

## Ciencia, Humanismo y Sociedad

### Seminarios sobre Ciencia

Historias del quantum  
Entender la Física Cuántica  
Seminario 6-I  
¿Partículas o campos?

ATENEO de Badajoz

Francisco J. Olivares del Valle  
Lunes, 20 de Enero de 2025  
19:30 h

Evolución de la Física en el s. XIX hasta Planck en 1900

Descubrimiento de  $h$  y sus múltiples facetas e implicaciones

Protagonistas principales de la Mecánica Cuántica y sus relaciones

Aspectos formales y operacionales de la Mecánica Cuántica

Soluciones de la Ecuación de Schrödinger  $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x) = E \Psi(x)$

**INTERPRETACIÓN RESULTADOS**

¿Partículas o campos?

**Fotones (electrones) que se autointerfieren y fotones (electrones) que ocupan todo el espacio**

### ORÍGENES

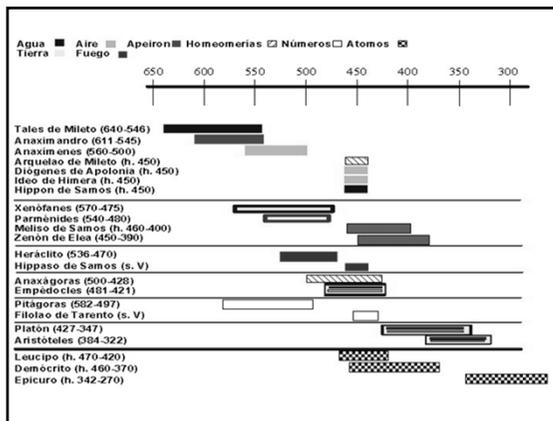
**Dicotomía sustancial:**

a) La materia **ES** discreta, está formada por porciones indivisibles (á-tomos)

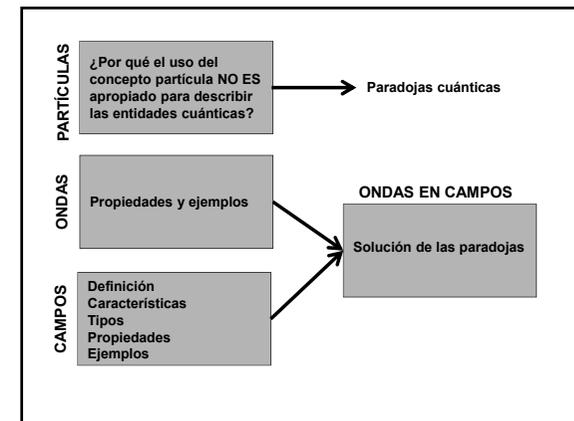
Leucipo, Demócrito, Epicuro, Lucrecio,...,Newton,...Boltzman

b) La materia **NO ES** discreta, está formada por porciones infinitamente divisibles de una o más "sustancias primordiales" (fuego, aire, agua, tierra, ...)

Milesios, Empédocles, Platón, Aristóteles,...,Einstein,....



### ARISTÓTELES (384 - 322 a. C.)



**PARTÍCULAS - Localidad, exclusión e indiscernibilidad**

1. UNA *partícula* es tan LOCAL que no puede, SIMULTÁNEAMENTE, ocupar DOS puntos del espacio separados a una cierta distancia. La partícula es un ente LOCAL (con una PERIFERIA definida).

2. DOS partículas, sean indiscernibles o no, NO PODRÁN OCUPAR nunca, SIMULTÁNEAMENTE, el mismo lugar del espacio. Son entes EXCLUYENTES, NO interpenetrables.

Intensidad :  $A$    Longitud de la onda:  $\lambda$    Frecuencia:  $\nu$    Periodo:  $\tau$

## ONDAS

Una ONDA es una perturbación o variación o cambio que se PROPAGA en un MEDIO soporte (como el agua o el aire, p.e.), TRANSPORTANDO energía (intensidad) de un lugar a otro SIN que haya TRANSPORTE DE MATERIA.

La LUZ y las ondas electromagnéticas SE PROPAGAN en el vacío sin necesidad de un MEDIO soporte, TRANSPORTANDO energía de un lugar a otro

Las ONDAS pueden clasificarse en diferentes TIPOS:

1. *Mecánicas*: Necesitan un medio material para propagarse, como las ondas sonoras (que viajan a través del aire) o las ondas en el agua.
2. *Electromagnéticas*: No requieren un medio material y pueden propagarse en el vacío, como la luz, las ondas de radio o los rayos X.
3. *Gravitacionales*: Son perturbaciones que alteran la geometría propia del espacio-tiempo y aunque es común representarlas viajando en el vacío, técnicamente no podemos afirmar que se desplacen por ningún espacio, sino que en sí mismas son alteraciones del espacio-tiempo producidas a consecuencia de una perturbación.

Además, las ondas pueden ser **transversales** (como las ondas en una cuerda) o **longitudinales** (como el sonido), dependiendo de la dirección en la que vibran los constituyentes del medio, respecto a la dirección de propagación de la perturbación.

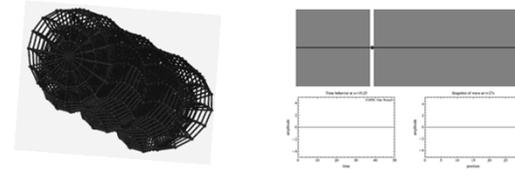
onda viajera correspondiente a un sonido puro

Ondas confinadas en un recinto

pulsos ondulatorios en una cuerda

©2014, Jan Rusch

### Onda material n-dimensional



Una **perturbación** se propaga en un medio material  
El medio material es elástico y **sus constituyentes mantienen su disposición relativa**  
**No hay transferencia de materia**  
Las variables (*tiempo* y *espacio*) de las que depende la **elongación** de la onda (**amplitud**) **no modifican su naturaleza ni propiedades**

$$\Psi = A \cdot \sin(\omega t \pm k \cdot \text{Esp}) \pm A$$

pulsación      ondulación

### Propiedades de las ondas

|                   | Reflexión  | Refracción  | Difracción  | Polarización   | Absorción  | Dispersión  |
|-------------------|--|---|---|--|--|---|
| <b>Definición</b> | La onda choca con un obstáculo y regresa al mismo medio. | La onda pasa de un medio a otro cambiando de velocidad. | Las ondas pasan por un orificio y después, se desplazan en todas las direcciones. | "Filtrado" de las ondas observando o utilizando solo las que vibran en un plano determinado. | Las ondas chocan contra un objeto que absorbe parte de su energía. | Un frente de ondas se filtra separando las ondas según su frecuencia. |
| <b>Ejemplos</b>   | La imagen en un espejo<br>El eco.                        | Imágenes bajo el agua.<br>Las lentes.                   | Una señal de WIFI.<br>Escuchar del otro lado de la pared.                         | Láser.<br>Fibra óptica.<br>Filtro UV.  | Aislantes acústicos.<br>Celdas fotovoltaicas.                      | Arco iris.<br>Espectros de emisión.                                   |

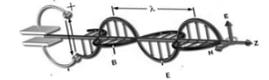


### Condición excluyente para las ondas mecánicas (materia):

Si **NO** hay un medio material (soporte) **nada se perturba** y, por tanto, **la perturbación no se propaga: NO SE PRODUCE UNA ONDA**

Se trata de un movimiento **EN** la materia y **no DE** la materia: **se propaga (transmite) ENERGÍA y NO MATERIA**

La luz y las **ondas electromagnéticas NO NECESITAN UN MEDIO SOPORTE**

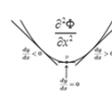


### ECUACIÓN DE ONDAS y soluciones

La **AMPLITUD** (o altura: intensidad) de la onda es una de las propiedades más características y es **función dependiente de las coordenadas espaciales y el tiempo**.  $\Phi = \Phi(x,y,z,t)$   
Su evolución (o **PROPAGACIÓN**) está regida por una **ecuación diferencial** que se conoce como **ECUACIÓN DE ONDAS** y que, en el caso de los medios continuos, representa un papel equivalente al que desempeñan las ecuaciones de **Newton, Lagrange o Hamilton** en el caso de la **Mecánica Clásica** de partículas.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$$

curvatura



Las **soluciones** de esta **ecuación de ondas** nos proporciona la **FORMA ANALÍTICA** de la amplitud,  $\Phi(x,y,z,t)$ , en **función de variables espacio-temporales**.  
Una vez que se conoce la **ECUACIÓN DE ONDAS** y las **CONDICIONES INICIALES**, todo problema asociado a la propagación de una perturbación en un medio **isótropo** queda reducido a encontrar **las posibles funciones  $\Phi(x,y,z,t)$**  que la verifican.  
Estas funciones se conocen con el nombre de **SOLUCIONES** o **FUNCIONES PROPIAS DE LA ECUACIÓN DE ONDAS**.

### Soluciones de la ecuación de ondas

$$\Phi(\vec{r}, t) = A \cdot e^{-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} + B \cdot e^{i(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

Onda reflejada      Onda incidente

Para una dimensión

$$\Phi(x, t) = \Phi_0 \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \nu t \right) \right] = \Phi_0 \sin \left( \omega t - kx + \frac{\pi}{2} \right)$$

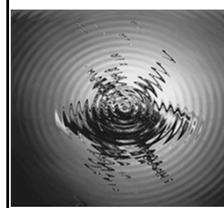
Amplitud = elongación máxima

Parte temporal:  $\cos(\alpha) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$

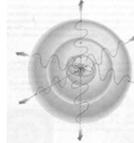
Parte espacial

$v = \frac{\lambda}{\tau} = \lambda \nu$        $\omega = 2\pi \nu$  Pulsación (nº de ciclos/tiempo)       $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  Ondulación (nº de ciclos/longitud)

### Ejemplos

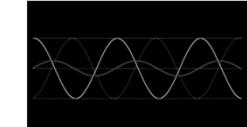


Onda esférica

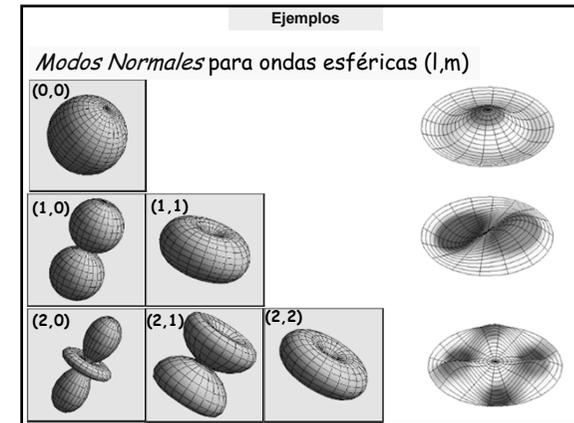
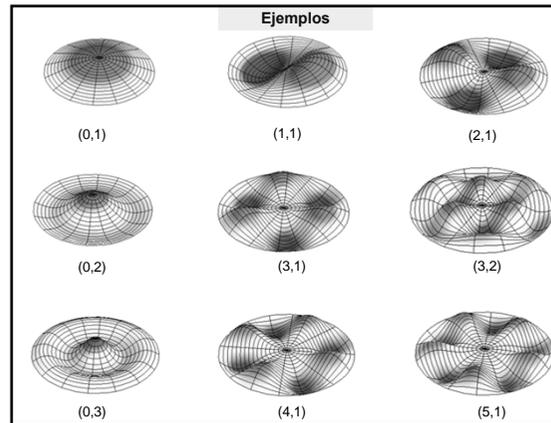
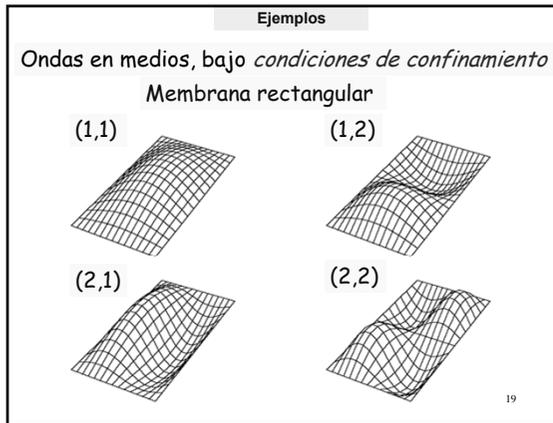


Sólo se propaga la perturbación, **NO** la materia

Principio de superposición



$$\Phi(\vec{r}, t) = c_1 \Phi_1(\vec{r}, t) + c_2 \Phi_2(\vec{r}, t) + \dots = \sum c_i \Phi_i(\vec{r}, t)$$



**Otras propiedades de las ondas**

- No se trata de un fenómeno **LOCAL**, sino de un **FENÓMENO EXTENDIDO** (que ocupa todo el espacio).
- Cuando hay **pérdidas** de energía, el fenómeno se califica de **dissipativo**: la onda propagada va perdiendo intensidad (amplitud)
- Cuando no hay disipación de energía (**conservativo**) las ondas son **estacionarias** (modos normales):

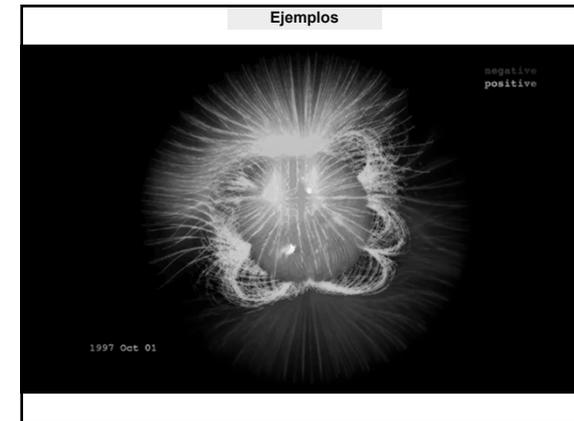
La **AMPLITUD** es constante, los **NODOS** no varían de posición y siempre se cumple que  $\lambda = L/n$  (con  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ )

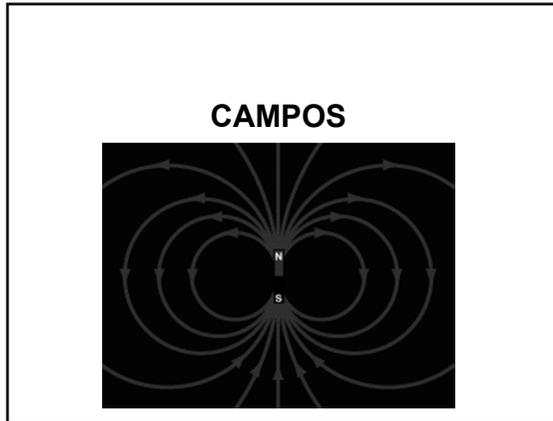
Si hay restricciones a la libre propagación de la onda (**onda confinada**) y el sistema es **CONSERVATIVO** (**no pierde energía**), la onda satisface la condición (caso monodimensional):

$$L = n \cdot \lambda$$

En donde L hace referencia al **espacio en el que se propaga la onda**,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $n$  un **número entero** (0, 1, 2, ...).

Así, en estas condiciones, **SÓLO SON POSIBLES** determinados valores para la longitud de onda  $\lambda$ .  
 O lo que es lo mismo, **SÓLO PUEDEN PROPAGARSE DETERMINADOS VALORES DE ENERGÍA.**





**Campo:** Se dice que en una región del espacio existe un CAMPO asociado a una propiedad física, si se puede asignar un valor de dicha propiedad a **TODOS** los puntos de la región espacial, en cada instante.

Líneas imaginarias de igual valor

El campo eléctrico apunta en la misma dirección que la fuerza eléctrica sobre una carga positiva.

Q carga que genera el campo      Carga de prueba

### Campo tensorial

Orden 0: escalar  
 Orden 1: vector (n)  
 Orden 2: tensor (n x n)  
 Orden 3: tensor (n x n x n)

-----

$$T = \begin{pmatrix} X_{111} & X_{112} & X_{113} & X_{114} & X_{115} & X_{116} \\ X_{121} & X_{221} & X_{222} & X_{223} & X_{224} & X_{225} \\ X_{231} & X_{232} & X_{233} & X_{234} & X_{235} & X_{236} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{711} & X_{712} & X_{713} & X_{714} & X_{715} & X_{716} \end{pmatrix}$$

-----

Time (0), velocity (1), polarizability (2), gradient moment of inertia (3), ...

160 años después de Newton, **Michael Faraday (1791-1867)**, introdujo el **concepto moderno de los CAMPOS como PROPIEDADES DEL ESPACIO que tienen consecuencias físicas**.

Argumentó **EN CONTRA** de la *acción a distancia*, proponiendo en cambio que las **INTERACCIONES** ocurren a través de "**líneas de fuerza**" que llenan el espacio y que los **ÁTOMOS** son meras convergencias de estas líneas de fuerza.

Pensaba que la **interacción a distancia NO PUEDE JUSTIFICARSE** por medio de "**INTERACCIONES ELECTROMAGNÉTICAS INSTANTÁNEAS**".

Es decir, que la **interacción a distancia debería producirse GRADUALMENTE**, de un cuerpo al siguiente, lo cual sería la **evidencia** de que **ALGÚN PROCESO FÍSICO OCURRE EN EL ESPACIO INTERMEDIO**.

Consideró que **las líneas de fuerza SON entidades físicas reales que llenan el espacio y pueden MOVERSE, EXPANDIRSE y CONTRAERSE**.

Y concluyó, finalmente, que las **líneas de fuerza magnéticas**, en particular, son **CONDICIONES FÍSICAS** del "**mero espacio**" (es decir, espacio que **NO CONTIENE SUSTANCIA MATERIAL, vacío**).

Hoy en día, esta descripción de los **CAMPOS**, como "**CONDICIONES DEL ESPACIO**", se admite, en general.

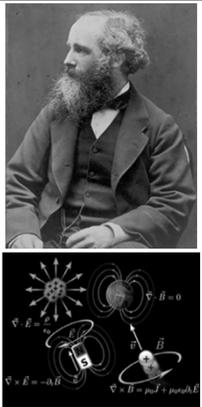
**James Clerk Maxwell (1831-1879)** fue menos **visionario**, más **newtoniano** y más **matemático** que Faraday: invocó un **éter mecánico** que **obedecería las leyes de Newton**.

También introdujo la concepción de Faraday de **TRANSMISIÓN CONTINUA DE FUERZAS** en lugar de **la acción instantánea a distancia** en el marco filosófico de la mecánica newtoniana. De este modo, **las leyes de fuerza de Faraday** se convirtieron en **el ESTADO de un medio material**, "**EL ÉTER**", de forma muy similar a como un **campo de velocidad** es un estado de un **fluido material**.

Encontró las **ECUACIONES DE CAMPO** dinámicas correctas para los fenómenos electromagnéticos, **CONSISTENTES con todos los resultados experimentales conocidos**.

Su análisis condujo a las predicciones de (1) **un tiempo finito de transmisión** para las interacciones EM y (2) **la luz, como un fenómeno de campo EM**.

A pesar del éxito de sus ecuaciones, y a pesar de la no aparición del éter en las ecuaciones reales, Maxwell **insistió durante toda su vida** en que las **fuerzas mecánicas newtonianas en el éter** PRODUCEN todos los fenómenos eléctricos y magnéticos, una visión que difería crucialmente de la visión de Faraday del campo EM como **un estado de "mero espacio"**.



Explica la relación entre el **FLUJO** del campo eléctrico a través una superficie cerrada con la **carga neta encerrada** por dicha superficie (ley de Gauss para el campo E).

Explica que el **campo magnético no diverge**: las **líneas de los campos magnéticos deben ser cerradas**. (ley de Gauss para el campo B).

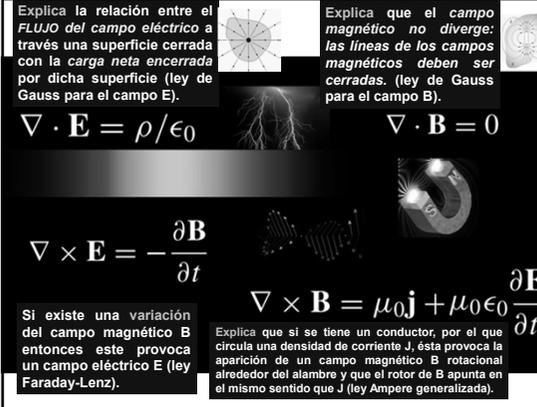
$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$        $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

Si existe una **variación del campo magnético B** entonces este provoca un **campo eléctrico E** (ley Faraday-Lenz).

Explica que si se tiene un conductor, por el que circula una densidad de corriente J, ésta provoca la aparición de un **campo magnético B** rotacional alrededor del alambre y que el **rotor de B apunta en el mismo sentido que J** (ley Ampere generalizada).



Definiremos la palabra **campo** de la siguiente forma: **es una región del espacio que tiene determinadas propiedades físicas**.

El **campo electromagnético (EM)** y el **gravitacional (CG)**, **llenan el espacio**, de igual manera que el **humo llena una habitación**.

El **campo electromagnético** es sólo uno de los **25 campos** similares, cada uno de los cuales **también llena el universo**. Y estos son sólo los campos conocidos; probablemente hay muchos **campos desconocidos**, correspondientes a la **materia oscura**, la **gravedad** y quién sabe qué más.

El universo **no está vacío**, ni está casi vacío. Está lleno. Cada nanómetro cúbico está repleto de una variopinta profusión de **muchos tipos de campos y ondas superpuestas**.

El universo es vasto, pero **no está vacío**, ni mucho menos.

El **Modelo Estándar** de la Física Cuántica considera **25 campos**. Los cuales incluyen **6 campos de quarks**, **6 campos de leptones** (incluido el campo de electrones), **8 campos de gluones**, los campos **W+, W-, Z** y de **fotones (EM)**, y el campo de **Higgs**.

Cada uno de estos campos tiene su quantum de energía característico, y todos estos quantum obedecen a la Física cuántica.

|         |                        |                        |                         |                     |                 |
|---------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------|
|         | 2.4 MeV<br>2/3<br>1/2  | 1.27 GeV<br>2/3<br>1/2 | 171.2 GeV<br>2/3<br>1/2 | 0<br>0<br>1         | Y<br>photon     |
|         | u<br>up                | c<br>charm             | t<br>top                |                     |                 |
| Quarks  | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2 | 104 MeV<br>-1/3<br>1/2 | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2  | 0<br>0<br>1         | g<br>gluon      |
|         | d<br>down              | s<br>strange           | b<br>bottom             |                     |                 |
|         | <2.2 eV<br>0<br>1/2    | <0.17 MeV<br>0<br>1/2  | <15.5 MeV<br>0<br>1/2   | 91.2 GeV<br>0<br>1  | Z<br>weak force |
|         | e<br>electron          | μ<br>muon              | τ<br>tau                |                     |                 |
| Leptons | 0.511 MeV<br>-1<br>1/2 | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2  | 80.4 GeV<br>+1<br>1 | W<br>weak force |
|         |                        |                        |                         |                     | Bosons (Forces) |

Muchos físicos suponen que con el tiempo se creará una **"TEORÍA DEL TODO"** que incorpore los campos del **modelo estándar**, más la **materia oscura**, la **energía oscura**, la **gravedad** y **cualquier otro** campo fundamental que pueda descubrirse.

Cada uno de los **25 campos conocidos actualmente** tiene un **"estado de vacío"** que también es **cuántico**.

¡El llamado **"vacío cuántico"** está lejos de estar vacío! Incluso si no hubiera "cosas" (ningún quantum), el universo seguiría estando lleno del "estado de vacío de los 25 campos": ¡Un universo caleidoscópico! **"Vacío cuántico"** es una contradicción engañosa en sus términos. Sería más apropiado decir **"pleno cuántico"**.

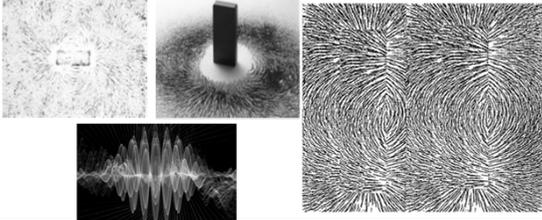


### ONDAS en CAMPOS



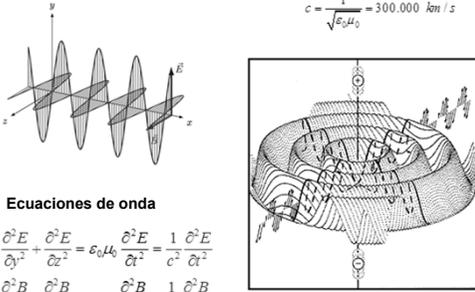
**CAMPOS – No localidad, enredamiento, extensión y superposición.**

- Una **PERTURBACIÓN** que se propaga en un **campo** es tan **NO LOCAL** que puede, **simultáneamente**, ocupar **dos puntos del espacio**, separados a una cierta distancia (en principio, **arbitraria**). Tal **perturbación** se propaga de forma **NO LOCAL** (con una **periferia indefinida**).
- DOS perturbaciones propagándose en un campo**, podrán **superponerse**, siempre, en cualquier lugar del espacio. **SON** entes **INCLUYENTES e INTERPENETRABLES**.



Maxwell demostró que  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  se propagan por el vacío de forma **autosostenida** y como si fueran **ONDAS**:

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 300.000 \text{ km/s}$

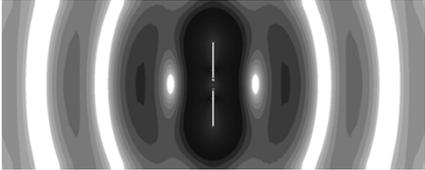


**Ecuaciones de onda**

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

¿Está el universo hecho de **ondas en "campos" espacialmente extendidos**, o de **partículas diminutas locales**, o de **ambas cosas**?

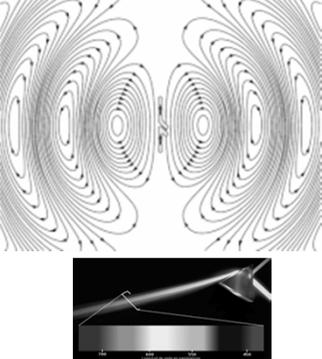


Con la notable excepción de **Richard Feynman**, la **mayoría** de los **teóricos cuánticos de campos** (físicos que armonizan la **MC** con la **TER**) **han adoptado este punto de vista (campos)**.

Hecho que de alguna manera **aún NO se ha filtrado a las filas más amplias de físicos, a otros científicos, a los libros de texto o libros divulgación y el público**, en general.



**Ondas en el campo electromagnético**



El **campo EM** es uno de los **campos cuantificados del universo**; es decir, su energía viene en forma de **haces (paquetes)** o **cuantones singularmente unificados**, cada uno de los cuales lleva **una determinada cantidad** (del latín "quantus" o "cantidad") **de energía**.

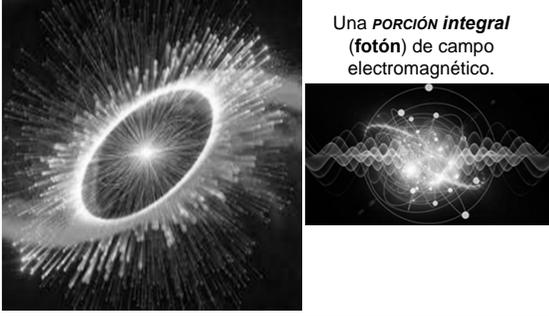
En el caso de la **luz** (radiación electromagnética en un determinado intervalo de  $\lambda$ ), estos **cuantones** se denominan **fonones**.



La **luz** que transporta una imagen de algo está hecha de una cantidad realmente grande de fotones.

El punto clave sobre **los cuantones** es que **son INDIVISIBLES, INFRACCIONABLES, ÚNICOS, ....**

Una **PORCIÓN integral (fotón)** de campo electromagnético.



Si la energía *se emite aquí y ahora*, y *se recibe allí y más tarde*, ¿DÓNDE ESTÁ MIENTRAS TANTO?

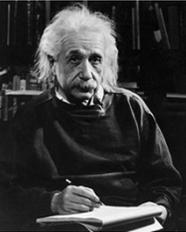
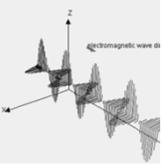
**Claramente, ESTÁ EN EL CAMPO**

**Faraday** y **Maxwell** crearon uno de los paradigmas más revolucionarios de la historia en nuestra visión del mundo físico: **La SUSTITUCIÓN de PARTÍCULAS por CAMPOS.**

Según Albert Einstein (1879-1955):

"Antes de Maxwell, la realidad física... se consideraba compuesta de partículas materiales... Desde la época de Maxwell, la realidad física se ha considerado representada por CAMPOS CONTINUOS ... y no susceptible de ninguna interpretación mecánica.

**Este CAMBIO en la CONCEPCIÓN DE LA REALIDAD es el más profundo y el más fructífero que la física ha experimentado desde la época de Newton.**"

En 1916, la Teoría General de la Relatividad (TGR) resolvió el dilema de Newton sobre el "ABSURDO" de la ACCIÓN GRAVITACIONAL A DISTANCIA.

La TGR considera que el Universo ESTÁ LLENO por el campo gravitatorio y los procesos asociados con él ocurren incluso en el espacio que está libre de materia y del campo EM.

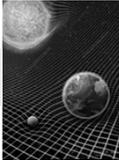
Einstein defendía una visión de la Física Clásica, según la cual "LOS CAMPOS SON TODO LO QUE HAY".

Abandonó los campos clásicos en su artículo de 1905 en el que proponía la Teoría Especial de la Relatividad (TER) donde escribió: "La introducción de un éter "luminífero" resulta superflua".

Para Einstein, no había éter material para soportar las ondas de luz. En cambio, el "MEDIO" de la luz era el ESPACIO MISMO.

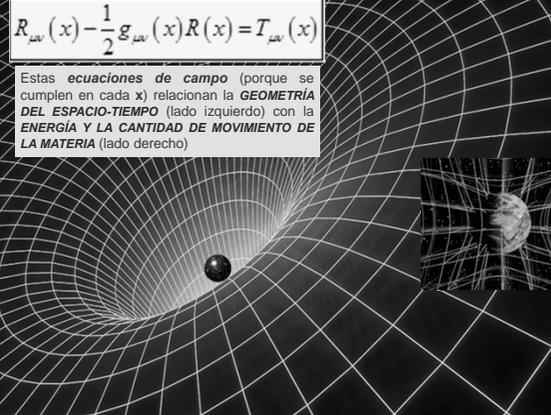
Lo que significa que los CAMPOS son ESTADOS O CONDICIONES DEL ESPACIO.

Puesto que los campos tienen energía, tendrán inercia y, por ello, deberían considerarse "SUSTANCIAS SIMILARES" en sí mismos, en lugar de simplemente estados de alguna sustancia, como el éter.




$$R_{\mu\nu}(x) - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}(x)R(x) = T_{\mu\nu}(x)$$

Estas ecuaciones de campo (porque se cumplen en cada x) relacionan la GEOMETRÍA DEL ESPACIO-TIEMPO (lado izquierdo) con la ENERGÍA Y LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO DE LA MATERIA (lado derecho)



**FIN**

**Ciencia, Humanismo y Sociedad**  
**Seminarios sobre Ciencia**

*Historias del quantum*  
 Entender la Física Cuántica  
 Seminario 6-II  
 Fotonos que se autointerfieren y  
 que ocupan todo el espacio

ATENEO de Badajoz

Francisco J. Olivares del Valle  
 Viernes, 31 de Enero de 2025  
 19:30 h

**FUENTES MONOFOTÓNICAS**

**LASER**

**INTERFEROMETRÍA**

Fotones que ocupan todo el espacio (NO localidad)

Fotones que se auto-interfieren (Superposición)

Fotones superpuestos (Unicidad e indivisibilidad)

**FUENTES MONOFOTÓNICAS**

**FUENTE DE FOTONES**

Actualmente existen diversas **técnicas eficaces** que permiten enviar **fotones, uno a uno**, y que son ampliamente utilizadas en áreas como la **ÓPTICA CUÁNTICA** y la **CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA**.

- La **ÓPTICA CUÁNTICA** es una rama de la física que estudia la interacción entre la luz (fotones) y la materia desde el marco de la MC. Se centra en fenómenos como la **dualidad onda-partícula**, el **entrelazamiento** cuántico y la **superposición de estados**.
- La **CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA** es una rama de la Criptografía que utiliza principios de la MC para **asegurar la comunicación y proteger la información**.

A diferencia de los métodos clásicos, que suelen basarse en complejidades matemáticas, la **Criptografía cuántica** ofrece un nivel de seguridad fundamentalmente nuevo al **aprovechar fenómenos** como el **entrelazamiento** y la **superposición**.

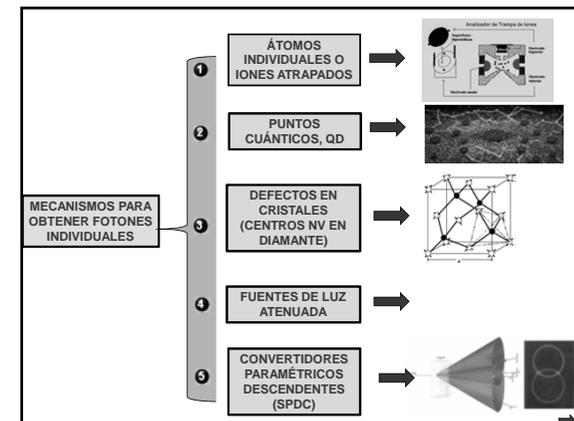
Una **fente monofotónica** es un dispositivo que permite la generación y emisión controlada de fotones **UNO a UNO**.

Este tipo de fuentes son relevantes en el ámbito de la **física cuántica, electrónica y nanotecnología**, ya que permiten estudiar fenómenos cuánticos y tienen aplicaciones en **computación cuántica** y **microscopía electrónica**, entre otros.

**Principio de funcionamiento**

La funcionalidad de una **fente monofotónica** es **controlar la emisión de fotones** para que se produzca **UN SOLO FOTÓN POR EVENTO**.

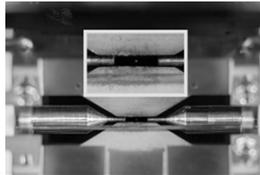
El dispositivo principal para este propósito es una **fente de fotones individuales**, que puede lograrse de diferentes maneras.



### 1. Átomos individuales o iones atrapados

Utilizando sistemas de átomos o iones atrapados en trampas ópticas o magnéticas, se pueden inducir TRANSICIONES ELECTRÓNICAS específicas que emiten un ÚNICO FOTÓN cuando el átomo regresa a su ESTADO FUNDAMENTAL.

Esta técnica de GENERAR fotones únicos es un enfoque poderoso en la MC moderna, pues permite un control preciso sobre los sistemas cuánticos y abre la puerta a diversas aplicaciones en tecnología cuántica, desde la COMPUTACIÓN CUÁNTICA hasta la CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA segura.



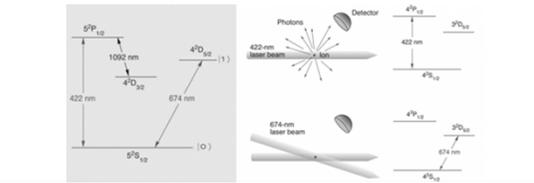
Átomo individual de estroncio en una trampa de iones. David Nadlinger, 2018.

Casi parece imposible que el punto brillante en el centro de la foto sea un átomo atrapado entre dos electrodos metálicos separados 2,3 mm de distancia.

Nadlinger trabaja en un grupo de investigación sobre computación cuántica con iones atrapados.

En este campo se usan iones de estroncio  $^{88}\text{Sr}^+$  que se enfrían por efecto Doppler usando un láser azul a 422 nm. Como respuesta el ión emite luz fluorescente a la misma longitud de onda gracias a la transición  $P_{1/2} \rightarrow S_{1/2}$ . Esta emisión se suele usar para asegurarse de que el ión está bien atrapado, lo que Nadlinger ha aprovechado para realizar su fotografía.

Para implementar un cúbit con este ión se usa el estado de superposición entre los niveles  $D_{3/2} \leftrightarrow S_{1/2}$  ( $|1\rangle \leftrightarrow |0\rangle$ ), que se fuerza con un láser a 674 nm y tiene una vida de media de 0,35 segundos. En el grupo de Nadlinger también usan iones de  $^{43}\text{Ca}^+$ , pero no permiten una fotografía tan espectacular.



Héctor Socas-Navarro nos cuenta: «Este puntito del centro NO ES un átomo. Bueno, sí, sí es un átomo. A ver, es un poco jaleo. Lo explico... En principio no podemos «ver» un átomo porque es más pequeño que la longitud de onda de la luz. Un átomo tiene tamaño del orden del ángstrom, que es más o menos la longitud de onda de rayos X. Entonces ¿qué es la foto?»

«Registran la luz que emite un átomo que tienen ahí suspendido. Es como si coges una luciérnaga de muy lejos y la convences de que se quede revoloteando por una zona. Entonces haces una foto de larga exposición desde lejos y consigues ver la zona por la que ha estado moviéndose. En la foto te acaba apareciendo el manchurrón de por dónde se ha movido la luciérnaga, que a lo mejor tiene 10 metros. ¿Has fotografiado una luciérnaga gigante de 10 metros? NO! Sí es cierto, has fotografiado UNA única luciérnaga pero ese punto NO ES una luciérnaga.»

«En la imagen el punto mide 4 píxeles de diámetro. Según el autor, el espacio en el que está mide 3 mm (150 píxeles en la imagen). Haciendo las cuentas, el átomo debe ser millones de veces más pequeño que ese punto de la foto. Dicho todo lo cual, la imagen es ESPECTACULAR!!!»

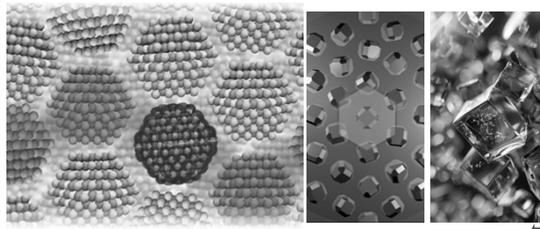
Ser o no ser depende «de cómo uno lo quiera mirar. Imagínate que coges una lámpara y te pones a moverte por una zona de mil kilómetros de diámetro mientras yo hago una foto de larga exposición. Sale una mancha de 1000 km de diámetro y digo que eres tú. Pues lo mismo.»

### 2. Puntos cuánticos (Quantum Dots, QD)

Los puntos cuánticos son nanocristales semiconductores que pueden emitir fotones individuales cuando son excitados con luz o electricidad. Son una fuente muy prometedora debido a su alta eficiencia y controlabilidad.

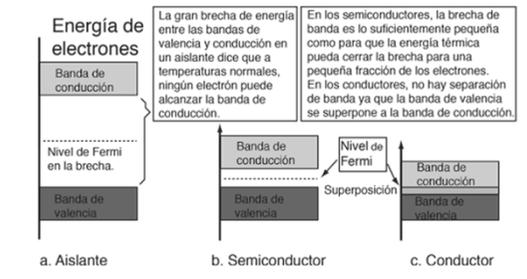
Un semiconductor es un material que tiene propiedades eléctricas intermedias entre un conductor y un aislante.

Su conductividad eléctrica se encuentra en un rango que puede ser modificado por la temperatura, las impurezas (dopaje) o la aplicación de campos eléctricos.



Los semiconductores tienen una "banda prohibida" o bandgap, que es la diferencia de energía entre la banda de valencia (donde residen los electrones en estado fundamental) y la banda de conducción (donde los electrones pueden moverse libremente y, por lo tanto, contribuir a la conductividad).

Los semiconductores típicos tienen bandgaps que oscilan entre 0,1 y 3 eV.



La conductividad eléctrica de un semiconductor puede ser modificada añadiendo impurezas controladas en un proceso llamado dopaje. Esto introduce niveles adicionales dentro del bandgap:

1. Semiconductores tipo n: Se añaden átomos donantes (por ejemplo, fósforo) que proporcionan electrones adicionales.
2. Semiconductores tipo p: Se añaden átomos aceptores (por ejemplo, boro) que crean vacantes para electrones.

La conductividad eléctrica de los semiconductores aumenta con el aumento de temperatura debido al mayor número de electrones que obtienen suficiente energía térmica para saltar al nivel superior.

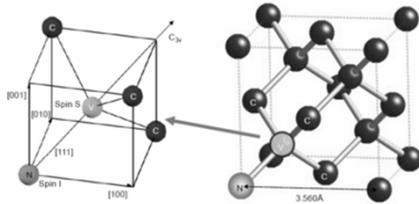
Los semiconductores son fundamentales en el funcionamiento de muchos dispositivos electrónicos como diodos, transistores, circuitos integrados y paneles solares.

Algunos ejemplos comunes de materiales semiconductores incluyen el silicio (Si), germanio (Ge) y compuestos como el arseniuro de galio (GaAs).

**3. Defectos en cristales (centros NV en diamante)**

Los defectos en redes cristalinas, como los **centros NV** (nitrógeno vacante) en **diamantes**, son **fuentes naturales de fotones individuales** con características ópticas muy estables.

Los **centros NV** son defectos que se presentan **cuando un átomo de carbono es reemplazado por un átomo de nitrógeno** y se crea una vacante en la red cristalina. Estos centros tienen propiedades ópticas únicas que les permiten **emitir fotones individuales**.



**4. Fuentes de luz atenuada**

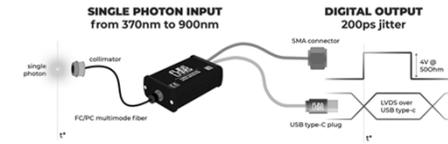
Aunque **no generan estrictamente un fotón cada vez**, se puede usar un **láser extremadamente atenuado** para reducir la probabilidad de que más de un fotón esté presente en un pulso de luz.

1. La **atenuación** se puede realizar mediante diferentes métodos: a) **Filtros ópticos**, que absorben parte de la luz, permitiendo que solo una fracción de la luz original pase; b) **Modulación de potencia** en láseres, para que emitan pulsos de luz muy débiles; y c) **Fuentes de luz de estado sólido**, como los **LED** o **láseres de semiconductores** que se pueden operar en **condiciones de baja intensidad**.

2. Al atenuar la luz, se busca establecer una condición en la que, en **intervalos de tiempo cortos**, la **probabilidad de que se emita más de un fotón sea muy baja**.

3. **Uso de procesos cuánticos.** Para garantizar la emisión de fotones individuales, se pueden utilizar procesos cuánticos específicos, como los **emisores cuánticos** (dispositivos como puntos cuánticos, átomos o moléculas excitadas que, al retornar a su estado fundamental, emiten un único fotón) o la **interferencia cuántica** (aprovechando fenómenos de interferencia para garantizar que solo un estado cuántico se active cada vez, resultando en la emisión de un único fotón).

4. **Detección de fotones individuales.** Para comprobar que efectivamente se han emitido fotones individuales, se utilizan detectores de alta precisión, como a) los **detectores de fotones individuales (SPADs)**, que pueden detectar la llegada de un único fotón y b) las **cámaras de coincidencia**. Estas últimas se emplean para medir la correlación entre eventos de detección, permitiendo verificar que los fotones detectados provienen efectivamente de la emisión de fotones individuales.



**5. Convertidores paramétricos descendentes (SPDC)**

Utilizando materiales no lineales, un fotón de alta energía (bombeo) se divide en dos fotones de menor energía, llamados "**gemelos**". Al detectar uno de estos fotones, se puede garantizar que el otro es único.

**Relevancia tecnológica**

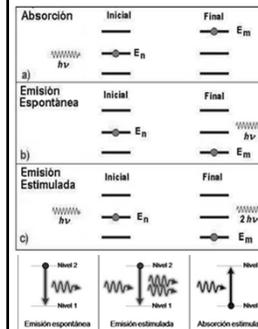
Las fuentes de fotones individuales son cruciales en aplicaciones como la **Criptografía cuántica**, **Computación cuántica**, **Metrología cuántica** y **pruebas de fundamentos de la física cuántica** (como los experimentos de las desigualdades de Bell).

No solo es posible **enviar fotones uno a uno hoy día**, sino que esta tecnología es fundamental para el desarrollo de **tecnologías cuánticas avanzadas**.



LASER

**La interacción de la radiación electromagnética con la materia (Einstein).**



En 1916, Albert Einstein propuso que hay **tres procesos** que ocurren en la formación de una línea espectral atómica.

Los tres procesos se denominan **ABSORCIÓN ESTIMULADA**, **EMISIÓN ESPONTÁNEA** y **EMISIÓN ESTIMULADA**. A cada uno se le asocia un **coeficiente de Einstein**, que es una medida de la **probabilidad de que ocurra ese proceso en particular**.

Einstein consideró el caso de la radiación isotrópica de frecuencia  $\nu$  y densidad de energía espectral  $\rho(\nu)$ .

**Paul Dirac** derivó los coeficientes en un artículo de 1927 titulado "**La teoría cuántica de la emisión y absorción de radiación**".

**La interacción de la radiación electromagnética con la materia (Einstein).**

|                           |                           |                         |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Absorción</b>          | Inicial<br>E <sub>n</sub> | Final<br>E <sub>m</sub> |
| a)                        |                           |                         |
| <b>Emisión Espontánea</b> | Inicial<br>E <sub>n</sub> | Final<br>E <sub>m</sub> |
| b)                        |                           |                         |
| <b>Emisión Estimulada</b> | Inicial<br>E <sub>n</sub> | Final<br>E <sub>m</sub> |
| c)                        |                           |                         |

$$\frac{A_{mn}}{B_{mn}} = \frac{8\pi h\nu_{mn}^3}{c^3}$$

$$A_{mn} = \frac{16\pi^3 \nu_{mn}^3}{3\epsilon_0 hc^3} |\mu_{mn}|^2$$

$$B_{mn} = \frac{|\mu_{mn}|^2}{6\epsilon_0 h^2} = B_{nm}$$

Para comprender con detalle cómo funcionan los láseres hay que entender primero cómo se produce la emisión de **rem** a nivel atómico.

Un átomo se puede considerar como un núcleo positivo alrededor del cual se mueven unos electrones con unas energías bien determinadas.

Los electrones no pueden poseer cualquier valor de la energía sino solamente unos **valores bien definidos** que se identifican como niveles, algo así como los peldaños de una escalera.

Ahora bien, un electrón puede pasar de un nivel de energía a otro emitiendo o absorbiendo un **cuánton de rem** (llamada fotón) con una energía igual a la diferencia entre los dos niveles de la transición.

Cuando un electrón se encuentra en un nivel de energía elevado, tiende a caer **espontáneamente** a un nivel de energía inferior con la subsiguiente emisión de **rem**.

Esto es lo que se conoce como **EMISIÓN ESPONTÁNEA** y es la responsable de la mayor parte de la **rem** que nos rodea.

Por otro lado, un fotón puede **estimular** la caída de un electrón a un nivel inferior **si tiene una energía igual a la diferencia entre los dos niveles**, en ese caso se emitirá un **segundo fotón idéntico** al que ha inducido la transición. Esta es la llamada **EMISIÓN ESTIMULADA**.

El proceso contrario, aquel en el que el fotón se absorbe induciendo la subida de un electrón a un nivel de energía superior, se llama **ABSORCIÓN ESTIMULADA**.

El hecho de que la **emisión estimulada** produzca dos fotones idénticos a partir de un fotón inicial es precisamente lo que permite amplificar la **rem** y es también responsable de que la **rem** generada por emisión estimulada **sea COHERENTE**, es decir que las **rem** que forman el haz emitido esté **sincronizado**.

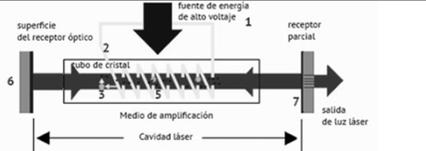
Pero, para que sea posible amplificar la luz por **emisión estimulada**, es **necesario** además que en el medio activo **haya un número mayor de electrones en el nivel de energía superior que en el inferior**; esto es lo que se llama **INVERSIÓN DE LA POBLACIÓN**.

Si por el contrario hubiera **más electrones en el nivel inferior** que en el superior, entonces **predominaría la absorción**, y el medio amortiguaría la energía de la **rem** en vez de amplificarla.

La inversión de la población es el **"principio fundamental"** de los láseres, y se consigue mediante el bombeo adecuado en ciertos materiales con **niveles de energía electrónicos METAESTABLES**.

Es decir, con niveles de energía en los cuales **los electrones tardan un tiempo RELATIVAMENTE LARGO en desexcitarse por emisión espontánea**, lo cual favorece precisamente la **acumulación de electrones en el estado de energía superior**.

1. Una **CORRIENTE ELÉCTRICA** de alto voltaje hace que el tubo de flash (como el de una lámpara de xenón) se **encienda y apague intermitentemente**.
2. Cada **parpadeo**, «bombea» energía al cristal de **rubí**. Los flashes hacen que se inyecte energía en el cristal de **rubí** en forma de fotones.
3. Los átomos en el cristal (los puntos verdes) absorben esta energía en el proceso llamado **ABSORCIÓN**. Los átomos absorben energía cuando sus electrones **"saltan"** a un nivel de energía más alto. Después de unos pocos milisegundos, los electrones vuelven a su nivel de energía original (estado fundamental) **emitiendo un fotón de luz** (los puntos azules más pequeños). Esto se llama **EMISIÓN ESPONTÁNEA**.
4. Los fotones emitidos por los átomos se acercan y alejan dentro del cristal de rubí, viajando a la **velocidad de la luz**.



5. En algunas ocasiones, uno de estos fotones estimula un átomo ya excitado. Cuando esto sucede, el átomo excitado emite un fotón, con lo que se recupera también el fotón original. Esto se llama **EMISIÓN ESTIMULADA**. En ese momento, un fotón de luz ha producido dos fotones de luz, así que ésta se ha **AMPLIFICADO**. En otras palabras, la «amplificación de luz» (un aumento en la cantidad de fotones) ha sido causada por «**EMISIÓN ESTIMULADA DE RADIACIÓN**». De ahí el nombre «**LÁSER**» (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

6. Un **espejo** en un extremo del tubo láser mantiene los fotones rebotando hacia adelante y hacia atrás dentro del cristal.

7. Un **espejo parcial** en el otro extremo del tubo hace rebotar algunos fotones en el cristal, pero **DEJA ESCAPAR A OTROS**.

8. Los **fotones que escapan** forman un haz **MUY CONCENTRADO** de luz **MONOCROMÁTICA** muy potente, que es lo que se usa.

Normalmente, el láser es un **tubo lleno del material láser**, con un espejo **totalmente reflectante** en un extremo y un espejo **parcialmente transmisor** en el otro extremo.

Los fotones, que se mueven en paralelo al eje del tubo, se reflejan muchas veces de un lado a otro, estimulando a otros átomos para que irradian, antes de escapar por el extremo parcialmente transmisor.

La **FC** predice que la **emisión estimulada** crea **fotones idénticos** al **fotón estimulante** en todos los sentidos, con **longitudes de onda**, **direcciones de movimiento** y **fases idénticas** (lo que significa que las crestas y valles de los fotones están en sintonía entre sí, por lo que siempre se refuerzan mutuamente de forma **constructiva** en lugar de interferir de forma destructiva).

Así, los miles de millones de fotones emitidos por el cristal **LÁSER** se mueven al unísono para formar **UNA GRAN ONDA** (un gran estado cuántico; es decir como un único fotón gigante) **CON EFECTOS MACROSCÓPICOS**.

Los fotones se mueven al unísono, creando efectos que son similares a los efectos de **UN SOLO FOTÓN**, pero son mucho más energéticos y, por lo tanto, observables macroscópicamente.

Los fotones de un **LÁSER** comparten un único estado cuántico y, por lo tanto, permanecen próximos a grandes distancias.



### INTERFEROMETRÍA

**Fotones que ocupan todo el espacio (NO localidad)**

**Fotones que se auto-interfieren (Superposición)**

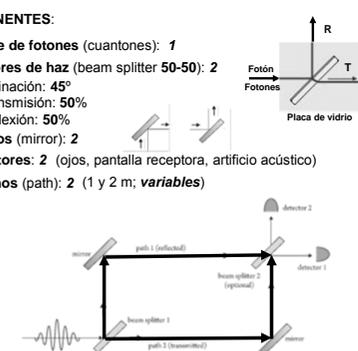
**Fotones superpuestos (Unicidad e indivisibilidad)**

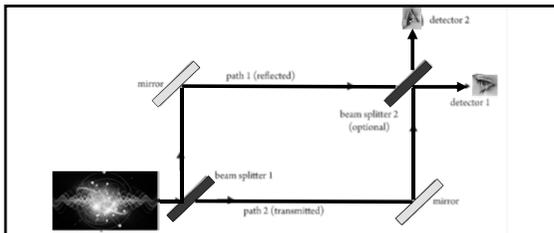
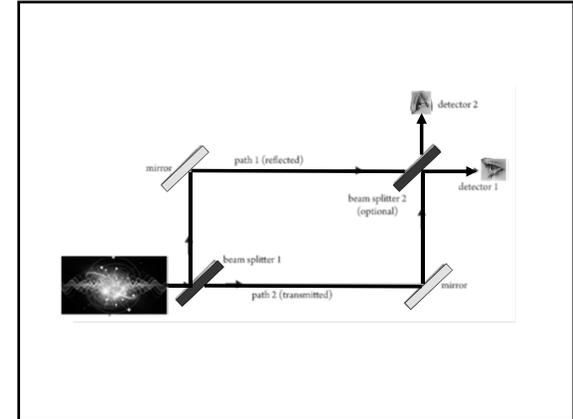
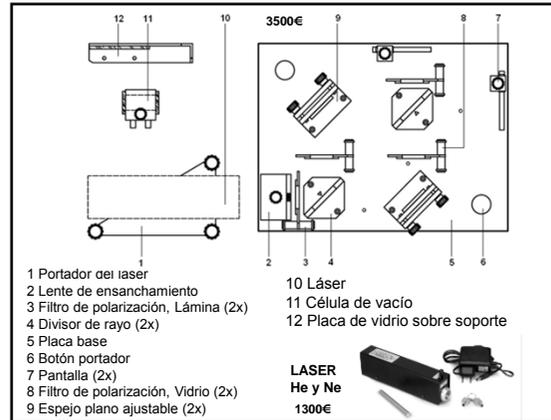
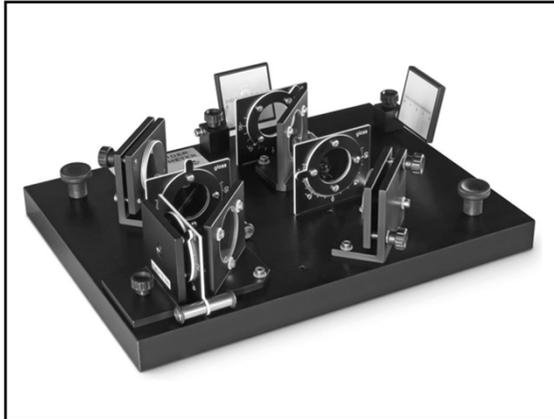


Es un **dispositivo que sirve para UNIR haces de luz reflejados y transmitidos**.

**COMPONENTES:**

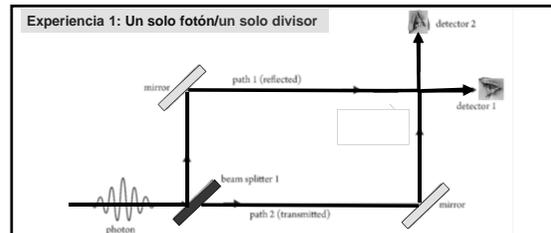
- Fuente de fotones (cuantones): 1**
- Divisores de haz (beam splitter 50-50): 2**  
Inclinación:  $45^\circ$   
Transmisión: 50%  
Reflexión: 50%
- Espejos (mirror): 2**
- Detectores: 2** (ojos, pantalla receptora, artefacto acústico)
- Caminos (path): 2** (1 y 2 m; **variables**)





El **divisor de haz 1** funciona como la ventana de un escaparate. Se trata de una placa de vidrio, vista de canto en la figura, que **refleja el 50%** de la luz que incide y **transmite el otro 50%**. En lugar de ser perpendicular al camino de los *fotones entrantes*, se coloca en un ángulo de **45°** con respecto a ellos, de modo que **un fotón REFLEJADO** se desvía **verticalmente** a lo largo del camino 1 y **un fotón TRANSMITIDO** se mueve **horizontalmente** a lo largo del camino 2.

Cada camino es de **un metro o dos** de largo y se coloca *cuidadosamente* sobre una mesa de laboratorio. Los **espejos** llevan los haces de luz a un **punto de cruce**, donde los experimentadores pueden, si lo desean, colocar un **segundo divisor de haz**.

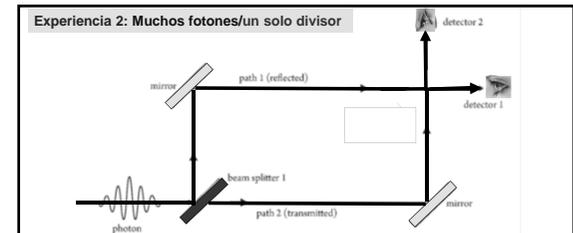


Supongamos que **UN solo fotón** entra por la parte inferior izquierda y el divisor de haz 2 está **ausente**. **¿Qué sucede cuando el fotón llega al primer divisor de haz? ¿Se refleja, se transmite o ambas cosas?**

El experimento muestra **SIEMPRE** que **se detecta como un FOTÓN ÚNICO y completo en el detector 1 o en el detector 2**.

Los detectores 1 y 2 podrían ser los **ojos de dos observadores diferentes**, o ambos podrían ser detectores de laboratorio que hacen clic o dan alguna otra indicación cuando **detectan luz**.

Así que este experimento, sin el divisor de haz 2, **VERIFICA LA EXISTENCIA DE CUANTONES INDIVISIBLES**, porque los detectores **SIEMPRE** detectan un **fotón o ningún fotón. NUNCA una fracción de un fotón**.



El experimento también **verifica la ALEATORIEDAD (azar, contingencia) CUÁNTICA**: cuando se envían **muchos** fotones, **uno a uno**, por la parte inferior izquierda. Las estadísticas de los impactos son **ABSOLUTAMENTE ALEATORIAS**, es decir, los resultados individuales (detector de impactos de fotones 1 o detector de impactos de fotones 2) son igualmente **IMPREDECIBLES**.

Podríamos ver los fotones impactar en uno u otro detector durante todo el día, pero aún no tener idea de **en qué detector impactará el siguiente fotón**, a pesar de que todos los fotones se preparan de **manera idéntica** y se someten a **condiciones idénticas**. Se podría objetar que este único experimento no prueba en absoluto que la elección del **CAMINO** sea **aleatoria**. Quizás un divisor de haz diferente o un diseño experimental diferente produciría un resultado predecible. ¿?

**Experiencia 3: Un solo fotón/Dos divisores**

Con el divisor de haz 2 colocado, sucede algo nuevo. El divisor de haz 2 mezcla los dos caminos. Si el fotón estaba en la ruta 1, (con 50-50 probabilidades) se transmite al detector 1 o se refleja al detector 2; si el fotón estaba en el camino 2, (también con 50-50 probabilidades) se refleja al detector 1 o se transmite al detector 2. En consecuencia, **no importa qué camino tome el fotón**, termina en el detector 1 o en el detector 2 con 50-50 probabilidades. Ahora los detectores **NO proporcionan ninguna pista acerca de qué camino tomó el fotón**. La FC informa (y la naturaleza lo confirma) que, siempre que un experimento no proporciona información sobre qué camino toma un **fotón** (o cualquier otro **cuantón**), **el fotón TOMA TODOS LOS CAMINOS POSIBLES SIMULTÁNEAMENTE**. ¿Esto es algo extraño? ¿verdad?.

**Experiencia 3: Un solo fotón/Dos divisores**

[Esto significa que **el fotón SE MUEVE A LO LARGO DE AMBOS CAMINOS SEPARADOS!** Eso es difícil de creer: Sólo se inyectó **un fotón**, y los detectores siempre detectan precisamente **un fotón**, y **los fotones nunca se rompen en pedazos**, y sin embargo, **¿un fotón está presente en ambos caminos?** ¿? **¿Cómo puede un fotón ir en dos direcciones y estar en dos lugares al mismo tiempo?** Además, este movimiento en **dos direcciones a la vez** debe ocurrir con independencia de la presencia o ausencia del segundo divisor de haz. Cuando el fotón llega al divisor 1 del haz, **no tiene forma de "saber" si hay un segundo divisor de haz "más adelante"**. Lo cuál significa que **TODOS** los fotones intervinientes fueron en ambos sentidos, hacia 1 y también hacia 2, pero de **alguna manera cada uno** fue detectado **por un solo detector**, ya fuera el 1 o el 2.

**Experiencia 3: Un solo fotón/Dos divisores**

Este **ir en dos direcciones**, llamado **SUPERPOSICIÓN**, nos lleva a cuestionar la noción **de que la luz esté hecha** de haces de **CUANTONES INDIVISIBLES**. Quizás cada fotón se divida en dos partes en el divisor de haz 1, con una parte en cada dirección. Pero el experimento proporciona evidencia **en contra** de tal hecho. Si la luz simplemente se divide en el primer divisor de haz, y parte de ella va en cada dirección, **ambos detectores** deberían hacer clic simultáneamente cuando el divisor de haz 2 está ausente. Pero **ambos detectores NUNCA** hacen clic **simultáneamente**, lo que implica que **SÓLO UN OBJETO, NO dos**, está presente en el dispositivo en cualquier momento. **NO HAY EVIDENCIA DE QUE EL FOTÓN SE DIVIDA ALGUNA VEZ.**

LUZ ELECTRONES

Esquema de la doble rendija de Young.

Los **fotones** impactan localmente y **parecen** partículas diminutas, pero **NO SON PARTÍCULAS**. Todos los **cuantones**, están **ESPACIALMENTE EXTENDIDOS**, y **A VECES parece que se comportan como PEQUEÑAS PARTÍCULAS**.

Cada fotón es un **CUANTÓN EXTENDIDO** (campo), análogo a una nube de humo, que se propaga a lo largo de **ambos caminos** siempre que **AMBOS ESTÉN DISPONIBLES**. El comportamiento descrito es **aplicable** a **TODO** lo que conocemos: **LUZ, ELECTRONES, QUARKS, PROTONES, NEUTRONES, ÁTOMOS, MOLÉCULAS**, etc.

Rendija Sencilla

Doble rendija

Consideremos, por ejemplo, **ÁTOMOS**, los constituyentes más pequeños de los **ELEMENTOS** químicos que aún conservan las características de ese elemento (un átomo de hierro es **el trozo más pequeño de hierro que todavía se comporta como hierro**).

A diferencia de los **FOTONES**, los **átomos** y las **moléculas** (grupos de átomos conectados) son **CUANTONES MATERIALES**. Sin embargo, tienen los mismos **comportamientos cuánticos** que los **fotones**, es decir, la **SUPERPOSICIÓN** y la **ALEATORIEDAD fundamental**.

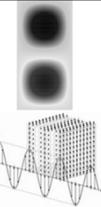
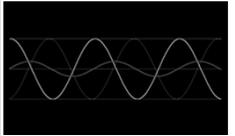
De hecho, la FC también se aplica a **objetos MACROSCÓPICOS** (visibles sin microscopio), como pelotas de béisbol y mesas, aunque es extremadamente difícil constatar **propiedades cuánticas OBSERVABLES** en objetos tan grandes. No obstante, hasta donde sabemos, **todo CUANTÓN MATERIAL obedece a la FC**.

Hay una explicación simple pero sorprendente para este extraño fenómeno.

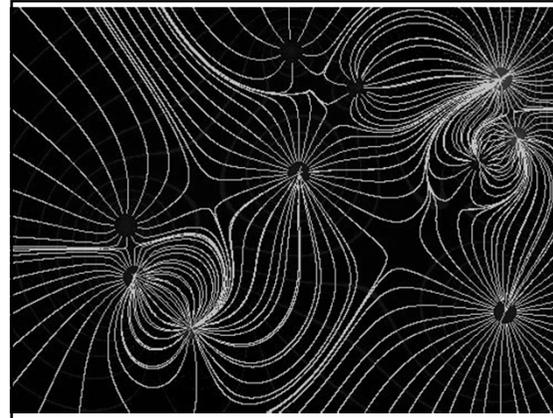
La **REALIDAD ESTÁ HECHA DE ONDAS** en campos invisibles.

Los **CUANTONES másicos** (electrones, átomos y moléculas) como los fotones, **NO** son "objetos" **locales** (partículas). **SON**, más bien, **ONDAS EN CAMPOS**, de la misma manera que las ondas del agua en un estanque son **ONDAS EN EL AGUA**.

La **SUPERPOSICIÓN** es común para las ondas. **NUNCA PARA LAS PARTÍCULAS.**


Propagación de una perturbación en un campo de agua (ONDA)



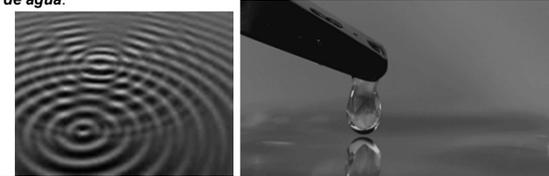
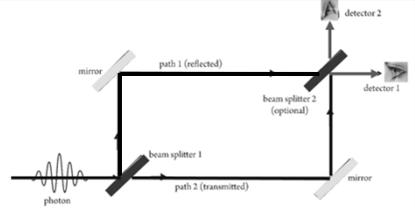
Como analogía **clásica** (no cuántica), imaginemos un estanque de **agua** tranquilo con una **mitad oriental cubierta por una fina capa de petróleo** y la otra **mitad occidental libre de petróleo**.

Imaginemos que dejamos caer una pequeña piedra en la mitad occidental, **creando ondas** que se mueven hacia afuera.

Probablemente no nos sorprendería si estas ondas rebotaran parcialmente en el límite **agua-petróleo** y se dirigieran hacia el **oeste**, y también cruzaran parcialmente el límite hacia el petróleo y continuarán dirigiéndose hacia el **este**.

La **ONDA ORIGINAL** ahora son **DOS ONDAS, EN DOS LUGARES diferentes**.

Este tipo de cosas sucede todo el tiempo con las olas, y no es sorprendente ni contradictorio cuando nos damos cuenta de que estamos hablando de una **ola de agua**.

Nuestro experimento con **interferómetro es así**. Cada fotón va en **ambos sentidos** al salir del divisor de haz 1.

Lo que es más sorprendente y singularmente cuántico es que, a diferencia de las ondas del agua, **estas ondas SIGUEN SIENDO UN SOLO FOTÓN, pero EN DOS LUGARES**.

En el caso del agua, el conjunto original de ondas crea **DOS conjuntos de ondas** que viajan en dos direcciones. Pero en el experimento del interferómetro **siempre detectamos UN solo fotón, nunca dos**.

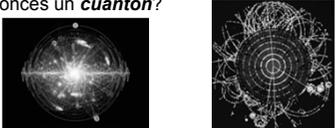
Un **fotón es una cosa UNITARIA** que puede estar en dos lugares a la vez.

Y la **materia** se comporta de la misma manera. Una **molécula material también es una onda en un campo** y puede estar en **DOS LUGARES A LA VEZ**.

Hasta donde sabemos, todo en el universo está hecho enteramente de **cuantos** ó **cuantones**.

La FC **trata** sobre la **naturaleza** y el **comportamiento** de estos constituyentes fundamentales del universo.

¿Qué es entonces un **cuantón**?



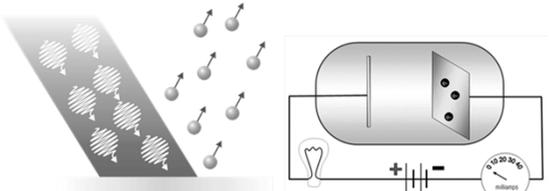
Los **cuantones** son sutiles, contrarios a la intuición y no se comprenden del todo. Sin embargo, hoy entendemos esta cuestión mejor que en **1951**, cuando Albert Einstein escribió a un colega:

**"Todos estos cincuenta años de reflexión consciente no me han acercado más a la respuesta a la pregunta: '¿Qué son los cuantos de luz?' Hoy en día, todos los Tom, Dick y Harry creen que lo saben, pero se equivocan."**

Einstein escribió un artículo innovador en **1905** que, por primera vez, reconocía la idea del **cuanto**.

Einstein sabía de qué hablaba. Su artículo se refería a un fenómeno simple llamado **efecto fotoeléctrico**, en el que la luz que incide sobre un metal hace que la superficie del metal expulse electrones.

Al suponer que la luz está formada por pequeños **paquetes** o "partículas", Einstein pudo explicar los **detalles cuantitativos de este fenómeno**.

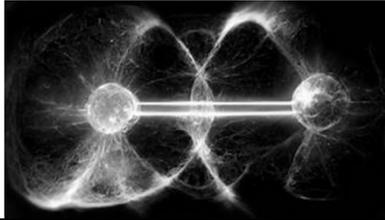


El primer indicio matemático de los **cuantones** provino de **Max Planck** en **1900**, pero el artículo de Einstein fue el primero en presentar los **cuantones** como un **objeto físico**. El **Premio Nobel de 1921** de Einstein fue otorgado por este artículo de **1905** y no por su teoría más significativa: la TER (1905) y la TGR (1915). En **1921**, era obvio que Einstein merecía un **Premio Nobel**, pero su trabajo sobre la relatividad todavía era controvertido, por lo que el Comité Nobel le otorgó el premio por su trabajo ampliamente aceptado sobre el **EFEECTO FOTOELÉCTRICO**. Siguió involucrado con la FC toda su vida, principalmente como un crítico perenne y agudo que brindó comentarios invaluable sobre temas problemáticos.

Mileva Maric



La palabra **CUANTO** deriva de "**cantidad**". Como definición práctica, un **cuantón** es una cantidad de **ENERGÍA DE CAMPO ESPECÍFICA, ALTAMENTE UNIFICADA y ESPACIALMENTE EXTENDIDA**. Los **fonones, electrones, protones, átomos y moléculas** son ejemplos de **cuantones**. Pensemos en un **cuantón** como un **PAQUETE DE ENERGÍA**. Aunque el **término haz** puede ser engañoso, porque un **único cuantón** puede extenderse, finamente, sobre una región de **muchos kilómetros de diámetro e incluso puede comprender trozos débilmente conectados y separados por distancias cosmológicas**



Los **cuantones son "digitales"** en el sentido de que un cuantón, incluso si tiene muchos kilómetros de ancho, **EXISTE por completo o NO EXISTE en absoluto**.

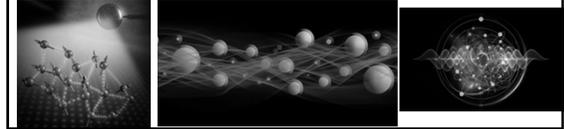
No se puede tener una parte de un cuantón, y no se puede crear un cuantón gradualmente o destruir un cuantón gradualmente.

Un cuantón siempre llega a existir, o desaparece, o cambia su configuración, **INSTANTÁNEAMENTE EN TODAS PARTES (una perturbación en un campo)**.

Cuando encendemos una luz, cada cuantón de luz espacialmente extendido (cada fotón) aparece de una vez, y cuando la luz se desvanece, cada cuantón de luz completo desaparece de repente, **aunque el fotón pueda tener kilómetros de ancho**.

Además, a veces los **cuantones saltan instantáneamente** de una configuración (estado) a otra completamente diferente. Esta cualidad de **TODO o NADA** tiene mucho que ver con la considerable **EXTRAÑEZA del cuantón**.

Una característica del cuantón es su **NO LOCALIDAD (naturaleza extensa)**



**FIN**