

Estos pretenden ser unos apuntes de teoría, que son al mismo tiempo “resumen” por el nivel bachillerato y amplios por el tema tratado, que es complejo y sobre el que se puede profundizar mucho, por lo que se intentan citar ideas que animen y orienten a saber más. Ver ejercicios en www.fiquipedia.es. Se trata la parte de física cuántica del bloque de 2º Bachillerato LOMCE “Física del siglo XX” que se implanta en el curso 2016-2017, cubriendo contenidos, y a veces citando criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables.

0. Física cuántica

La física o mecánica cuántica es una rama de la física que se ocupa de cómo funciona la naturaleza a una escala muy pequeña. Surge a principios del sXX porque es cuando la física intenta explicar cosas a esa escala, átomos y partículas fundamentales. Es una teoría bien probada experimentalmente, pero compleja en sus matemáticas, comprensión e interpretación, ya que trata de cosas pequeñas donde no funciona nuestra intuición formada en el mundo macroscópico, y las reglas no son las mismas. Einstein intentó demostrar que era una teoría física incompleta, pero a finales sXX se comprobó que se equivocaba.

A veces se presenta como algo “surgido y cerrado” a principios del sXX, pero es importante tener presente que ha tenido y sigue teniendo actividad teórica y enlaces con aplicaciones prácticas y física de partículas.

1. Fenómenos con insuficiencia de la Física Clásica para explicarlos. Nuevas ideas para explicar fenómenos. Origen de la Física Cuántica. Problemas precursores

Se describen cronológicamente y se comenta cómo la física clásica no podía explicarlos, y cómo surgen inicialmente un conjunto de nuevas ideas / hipótesis / principios que realizaban correcciones a la física clásica para explicarlos, sin ser una teoría física “completa”, lo que ocurre en torno a década 1920.

Más adelante se intenta dar una visión no cronológica, sino global, muy simplificada, de la física cuántica.

1.1 Radiación térmica cuerpo negro. “Catástrofe ultravioleta”

La materia condensada emite radiación electromagnética en espectro continuo, emisión que varía según temperatura y la frecuencia (ó λ). Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que recibe, y radia según un espectro característico (ver gráfica): si aumenta T, emite más radiación (área bajo la curva) y máximo radiación está a f mayor (λ menor), y si baja T a la inversa. Un cuerpo (carbón, hierro, filamento bombilla) a medida que lo vamos calentando (si no se descompone) cambia de color: radia en infrarrojo (T ambiente), rojo, anaranjado y blanco (no emite solamente una frecuencia, se mezclan colores).

“Explicación” con física clásica: materia estaba formada por muchos osciladores pequeños, que vibraban en función de la temperatura y eso les hacía emitir radiación. En la teoría clásica de Rayleigh-Jeans se obtenía una curva que era una buena aproximación a la realidad para bajas frecuencias (altas λ), pero para altas frecuencias (baja λ) era totalmente errónea, de hecho implicaba que radiaría energía infinita; se habla de “Catástrofe Ultravioleta”.

>El espectro de radiación permite calcular la temperatura de un objeto distante, por ejemplo el Sol.

1.1.1 Hipótesis de Planck. Cuantización de la energía

Planck en 1900 (Nobel 1918) propone la ley de Planck, que da una curva teórica ajustada a la experimental al añadir una hipótesis, que plantea como un arreglo matemático, no como una realidad física: los osciladores de la materia no lo hacen con cualquier energía, solo con ciertos valores, sin ser posibles valores intermedios.

La energía de un oscilador está cuantizada; matemáticamente $E=nhf$. E es proporcional a la frecuencia, múltiplo de una cantidad mínima (Constante de Planck $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s), con n=número cuántico (entero)

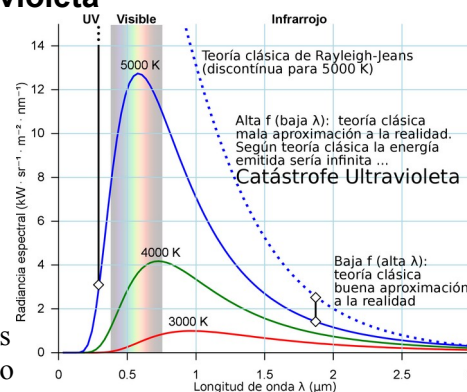
>El múltiplo n aparece en la expresión original, son múltiplos de cuantos, aunque a veces no se indica.

La cuantización de la E (los cuantos de E) y la constante de Planck son la base de la teoría cuántica.

Cualitativamente se puede ver que la cuantización aplica a una escala muy pequeña, no con las energías del mundo macroscópico; un péndulo lo podemos subir más o menos y oscilará con más o menos E, y no vemos escalones que supongan que no lo podamos subir a la altura que queramos y hacer oscilar con el valor de E que queramos. No vemos saltos de E porque son muy pequeños: si oscilase 1 vez por segundo y con $E=2$ J, el siguiente escalón serían $2+6,63 \cdot 10^{-34}=2,0000000000000000000000000000000663$ J, sin que haya ningún valor de E posible entre esos dos valores, lo que es en el mundo macroscópico no se aprecia, pero a escala muy pequeña, como la atómica, es importante. (Idea de [Cuántica sin fórmulas-Hipótesis de Planck](#))

>Planck también propuso las unidades naturales, que sugieren cuantización espacio, tiempo,...

>Existen otras magnitudes físicas cuantizadas, como la carga, el spin, ...



Darth Kule, wikipedia, public domain (derivado)



1.2 Efecto fotoeléctrico

Descubierto por Hertz en 1887, al experimentar la emisión de ondas de radio, comprobó que si se iluminaban electrodos metálicos con luz ultravioleta, la chispa saltaba más fácil que en oscuridad.

El efecto fotoeléctrico estaba bien descrito experimentalmente pero la física clásica no lo podía explicar:

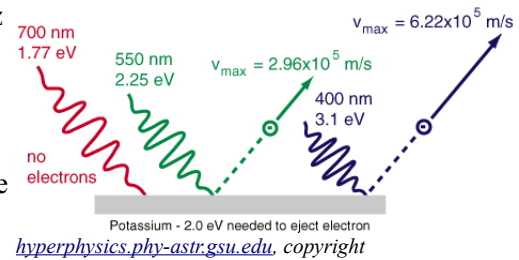
1. El efecto fotoeléctrico sólo se produce si la frecuencia de la luz incidente es igual o superior a un valor propio de cada metal, que se llama **frecuencia umbral**.

2. Al aumentar la intensidad de la luz incidente aumenta proporcionalmente el número de electrones emitidos

3. La energía cinética máxima de los electrones emitidos (medible con **potencial de frenado**) no depende de la intensidad de la luz incidente, pero sí depende de la frecuencia.

4. El efecto fotoeléctrico se produce “instantáneamente” tras la incidencia de la luz, aunque sea débil.

“Explicación” con física clásica: la luz al llegar al metal le transfería energía al electrón y si la energía era suficiente lo arrancaba, produciendo el efecto fotoeléctrico, por lo que asumía que si la luz era débil, no podía producirse el efecto fotoeléctrico, y que si era intensa, siempre debía producirse, lo que contradice punto 1. Cuando la frecuencia es superior a la umbral asumía que al aumentar la intensidad de la luz debía aumentar el número de electrones emitidos y su energía, lo que contradice punto 3. Si la intensidad es muy débil la luz tendrá poca energía, y habrá un retardo temporal hasta que se acumulase la energía necesaria, lo que contradice punto 4. No explica por qué hay frecuencia umbral y dependencia de la frecuencia (1, 3).



1.2.1 Luz como partícula con cuanto de energía, fotones

Einstein en 1905 (Nobel 1921 por esto, no por relatividad) explica el efecto fotoeléctrico. Partiendo de la idea de Planck de que la energía radiada está cuantizada, sugiere que la luz está formada por paquetes / cuantos de energía, **fotones**, que son partículas indivisibles, sin masa, e introduce una idea básica de interacción luz-materia, que se hace entre fotones y electrones. Lo que indica Planck y Einstein no es lo mismo, citando a Einstein “Aunque la cerveza se venda siempre en botellas de una pinta, eso no implica que la cerveza conste de porciones indivisibles de una pinta”

Explicación cuántica del efecto fotoeléctrico: un fotón tiene una energía $E=hf$, mayor según la frecuencia. Existe una energía mínima necesaria para extraer un electrón del metal, que se llama **trabajo de extracción ó función de trabajo (W_0)**. Al chocar un fotón con un electrón este absorbe su energía; si su energía es igual o superior a W_0 se produce efecto fotoeléctrico, pero si la energía es menor, no es extraído y no se produce efecto fotoeléctrico: como $E=hf$ explica la existencia de frecuencia umbral y de que el electrón sea extraído sin retardo con luz muy débil. La intensidad de la luz está asociada a la cantidad de fotones; para una frecuencia dada, si aumenta la intensidad aumentará en la misma proporción el número de electrones extraídos. Si la energía del fotón es superior a W_0 , tras el choque el exceso de energía pasará a energía cinética del electrón, por lo que se puede plantear $E_{\text{fotón}}=W_0+E_{\text{c máxima}}$, que al sustituir da la **ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico: $hf=W_0+\frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2$** . Esta expresión también explica que la energía cinética máxima de los electrones emitidos dependa de la frecuencia de la luz incidente.

>En problemas de efecto fotoeléctrico, las unidades de energía habituales son eV, ya que es del orden de magnitud de la energía asociada a los fotones cercanos a la luz visible y a la energía asociada a los trabajos de extracción. Un eV es la energía que gana un electrón cuando es acelerado con una diferencia de potencial de 1 V, y numéricamente $1 \text{ eV}=1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. En un flujo luminoso/haz hay muchos fotones, que liberan muchos electrones; es habitual usar ideas de mol de fotones y de electrones, y potencia del haz.

>**Hablar de fotones supone retomar la teoría corpuscular cuando la teoría ondulatoria estaba aceptada, y un nuevo problema para la física clásica, explicar el carácter ondulatorio (difracción) y corpuscular de la luz; al tiempo campo electromagnético que llena todo el espacio y fotones discontinuos.**

1.3 Estabilidad del átomo y espectros atómicos discontinuos

- El modelo de Rutherford de 1911, el electrón orbita alrededor del núcleo, y según leyes clásicas del electromagnetismo, una partícula cargada acelerada radia energía, por lo que el electrón se iría acercando al núcleo chocando con él, y el átomo no sería estable.

- Al aplicar un voltaje elevado a un gas, emite luz cuyo espectro solamente tiene ciertas frecuencias (λ); es discontinuo a diferencia del espectro de emisión de materia condensada. Cada elemento emite un espectro distinto, y había algunos muy estudiados, como el Hidrógeno, con expresiones matemáticas como la fórmula de Rydberg, sin sentido físico pero obtenidas experimentalmente, que relacionaban valores frecuencias (λ). Ninguno de los dos fenómenos podía explicarse con la física clásica.





1.3.1 Modelo atómico de Bohr

Bohr en 1913 (Nobel 1922) propone un modelo atómico que explica la estabilidad del átomo y el espectro de Hidrógeno. Lo hace partiendo de las ideas de Planck y de Einstein, aplicándolas al movimiento del electrón alrededor del núcleo, siendo las ideas básicas que los electrones describen órbitas circulares que tienen niveles de energía y momento angular cuantizados, y cuando el electrón cambia de órbita absorbe o emite un fotón con la diferencia de energía entre órbitas. Introduce el número cuántico principal n , de modo que sólo existen las órbitas para las que n es un número entero. El modelo de Bohr explica órbitas como estacionarias, pero no explica cómo se producen los saltos cuánticos, ya que en las transiciones electrónicas el electrón pasa de una órbita a otra sin estar en ningún punto intermedio. Solamente explicaba el espectro de Hidrógeno y no explicaba fenómenos asociados como el efecto Zeeman (1897) y efecto Stark (1913), que suponen el desdoblamiento de líneas del espectro ante la presencia de un campo magnético y eléctrico respectivamente. Bohr sabía que su modelo era provisional (solamente duró 3 años), y propuso crear una **mecánica cuántica** (es la primera vez que se usa el término) que aplique a nivel atómico, y que esté basada sólo en modelos teóricos respaldados con experimentos y no en visión tradicional, ya que toda la mecánica clásica, toda nuestra intuición, e incluso nuestro vocabulario no son válidos al basarse en sistemas mucho más grandes.

1.4 Experimentos asociados a la dualidad onda corpúsculo. Hipótesis de De Broglie

>Ver “Controversia histórica sobre la naturaleza de la luz” en bloque de “óptica física”

En 1803 Young realizó un experimento con doble rendija que confirmó que la luz sufría difracción y supuso que se aceptase mayoritariamente que era una onda. Tras la explicación del efecto fotoeléctrico surgía el problema de explicar la difracción con partículas (fotones). Aunque poco conocido, en 1909 Taylor/Thomson (Nobel 1906) realizan experimento similar con rayos de luz muy débiles, necesitando una duración continua de 3 meses de registro en la placa fotográfica (se podría asumir que pasaban pocos o un solo fotón cada vez), y aparece el patrón de interferencia. Más tarde Dirac dirá “Cada fotón interfiere con sí mismo”

>El experimento de la doble rendija con partículas se ha repetido más veces, se comenta más adelante

En 1923 Compton (Nobel 1927) descubre el “**Efecto Compton**”; cuando luz de alta E y f (rayos X) incide sobre electrones libres, pierde energía y disminuye f (aumenta λ). No se puede explicar con la naturaleza ondulatoria de la luz, sino como choque fotón y electrón con conservación momento (con fórmulas relativistas por ser las velocidades grandes).

En 1924 Louis De Broglie (Nobel 1929) plantea como hipótesis que la dualidad onda-corpúsculo aplica a todas las partículas, no es exclusiva de los fotones; si la luz (sin masa) contiene partículas asociadas a la onda, todas las partículas (con masa) tienen una onda “piloto” asociada. A la longitud de onda de esa onda se

llama **longitud de onda de De Broglie**, y su valor es $\lambda_{\text{De Broglie}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ donde p si procede es relativista,

($p = \gamma mv$) ya que se obtiene de igualar energía $E = pc$ (relatividad) y en $E = hf$ (Planck).

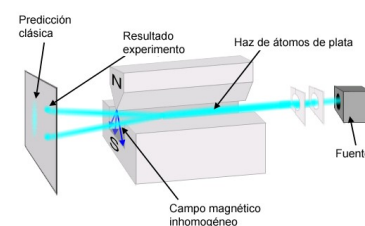
En 1927 Davisson y Germer (Davisson Nobel 1937) descubren (casualmente) la difracción con electrones, confirmando la hipótesis de De Broglie.

En 1927 Bohr propone el **principio de complementariedad**: resumido para la luz sería que a veces se puede comportar como onda, a veces como partícula, pero nunca ambos en el mismo experimento. Otra manera de verlo sería que intuición no es aplicable a sistemas a escala alejada de nuestra experiencia, es posible que algunas de las conclusiones que extraigamos de los experimentos nos parezcan contradictorias, pero esto no se debe a que las conclusiones sean falsas, sino a que los conceptos que utilizamos para tratar de entenderlas no son los adecuados, porque experimentando siempre obtenemos medidas clásicas, y en cada experimento obtenemos una concreta, y los términos onda y partícula son clásicos. Enlaza con su propuesta de la necesidad de una mecánica cuántica comentada cuando propuso su modelo atómico.

>Una idea sería hablar de ondícula, ¿qué nombre usar para nombrar algo no visto nunca?

1.5 Experimento de Stern-Gerlach. Cuantización momento angular y spin

Stern y Gerlach en 1922 (Stern Nobel 1943) realizan un experimento que muestra experimentalmente las partículas tienen un momento angular intrínseco (asociado a spin) y que está cuantizado, solamente puede tener ciertos valores, cuando según la mecánica clásica podría variar de manera continua. Además, si se concatenan varios experimentos secuencialmente, se producen resultados que la física clásica no puede explicar; solamente se puede medir en un eje (z), ya que medirlo en un eje destruye la información sobre los dos (x y y). Esto enlaza con el principio de incertidumbre: no se pueden medir y conocer simultáneamente ciertas magnitudes observables.



wikimedia, cc-by-sa





1.6 Principio de incertidumbre de Heisenberg

El principio de incertidumbre o relación de indeterminación de Heisenberg, fue enunciado cualitativamente en 1927, establece la imposibilidad de determinar simultáneamente y con precisión arbitraria, ciertos pares de variables físicas, como son la posición y el momento lineal, o la energía y el tiempo. Matemáticamente se puede enunciar de dos maneras, y por eso se habla en plural de relaciones de indeterminación

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} = \frac{h}{4\pi} \quad \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Desde el punto de vista de la física clásica se asumía que una medida se debería poder hacer tan precisa como se quisiera, y la única limitación estaría en los instrumentos de medida.

Primera idea cuántica del principio de incertidumbre: Se suele confundir y explicar asociado al efecto del observador, que relaciona error en medida y perturbación: el proceso para obtener un valor de la medida supone una perturbación mayor cuanto más pequeño es el valor a medir: debe existir interacción mínima para obtener la medida. Por ejemplo al medir posición y momento lineal de un electrón, en la medida usamos un fotón que perturba al electrón, perturbación imposible de eliminar porque el fotón siempre tendrá energía, y siempre se modifican los valores a medir al realizar la medida. Heisenberg usó esta idea en un experimento mental de un microscopio rayos γ ; con fotones de λ pequeña medimos bien posición, pero tenemos alta f , p y E que perturba mucho el movimiento del electrón, y λ grande ocurre lo contrario.

Explicación cuántica del principio de incertidumbre: la idea anterior, muy habitual, no es correcta, porque el principio no está ligado a la medida y perturbación, sino a valores simultáneos de magnitudes observables, y fija un límite en el que no se pueden usar conceptos de la física clásica. En el caso de posición y momento implica que escala cuántica las partículas no siguen una trayectoria determinada, ya que eso implicaría conocer en todos los instantes simultáneamente posición y momento lineal. Dos ejemplos que muestran que la idea de trayectoria clásica no tiene sentido son los orbitales atómicos y el experimento de la doble rendija. Deja de haber determinismo clásico (no probabilístico), ya que si el electrón tuviera posición y momento con valores concretos, aunque no los pudiésemos medir, la partícula sí seguiría una trayectoria clásica, pero eso no es así. La mecánica cuántica es determinista en la evolución probabilidades de los valores medidos, pero no en valores medidos. Enlaza con la idea de abandonar realismo (la realidad tiene un valor antes de medirlo) y pasar al positivismo (lo único que podemos saber de la realidad es lo que midamos)

Es importante destacar el valor de la constante de Planck que aparece en el principio de incertidumbre, $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Js, lo que hace que a nivel macroscópico el principio de incertidumbre sea inapreciable.

> *¿Cómo que una partícula no tiene trayectoria? Aunque sea cierto para el electrón en el átomo, ¿cómo se explica la trayectoria de una partícula en la cámara de niebla? Lo que observamos son una secuencia de interacciones del electrón con gotas, pero entre esos puntos no se puede decir lo que ha pasado.*

> *El principio de Heisenberg para medida-perturbación fue reformulado por Kennard en 1927 de manera correcta para desviaciones del producto de dos magnitudes, y se cumple se mida o no.*

> *El concepto "observar" es realizar una medida, es una interacción de un sistema macroscópico de medida con el sistema a medir, y no implica un observador físico ni la consciencia humana.*

2. Creación de la mecánica cuántica. Interpretación probabilística

Como se ha comentado se puede decir hasta la década de 1920 se realizaban correcciones y aportaban ideas, pero es entonces cuando surge una teoría física completa:

En 1925 **Heisenberg** (Nobel 1932 por "la creación de la mecánica cuántica"), Born y Jordan crean la mecánica cuántica matricial. Cualitativamente usa matrices que relacionaran números de partida y resultados, sin sentido físico visualizable cómo se llega de unos a otros. Asociable a idea de no trayectoria.

En 1926 **Schrödinger** (Nobel 1933) desarrolla la mecánica cuántica ondulatoria, enlazando con dualidad de De Broglie. Surge el concepto de ecuación de onda, cuya solución es la función de onda, imaginaria, que describe la evolución temporal de un sistema a nivel cuántico, y se aplica para describir el estado del electrón en el átomo, con lo que surge el modelo atómico de Schrödinger, básicamente es modelo actual.

En 1926 **Dirac** (Nobel 1933) desarrolla Mecánica Cuántica que unifica lo hecho por Heisenberg y Schrödinger. La ecuación de Dirac para el electrón revisa la de Schrödinger, contemplando relatividad y spin, y predice la existencia de antimateria: Anderson (Nobel 1936) detecta positrón en 1932 en rayos cósmicos.

En 1926 **Born** (Nobel 1954) realiza la **interpretación estadística de la función onda**; $|\Psi|^2$ es la función de densidad de probabilidad, indica la probabilidad de obtener un valor en una medida, sin una explicación causal. Esta interpretación probabilística con la posición del electrón lleva al concepto de orbitales atómicos.

En 1927 se celebra la **5ª Conferencia de Solvay** en Bruselas, donde se debate sobre la interpretación de la mecánica cuántica, con dos "bandos" liderados por Einstein y Bohr, buenos amigos, cuyas posturas se



pueden resumir en dos frases que se suelen citar, Einstein (1926) “Dios no lanza dados” y Bohr (dudosa) “No le digas a Dios qué hacer con sus dados”. Finalmente “gana” Bohr y se sientan las bases de lo que más tarde se llamará **Interpretación de Copenhague** (donde estaba el instituto donde Bohr y otros trabajaban), que es la interpretación más habitual y considerada ortodoxa, cuyas ideas básicas son:

-El estado de un sistema lo define una **función de onda Ψ** , que se “colapsa” en un valor en la medida.

-La naturaleza tiene una **descripción probabilística** (Born). Es no determinista; como no se pueden conocer con exactitud los valores actuales tampoco se puede conocer con exactitud el futuro, pero sí probabilidades.

-**Principio de incertidumbre**. Visión del positivismo; no se puede decir nada de lo que pasa cuando no se observa. La pregunta “¿Donde estaba la partícula antes de que midiera la posición?” no tiene sentido.

-**Principio de complementariedad**. Dualidad onda-corpúsculo de la materia. Visión centrada en describir lo observado y medido, no en describir una realidad antes de ser medida.

-**Principio de correspondencia** (Bohr): la mecánica cuántica describe un sistema como la física clásica si el sistema es lo suficientemente grande. Las leyes físicas son únicas independientemente de la escala, pero a escala macroscópica ($h \rightarrow 0$, $\lambda_{\text{De Broglie}} \ll \text{sistema}$) la física cuántica se expresa como la física clásica.



1 Peter Debye (1936 Q)
2 Irving Langmuir (1932 Q)
3 Martin Knudsen
4 Auguste Piccard
5 Max Planck (1918 F)
6 William L. Bragg (1915 F)
7 Émile Henriot
8 Paul Ehrenfest
9 Marie Curie (1903 F y 1911 Q)
10 Hendrik Anthony Kramers
11 Edouard Herzen
12 Hendrik A. Lorentz (1902 F)
13 Théophile de Donder
14 Paul Adrien M. Dirac (1933 F)
15 Albert Einstein (1921 F)
16 Erwin Schrödinger (1933 F)
17 Arthur H. Compton (1927 F)
18 Jules Émile Verschaffelt
19 Paul Langevin
20 Louis-V. de Broglie (1929 F)
21 Charles-Eugène Guye
22 Wolfgang Pauli (1945 F)
23 Werner Heisenberg (1932 F)
24 Max Born (1954 F)
25 C.T. Rees Wilson (1927 F)
26 Ralph Howard Fowler
27 Léon Brillouin
28 Niels Bohr (1922 F)
29 O.W. Richardson (1928 F)
(Eran o fueron Nobel 17)

5ª Conferencia Solvay 1927 (original en blanco y negro, participantes, public-domain)

2.1 Algunos pasos posteriores en fundamentos de mecánica cuántica

Se pueden citar muchos, pero se da una selección personal de “pocas” ideas:

En 1935 se publica un artículo **EPR** (iniciales de autores Einstein, Podolsky y Rosen, y al tiempo de Elements of Physical Reality) donde intenta demostrar que la mecánica cuántica es incompleta para describir la realidad física (lo que es para Einstein), y que debe haber variables ocultas que describan una realidad única antes de ser medida, sin probabilidades. Partiendo del principio de localidad (relatividad) según el cual la realidad física no puede ser afectada instantáneamente a distancia, muestra que la “acción fantasmal a distancia” del **entrelazamiento** lleva al absurdo de que la realidad no tiene valor definido antes de la medida. En 1959 Aharonov-Bohm proponen efecto por interacción entre potencial eléctrico y función onda, validado en 1960; en zonas sin campo magnético hay efecto sobre una carga, y sugiere “no localidad”.

En 1964 **John Bell** enuncia un teorema que indica que con variables ocultas locales no se pueden reproducir las predicciones de la mecánica cuántica; para que la mecánica cuántica sea completa con una realidad antes de ser medida como esperaba Einstein, no puede ser una realidad local.

El teorema de Bell en forma de desigualdades puede ser probado experimentalmente, lo que se hizo varias veces hasta 1982, cuando **Aspect** confirma con gran precisión las desigualdades de Bell con fotones entrelazados: la mecánica cuántica es completa y Einstein se equivocaba; dos partículas entrelazadas son una entidad única, no tienen realidades físicas locales separadas.

En 1990 se propone experimento GHZ (Greenberger, Horne, Zeilinger) que con entrelazamiento triple plantea un “Teorema de Bell sin desigualdades”, verificado en 1990, que muestra que mecánica cuántica es correcta y no puede haber realismo y localidad al mismo tiempo.

A nivel teórico y de interpretaciones el problema de la medida, que enlaza con aplicaciones, sigue centrando interés. En 1988 AAV (Aharonov, Alber, Vaidman) proponen la “medida débil”, que no perturba el sistema medido. En 2012 en Nobel de Física está asociado a “medida cuántica no destructiva”. (MinutePhysics, [2012 Nobel : How Do We See Light?](#))



3. Aplicaciones de la Física Cuántica al desarrollo científico y tecnológico

La física cuántica surge con el átomo pero luego se extiende a mucho más.

El conocimiento aportado por la física cuántica es el punto de partida gran cantidad de tecnologías:

- Electrónica y comunicaciones (telefonía móvil, Internet...) (Bardeen, Brattain, Shockley 1958 inventan el transistor, sustituye a las válvulas de vacío y lleva asociada la miniaturización; en los microprocesadores hay millones)
- Física de materia condensada: nuevos materiales
- Superconductores (teoría BCS en 1957 con pares de electrones)
- Resonancia magnético nuclear (Purcel y Bloch 1946, Damadian 1977 primera completa de cuerpo humano)
- Microscopio electrónico (Ruska prototipo 1931)
- Microscopio de efecto túnel (Bining y Rohrer 1981)
- Nanotecnología, miniaturización y límites.
- Química: orbitales atómicos y moleculares, espectroscopía
- Relojes atómicos, que redefinieron el segundo para el SI en 1967, y de los que depende el sistema GPS.
- Criptografía cuántica (Bennet Bassard 1984 primer protocolo, Ekert 1991 usa entrelazamiento)
- Computación cuántica (Deutsch 1985 teoría)

3.1 El Láser

El Láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación) es un dispositivo que amplifica la luz mediante absorción y radiación de energía, usando un fenómeno cuántico que es la emisión estimulada. En 1953 se construyó un máser (mismos principios que láser pero con microondas) por Townes (Nóbel en 1964), el primer láser en 1960 por Maiman.

3.1.1 Características fundamentales de la radiación láser

La radiación láser es coherente, lo que hace referencia normalmente a coherencia temporal: la radiación está en un rango de frecuencias muy estrecho, idealmente es una única frecuencia y monocromático. La frecuencia del láser y su intensidad son las características principales.

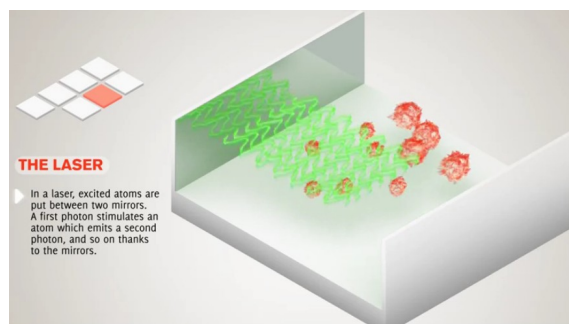
También se habla de que es coherente espacialmente: el haz es muy estrecho

3.1.2 Funcionamiento básico

Un láser tiene tres elementos básicos:

- Cavidad [óptica resonante] láser: consigue que la luz esté circulando mucho tiempo por el medio activo, típicamente es una cavidad formada por dos espejos.
- Medio activo: material en el que se produce la amplificación con los procesos de excitación mediante bombeo de energía y con los procesos de emisión.
- Bombeo: realiza la excitación del medio activo, normalmente luz (bombeo óptico) o corriente eléctrica (bombeo eléctrico)

Con estos tres elementos se consigue la inversión de la población; hay más átomos excitados que átomos en nivel fundamental. En cierto momento un átomo se desexcita con una emisión espontánea, y se consigue que esos fotones estimulen la desexcitación del resto de átomos produciendo emisión estimulada de radiación, que tras cierta circulación en la cavidad láser es suficientemente intensa para abandonarla como rayo láser.



Láser, <http://www.toutestquantique.fr>

3.1.3 Principales tipos de láseres existentes

Los láseres se pueden clasificar según el tipo de medio activo:

Estado sólido (láser de rubí, tierras raras). Los semiconductores son medio sólido, pero son otra categoría.

Semiconductores (los diodos láser son los más habituales, impresoras, punteros, CD/DVD)

Gas (láser de excímeros, utilizados en cirugía láser ocular LASIK)

Líquido o colorante.

3.1.4 Principales aplicaciones

Numerosas aplicaciones como comunicaciones (fibra óptica) y medicina (cirugía, depilación), y forma parte de muchos productos comerciales: impresoras láser, CD/DVD, ratones ópticos, lectores de códigos, punteros láser, pulsioxímetros, iluminación de espectáculos. Con alta intensidad se utiliza en industria para corte de materiales, y en fusión por confinamiento inercial. La medición de distancias precisas mediante láser permite guiado de vehículos o realización de topografía desde el espacio.

La interferometría tiene utilidades en investigación, como LIGO y las ondas gravitacionales.



4. Anexos/temas para profundizar

Es un tema muy amplio y podría ser interminable, se ponen ideas mínimas:

4.1 Algunas citas sobre mecánica cuántica

Hay muchas de físicos, se incluyen porque hacen reflexionar sobre las ideas que transmiten y a abrir mente

-*"What I am going to tell you about is what we teach our physics students in the third or fourth year of graduate school... It is my task to convince you not to turn away because you don't understand it. You see my physics students don't understand it... That is because I don't understand it. Nobody does."* Feynman

-*"What we observe is not nature itself, but nature exposed to our method of questioning"* Heisenberg

'...the "paradox" is only a conflict between reality and your feeling of what reality "ought to be."' Feynman

"There is no quantum world. There is only an abstract physical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature..." Bohr

4.2 Algunos términos cuánticos

La idea es describir muy brevemente algunos que surgen habitualmente. Ya mencionados: función de onda, incertidumbre, complementariedad, correspondencia, no localidad, medida, observable, ...

-**Estado cuántico:** que no es un estado clásico concreto: es un objeto matemático, no real, que contiene toda la información del sistema cuántico, midamos o no, e incluye todos los valores posibles de observables con la probabilidad de que sean obtenidos. El estado está descrito por la función de onda y su evolución temporal la describe la ecuación Schrödinger, siempre que no haya medida /colapso/ interacción externa al sistema que descrito, ya que entonces el estado cuántico puede cambiar. Más: estados propios, valores propios...

-**Superposición:** estado cuántico que es combinación simultánea de varios posibles estados de sistema cuántico, de modo que la probabilidad es una combinación de probabilidades de esos estados. Ejemplos son los qubits superposición de $|0\rangle$ y $|1\rangle$, la interferencia de un electrón en una doble rendija, y cualitativamente, el gato de Schrödinger. Recomendación: ["Cuántica sin fórmulas- Superposiciones cuánticas"](#)

-**Entrelazamiento:** fenómeno asociado a que en un grupo de partículas el estado cuántico de cada una depende del estado cuántico de las demás. Por ejemplo si se crean dos partículas con spin $\pm 1/2$, para cada una de ellas la probabilidad en la medida será 50 %, pero una vez medida una, se sabe 100% seguro la medida que se obtendrá en la otra. No tienen estados separados; medidas aleatorias, pero correlacionadas.

-**Colapso:** fenómeno en el que la función de onda, inicialmente en superposición de estados, pasa a tener un único estado asociado a la interacción en el proceso de medida; conecta función de onda y observables.

-**Decoherencia:** fenómeno asociado al desfase de los estados cuánticos componentes de una superposición, que surge de interacción con el entorno, y que hace que no puedan interferir entre sí, y su comportamiento sea clásico. Es algo que se intenta evitar y controlar en computación cuántica.

-**Spin:** es una propiedad cuántica sin análogo clásico asociado a simetría función de onda frente a rotación. Es momento angular intrínseco (mismas unidades que el macroscópico y enlazables con efectos Einstein-de Haas y Barnett), no es giro sobre su eje. Es "como si" fuera un imán porque se acopla al campo magnético, pero no es un imán. No es un vector: "dirección" cuantizada, y más complejo.

4.3 Algunos fenómenos cuánticos

Efecto túnel: la imposibilidad de asignar una posición con certeza a una partícula hace que pueda "aparecer" al otro lado de una barrera de potencial sin aportarle energía para superarla; analogía con montaña y túnel.

Condensado Bose-Einstein: nuevo estado de la materia a muy bajas temperaturas, propuesto en 1924, conseguido en 1995 por Cornell, Ketterle, Wieman, Nobel 2001

Efecto Casimir; efecto cuántico macroscópico propuesto en 1948, atracción dos placas muy próximas paralelas por efecto de vacío cuántico. Medido experimental con precisión en en 1997 por Lamoreaux

Efecto Hall Cuántico: versión cuántica efecto clásico que hace que la conductividad esté cuantizada, descubierto en 1980 por Klitzing (Nobel 1985). Se usa en calibración resistencias desde 1990.

Teletransporte cuántico: propuesto en 1993, se transporta información cuántica (el estado) a través de entrelazamiento y de comunicación clásica. No transporta materia ni a más velocidad que la luz.

4.4 Interpretaciones de la mecánica cuántica

Además de la interpretación de Copenhague, hay otras; varía determinismo, realidad de la función de onda, existencia de variables ocultas, explicación del colapso/medida/papel observador. No hay un consenso claro sobre cómo interpretar la medida.

En 1952 **Bohm**, apoyándose en ideas de De Broglie, propuso una interpretación que usa variables ocultas no locales y sí es determinista, llamada **Bohm-De Broglie**. Esta interpretación es importante porque influyó a Bell para formular su teorema.

En 1957 Everett realiza la interpretación de múltiples universos; no hay colapso, cada posibilidad de la



función de onda es real y representa un universo paralelo.

>La falta de consenso en la interpretación y lo confuso, en especial el papel del observador “consciente” hace que a veces se haga un uso indebido de mecánica cuántica para justificar afirmaciones no científicas.

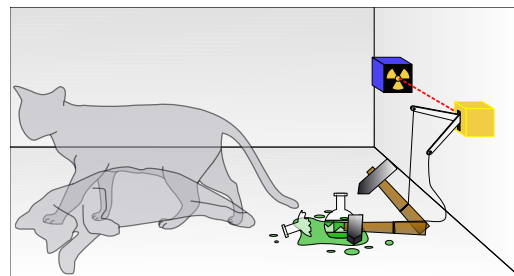
4.5 Algunos experimentos mentales y reales con física cuántica

En general es interesante ver que a veces se cambia el orden habitual; a partir matemáticas se proponen hechos que luego se verifican experimentalmente, como positrón, entrelazamiento y bosón Higgs.

4.5.1 El gato de Schrödinger

En 1935 Schrödinger propone este experimento mental como discusión del concepto de realidad física, para intentar mostrar lo absurdo el que no haya un valor definido hasta que no hay colapso/medida/observación, apoyando idea EPR.

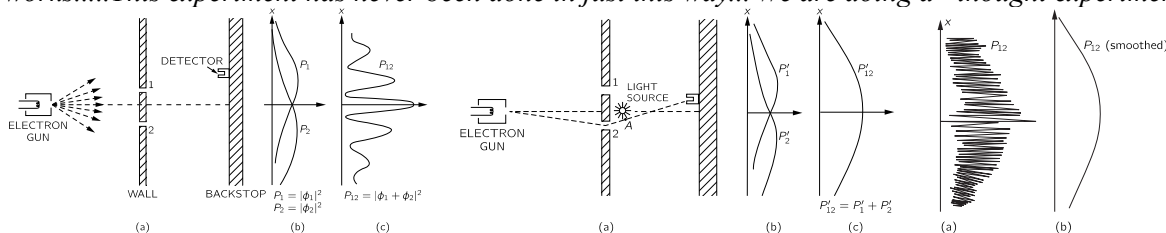
Si no se abre la caja, la función de onda del sistema describiría al mismo tiempo el gato vivo y muerto con igual probabilidad. Es un experimento muy usado para explicar las diferencias entre distintas interpretaciones de la mecánica cuántica; según la de Copenhague, se toma un valor concreto cuando hay medida / interacción con un sistema macroscópico, y eso ocurre en el detector.



Gato de Schrödinger, [wikipedia](https://es.wikipedia.org/wiki/Gato_de_Schrödinger), cc-by-sa

4.5.2 El experimento de la doble rendija con visión de física cuántica

Aunque el experimento de Young surgió para demostrar el carácter ondulatorio luz, en mecánica cuántica se usa con elementos que clásicamente se consideran partículas para demostrar la dualidad onda-partícula. Es un experimento mental utilizado por Feynman; “...which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery. We cannot make the mystery go away by “explaining” how it works. We will just tell you how it works.... This experiment has never been done in just this way... We are doing a “thought experiment”...”



[The Feynman Lectures on Physics, Chapter 37. Quantum Behavior](https://www.feynmanlectures.com/), Copyright 1963, 2006, 2013 by the California Institute of Technology

No se puede saber si los electrones pasan por una de las dos rendijas, averiguar por qué rendija pasa elimina la interferencia. La probabilidad depende de que el evento pueda ocurrir de varias maneras al tiempo o de que se sepa que ocurre de una manera de entre las posibles.

En 1961 Jönsson realiza el experimento con electrones, realizándose electrón a electrón en 1974 por Merli y en 1998 por Tonomura, validando el experimento mental de Feynman de colocar detectores.

Hay variaciones del experimento, con detectores en rendijas, con polarizadores para marcar las ondas, y con detectores en otros puntos: elección retardada y borrado cuántico.

El experimento se ha realizado con partículas más grandes que electrones mostrando la dualidad: en 1999 se realizó con moléculas de fullereno esférico con 60 átomos de Carbono, y en 2013 se realizó con moléculas de 810 átomos (más de 10000 u)

4.6 Unidades naturales o Unidades de Planck

Es un sistema de unidades propuesto por Planck en 1899, de modo que solamente dependan de las 5 constantes universales (c, G, h, K (Coulomb) y k (Boltzman)), de modo que esas constantes tomen valor 1.

En palabras de Planck *Éstas retienen necesariamente su significado en cualquier momento y para cualquier civilización, incluso las extraterrestres y no humanas, y pueden por lo tanto llamarse “unidades naturales”*

La ley de gravitación universal pasa a ser $F=m_1m_2/r^2$, la energía de un fotón pasa a ser $E=\omega$, y la equivalencia masa energía pasa a ser $E^2=m^2+p^2$.

Es muy interesante que surgen unidades de tiempo, longitud, masa, carga y temperatura.

$$\text{Longitud de Planck } l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,616 \cdot 10^{-35} \text{ m} \quad \text{Tiempo de Planck } t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5,391 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

$$\text{Temperatura de Planck } T_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}} = 1,417 \cdot 10^{32} \text{ K}$$

