

Bloque 4.4

Física de Partículas

Apuntes completos para la PAU: las cuatro interacciones fundamentales con su intensidad, su alcance y su bosón mediador, clasificación de las partículas en fermiones y bosones, los seis quarks y los seis leptones en tres familias, estructura del protón y del neutrón, hadrones, bariones y mesones, qué unifica y qué deja fuera el modelo estándar y aceleradores de partículas. Diagramas, cuadros resumen y diez ejercicios resueltos paso a paso.

Contenido

4.4 Física de Partículas y Modelo Estándar

Interacciones fundamentales, fermiones y bosones, quarks y leptones, protón y neutrón, hadrones, modelo estándar, aceleradores

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

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

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

4.4 Física de Partículas

4.4 Partículas · Interacciones · Fermiones y bosones · Quarks · Modelo estándar.

4.4.1 · Las cuatro interacciones fundamentales

Todas las fuerzas que se observan en la naturaleza se reducen a **cuatro interacciones fundamentales**. El modelo estándar las describe a todas de la misma manera: dos partículas interactúan porque **se intercambian una tercera partícula**, llamada **bosón mediador**. No hay contacto ni acción a distancia instantánea: hay un bosón que sale de una partícula y llega a la otra.

Las cuatro interacciones fundamentales				
Interacción	Intensidad	Alcance	Bosón mediador	Actúa sobre
Nuclear fuerte	1	10^{-15} m	gluón	quarks
Electromagnética	10^{-2}	infinito	fotón	cargas eléctricas
Nuclear débil	10^{-5}	10^{-18} m	bosones W y Z	quarks y leptones
Gravitatoria	10^{-39}	infinito	gravitón (sin detectar)	todas las masas

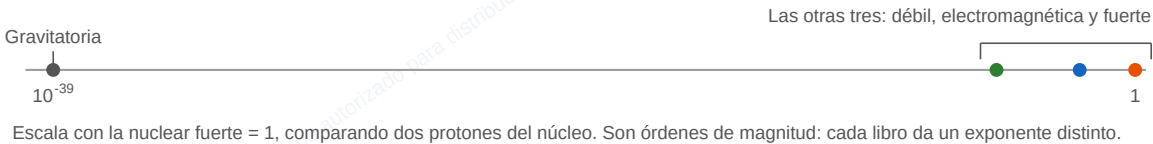


Figura 1 - Las dos de alcance infinito son las que se notan en la vida diaria; las dos nucleares se apagan a distancias más pequeñas que un núcleo.

Los cinco bosones del modelo estándar

Fotón -> electromagnética. Gluón -> nuclear fuerte (lleva carga de color).

Bosones W^+ , W^- y Z^0 -> nuclear débil. Masas de 80 y 91 GeV/c².

Bosón de Higgs -> no media ninguna: da masa a las demás. Unos 125 GeV/c².

El **alcance** depende de la masa del bosón mediador. El fotón no tiene masa, y por eso la interacción electromagnética llega hasta el infinito; al gravitón se le supone masa nula por la misma razón. Los bosones W y Z son muy pesados, entre 85 y 100 veces la masa del protón, y una partícula tan pesada no puede viajar lejos: por eso la interacción débil tiene un alcance cortísimo. El gluón no tiene masa, pero lleva **carga de color** y los gluones interactúan entre

ellos, de modo que la interacción fuerte tampoco sale del núcleo.

Error típico. Confundir **intensidad** con **alcance**. La gravedad es la más débil de las cuatro y, aun así, gobierna el universo a gran escala: su alcance es infinito y **no se cancela**, porque no existen masas negativas. Las cargas eléctricas, en cambio, son de los dos signos y se compensan.

4.4.2 · Fermiones y bosones: quarks, leptones y las tres familias

La primera clasificación divide todas las partículas en dos grupos según su **espín**. Los **fermiones** tienen espín semientero, cumplen el principio de exclusión y forman la materia; los **bosones** tienen espín entero y median en las interacciones.

Los fermiones que forman la materia son **doce**: seis quarks y seis leptones, agrupados en **tres familias** (o generaciones). Cada familia repite el mismo esquema —dos quarks, un leptón cargado y un neutrino— y lo que cambia es la masa: en los quarks y en los leptones cargados es mayor en cada familia siguiente. Toda la materia que nos rodea está hecha con las cuatro partículas de la **primera familia**: los quarks u y d, el electrón y el neutrino electrónico; los quarks y los leptones cargados de la segunda y la tercera son inestables y acaban desintegrándose en partículas de la primera. Cada una tiene además su **antipartícula**, idéntica pero con la carga cambiada de signo.

Cómo se clasifican las partículas elementales

FERMIONES · espín semientero (1/2) · cumplen el principio de exclusión · forman la materia			
QUARKS carga +2/3 carga -1/3	familia 1	familia 2	familia 3
	u (up)	c (charm)	t (top)
	d (down)	s (strange)	b (bottom)
LEPTONES carga -1 carga 0	familia 1	familia 2	familia 3
	e (electrón)	μ (muón)	τ (tauón)
	ν_e (neutrino)	ν_μ (neutrino)	ν_τ (neutrino)
BOSONES · espín entero (0, 1, 2...) · no cumplen el principio de exclusión			
fotón -> electromagnética		gluón -> nuclear fuerte	
Higgs -> da la masa		W y Z -> nuclear débil	
		gravitón -> gravedad: fuera del modelo estándar	

Ojo: un mesón (quark + antiquark) también es bosón, por su espín entero, aunque no medie ninguna interacción.

La materia que nos rodea usa solo la familia 1: quarks u y d, electrones y neutrinos electrónicos.

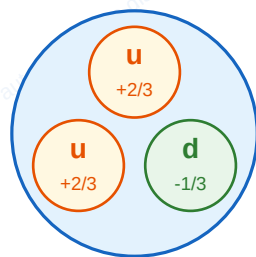
Figura 2 - El cuadro que hay que saberse: los doce fermiones arriba (quarks y leptones, en tres familias) y los bosones abajo, con lo que media cada uno.

Truco. Fermión o bosón se decide por el **espín**: semientero, fermión; entero, bosón. Entre las partículas elementales eso coincide con lo que la partícula hace —las que forman materia son fermiones y las que transmiten una fuerza son bosones—, y por ahí se puede tirar en el examen. Pero es un atajo, no la definición: un **mesón** lleva un quark y un antiquark, así que su espín es entero y **es un bosón**, aunque no medie ninguna interacción. Y dentro de los fermiones, **quark o leptón** se decide por la interacción fuerte: los quarks la sienten, los leptones no.

4.4.3 · El protón y el neutrón por dentro. Hadrones

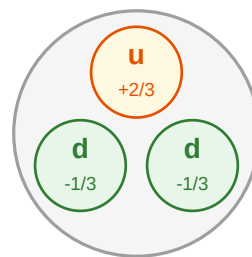
Los quarks son los únicos fermiones con **carga fraccionaria**: los quarks u, c y t tienen carga $+2/3$ y los quarks d, s y b tienen carga $-1/3$, siempre en unidades de la carga del electrón. Ni el protón ni el neutrón son partículas elementales: cada uno está formado por **tres quarks** de la primera familia, y de ahí sale exactamente su carga.

De qué están hechos el protón y el neutrón



PROTÓN (u u d)

Carga: $+2/3 + 2/3 - 1/3 = +3/3 = +1$



NEUTRÓN (u d d)

Carga: $+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0/3 = 0$

Una partícula de materia (no un bosón mediador): ¿lleva quarks?

SÍ -> es un HADRÓN		NO -> es un LEPTÓN
BARIÓN	MESÓN	Es elemental: no tiene partes. No siente la interacción fuerte. espín 1/2: FERMIÓN, siempre.
3 quarks	quark + antiquark	
espín 1/2: FERMIÓN	espín entero: BOSÓN	

Las cargas van en unidades de la carga del electrón y los quarks van unidos por gluones. Mesones: los piones. Leptones: el electrón.

Figura 3 - Cambiar un solo quark d por un quark u convierte un neutrón en un protón: eso es la desintegración beta. Abajo, la jerarquía entera.

Toda partícula formada por quarks se llama **hadrón**, y hay dos maneras de juntarlos. Los hadrones **no** son elementales, porque tienen partes; los quarks que los forman sí lo son. Además, los quarks nunca se han observado sueltos: al contrario que la fuerza eléctrica, la interacción fuerte **crece** cuando dos quarks se separan, y mucho antes de conseguir separarlos esa energía se convierte en partículas nuevas. A esto se le llama **confinamiento**.

HADRONES: partículas hechas de quarks, sienten la interacción fuerte

Bariones: tres quarks. Espín semientero $\rightarrow$ son fermiones. Protón y neutrón.

Mesones: un quark y un antiquark. Espín entero $\rightarrow$ son bosones. Los piones.

La desintegración beta, vista con quarks. Uno de los quarks d del neutrón (u d d) se transforma en un quark u, y el neutrón se convierte en un protón (u u d). El cambio lo hace la interacción débil a través de un bosón W^- , que enseguida se convierte en un electrón y un antineutrino. Comprueba las cargas: $0 = +1 + (-1)$. Cuadra.

Truco. Cómo clasificar en el examen una partícula que te den. 1) ¿Media una interacción? Entonces es uno de los bosones del modelo estándar. 2) ¿Está hecha de quarks? Entonces es un hadrón: barión si lleva tres quarks (y es fermión), mesón si lleva un quark y un antiquark (y es bosón). 3) ¿Es materia y no tiene quarks dentro? Entonces es un leptón, y es fermión.

4.4.4 · El modelo estándar: qué unifica y qué deja fuera

El **modelo estándar** es la teoría que describe todas las partículas elementales conocidas y **tres** de las cuatro interacciones: la fuerte, la electromagnética y la débil. Las dos últimas están además unificadas en una sola descripción, la **teoría electrodébil**. La **gravedad se queda fuera**: la relatividad general no encaja con la descripción cuántica del resto, y ese es el gran problema abierto de la física de hoy. Además de la gravedad, el modelo estándar no explica por qué hay exactamente tres familias de fermiones, ni por qué las masas valen lo que valen, ni de qué está hecha la materia oscura.

PAU - Atención. Esta es la frase que piden las especificaciones de la PAU con estas palabras: *"el modelo estándar unifica el tratamiento de tres interacciones, pero no explica la interacción gravitatoria"*. Si la pregunta es de razonar, esa frase y el motivo (no hay teoría cuántica de la gravedad, y el gravitón no se ha detectado) valen la respuesta entera.

4.4.5 · Aceleradores de partículas

Para **ver** algo pequeño hace falta iluminarlo con una longitud de onda todavía más pequeña. Por la relación de De Broglie la longitud de onda de una partícula es inversamente proporcional a su cantidad de movimiento, así que cuanto más pequeño sea lo que se quiere mirar, más energía hay que darle a la partícula que lo mira. De ahí que la física de partículas necesite máquinas

gigantescas. En todas ellas quien acelera es un **campo eléctrico** —el de unas cavidades conectadas a una tensión alterna— y quien curva la trayectoria es un **campo magnético**.

En el **acelerador lineal** las partículas van en línea recta por un tubo de vacío y atraviesan una fila de cavidades: la tensión cambia de signo en el momento justo y reciben un empujón en cada hueco, pasando una sola vez por cada uno, así que la energía final la limita la longitud del tubo. En el **acelerador circular** (ciclotrón, sincrotrón, LHC) unos imanes curvan la trayectoria y la obligan a dar vueltas, de modo que pasa muchas veces por las mismas cavidades y suma energía en cada vuelta. El **LHC** del CERN es un anillo de 27 km de circunferencia que hace chocar haces de protones; en él se descubrió el Higgs.

Error típico. Decir que el campo magnético acelera las partículas. La fuerza magnética es siempre perpendicular a la velocidad, así que **no hace trabajo y no cambia la energía**: solo curva la trayectoria. En un acelerador circular los imanes guían y las cavidades empujan.

Ejercicios - Sección 4.4

Diez ejercicios tipo PAU: razonar si una afirmación es verdadera o falsa, clasificar partículas y describir. En rojo el método.

1. Razona si son verdaderas o falsas: (a) "Los protones y neutrones son partículas elementales, es decir, no tienen una estructura interna conocida". (b) "El electrón sí es una partícula elemental".

Elemental significa "sin partes conocidas": hay que mirar si la partícula está formada por quarks o no.

(a) **FALSA.** Protón (u u d) y neutrón (u d d) están formados por tres quarks cada uno. Son hadrones, y en concreto bariones: sí tienen estructura interna, y se conoce.

(b) **VERDADERA.** El electrón es un leptón, y los leptones son fermiones elementales del modelo estándar: no están formados por nada más pequeño.

El apartado (a) está copiado de la PAU de Murcia de 2025 ordinaria, opción 4-B.

Resultado final: (a) Falsa: son bariones formados por tres quarks. (b) Verdadera: el electrón es un leptón elemental.

2. Los quarks u, c y t tienen carga $+2/3$ y los quarks d, s y b tienen carga $-1/3$, en unidades de la carga del electrón. Comprueba la carga del protón (u u d) y la del neutrón (u d d), y calcula la del antiprotón y la de un mesón formado por un quark u y un antiquark d.

Se suman las cargas de los quarks de cada partícula. Un antiquark tiene la carga del quark cambiada de signo.

Protón (u u d): $q = +2/3 + 2/3 - 1/3 = (2 + 2 - 1)/3 = 3/3 = +1$

Neutrón (u d d): $q = +2/3 - 1/3 - 1/3 = (2 - 1 - 1)/3 = 0/3 = 0$

Antiprotón: los tres quarks se cambian por sus antiquarks, o sea que se le cambia el signo a las tres cargas.

q = $-2/3 - 2/3 + 1/3 = (-2 - 2 + 1)/3 = -3/3 = -1$

Mesón de un quark u con un antiquark d: el antiquark d tiene carga $+1/3$.

q = $+2/3 + 1/3 = 3/3 = +1$

Las cargas fraccionarias siempre se compensan hasta dar un entero: nunca se ha medido una carga libre que no sea múltiplo de la del electrón.

Resultado final: Protón +1 | Neutrón 0 | Antiprotón -1 | Mesón (u con antiquark d) +1

3. Para cada una de estas partículas indica si es un fermión o un bosón, y si es un constituyente de la materia o un mediador de interacciones: electrón, fotón, bosón W, quark u, gluón y neutrino electrónico.

Lo que decide si es fermión o bosón es el espín: semientero o entero. Las seis de esta lista son elementales, y en las elementales las dos respuestas coinciden: las que forman materia tienen espín semientero y las que median tienen espín entero. Cuidado con generalizarlo, que en un mesón deja de valer.

Electrón - fermión, constituyente. Leptón cargado de la primera familia.

Fotón - bosón, mediador de la interacción electromagnética.

Bosón W - bosón, mediador de la interacción nuclear débil, con el Z.

Quark u - fermión, constituyente. Con el quark d forma protones y neutrones.

Gluón - bosón, mediador de la interacción nuclear fuerte entre quarks.

Neutrino electrónico - fermión, constituyente. Leptón neutro de la primera familia.

Los cuatro primeros son los que pedía la PAU de Murcia de 2026 extraordinaria, opción 4-B.

Resultado final: Fermiones y materia: electrón, quark u y neutrino electrónico. Bosones y mediadores: fotón, bosón W y gluón.

4. Describe brevemente las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza y compara su alcance y su intensidad. Razona después por qué, siendo la gravedad la más débil de las cuatro, es la que domina el movimiento de los planetas.

La tabla se aprende de memoria; la segunda parte es un razonamiento y hay que separar la intensidad del alcance y de si la fuente se cancela o no.

1.º **Nuclear fuerte:** une los quarks. Gluón. Alcance $\approx 10^{-15}$ m. Es la de referencia, intensidad 1.

2.º **Electromagnética:** entre cargas. Fotón. Alcance infinito. Intensidad $\approx 10^{-2}$.

3.º **Nuclear débil:** desintegración beta. Bosones W y Z. Alcance $\approx 10^{-18}$ m. Intensidad $\approx 10^{-5}$.

4.º **Gravitatoria:** sobre toda la masa. Gravitón, sin detectar. Alcance infinito. Intensidad $\approx 10^{-39}$.

A escala planetaria las dos nucleares ni existen, porque no salen del núcleo. Quedan la electromagnética y la gravitatoria, las dos de alcance infinito.

La electromagnética es más intensa, pero hay cargas de los dos signos y en un cuerpo grande se compensan: un planeta es **eléctricamente neutro**. La masa solo tiene un signo, así que la gravedad de todas sus partículas **se suma**.

La primera mitad es la pregunta 4 a) de la PAU de Andalucía de junio de 2017.

Resultado final: Fuerte > electromagnética > débil > gravitatoria. La gravedad domina a gran escala porque su alcance es infinito y la masa no se cancela.

5. Razona si son verdaderas o falsas: (a) "La interacción electromagnética está mediada por el gluón". (b) "Los bosones W y Z tienen mucha masa, y por eso la interacción débil es de corto alcance". (c) "El bosón de Higgs media la interacción gravitatoria".

Cada una se contesta emparejando bosón e interacción. La (b) pide además la relación entre masa del mediador y alcance, que es la parte que hay que razonar.

(a) **FALSA**. El gluón media la interacción nuclear **fuerte**, la que une los quarks. La electromagnética la media el **fotón**.

(b) **VERDADERA.** Pesan unos 80 y 91 GeV/c^2 , entre 85 y 100 veces la masa del protón. Un mediador tan pesado solo existe un instante brevísimo y no llega lejos: el alcance de la débil es de unos 10^{-18} m. Al revés, el fotón sin masa da alcance infinito.

(c) **FALSA.** El Higgs no media ninguna de las cuatro: es la partícula del campo que da masa a las demás. La gravedad la mediaría el gravitón, que ni está detectado ni forma parte del modelo estándar.

Resultado final: (a) Falsa, es el fotón. (b) Verdadera. (c) Falsa: el Higgs da masa, no media la gravedad.

6. ¿Cuáles son las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza? Razona si el modelo estándar de la física de partículas engloba esas cuatro interacciones.

Teoría pura: se contesta con la frase de la especificación de la PAU, añadiendo el motivo y no solo el nombre de la interacción que falta.

Las cuatro son la **nuclear fuerte**, la **electromagnética**, la **nuclear débil** y la **gravitatoria**.

No las engloba todas. El modelo estándar describe con un mismo formalismo solo **tres**: la fuerte, la electromagnética y la débil. Las dos últimas están además unificadas entre sí en la **teoría electrodébil**.

Deja fuera la **gravitatoria**: la relatividad general, que es la teoría que la describe, no encaja con la descripción cuántica de las otras tres, y el gravitón no se ha detectado nunca.

Es la pregunta 7 de la PAU de Extremadura de 2025 ordinaria, con 1,25 puntos por apartado.

Resultado final: Fuerte, electromagnética, débil y gravitatoria. El modelo estándar solo engloba las tres primeras: la gravedad se queda fuera.

7. Un neutrón libre se desintegra dando un protón, un electrón y un antineutrino. Explica el proceso a nivel de quarks: qué quark cambia, en cuál se convierte, qué interacción interviene y qué bosón la media. Comprueba que la carga se conserva.

Se escriben las dos composiciones en quarks y se comparan. Cambiar un quark por otro de distinto tipo solo lo puede hacer la interacción débil.

Neutrón $u d d$, protón $u u d$: uno de los quarks **d** se ha convertido en un quark **u**. Eso cambia el tipo (el "sabor") del quark, y solo lo hace la **interacción nuclear débil**, mediada por un bosón W^- que se desintegra enseguida en el electrón y el antineutrino que salen.

$d \rightarrow u + W^- \mid W^- \rightarrow e^- + \text{antineutrino}$

Conservación de la carga, contando quark a quark:

Antes: $+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$ | Después: $(+1) + (-1) = 0$

También cuadra el número de quarks: siguen siendo tres, así que el protón es barión igual que lo era el neutrón.

Resultado final: Un quark d se convierte en un quark u por la interacción débil, mediada por un bosón W^- . La carga se conserva: 0 antes y 0 después.

8. Te dan la composición en quarks de cuatro partículas: (a) u u d, (b) un quark u con un antiquark d, (c) u d s, (d) los antiquarks anti-u, anti-u y anti-d. Di de cada una si es un barión o un mesón, si es fermión o bosón, y calcula su carga.

Se cuentan los quarks: tres quarks son un barión y por tanto un fermión; un quark con un antiquark es un mesón y por tanto un bosón.

(a) u u d - tres quarks: **barión** y **fermión**. Es el protón. $q = +2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$

(b) u con antiquark d - un quark y un antiquark: **mesón** y **bosón**. El antiquark d tiene carga $+1/3$. $q = +2/3 + 1/3 = +1$

(c) u d s - tres quarks: **barión** y **fermión**. Lleva un quark de la segunda familia, así que es inestable. $q = +2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

(d) anti-u, anti-u, anti-d - tres antiquarks: **antibarión**, también **fermión**. Es el antiprotón. $q = -2/3 - 2/3 + 1/3 = -1$

Las cuatro son hadrones. Ojo con el mesón: es un hadrón, pero no es un fermión.

Resultado final: (a) barión, fermión, +1 | (b) mesón, bosón, +1 | (c) barión, fermión, 0 | (d) antibarión, fermión, -1

9. La materia ordinaria (átomos, moléculas, tu propio cuerpo) está hecha únicamente con partículas de la primera familia. Explica por qué, y di qué cuatro partículas son.

La clave es la estabilidad: lo más pesado se desintegra en lo más ligero, y al final solo sobrevive lo más ligero de cada tipo.

Las tres familias repiten el mismo esquema y lo que cambia es la **masa**, que en los quarks y los leptones cargados va creciendo.

Los quarks y los leptones cargados de la segunda y la tercera familia son **inestables**: por la interacción débil se desintegran en otras más ligeras, y la cadena termina siempre en las de la primera, que ya no tiene nada más ligero en lo que convertirse.

Las cuatro son el quark **u**, el quark **d**, el **electrón** y el **neutrino electrónico**. Con u y d se construyen protones y neutrones, y con protones, neutrones y electrones, todos los átomos.

Resultado final: Los quarks y los leptones cargados de las familias 2 y 3 son inestables. Las cuatro son el quark u, el quark d, el electrón y el neutrino electrónico.

10. Describe el funcionamiento elemental de un acelerador lineal y de uno circular. ¿Por qué hace falta tanta energía? ¿Acelera el campo magnético a las partículas?

Tres preguntas seguidas: la primera es descriptiva, la segunda sale de De Broglie y la tercera tiene trampa.

Lineal. Tubo de vacío recto con una fila de cavidades a tensión alterna: la tensión cambia de signo en el momento justo y la partícula recibe un empujón en cada hueco, pasando una sola vez por cada uno. La energía final la limita la longitud del tubo. **Circular** (ciclotrón, sincrotrón, LHC): unos imanes la obligan a dar vueltas, así que pasa muchas veces por las mismas cavidades y suma energía en cada una.

Por qué hace falta energía. Para "ver" algo hace falta una longitud de onda de su tamaño o menor, y por De Broglie $\lambda = h/p$.

No, el campo magnético no acelera. Su fuerza es perpendicular a la velocidad: no hace trabajo, solo curva. Acelera el campo eléctrico de las cavidades.

La especificación de la PAU pide justo esto: "funcionamiento elemental de los aceleradores lineales y circulares".

Resultado final: El lineal acelera de una pasada; el circular, en cada vuelta.