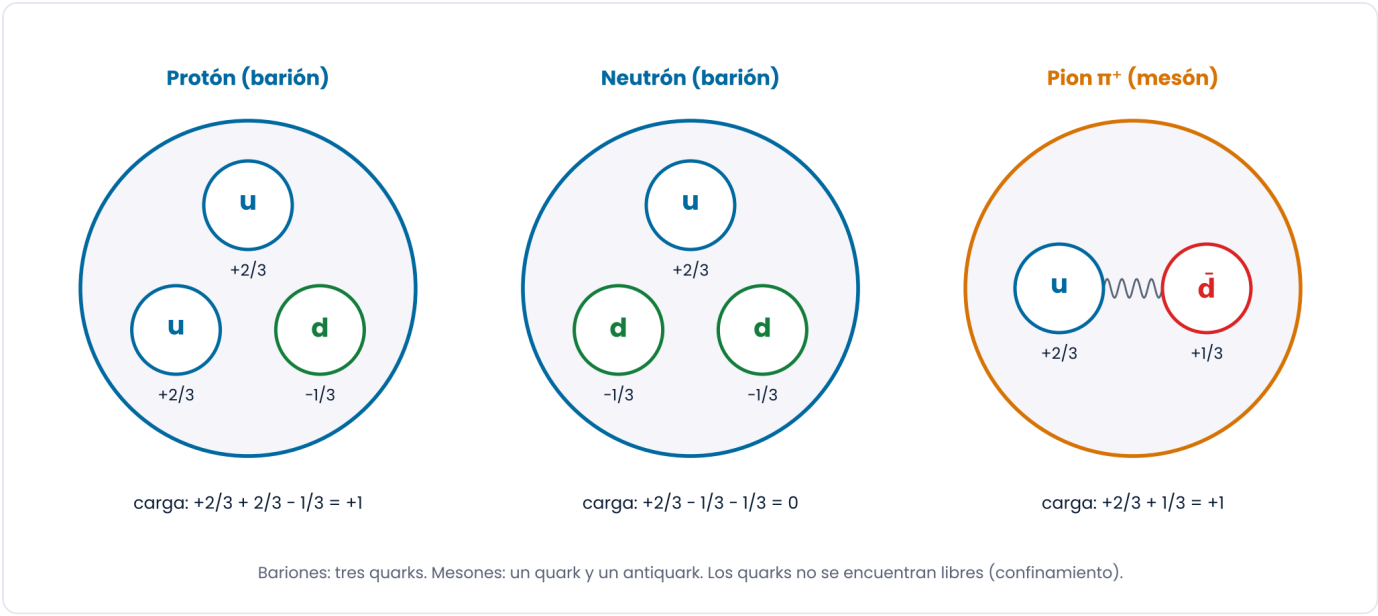
CARGA A PARTIR DE LOS QUARKS

¿Qué carga tienen el antiprotón ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$) y el mesón π^- ($d\bar{u}$)?

Respuesta modelo

Un antiquark tiene la carga opuesta a la de su quark: $\bar{u}$ tiene $-\frac{2}{3}$ y $\bar{d}$, $+\frac{1}{3}$. Antiprotón: $-\frac{2}{3}-\frac{2}{3}+\frac{1}{3}=-1$, es decir, $-e$. Pion negativo: $-\frac{1}{3}-\frac{2}{3}=-1$.

Por qué puntúa. El antiprotón tiene la misma masa que el protón y la carga opuesta: es su antipartícula.



Hadrones. El protón (uud) y el neutrón (udd) son bariones; el pion π^+ ($u\bar{d}$) es un mesón. La carga es la suma de las de sus quarks.

4 Las cuatro interacciones fundamentales

Todo lo que pasa en la naturaleza se explica con **cuatro interacciones**: **gravitatoria**, **electromagnética**, **nuclear fuerte** y **nuclear débil**. Cada una actúa sobre una propiedad de las partículas y tiene su alcance y su intensidad.

- **Gravitatoria:** siempre atractiva y de alcance infinito. Es la más débil, pero **domina a gran escala** (planetas, galaxias) porque la masa no tiene signo y no se cancela, mientras que la materia es eléctricamente neutra en conjunto.
- **Electromagnética:** atractiva o repulsiva según el signo de las cargas, de alcance infinito. Mantiene unidos átomos y moléculas y explica la química, la luz, el rozamiento o el contacto entre cuerpos.
- **Nuclear fuerte:** la más intensa. Une los quarks en los hadrones y, como efecto residual, los protones y neutrones en el núcleo venciendo la repulsión eléctrica entre protones (Tema 19). Fuera del núcleo no se nota.
- **Nuclear débil:** la única que **cambia el sabor de un quark o de un leptón**. Es la responsable de la **desintegración** β (Tema 19) y del primer paso de la fusión en el Sol, en el que dos protones dan un deuterón, un positrón y un neutrino.
- **Por qué el alcance depende de la masa del mediador:** un bosón de masa M solo puede existir «prestado» un tiempo $\Delta t \approx \hbar/(Mc^2)$ (incertidumbre energía-tiempo, Tema 18) y recorre como mucho $c\,\Delta t = \hbar/(Mc)$. Con el W (80,4 GeV/c²) sale $2{,}5 \cdot 10^{-18}$ m; con el fotón, sin masa, el alcance es infinito.

Interacción	Actúa sobre	Mediador	Alcance · intensidad relativa
Nuclear fuerte	Quarks y gluones (carga de color); entre nucleones, como fuerza nuclear	Gluones (8)	$\approx 10^{-15}$ m · 1
Electromagnética	Partículas con carga eléctrica	Fotón (γ)	Infinito $(1/r^2)$ · $\approx 10^{-2}$
Nuclear débil	Quarks y leptones (todos los fermiones)	W^+, W^-, Z^0	$\approx 10^{-18}$ m · $\approx 10^{-5}$
Gravitatoria	Todo lo que tiene masa o energía	Gravitón (hipotético)	Infinito $(1/r^2)$ · $\approx 10^{-39}$

Intensidades orientativas para dos protones, con las constantes adimensionales de cada interacción: electromagnética $\alpha \approx 1/137$; débil $G_F m_p^2 \approx 1{,}0 \cdot 10^{-5}$ (constante de Fermi); gravitatoria $G m_p^2/\hbar c \approx 5{,}9 \cdot 10^{-39}$. Dependen de la energía y los manuales dan valores algo distintos: lo que se pide es el **orden**, fuerte > electromagnética > débil > gravitatoria.

ELÉCTRICA FRENTE A GRAVITATORIA (CANARIAS LO PIDE)

Compara la fuerza eléctrica y la gravitatoria entre dos protones. Datos: $K = 8{,}99 \cdot 10^{9}$ N·m²/C², $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N·m²/kg², $e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C, $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Respuesta modelo

Las dos dependen de $1/r^2$, así que el cociente no depende de la distancia:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{Ke^2}{Gm_p^2} = \frac{8{,}99 \cdot 10^{9} \cdot (1{,}60 \cdot 10^{-19})^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot (1{,}67 \cdot 10^{-27})^2} = 1{,}24 \cdot 10^{36}$$

La repulsión eléctrica es 10^{36} veces mayor que la atracción gravitatoria.

Por qué puntúa. Por eso la gravedad no puede mantener unidos los protones de un núcleo: hace falta la interacción fuerte. Entre un electrón y un protón el cociente es aún mayor, $2{,}27 \cdot 10^{39}$.

Lo que dicen los documentos oficiales

Extremadura (Aspectos curriculares orientativos, Bloque D, anexos al acta de 12-03-2026): «No se incluye la teoría sobre la unificación de las fuerzas» (en 2025-26; pendiente de confirmar para 2027). **Andalucía** (Directrices y orientaciones 2026-27) solo cita «Interacciones fundamentales de la naturaleza: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil»; el modelo estándar y los aceleradores no aparecen en su concreción, pero están en el currículo andaluz y en el RD 243/2022, y ningún documento los excluye. **Canarias** (Matriz de especificaciones PAU 2027, saber IV.3): «Describe las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza y establece sus órdenes de magnitud. Compara cuantitativamente los órdenes de magnitud entre las interacciones Gravitatoria y Electrostática.»

5 Interacciones como intercambio de bosones y el bosón de Higgs

El RD 243/2022 lo dice así: «Las interacciones fundamentales como procesos de intercambio de partículas (bosones)». Dos partículas interactúan **intercambiando un bosón mediador**: la fuerza deja de ser una acción a distancia.

- **Fotón** (γ): sin masa ni carga; media la interacción electromagnética. Como no tiene masa, su alcance es infinito.
- **Gluones** (8): sin masa, pero con carga de color, así que interaccionan entre sí; por eso la fuerte no llega lejos aunque el gluón no tenga masa (confinamiento).
- **W^+, W^- y Z^0:** muy pesados (80,4 y 91,2 GeV/c²), de ahí el alcance tan corto de la débil. El W tiene carga y cambia el sabor: en la β^-, $d \to u + W^-$ y después $W^- \to e^- + \bar{\nu}_e$. Se descubrieron en el CERN en 1983 (experimentos UA1 y UA2); el Nobel de 1984 fue para Carlo Rubbia y Simon van der Meer.
- **Gravitón:** sería el mediador de la gravedad (espín 2), pero no se ha detectado y la gravedad **no forma parte del modelo estándar**: no hay una teoría cuántica de la gravedad comprobada. La describe la relatividad general.
- **El bosón de Higgs no media ninguna de las cuatro interacciones.** Es la huella del **campo de Higgs**: al interaccionar con él adquieren masa el W, el Z y los fermiones (mecanismo de Brout-Englert-Higgs). Los experimentos **ATLAS y CMS** del LHC anunciaron su descubrimiento el **4 de julio de 2012**; Englert y Higgs recibieron el Nobel de Física de 2013. Su masa es de unos 125 GeV/c². **Ojo en Murcia:** sus Especificaciones 2027 lo ponen en la lista de bosones que «median en las interacciones» («el fotón, los bosones W, el bosón Z, el gluon y el bosón de Higgs»). Si te preguntan allí si es constituyente o mediador, di que es un **bosón y no es constituyente** de la materia, y añade en una frase que no transmite ninguna de las cuatro interacciones: su campo da masa.
- En el modelo estándar, la electromagnética y la débil son dos caras de una sola interacción **electrodébil**. (En Extremadura, los Aspectos curriculares de 2025-26 dicen «No se incluye la teoría sobre la unificación

de las fuerzas»; pendiente de confirmar para 2027.)

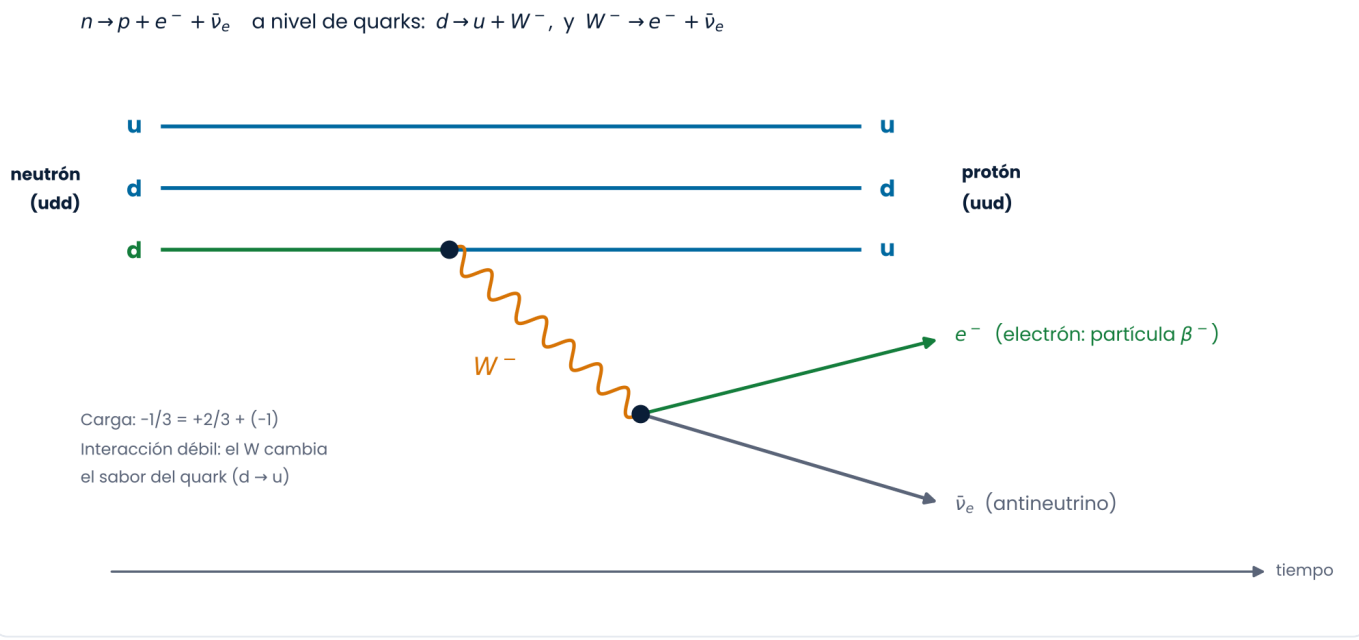
QUÉ SE CONSERVA EN LA DESINTEGRACIÓN β^-

Comprueba que en $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$ y en $d \to u + W^-$ se conserva la carga, y explica para qué hace falta el antineutrino.

Respuesta modelo

Carga: $0 = +1 + (-1) + 0$; con quarks, $-\frac{1}{3} = +\frac{2}{3} + (-1)$. El **número leptónico** vale 0 antes y $+1$ (electrón) -1 (antineutrino) $= 0$ después: sin el antineutrino no se conservaría. Además, se lleva parte de la energía, y por eso los electrones β salen con energías distintas.

Por qué puntúa. Cataluña resta 0,25 puntos si falta el antineutrino al escribir una β^- (Tema 19).



La desintegración β^- vista con quarks. Un quark d del neutrón emite un W^- y se convierte en u: el neutrón pasa a protón. El W^- se desintegra en un electrón y un antineutrino.

6 Antimateria: aniquilación y creación de pares

Cada partícula tiene una **antipartícula** con la **misma masa** y el mismo espín, y la **carga opuesta** (también opuestos los números leptónico y bariónico). La del electrón es el **positrón** e^+; la del protón, el **antiprotón** $\bar{p}$ ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$). Algunas partículas neutras, como el fotón, son su propia antipartícula.

- **Historia:** Dirac la predijo con su ecuación relativista del electrón (1928) y **Anderson descubrió el positrón en 1932** en los rayos cósmicos, con una cámara de niebla en un campo magnético: una traza como la de un electrón, pero curvada al revés. El antiprotón se produjo en 1955 en el acelerador Bevatron de Berkeley.
- **Aniquilación:** partícula y antipartícula desaparecen y su energía sale como fotones. Un electrón y un positrón en reposo dan casi siempre **dos fotones de 0,511 MeV** en sentidos opuestos (nunca uno solo), para que el momento lineal total siga siendo cero. Es la base de la **PET** (Tema 19).
- **Creación de pares:** un fotón con energía suficiente se materializa en un electrón y un positrón, $\gamma \to e^- + e^+$. Hace falta $E_\gamma \geq 2m_e c^2 = 1{,}022$ MeV y un núcleo cerca que se lleve parte del momento (un fotón solo, en el vacío, no puede). Asturias lo pide: «Aplicar el principio de conservación masa y energía relativista en procesos de pares de partículas» (ficha 2025-26, indicador 63).
- **La carga se conserva:** en la aniquilación y en la creación de pares vale 0 antes y después.
- **Antimateria en el universo:** en el Big Bang se crearon materia y antimateria, pero hoy casi todo es materia; esa asimetría es un problema abierto. En el CERN se fabrica y estudia antihidrógeno (un positrón

ligado a un antiprotón).

FOTÓN MÍNIMO PARA CREAR UN PAR

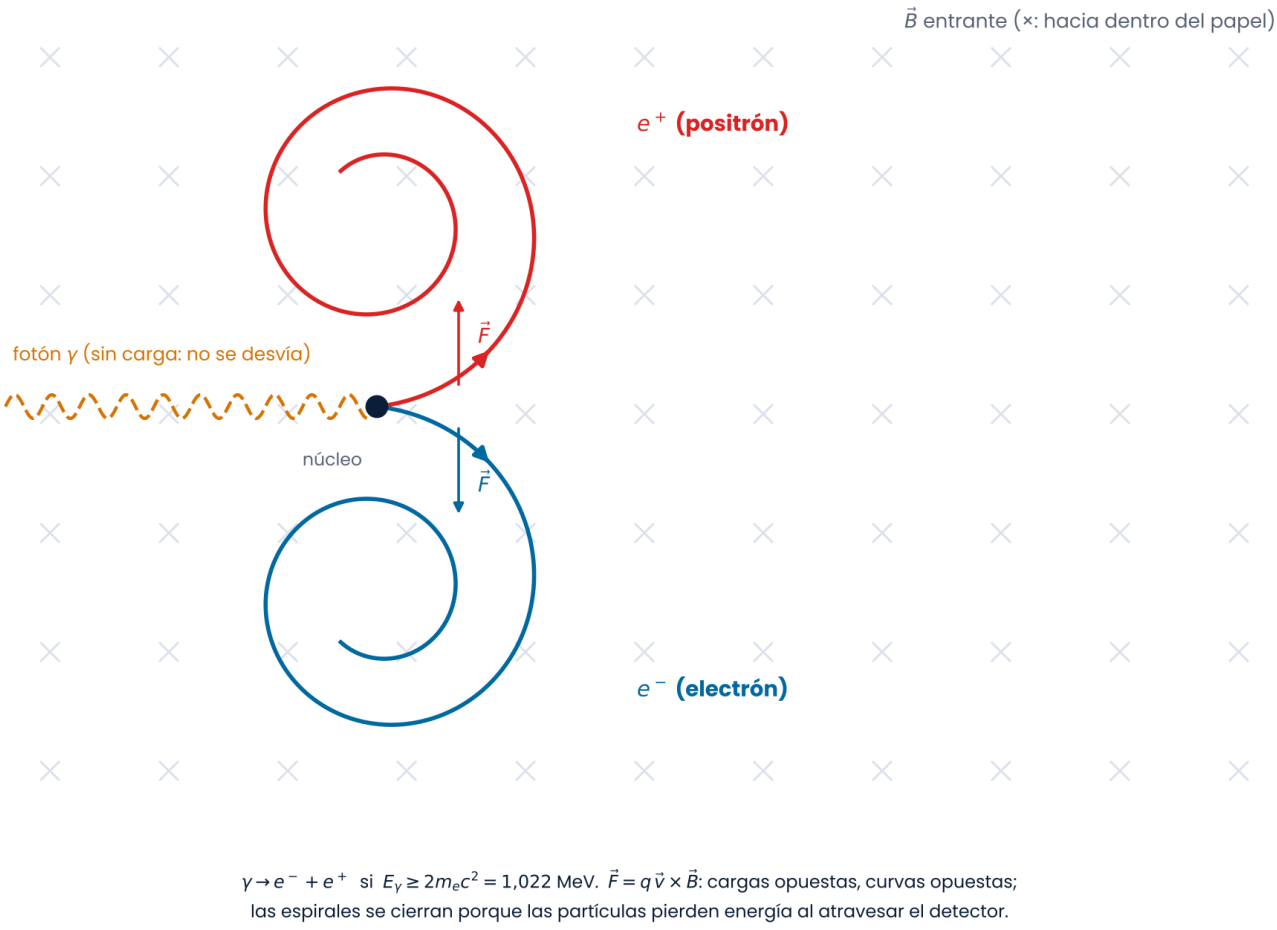
¿Qué energía y qué longitud de onda máxima tiene que tener un fotón para crear un par electrón-positrón? Datos: $m_e c^2 = 0{,}511$ MeV, $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·s, $c = 3{,}00 \cdot 10^{8}$ m/s, $1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J.

Respuesta modelo

Tiene que aportar al menos la energía en reposo de las dos partículas: $E_{\text{min}} = 2m_e c^2 = 1{,}022$ MeV $= 1{,}637 \cdot 10^{-13}$ J. Como $E = hc/\lambda$:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{E_{\text{min}}} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}}{1{,}637 \cdot 10^{-13}} = 1{,}21 \cdot 10^{-12}\ \text{m}$$

Por qué puntúa. Son rayos gamma. Con más energía, lo que sobra sale como energía cinética del par.



Creación de pares en un detector. Con $\vec{B}$ entrante, $\vec{F} = q\,\vec{v} \times \vec{B}$ empuja el positrón hacia arriba y el electrón hacia abajo. El fotón, sin carga, no deja curva.

7 Aceleradores de partículas: LHC, ALBA y cómo se detecta

Para ver estructuras pequeñas hace falta una longitud de onda pequeña ($\lambda = h/p$, Tema 18) y para crear partículas pesadas hace falta mucha energía ($E = mc^2$, Tema 17). Un acelerador lleva partículas cargadas a gran energía con **campos eléctricos** y las guía con **campos magnéticos**.

- **El campo eléctrico acelera:** al atravesar una diferencia de potencial, una carga gana $\Delta E_c = |q|\,\Delta V$ (Tema 8). En un **acelerador lineal** (linac) lo hace una y otra vez en línea recta; el Linac4 del CERN acelera iones

negativos de hidrógeno (H^-: un protón con dos electrones) hasta 160 MeV, y al entrar en el PS Booster se les quitan los electrones y quedan protones.

- **El campo magnético curva:** la fuerza de Lorentz no cambia la rapidez y hace girar la partícula con $r = \frac{p}{|q|B}$ (Tema 9; a velocidades pequeñas, $p = mv$). El **ciclotrón** (Tema 9) usa un B fijo y deja de funcionar cuando la partícula se vuelve relativista.
- **Sincrotrón:** la partícula recorre siempre el mismo anillo; al subir su momento se sube B a la vez, para que $r = p/(|q|B)$ no cambie. El LHC es un sincrotrón que funciona como **colisionador**: dos haces en sentidos opuestos chocan de frente.
- **El LHC** (CERN, junto a Ginebra): anillo de 27 km (26 659 m) a unos 100 m bajo tierra, con 1232 imanes dipolares superconductores enfriados a 1,9 K (−271 °C). Hizo circular sus primeros protones el 10 de septiembre de 2008 y de 2022 a junio de 2026 (su tercera etapa, el Run 3) los hizo chocar a 13,6 TeV (6,8 TeV por haz); su energía de diseño es de 14 TeV (7 TeV por haz). Desde julio de 2026 está parado por obras (la «Long Shutdown 3»): se transforma en el **LHC de alta luminosidad** (HL-LHC), que volverá a funcionar hacia 2030. Antes pasan por el Linac4, el PS Booster, el PS y el SPS.
- **Detectar es medir trayectorias en un campo $\vec{B}$:** el sentido de la curvatura da el **signo de la carga** y el radio, el momento lineal (es lo que pide el indicador 70 de Asturias). Las partículas neutras (fotón, neutrón, neutrinos) no se curvan.
- **España** fue Estado miembro del CERN de 1961 a 1969 y lo es otra vez desde 1983; grupos españoles, como el del CIEMAT en el experimento CMS, trabajan en el LHC. En Cerdanyola del Vallès (Barcelona) está el **sincrotrón ALBA**: acelera electrones hasta 3 GeV y aprovecha la **luz de sincrotrón** (sobre todo rayos X) que emiten al curvarse para estudiar la estructura de materiales y moléculas; funciona con usuarios desde 2012.

EL RADIO DEL LHC

Los dipolos del LHC dan $B = 8{,}33$ T a 7 TeV por haz (valores de diseño). ¿Qué radio describe un protón de 7 TeV? Toma $c = 2{,}998 \cdot 10^8$ m/s.

Respuesta modelo

Como $E = 7$ TeV $\gg m_p c^2 = 0{,}938$ GeV, el protón es ultrarrelativista y $p \approx E/c$. Con E en eV, $E = 7 \cdot 10^{12}\, e$ (en julios), y la carga e se simplifica:

$$r = \frac{p}{eB} = \frac{E}{e\,c\,B} = \frac{7 \cdot 10^{12}\ \text{V}}{2{,}998 \cdot 10^8\ \text{m/s} \cdot 8{,}33\ \text{T}} = 2{,}80 \cdot 10^3\ \text{m}$$

Por qué puntúa. Coincide con el radio de curvatura de diseño (2803,95 m, LHC Design Report). El anillo mide 26,7 km y no $2\pi \cdot 2{,}80 = 17{,}6$ km porque tiene tramos rectos para acelerar, enfocar y poner los detectores.

¿MUON POSITIVO O NEGATIVO?

En un detector con $\vec{B}$ entrante en el papel ($\vec{B} = -B\,\vec{k}$), un muon entra hacia la derecha ($\vec{v} = v\,\vec{\imath}$) y se curva hacia abajo. ¿Es un μ^+ o un μ^-?

Respuesta modelo

$\vec{v} \times \vec{B} = vB\,\vec{\imath} \times (-\vec{k}) = +vB\,\vec{\jmath}$. Con $q > 0$ la fuerza iría hacia arriba; como se curva hacia abajo, $q < 0$: es un μ^-.

Por qué puntúa. En la figura de la creación de pares pasa lo mismo: el positrón se curva hacia arriba y el electrón hacia abajo.

Extremadura y los aceleradores

Los aceleradores de partículas están en el RD 243/2022, pero no aparecen en el saber D.2.2 del Decreto 109/2022 (currículo de Extremadura) ni en sus Aspectos curriculares orientativos. Ningún documento dice que no entren. Además, los Aspectos de 2025-26 avisan: «en este bloque se dará prioridad a los saberes básicos D.1 (especialmente D.1.3) y D.2.1» (relatividad, cuántica y física nuclear); las partículas son el D.2.2. En **Murcia** las Especificaciones 2027 los citan (lineales y circulares, de forma elemental).

8 Lo que el modelo estándar no explica

Madrid incluye en su currículo (Decreto 64/2022) las «Fronteras y desafíos de la física». Estos son los grandes huecos del modelo estándar, a nivel de PAU.

- **La gravedad:** no tiene sitio en el modelo; la describe la relatividad general.
- **La materia oscura:** se deduce de la rotación de las galaxias, pero ninguna partícula conocida la explica (Tema 6).
- **La masa de los neutrinos:** el modelo original los suponía sin masa, pero las **oscilaciones de neutrinos** demostraron que la tienen (Nobel de 2015 a Kajita y McDonald).
- **La asimetría materia-antimateria:** por qué sobrevivió la materia.
- **Cosmología de partículas:** justo después del Big Bang el universo estaba tan caliente que quarks, gluones y leptones iban libres; al enfriarse se formaron protones y neutrones y, después, los primeros núcleos. Los choques de iones pesados del LHC recrean a pequeña escala ese «plasma de quarks y gluones» (experimento ALICE).

9 Ejercicio resuelto: las cuatro interacciones y el modelo estándar (Extremadura 2025)

PAU EXTREMADURA 2025 · CONVOCATORIA ORDINARIA · BLOQUE D, PREGUNTA 7 (A ELEGIR ENTRE LAS PREGUNTAS 6 Y 7; 2,5 PUNTOS)

PREGUNTA 7. Responde a las siguientes preguntas:

a) ¿Cuáles son las 4 fuerzas fundamentales de la Naturaleza? (1,25 puntos)

b) Razona si el Modelo Estándar de la Física de Partículas engloba dichas interacciones. (1,25 puntos)

Apartado a)

1. **La idea:** nombrar las cuatro y, para que la respuesta sea completa, decir de cada una sobre qué actúa, su alcance y su mediador.
2. **Gravitatoria:** entre todo lo que tiene masa; siempre atractiva y de alcance infinito; la más débil, pero domina a gran escala (órbitas, galaxias).
3. **Electromagnética:** entre partículas con carga; atractiva o repulsiva y de alcance infinito; mantiene unidos átomos y moléculas. Mediador: el fotón.
4. **Nuclear fuerte:** entre quarks (y, como fuerza nuclear, entre protones y neutrones); la más intensa, con alcance de unos 10^{-15} m; mantiene unido el núcleo. Mediadores: los gluones.
5. **Nuclear débil:** actúa sobre quarks y leptones y cambia su sabor; alcance de unos 10^{-18} m; responsable de la desintegración β. Mediadores: $W^{\pm}$ y Z^{0}.

SOLUCIÓN Gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil (de menos a más intensa: gravitatoria, débil, electromagnética, fuerte).

Apartado b)

1. **La idea:** el modelo estándar explica las interacciones como **intercambio de bosones mediadores**; hay que ver cuáles tienen su mediador dentro de la teoría.
2. **Electromagnética:** sí, mediada por el fotón. **Débil:** sí, mediada por W^+, W^- y Z^0 (el modelo la une con la electromagnética en la electrodébil). **Fuerte:** sí, mediada por los gluones.
3. **Gravitatoria:** no. Su mediador sería el gravitón, que no se ha detectado, y no hay una teoría cuántica de la gravedad comprobada; la gravedad se describe con la relatividad general.

SOLUCIÓN No las engloba todas: incluye tres (electromagnética, débil y fuerte, mediadas por bosones) y deja fuera la gravitatoria.

Lo que puntúa. Los criterios específicos de Extremadura no ponen nada para el apartado a) («----») y para el b) dicen: «Basta con que pongan las tres interacciones del modelo estándar, mediadas por bosones, o que la gravitatoria no lo está, pero no es necesario que identifiquen con su denominación los diferentes bosones. En cualquier caso, si el razonamiento es incorrecto o inexistente, la cuestión se califica con 0 puntos.» Como es una respuesta de texto, cuenta la ortografía: «A partir de la tercera falta se descuenta 0,1 puntos, hasta el máximo de 1 punto en el total del examen.»

Error típico que te quita puntos. En b), contestar solo «no» sin decir cuál se queda fuera y por qué (0 puntos), o decir que el modelo estándar incluye la gravedad «con el gravitón». En a), poner la fuerza eléctrica y la magnética como dos fuerzas distintas: son una sola, la electromagnética.

10 Ejercicio resuelto: fermiones y bosones, constituyentes y mediadores (Murcia 2026)

PAU REGIÓN DE MURCIA 2026 · CONVOCATORIA EXTRAORDINARIA (JULIO) · BLOQUE 4, OPCIÓN 4-B, APARTADO B (BLOQUE DE 2 PUNTOS; A ELEGIR ENTRE 4-A Y 4-B; EL APARTADO VALE 1 PUNTO)

Bloque 4: Física relativista, cuántica, nuclear y de partículas [2 puntos]. Opción 4-B. [Aquí se resuelve solo el apartado b; el apartado a, la energía de enlace por nucleón del helio-4, es del Tema 19.]

b) Para cada una de las siguientes partículas elementales indique si es un fermión o un bosón y si son constituyentes de la materia o mediadores de interacciones: electrón, fotón, W, quark up (u). (1 punto)

Apartado b)

1. **La idea:** el criterio es el **espín**. Los **fermiones** (espín $\frac{1}{2}$: quarks y leptones) son los **constituyentes de la materia**; los **bosones** de espín 1 (fotón, $W^{\pm}$, Z^0, gluones) son los **mediadores** de las interacciones.
2. **Electrón:** leptón de espín $\frac{1}{2}$ → **fermión**, **constituyente** de la materia (forma la corteza de los átomos).
3. **Fotón:** espín 1 → **bosón**, **mediador** de la interacción electromagnética.
4. **W:** espín 1 → **bosón**, **mediador** de la interacción débil (con el Z^0). Que tenga masa (80,4 GeV/c²) no lo convierte en materia.
5. **Quark up:** espín $\frac{1}{2}$ → **fermión**, **constituyente** de la materia (dos en el protón, uno en el neutrón).

SOLUCIÓN Electrón: fermión, constituyente. Fotón: bosón, mediador (electromagnética). W: bosón, mediador (débil). Quark up: fermión, constituyente.

Lo que puntúa. Murcia no publica criterios específicos por pregunta. Sus criterios generales piden: «Las respuestas cualitativas deben mencionar la ley aplicada y/o el razonamiento que lleva a la solución», y cuentan como error grave «No razonar o justificar en los casos en los que se pida explícitamente». Aquí basta una frase con el criterio (espín) y

las ocho clasificaciones. La resolución que publica el coordinador de Física de la PAU en la Universidad de Murcia da lo mismo: electrón y quark u, fermión y constituyente; fotón y W, bosón y mediador (electromagnética y débil).

Error típico que te quita puntos. Clasificar el W como fermión «porque tiene masa» o el fotón como constituyente «porque la luz es materia». El criterio no es la masa, sino el espín.

11 Ejercicio resuelto: protones del PS Booster del CERN (Madrid 2027)

PAU COMUNIDAD DE MADRID · MODELO 2027 (CURSO 2026-2027) · PREGUNTA 4.B (BLOQUE FÍSICA RELATIVISTA, CUÁNTICA, NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS; A ELEGIR ENTRE 4.A Y 4.B; 2,5 PUNTOS). ES IDÉNTICA A LA PREGUNTA 4.B DEL MODELO 2026.

Dentro del complejo de aceleradores que suministran protones al LHC (Large Hadron Collider) está el PS Booster, un acelerador circular capaz de acelerar protones hasta una energía cinética de 1,4 GeV. Determine: (Datos: Valor absoluto de la carga del electrón, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; Velocidad de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}; Masa en reposo del protón, $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.)

a) La masa relativista de los protones cuando su energía cinética es de 1,4 GeV. (1,5 puntos)

b) La velocidad de dichos protones con esta energía. (1 punto)

Apartado a)

1. **La idea:** la energía total de una partícula relativista es $E = mc^2 = m_0c^2 + E_c$ (Tema 17). Se despeja la masa relativista m.
2. Energía cinética en julios: $E_c = 1{,}4 \cdot 10^{9}\ \text{eV} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J/eV} = 2{,}24 \cdot 10^{-10}$ J.
3. Energía en reposo: $m_0c^2 = 1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^{8})^2 = 1{,}503 \cdot 10^{-10}$ J $= 0{,}939$ GeV. La energía cinética es mayor que la de reposo: hay que usar relatividad.
4. $$m = m_0 + \frac{E_c}{c^2} = 1{,}67 \cdot 10^{-27} + \frac{2{,}24 \cdot 10^{-10}}{9 \cdot 10^{16}} = 1{,}67 \cdot 10^{-27} + 2{,}49 \cdot 10^{-27} = 4{,}16 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$
5. **Contexto:** según el CERN, el PS Booster aceleraba los protones hasta 1,4 GeV cuando lo alimentaba el Linac2 (1978–2018); con el Linac4 los lleva a 2 GeV. El ejercicio no cambia.

SOLUCIÓN $m = 4{,}16 \cdot 10^{-27}$ kg, unas 2,49 veces la masa en reposo. Coincide con la solución oficial.

Apartado b)

1. **La idea:** $m = \gamma m_0$ con $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$; se despeja v.
2. $\gamma = \dfrac{m}{m_0} = \dfrac{4{,}16 \cdot 10^{-27}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}} = 2{,}49.$
3. $$v = c\sqrt{1 - \frac{m_0^2}{m^2}} = c\sqrt{1 - \frac{1}{2{,}49^2}} = 0{,}916\,c = 2{,}75 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}$$
4. **Comprobación:** con la fórmula clásica saldría $v = \sqrt{2E_c/m_0} = 5{,}18 \cdot 10^{8}$ m/s, más que la luz: absurdo.

SOLUCIÓN $v = 0{,}916\,c = 2{,}75 \cdot 10^{8}$ m/s: muy cerca de c, pero por debajo. Coincide con la solución oficial.

Lo que puntúa. Los criterios de Madrid valoran «la identificación de los principios y leyes físicas involucradas» (aquí, $E = mc^2 = m_0c^2 + E_c$ y $m = \gamma m_0$) y dicen: «Se valorará la destreza en la obtención de resultados numéricos y el uso

correcto de las unidades en el Sistema Internacional». La solución oficial (documento de trabajo orientativo) da $m = 4{,}16 \cdot 10^{-27}$ kg y $v = 0{,}916\,c = 2{,}75 \cdot 10^{8}$ m/s.

Error típico que te quita puntos. Usar $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ (sale una velocidad mayor que c) o tomar E_c como energía total y escribir $m = E_c/c^2 = 2{,}49 \cdot 10^{-27}$ kg, olvidando la masa en reposo. También, no pasar los GeV a julios.

Conceptos clave

Partícula elemental

Partícula sin estructura interna conocida. En el modelo estándar: 6 quarks, 6 leptones, los bosones mediadores y el bosón de Higgs.

Modelo estándar

Teoría que clasifica las partículas elementales y explica las interacciones electromagnética, débil y fuerte como intercambio de bosones. No incluye la gravedad.

Fermión

Partícula de espín semientero (1/2). Cumple el principio de exclusión de Pauli. Los fermiones elementales (quarks y leptones) forman la materia.

Bosón

Partícula de espín entero. Los bosones elementales son los mediadores (fotón, W, Z, gluones; espín 1) y el bosón de Higgs (espín 0).

Quark

Fermión elemental con carga $+\frac{2}{3}e$ (u, c, t) o $-\frac{1}{3}e$ (d, s, b) y carga de color. Siente las cuatro interacciones y no se encuentra libre.

Leptón

Fermión elemental que no siente la interacción fuerte: electrón, muon, tau (carga -e) y sus tres neutrinos (neutros).

Neutrino

Leptón sin carga y de masa diminuta (menos de 1 eV/c²) que solo siente la interacción débil y la gravedad.

Hadrón

Partícula compuesta de quarks que siente la interacción fuerte. Puede ser barión o mesón.

Barión

Hadrón de tres quarks (es un fermión). Ejemplos: protón (uud) y neutrón (udd).

Mesón

Hadrón de un quark y un antiquark (es un bosón). Ejemplo: pion $\pi^+ = u\bar{d}$.

Bosón mediador

Partícula cuyo intercambio produce una interacción: fotón (electromagnética), W y Z (débil), gluones (fuerte); el gravitón sería el de la gravedad.

Bosón de Higgs

Bosón de espín 0 asociado al campo de Higgs, con el que adquieren masa el W, el Z y los fermiones. Descubierto en el LHC en 2012; unos 125 GeV/c².

Antipartícula

Partícula con la misma masa y espín que otra y carga (y números cuánticos) opuestos. El positrón es la antipartícula del electrón.

Aniquilación

Encuentro de una partícula con su antipartícula en el que ambas desaparecen y su energía sale como fotones (en reposo, $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ de 0,511 MeV cada uno).

Creación de pares

Materialización de un fotón de al menos $2m_ec^2 = 1{,}022$ MeV en un electrón y un positrón, cerca de un núcleo.

Confinamiento

Propiedad de la interacción fuerte por la que los quarks y los gluones no pueden existir aislados.

Sincrotrón

Acelerador circular en el que el campo magnético aumenta con el momento de las partículas para mantener fijo el radio. El LHC y ALBA lo son.

MODO PAU

Ocho claves que valen puntos

Las cuatro

Gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil, cada una con su mediador: gravitón (hipotético), fotón, gluones, W y Z.

La gravedad, fuera

El modelo estándar describe **tres**; la gravitatoria no (Extremadura da 0 si no se razona).

Fermión o bosón

Decide el **espín**: semientero → fermión (materia); entero → bosón (mediadores y Higgs). La masa no cuenta.

Suma las cargas

$u = +\frac{2}{3}$, $d = -\frac{1}{3}$; los antiquarks, al revés. Protón $uud = +1$, neutrón $udd = 0$.

Protón y neutrón

No son elementales: tres quarks cada uno. El electrón sí lo es.

Antipartícula

Misma masa, carga opuesta. Aniquilación e^-e^+ → 2γ de 0,511 MeV; creación de pares desde 1,022 MeV.

Acelerador

$\vec{E}$ acelera ($\Delta E_c = |q|\Delta V$), $\vec{B}$ curva ($r = p/|q|B$); el sentido de la curva da el **signo de la carga**.

Razona siempre

En Extremadura y Murcia una respuesta sin razonar vale 0. Una frase con el criterio basta.

Cómo te lo pueden preguntar

- Clasificar partículas o interacciones: las cuatro interacciones y si el modelo estándar las engloba (Extremadura), si el protón y el neutrón son elementales (verdadero o falso) o si una partícula es fermión o bosón, constituyente o mediador (Murcia): sale en 3 de las 68 convocatorias ordinarias y extraordinarias de 2025 y 2026, en 2 comunidades.
- Aceleradores como contexto de un problema de relatividad o de De Broglie (PS Booster y LHC en los modelos de Madrid y Asturias, Fuente Europea de Neutrones en Madrid, acelerador lineal en Castilla y León, sincrotrón ALBA en Asturias): lo que se calcula es del Tema 17 o del 18, y allí se cuenta.
- El positrón como carga en problemas de campo eléctrico o magnético (Madrid 2025 ordinaria, 2.A; Murcia 2024 ordinaria, P1): se resuelve con los Temas 7, 8 y 9; aquí solo hace falta saber que tiene la masa del electrón y carga $+e$.

No lo confundas

- **Fermión con bosón:** el fermión tiene espín semientero y forma la materia; el bosón tiene espín entero y media las interacciones (o es el Higgs). El W es un bosón aunque tenga mucha masa.
- **Leptón con hadrón:** los leptones son elementales y no sienten la fuerte; los hadrones están hechos de quarks y sí la sienten.
- **Barión con mesón:** tres quarks (protón, neutrón) frente a quark y antiquark (pion). El pion es un bosón compuesto, no un mediador fundamental.
- **Neutrón con neutrino:** el neutrón es un barión (udd) de 939,6 MeV/c²; el neutrino es un leptón elemental de masa casi nula.
- **Positrón con protón:** los dos tienen carga +e, pero el positrón tiene la masa del electrón y es su antipartícula.
- **Antimateria con materia oscura:** la antimateria es conocida y se fabrica en el CERN; la materia oscura no es ninguna partícula conocida (Tema 6).
- **Bosón de Higgs con mediador:** el Higgs no transmite ninguna de las cuatro interacciones; da masa a otras partículas.
- **Alcance con intensidad:** la gravedad y la electromagnética tienen alcance infinito, pero la gravedad es la más débil; la fuerte es la más intensa y apenas llega a 10^{-15} m.

Ponte a prueba

PAU Murcia 2025 (ordinaria, junio), Bloque 4, opción 4-B, apartado a (a elegir entre 4-A y 4-B; 1,25 puntos de los 2,5 de la opción; el apartado b, la fusión ²H + ³H, es del Tema 19). a) [1.25p] Razonar la veracidad o falsedad de las siguientes afirmaciones: (1) Los protones y neutrones son partículas elementales, es decir, no tienen una estructura interna conocida. (2) La masa de un núcleo es menor que la suma de las masas de los protones y neutrones que lo componen.

Solución: (1) Falsa. El protón (uud) y el neutrón (udd) son bariones formados por tres quarks; los experimentos de dispersión de electrones del SLAC (desde 1968) mostraron esa estructura interna. Elementales son los quarks y el electrón. **(2) Verdadera.** Al formarse el núcleo se libera la energía de enlace B, y la masa del núcleo es $M = Zm_p + Nm_n - B/c^2$: el **defecto de masa** (Tema 19). Ejemplo, con las masas de CODATA: para el helio-4, $\Delta m = 2 \cdot 1{,}00728 + 2 \cdot 1{,}00866 - 4{,}00151 = 0{,}03037$ u, que equivalen a 28,3 MeV (7,07 MeV por nucleón). La resolución del coordinador de Física de la PAU en la Universidad de Murcia da lo mismo: (1) falso y (2) verdadero.

EBAU Murcia 2024 (extraordinaria, julio), Bloque I (preguntas de teoría; elegir dos de las cuatro), T4 (1 punto). Interacciones fundamentales.

Solución: Hay que desarrollar un tema breve. **Cuatro interacciones:** (1) **gravitatoria**, entre masas, siempre atractiva, alcance infinito, la más débil ($\sim 10^{-39}$ respecto a la fuerte), domina a gran escala; mediador hipotético, el gravitón. (2) **Electromagnética**, entre cargas, atractiva o repulsiva, alcance infinito ($\sim 10^{-2}$); une átomos y moléculas; mediador, el fotón. (3) **Nuclear fuerte**, entre quarks (y entre nucleones), la más intensa, alcance $\sim 10^{-15}$ m; mantiene unido el núcleo; mediadores, los gluones. (4) **Nuclear débil**, entre quarks y leptones, alcance $\sim 10^{-18}$ m ($\sim 10^{-5}$); cambia el sabor y causa la desintegración β; mediadores, $W^{\pm}$ y Z^0. Cierra diciendo que el modelo estándar describe las tres últimas como intercambio de bosones y que la gravedad queda fuera. Murcia no publica solución de las preguntas de teoría.

PAU Asturias 2025 (modelo, curso 2024-25), Pregunta 8 (se responden cinco de las ocho preguntas; 2 puntos). En el LHC (Large Hadron Collider) del CERN se trabaja en la detección y estudio de los muones, que son un tipo de leptón, empleados para radiografiar las pirámides de Egipto y con potenciales aplicaciones en la catálisis de reacciones de fusión nuclear o en la detección de tumores malignos. Para su obtención, se realizan colisiones de haces de protones, con una energía total de 14 TeV (la máxima soportada actualmente por el LHC). Calcula: a) La energía cinética de uno de los protones si toda esa energía está asociada a la colisión de dos de ellos. (1 punto) b) La masa y la cantidad de movimiento relativista de cada uno de los protones. (1 punto) (Datos de la tabla común del examen: c = 3.0x10⁸ m·s⁻¹; mp+ = 1.7x10⁻²⁷ kg; |qe-| = |qp+| = 1.6x10⁻¹⁹ C.)

Solución: a) Cada protón lleva la mitad: $E = 7$ TeV $= 7 \cdot 10^{12} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 1{,}12 \cdot 10^{-6}$ J (energía total). Su energía en reposo es $m_0c^2 = 1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot (3{,}0 \cdot 10^8)^2 = 1{,}53 \cdot 10^{-10}$ J $= 0{,}956$ GeV, despreciable: $E_c = E - m_0c^2 = 6{,}999$ TeV $\approx 1{,}12 \cdot 10^{-6}$ J. **b)** $m = E/c^2 = 1{,}12 \cdot 10^{-6}/(9{,}0 \cdot 10^{16}) = 1{,}24 \cdot 10^{-23}$ kg, unas $7{,}3 \cdot 10^3$ veces la masa en reposo. $p = \sqrt{E^2 - (m_0c^2)^2}/c \approx E/c = 3{,}73 \cdot 10^{-15}$ kg·m/s. (Si tomas los 7 TeV como energía cinética, los resultados son los mismos con tres cifras.) **Matiz:** 14 TeV es la energía de diseño del LHC; según el CERN, de 2022 a junio de 2026 colisionó a 13,6 TeV, y desde julio de 2026 está parado para convertirse en el HL-LHC. Asturias no publica solución de este modelo.

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: «Modelo estándar en la física de partículas…»)
2. CERN: The Standard Model
3. CERN: The Higgs boson
4. CERN: The Z boson (descubrimiento de W y Z en 1983)
5. CERN: The Large Hadron Collider (cifras clave: 26 659 m, 1232 dipolos a 1,9 K, 13,6 TeV; parada LS3 desde julio de 2026)
6. CERN: The Proton Synchrotron Booster
7. CERN: Our Stakeholders, Estados miembros (España, 1961–1969 y desde 1983)
8. LHC Design Report, vol. I, cap. 2 (CERN-2004-003): parámetros de diseño (8,33 T; radio de curvatura 2803,95 m)
9. Particle Data Group, Review of Particle Physics 2025: tablas resumen de bosones gauge y de Higgs
10. Particle Data Group 2025: tablas resumen de leptones
11. Particle Data Group 2025: tablas resumen de quarks
12. Particle Data Group 2025: tablas resumen de mesones (pion)
13. NIST: CODATA, constantes físicas fundamentales
14. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades: ICTS Sincrotrón ALBA
15. CIEMAT: grupo del experimento CMS
16. Universidad de Oviedo: Información sobre la PAU 2025/2026, Física (anexo de concreción curricular, indicadores 63 y 68-70)
17. Gobierno de Canarias: Matriz de especificaciones de Física, PAU 2027
18. Universidad de Extremadura: Aspectos curriculares orientativos de Física, Bloque D (acuerdos de 12-03-2026)
19. Distrito Único Andaluz: Directrices y orientaciones de Física, curso 2026-27
20. Universidad de Murcia: web del coordinador de Física de la PAU (especificaciones 2027 y resoluciones)
21. Examen PAU Física Extremadura 2025 (ordinaria)
22. Criterios específicos PAU Física Extremadura 2025 (ordinaria)
23. Examen y criterios PAU Física Murcia 2026 (extraordinaria)
24. Examen y criterios PAU Física Murcia 2025 (ordinaria)
25. Examen y criterios EBAU Física Murcia 2024 (extraordinaria)
26. Modelo PAU Física Comunidad de Madrid 2027, con criterios y soluciones
27. Modelo PAU Física Asturias 2025

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).

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.