



## Hadrón

Un **hadrón** (del griego ἄδρός, *hadrós*, "denso") es una **partícula subatómica** que experimenta la **interacción nuclear fuerte**. Puede ser una **partícula elemental** o una partícula compuesta. Los **gluones**, **neutrones** y **protones** son ejemplos de hadrones.

Como todas las **partículas subatómicas**, los hadrones tienen **números cuánticos** correspondientes a las representaciones del **grupo de Poincaré**:  $J^{PC}(m)$ , donde  $J$  es el **espín**,  $P$  la **paridad**,  $C$  la **paridad C**, y  $m$  la masa. Además pueden llevar números cuánticos de **sabor** como el **isospín**, **extrañeza**, etc.

Los hadrones se pueden subdividir en dos clases:

### Bariones

Son **fermiones** y siempre llevan un número cuántico conservado llamado **número bariónico** ( $B$ ) que es igual a 1 para los **nucleones**.

### Mesones

Son **bosones** con  $B = 0$ .

La mayor parte de los hadrones pueden ser clasificados por el modelo de quarks, que postula que todos los números cuánticos de los bariones se derivan de aquellos de los **quarks de valencia**. Para un barión estos son tres quarks, y para un mesón estos son un par quark-antiquark.

Cada quark es entonces un fermión con  $B = 1/3$ . Los estados excitados bariónicos o mesónicos son conocidos como **resonancias**. Cada estado fundamental hadrónico puede tener muchos estados excitados, y cientos han sido observados en experimentos con partículas. Las resonancias decaen extremadamente rápido (aproximadamente en  $10^{-24}$  s) por las interacciones fuertes.

Los mesones que se encuentran fuera de la clasificación según el modelo de quarks se denominan **mesones exóticos**. Estos incluyen glueballs (bolas de pegamento), mesones

híbridos y tetraquarks. Los únicos bariones que están fuera del modelo de quarks a la fecha son los [pentaquarks](#), pero la evidencia de su existencia es poco clara desde [2005](#).

Todos los hadrones son excitaciones de una partícula de la teoría básica de la [interacción fuerte](#), llamada [cromodinámica cuántica](#). Debido a una propiedad llamada [confinamiento](#) que esta teoría experimenta a energías por debajo de la [escala QCD](#), estas excitaciones no son [quarks](#) y [gluones](#), que son los campos básicos, sino los hadrones que son compuestos, y no llevan [carga de color](#).

En otras fases de [materia QCD](#) los hadrones pueden desaparecer. Por ejemplo, a temperatura y presión muy altas, a menos que haya suficiente cantidad de sabores muy masivos de quarks, la teoría QCD predice que los quarks y gluones van a interactuar débilmente y ya no estarán confinados. Esta propiedad, que se conoce como [libertad asintótica](#), ha sido experimentalmente confirmada a las escalas de energía de entre un GeV y un TeV. Pero esta teoría pronto se pondrá a prueba ya que el 10 de septiembre de 2008 se puso en funcionamiento un acelerador de partículas o hadrones (el [LHC](#), gran colisionador de hadrones, por sus iniciales en inglés), que mide 27 km de circunferencia, situado en el límite entre Francia y Suiza, cerca de la ciudad de Ginebra, y ha costado 3.700 millones de Euros (unos 6.000 millones de dólares según algunas fuentes).

## Escala de energía

En [física](#), la **escala de energía** es un valor particular de la [energía](#) determinado con la precisión de un orden (o de algunos órdenes) de magnitud. Diversos fenómenos ocurren en diversas escalas de la energía. Las energías típicas de todos los fenómenos que ocurran en la misma escala de la energía son comparables.

La observación que diversos fenómenos se deben organizar según la escala de la energía (o, equivalentemente, la [escala de longitud](#)) es una de las ideas básicas del [grupo de renormalización](#).

Por ejemplo, la [escala](#) de QCD (energía) es de alrededor de 150 [MeV](#), y las masas de partículas que interactúan fuertemente (tales como el [protón](#)) son groseramente comparables. La [escala](#) de energía electrodébil es más alta, groseramente 250 [GeV](#). La [escala de Planck](#) es mucho más alta aun - unos  $10^{19}$  GeV.

# Fermión

Diferencia entre fermiones y bosones.

Un **fermión**, llamado así en honor al célebre científico italiano [Enrico Fermi](#), es uno de los dos tipos básicos de partículas que existen en la naturaleza (el otro tipo son los [bosones](#)). Los fermiones se caracterizan por tener [spin](#) semi-entero ( $1/2, 3/2, \dots$ ).

En el [modelo estándar](#) existen dos tipos de fermiones fundamentales, los [quarks](#) y los [leptones](#). En el [modelo estándar de física de partículas](#) los fermiones se consideran los constituyentes básicos de la materia, que interactúan entre ellos vía [bosones](#) de [gauge](#).

## Descripción cuántica

En la descripción de la [mecánica cuántica](#) no relativista las [funciones de onda](#) de los fermiones son [antisimétricas](#), lo cual se corresponde con el hecho de que obedecen la [estadística de Fermi-Dirac](#) verificando, por tanto, el [principio de exclusión de Pauli](#). Esta propiedad implica, que dos fermiones no pueden ocupar el mismo estado cuántico al mismo tiempo.

Todas las partículas elementales "observadas" son fermiones o bosones. Una partícula compuesta, formada por varias elementales, puede ser también un fermión o un bosón dependiendo sólo del número de fermiones que contenga:

- Las partículas compuestas que contienen un número par de fermiones son bosones. Este es el caso, por ejemplo, de los [mesones](#) o del [núcleo](#) de [carbono-12](#).
- Las partículas compuestas que contienen un número impar de fermiones son fermiones. Este es el caso, por ejemplo, de los [bariones](#) o del [núcleo](#) de [carbono-13](#).

Por el contrario el número de bosones que contenga la partícula es irrelevante de cara a determinar su posible naturaleza fermiónica o bosónica.

Por supuesto, el comportamiento fermiónico o bosónico de las partículas compuestas solo se aprecia si observamos el sistema a gran distancia en comparación con la escala de la partícula. Si observamos a escalas similares entonces la contribución de la estructura espacial empieza a ser importante. Por ejemplo, dos átomos de [helio-4](#) a pesar de ser bosones no pueden ocupar el mismo espacio si este es comparable al tamaño de la estructura de la partícula en cuestión. Así, el helio líquido tiene una densidad finita comparable a la densidad de la materia [líquida](#) ordinaria.

# Fermiones elementales

Los fermiones elementales se dividen en dos grupos:

- **quarks**, que forman las partículas del núcleo atómico, y que son capaces de experimentar la **interacción nuclear fuerte**.
- **leptones**, entre los que se encuentran los electrones y otras que interactúan básicamente mediante la **interacción electrodébil**.

La materia ordinaria está básicamente formada por fermiones y a ellos debe prácticamente toda su **masa**. Los átomos están básicamente formados por quarks que a su vez forman los **protones** y los **neutrones** del núcleo atómico y también de **leptones**, los **electrones**. El **principio de exclusión de Pauli** obedecido por los fermiones es el responsable de la "impenetrabilidad" de la materia ordinaria, que hace que esta sea una substancia extensa. El principio de Pauli también es responsable de la estabilidad de los **orbitales atómicos** haciendo que la complejidad química sea posible. También es el responsable de la presión ejercida por la **materia degenerada**.

Los fermiones elementales también pueden ser clasificados en:

- **fermiones de Majorana**, cuando son estados propios del operador de **conjugación de carga** y por tanto dos fermiones de ese tipo pueden aniquilarse mutuamente.
- **fermiones de Dirac**, cuando no son estados propios del operador de conjugación de carga, y por tanto, tiene una carga eléctrica de signo contrario a la de su correspondiente antipartícula

# Espacio-tiempo de Minkowski

En **física matemática**, el **espacio de Minkowski** (o **espacio-tiempo de Minkowski**) es una **variedad Lorentziana** de cuatro dimensiones y curvatura nula, usada para describir los fenómenos físicos en el marco de la **teoría especial de la relatividad** de **Einstein**.

En el espacio de Minkowski pueden distinguirse tres dimensiones espaciales ordinarias y una dimensión temporal adicional, de tal manera que todas juntas forman una **4-variedad** y así representar al **espacio-tiempo**.

## Definición

El espacio-tiempo de Minkowski es una variedad lorentziana de **curvatura** nula e isomorfa a  $\mathcal{M}_0 = (\mathbb{R}^4, \eta)$  donde el **tensor métrico** puede llegar a escribirse en un sistema de **coordenadas cartesianas** como:

$$(1) \eta = -dx^0 \otimes dx^0 + dx^1 \otimes dx^1 + dx^2 \otimes dx^2 + dx^3 \otimes dx^3$$

O en forma **matricial** explícita, respecto a la misma base:

$$(2) (\eta_{\alpha\beta}) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

De todas maneras es común renombrar a las coordenadas en términos de las coordenadas espaciales y el tiempo usados en la mecánica newtoniana es decir:

$(x^0, x^1, x^2, x^3) \mapsto (ct, x, y, z)$  con lo cual el tensor métrico se escribe simplemente como:

$$(3) \eta = -c^2 dt \otimes dt + dx \otimes dx + dy \otimes dy + dz \otimes dz$$

## Propiedades

### Contenido material

El **tensor de curvatura** de Riemann del espacio-tiempo de Minkowski es idénticamente nulo, razón por la cual se dice que el espacio-tiempo es plano. Así el resto de tensores y escalares de curvatura resultan nulos, siendo también nulo el tensor de Einstein que es igual al contenido material. Por tanto, el espacio-tiempo de Minkowski representa un **universo vacío**.

Físicamente el espacio-tiempo de Minkowski puede emplearse como una buena representación local del espacio-tiempo real de regiones razonablemente pequeñas y muy alejadas del resto de materia.

### Geodésicas

Cualquier línea **recta** constituye una **geodésica**, ya que el tensor de curvatura se anula. Tomando coordenadas cartesianas las geodésicas vienen dadas simplemente por:

$$(5) \quad \ddot{t} = 0 \quad \ddot{x} = 0 \quad \ddot{y} = 0 \quad \ddot{z} = 0$$

Que corresponden a líneas rectas:

$$(6) \quad t(\tau) = t_0 + \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad x(\tau) = x_0 + \frac{v_x \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y(\tau) = y_0 + \frac{v_y \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad z(\tau) = z_0 + \frac{v_z \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Donde:

$(v_x, v_y, v_z)$  son las componentes de la velocidad de una partícula.

$\tau$ , es el tiempo propio de la partícula que viaja según la geodésica.

## Grupo de isometría

El grupo de isometría del espacio-tiempo de Minkowski es precisamente el [grupo de Poincaré](#), que admite diversos subgrupos entre ellos:

- El [grupo de Lorentz](#)
- El [grupo de rotaciones](#)
- El **grupo de traslaciones** que es isomorfo a  $\mathbb{R}^4$ , en particular cualquier campo vectorial constante es un vector de Killing, que genera un [grupo uniparamétrico de isometrías](#).

## Representación pseudoeuclídea

El espacio-tiempo de Minkowski admite un tratamiento pseudoeuclídeo, eso significa que bajo la aplicación sobre los complejos dada por:

$$X = (ct, x, y, z) \mapsto \tilde{X} = (ict, x, y, z)$$

Y tratando las coordenadas resultantes como vectores de un espacio euclídeo de cuatro dimensiones se reproducen los resultados geométricos típicos del espacio-tiempo de Minkowski. Si en esa representación compleja se trata todo escalar se construye a partir del producto escalar euclídeo las magnitudes escalares de la teoría resultan invariantes. Además se cumple que:

$$(7) \quad U^\alpha V_\alpha = \tilde{U} \cdot \tilde{V} \quad \forall U, V \in TM_0$$

Es más todos los [cuadrivectores](#) y cuadritensores antisimétricos de segundo orden admiten una representación compleja de ese tipo, con similares propiedades de invariancia a (4):

---

## Números Cuánticos

Los números cuánticos son valores numéricos que nos indican las características de los electrones de los átomos, esto está basado desde luego en la teoría atómica de Neils Bohr que es el modelo atómico más aceptado y utilizado en los últimos tiempos.

Los números atómicos más importantes son cuatro:

- Número Cuántico Principal.
- Número Cuántico Secundario.
- Número Cuántico Magnético.
- Número Cuántico de Spin.

### Número Cuántico Principal (n)

El número cuántico principal nos indica en que nivel se encuentra el electrón, este valor toma valores enteros del 1 al 7.

### Número Cuántico Secundario (d)

Este número cuántico nos indica en que subnivel se encuentra el electrón, este número cuántico toma valores desde 0 hasta (n - 1), según el modelo atómico de Bohr - Sommerfeld existen además de los niveles u orbitas circulares, ciertas órbitas elípticas denominados subniveles. Según el número atómico tenemos los números:

- $l = 0$  **s** sharp
- $l = 1$  **p** principal
- $l = 2$  **d** diffuse
- $l = 3$  **f** fundamental
- $l = 4$  **g**
- $l = 5$  **h**
- $l = 6$  **i**

## Número Cuántico Magnético (m)

El número cuántico magnético nos indica las orientaciones de los orbitales magnéticos en el espacio, los orbitales magnéticos son las regiones de la nube electrónica donde se encuentran los electrones, el número magnético depende de  $l$  y toma valores desde  $-l$  hasta  $l$ .

## Número Cuántico de Spin (s)

El número cuántico de spin nos indica el sentido de rotación en el propio eje de los electrones en un orbital, este número toma los valores de  $-1/2$  y de  $1/2$ .

De esta manera entonces se puede determinar el lugar donde se encuentra un electrón determinado, y los niveles de energía del mismo, esto es importante en el estudio de las radiaciones, la energía de ionización, así como de la energía liberada por un átomo en una reacción.

## Principio de Exclusión de Pauli

El mismo dice "*En un mismo átomo no puede existir dos electrones que tengan los mismos números cuánticos*" de esta manera podemos entonces afirmar que en un mismo orbital no puede haber más de dos electrones y que los mismos deben tener distinto número de spin.

## Regla de Hund

Cuando se llena orbitales con un mismo nivel de energía o lo que es lo mismo que se encuentran en un mismo subnivel se debe empezar llenando la mitad del subnivel con electrones de spin  $+1/2$  para luego proceder a llenar los subniveles con electrones de spin contrario ( $-1/2$ ).