

# **La importancia de la Luz en nuestras vidas<sup>1</sup>**

Un repaso por la apasionante historia y relevancia  
actual de la Óptica y la Fotónica

## **Apuntes de la Asignatura**

**Jesús Mirapeix Serrano**

Grupo de Ingeniería Fotónica  
Universidad de Cantabria



---

<sup>1</sup>Asignatura enmarcada en el Programa Sénior de la Universidad de Cantabria.



**Figura 1.** Grupo de “Heisenbéricos miopes” (en realidad se trata de un grupo de ingleses bailando el “*Morris dancing*”). Fuente: <http://inciclopedia.wikia.com>. Licencia: CC-BY-SA 3.0

Queda prohibida, salvo excepción prevista por en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transforamción de esta obra sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sgts. Código Penal).

### **La importancia de la Luz en nuestras vidas**

Mirapeix Serrano, Jesús

© 2020 Jesús Mirapeix Serrano

Universidad de Cantabria

39005 Santander

# LA IMPORTANCIA DE LA LUZ EN NUESTRAS VIDAS

## *Estructura del Curso*

**E**ste curso se ha dividido en un total de **8 capítulos** en los que se pretende introducir al alumno los conceptos principales de la óptica y la fotónica: desde el uso de las primeras lentes de aumento hasta el uso del láser en infinidad de dispositivos y aplicaciones hoy en día.

▶ **Capítulo 1: Evolución histórica de la Óptica y la Fotónica**

Por medio de personajes clave como Arquímedes, Newton o Einstein, recorreremos la apasionante historia de la evolución de la Óptica hasta llegar a la Fotónica, con la invención de los omnipresentes láser y fibra óptica.

▶ **Capítulo 2: ¿Qué es la luz? Ondas y Partículas**

De una manera sencilla y amigable trataremos de acercarnos a uno de los “misterios” que más han preocupado y ocupado a cientos de científicos de los últimos siglos: ¿Qué es la Luz? ¿Es la luz una onda o una partícula?

▶ **Capítulo 3: Sol, Luz y Vida: comprendiendo el funcionamiento del Sol y la fotosíntesis**

La vida en nuestro planeta no existiría de no ser por el Sol y la energía que nos brinda cada segundo. De igual manera, la fotosíntesis, o lo que es lo mismo, la conversión que realizan las plantas de materia inorgánica a compuestos orgánicos gracias a la energía de la luz.

▶ **Capítulo 4: Láser, fibra óptica y su importancia en la sociedad actual: internet**

Nuestra sociedad no sería la misma si, allá por 1958, no se hubiese inventado el láser y, posteriormente, la fibra óptica. Internet, el gran fenómeno de las comunicaciones que ha revolucionado nuestra vida, no es más que luz (láser) que viaja a través del mundo por fibra óptica. Revisaremos brevemente la invención del láser, de la fibra óptica y sus fundamentos básicos.

▶ **Capítulo 5: Midiendo el mundo a través de los fotones: de la biomedicina a la ingeniería civil**

La luz no sirve sólo para comunicarnos a gran velocidad por medio de internet. También puede valernos para aplicaciones de lo más variado: desde delimitar de manera precisa células cancerígenas hasta evaluar en tiempo real el estado de un puente o una presa. En este capítulo mostraremos brevemente algunos ejemplos significativos que nos ayuden a comprender mejor esta faceta “oculta” de la luz.

▶ **Capítulo 6: El fenómeno de la visión: funcionamiento del ojo humano y animal**

Este acercamiento al mundo de la luz no sería completo si no somos capaces de comprender como funciona uno de los elementos más increíbles del cuerpo humano: el ojo y el sentido de la visión. Además, veremos las diferencias existentes con el sentido de la visión de otros miembros del reino animal.

▶ **Capítulo 7: Últimos avances de la fotónica y perspectivas de futuro**

En este capítulo final revisaremos algunos de los avances más recientes en el mundo de la óptica y la fotónica. Del mismo modo, veremos cuáles son las perspectivas de futuro de un campo de conocimiento fundamental en la actualidad y, sin duda, en las próximas décadas.

► **Capítulo 8: Experimentos en casa**

Por último, se propondrán a los alumnos una serie de sencillos experimentos que permitirán interiorizar los conceptos explicados a lo largo del curso.

# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>1</b>
<b>2. ¿Qué es la Luz? Ondas y Partículas</b>	<b>2</b>
2.1. ¿Por dónde empezamos? . . . . .	2
2.1.1. Partículas . . . . .	2
2.1.2. Ondas . . . . .	4
2.1.3. La energía de un fotón . . . . .	7
2.2. Dualidad Onda-Corpúsculo . . . . .	8
2.3. El experimento de la Doble Rendija 2.0 . . . . .	11
2.4. Conclusiones . . . . .	16
<b>Índice de figuras</b>	<b>18</b>

# CAPÍTULO 2

## ¿Qué es la Luz? Ondas y Partículas

### 2.1. ¿Por dónde empezamos?

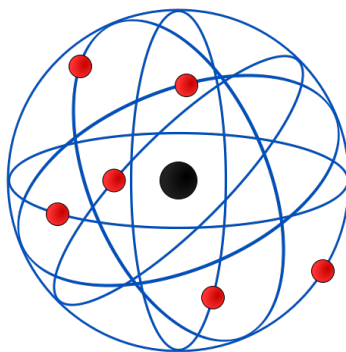
**¡Recordando a Newton y Huygens!** En el Capítulo anterior, en el que hemos realizado un breve repaso a la evolución histórica de la óptica en los últimos siglos, hemos podido apreciar como los científicos mantuvieron durante mucho tiempo una enconada disputa sobre la naturaleza de la luz. Si nos ponemos en la piel de Newton y Huygens, allá por finales del siglo XVIII, resulta obvio que no sería fácil determinar la verdadera naturaleza de la luz. Evidentemente, estos científicos (y los posteriores) se basarían en su intuición pero, sobre todo, en diversos experimentos para tratar de validar sus hipótesis. Antes de nada, trataremos de clarificar los conceptos de partícula y onda.

#### 2.1.1. Partículas

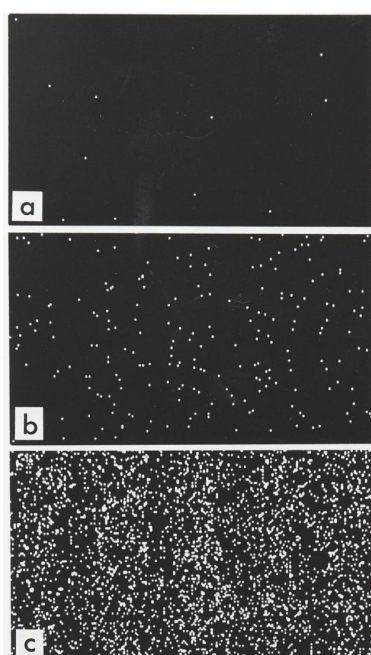
¿Qué es una partícula? Si acudimos al diccionario de la RAE, la acepción de **partícula** que buscamos sería:

*Parte pequeña de materia.*

Cuando hablamos de partículas en física, nos estamos refiriendo a los **componentes elementales de la materia**. Por ejemplo, sabemos que la materia está formada por **átomos** y estos, a su vez, están formados por un núcleo compuesto de **protones/neutrones** y **electrones**, que “orbitan” alrededor del núcleo (Figura 2.1). Los electrones serían un ejemplo de partícula elemental: veámoslo con un ejemplo gráfico en la Figura 2.2. En esta figura está representado precisamente el experimento de la doble rendija de Young del que ya hablamos en el Capítulo 1. Este experimento parecía validar, originalmente, la teoría de que la luz era una onda. Sin embargo, un equipo de investigadores decidió “dar una vuelta” al experimento y realizarlo lanzando partículas “elementales” de una en una. En la imagen lo que vemos son electrones que son lanzados de manera individual y detectados sobre una pantalla: cada punto es un electrón, una partícula. Por curiosidad, mencionar que el número de electrones en cada imagen es de 11 (a), 200 (b), 6000 (c), 40000 (d) y 140000 (e).



**Figura 2.1.** Representación de un átomo según el modelo atómico de Rutherford (núcleo representado en negro y electrones en rojo). Fuente: Wikimedia Commons (CC BY-SA 3.0). <https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo>



**Figura 2.2.** Experimento de la doble rendija realizado por el equipo del Dr. Tonomura. Fuente: Wikipedia (CC BY-SA 3.0). [https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento\\_de\\_Young](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young)

### Cuestión 1.1: Partículas ¿fundamentales?

Hemos hablado de neutrones y protones pero: ¿se consideran a día de hoy partículas fundamentales? ¿Se conocen partículas más pequeñas y “más fundamentales”?

Si te interesa el tema, investiga un poco por tu cuenta para tratar de contestar a esta pregunta.

Si con la explicación anterior hemos sido capaces de asimilar el concepto de partícula, entenderemos inmediatamente que la **teoría cospurcular de la luz** implica que ésta está formada por pequeñas partículas denominadas **fotones**. Esto es, cuando vemos un rayo de luz, podemos imaginarnos que está compuesto por multitud de pequeños fotones, al igual que ocurre con los

electrones de la Figura 2.2.

### 2.1.2. Ondas

Como ya se comentó en el capítulo anterior, una onda puede entenderse como:

*f. Fis. Movimiento periódico que se propaga en un medio físico o en el vacío.*

Comentábamos también que una onda es una perturbación que se propaga sobre un determinado medio, como ocurre con el sonido por el aire, por ejemplo. Se podría puntualizar que una onda es una perturbación que se propaga por un medio y que transporta energía. Esta puntualización es importante y fácil de asimilar. Pensemos en el ejemplo de las olas<sup>1</sup>: sabemos que transportan energía ya que todos hemos experimentado sus embestidas en la playa<sup>2</sup>.

#### Importante 1.1: Olas y Energía

Existen diversas energías renovables asociadas a los mares y océanos, como las basadas en las corrientes marinas, la diferencia de altura de las mareas o la diferencia de temperatura a diferentes profundidades en los océanos. Una de las más conocidas es la denominada energía undimotriz, que aprovecha la energía que transportan las olas por medio de dispositivos de tipo “boya” (Figura 2.3, izquierda) o como el denominado “Pelamis” o serpiente de mar (Figura 2.3, derecha)

#### Cuestión 1.2: Energía Undimotriz

Busca información sobre el funcionamiento de al menos un dispositivo de generación de **energía undimotriz** y explícalo brevemente **con tus propias palabras**, incluyendo algún ejemplo de instalación real.

Según tu opinión: ¿será la energía undimotriz una **tecnología renovable clave en el futuro cercano**?

**Maxwell**, el gran físico del que también hablamos en el Capítulo 1, demostró la estrecha relación existente entre **electricidad y magnetismo** y propuso que **la luz es una onda electromagnética**. ¿Qué significa esto? Básicamente que la luz sería la combinación de un campo eléctrico y uno magnético que se propagarían como una onda, tal y como se ha representado en la Figura 2.4. En dicha figura, vemos como aparece representada una onda, en amarillo, cuyo valor varía a medida que se desplaza por la pantalla (también podemos ver una señal verde, pero esa ahora no nos interesa). Dicha onda podría ser perfectamente **la electricidad que nos llega a casa**, que en España tiene unos valores de 230V de tensión y 50Hz de frecuencia.

Ha llegado por tanto el momento de explicar brevemente los parámetros fundamentales que definen a una onda:

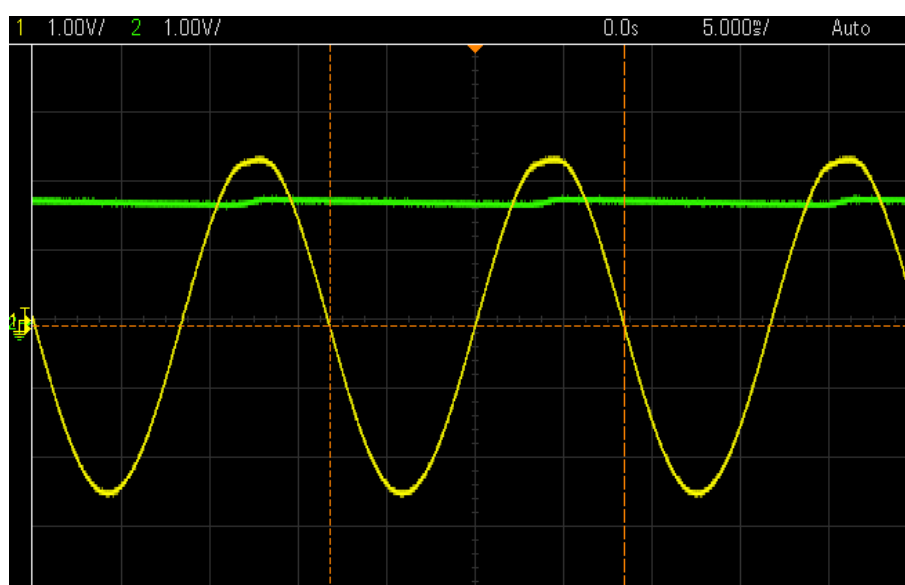
<sup>1</sup>Curiosamente, en inglés **wave** se utiliza indistintamente para nuestra “ola” y para “onda”.

<sup>2</sup>De hecho, existe una energía renovable, la energía undimotriz, que se basa en el aprovechamiento de la energía de las olas para generar energía eléctrica.





**Figura 2.3.** Dispositivos para el aprovechamiento de la energía undimotriz (izquierda: PB40 PowerBuoy por Ocean Power Technologies (Licencia: Dominio Público); derecha: sistema Pelamis (Licencia: Dominio Público)).

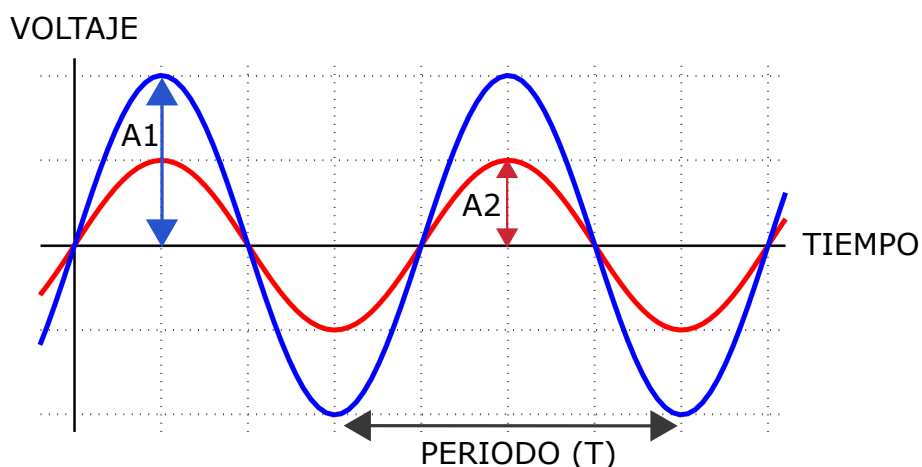


**Figura 2.4.** Onda medida y representada en la pantalla de un osciloscopio. Fuente: Wikipedia (CCO 1.0). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Half-wave\\_rectifier\\_waveform.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Half-wave_rectifier_waveform.png)

**La amplitud**  $A$  de una onda nos da una idea de la intensidad o energía asociada a la misma. Si nos fijamos en la Figura 2.4, la amplitud sería la distancia (sobre el eje vertical) entre los puntos mínimo y máximo de la onda. En el ejemplo de la electricidad, estaríamos hablando de una amplitud de 230V. En el ejemplo de una ola en el mar, la amplitud sería la altura de la ola.

**El periodo**  $T$  de una onda nos da una idea de lo rápido que “se mueve” o varía con el tiempo. Esto es, fijándonos en el eje horizontal, si los valles y picos de la onda estuviesen muy juntos, hablaríamos de un periodo más pequeño (**expresado en segundos**) y si estuviesen más separados, de un periodo más grande.

**La frecuencia**  $f$  de una onda no es sino otra manera de expresar lo rápido o lento que varía ésta. De hecho, la frecuencia es el inverso del periodo, es decir:  $f = \frac{1}{T}$ . La frecuencia se expresa en hercios, que son equivalentes a  $\frac{1}{\text{segundo(s)}}$ .



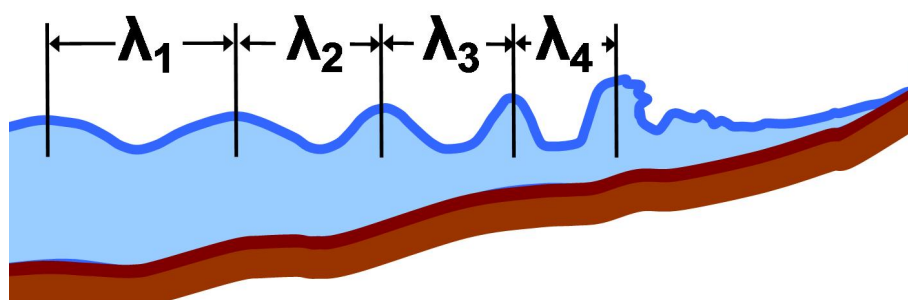
**Figura 2.5.** Amplitud y frecuencia de una onda. Fuente: Wikimedia Commons (CC-BY-SA 4.0) (Imagen original modificada). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amplified\\_sine\\_wave.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amplified_sine_wave.svg)

Estos parámetros fundamentales de una onda se han representado en la Figura 2.5. Como puede apreciarse, las ondas 1 (azul) y 2 (roja) tienen el mismo **periodo**, pero la **amplitud** de la primera es el doble que la de la segunda.

Un último concepto importante y muy interesante es el de la **longitud de onda**  $\lambda$ . La  $\lambda$  de una onda hace referencia al tamaño físico, a las dimensiones espaciales de la onda. Si en la Figura 2.5 representamos en el eje horizontal “distancia” en vez de tiempo, lo que antes era el periodo de la onda (lo que tarda en volver al mismo punto) ahora pasa a ser la longitud de onda (el tamaño de la misma).

### Importante 1.2: Ondas y Olas

Las olas se comportan como ondas en su desplazamiento por los océanos y, de hecho, se utilizan parámetros como la longitud de onda a la hora de estudiarlas. En la Figura 2.6 puede apreciarse como la  $\lambda$  de las olas varía a medida que se acercan a lugares donde la profundidad es menor, esto es, cercanos a la costa.



**Figura 2.6.** Representación de la evolución de la longitud de onda de las olas a medida que se acercan a la costa. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: CC-BY-SA 3.0. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Local\\_wavelength.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Local_wavelength.JPG)

En la Figura 2.8 se han representando ondas asociadas a diferentes longitudes de onda a lo largo de todo el espectro electromagnético. Como puede apreciarse, las ondas asociadas a **los rayos-X o a la radiación ultravioleta** tienen una  $\lambda$  muy pequeña (son muy pequeñas, del tamaño de átomos); mientras que las **ondas de radio**, por ejemplo, son mucho más grandes (de un tamaño comparable a un edificio).

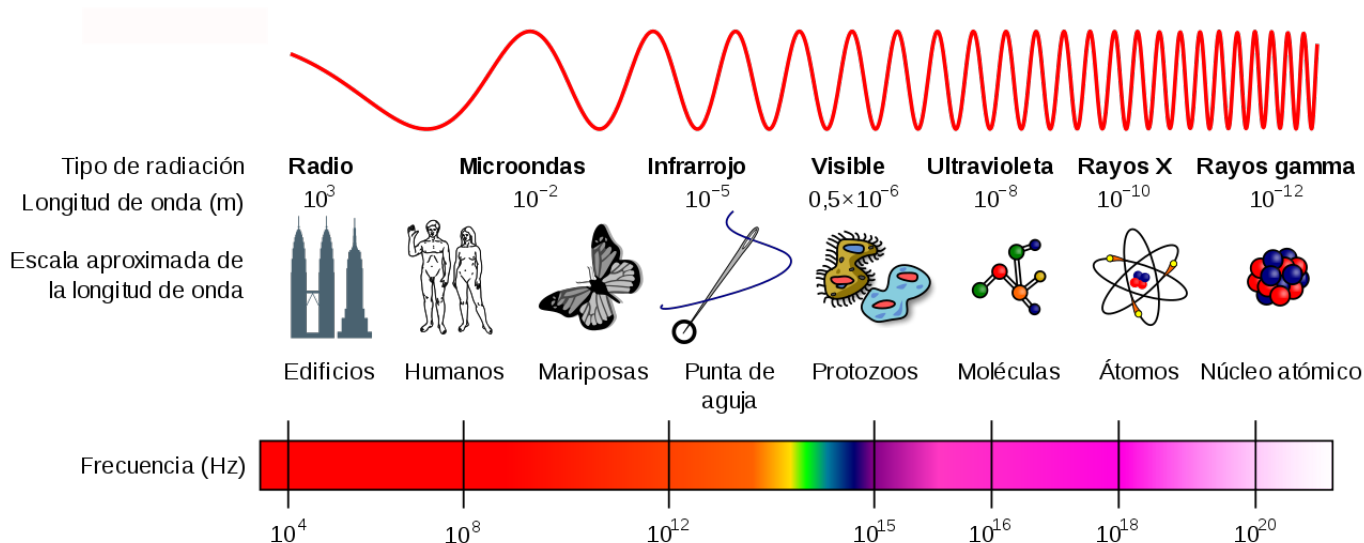


Figura 2.7. Espectro electromagnético. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio público. [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:EM\\_Spectrum\\_Properties\\_es.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:EM_Spectrum_Properties_es.svg)

**Importante 1.3: Emisoras de radio y su frecuencia**

Probablemente hoy en día uses una radio digital, pero durante mucho tiempo se han empleado radios donde, mediante un dial, se buscaba manualmente la sintonización de una u otra emisora. Lo que se hacía al “mover” el dial era cambiar la frecuencia a la que la radio estaba sintonizada, buscando así los diferentes canales, que emiten a diferentes frecuencias.

**2.1.3. La energía de un fotón**

Si nos fijamos en la Figura 2.8 podemos localizar fácilmente las longitudes de onda correspondientes a la **luz visible, ultravioleta y a los rayos-X**: ¿qué ocurre con su longitud de onda? A medida que nos desplazamos desde el visible a los rayos-X la longitud de onda se hace más pequeña. ¿Nos aporta esto alguna información adicional de interés? Está claro que sí:

La **energía asociada a la luz** o radiación está directamente relacionada con su longitud de onda, de hecho, es inversamente proporcional a su  $\lambda$ . La expresión que nos indica esto es la siguiente:

$$E = h \cdot f \tag{2.1}$$

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \tag{2.2}$$

En las ecuaciones anteriores  $E$  es la energía de la luz,  $h$  una constante (la constante de Planck),  $c$  la velocidad de la luz en el vacío y  $f$  la frecuencia y  $\lambda$  la longitud de onda de la luz<sup>1</sup>.

Por medio de las ecuaciones anteriores podemos conocer que luz tiene asociada más energía y, por lo tanto, puede ser más (potencialmente) peligrosa para el ser humano. Por ejemplo, la luz visible no nos causa en términos generales ningún problema, mientras que sabemos que la exposición repetida a la luz ultravioleta o a los rayos-X (que son más energéticos) sí que puede acarrear problemas de salud.

### Cuestión 1.3: Emisoras de radio y su energía

Para afianzar los conceptos que acabamos de hacer te propongo el siguiente ejercicio: selecciona dos emisoras de radio al hacer y busca su frecuencia (por ejemplo en FM puedes buscar “Onda Cero” y “Cadena Ser”). Apunta sus frecuencias correspondientes y calcula su energía a través de la sencilla expresión que acabamos de ver<sup>a</sup>: ¿qué cadena transmite ondas con mayor energía?

<sup>a</sup>Ten en cuenta que  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$

## 2.2. Dualidad Onda-Corpúsculo

Hasta ahora en este capítulo se han visto nociones fundamentales sobre las ondas y las partículas. Sin embargo, no se ha dado respuesta a la pregunta fundamental: **¿qué es la luz: una onda o una partícula?** Conocemos ya los postulados de científicos como Huygens y Newton en el siglo XVII a favor de un planteamiento u otro. Sin embargo, tenemos que esperar casi dos siglos para avanzar un paso más en esta cuestión, y no será precisamente para dar la razón a ninguna de las dos “facciones”.

### Importante 2.1: Ondas y Partículas más allá de Huygens y Newton

Científicos posteriores a Huygens y Newton continuaron con sus investigaciones. Por ejemplo Young y Fresnel parecieron ratificar la teoría ondulatoria con sus experimentos de las rendijas. Por el contrario, Planck y Einstein propusieron la existencia de los “cuantos” o partículas de luz: los fotones. Einstein se basó para ello en sus observaciones y explicación del efecto fotoeléctrico, que le valió el Premio Nobel de Física que recibió en 1921. Todo este trabajo anterior sirvió a de Broglie para el desarrollo de su propia teoría.

**Louis-Victor de Broglie** (1892-1987) fue un físico teórico francés que centró sus investigaciones en la teoría cuántica<sup>2</sup> y que, tras sus estudios e investigaciones, propuso la denominada dualidad onda-corpúsculo, que pasaremos a explicar a continuación. Antes de ello merece la pena comentar que, su bien esta teoría fue inicialmente ignorada por sus colegas científicos, el apoyo

<sup>1</sup>Es fácil deducir que la frecuencia y la longitud de onda se relacionan tal que  $f = \frac{c}{\lambda}$ .

<sup>2</sup>En física, la mecánica cuántica se dedica al estudio de los fenómenos que ocurren a escalas muy pequeñas, involucrando por ejemplo a átomos. Las leyes que rigen en el mundo cuántico no se pueden aplicar a la física de los objetos de nuestra vida cotidiana, de ahí que se haya convertido en una rama específica de la física.



**Figura 2.8.** Louis de Broglie. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio público. [https://es.wikipedia.org/wiki/Louis-Victor\\_de\\_Broglie](https://es.wikipedia.org/wiki/Louis-Victor_de_Broglie)

de Einstein hizo que pasase a ser ampliamente reconocida y que, incluso, de Broglie recibiese el **Premio Nobel de Física en 1929**.

¿Qué propuso “el príncipe”<sup>1</sup> de Broglie en su teoría de la dualidad? Muy sencillo: la luz no es una onda ni una partícula, sino que se comporta como tal dependiendo de cómo la observemos.

Trataremos de explicar este aparentemente complejo planteamiento a través del magnífico ejemplo propuesto por **Pedro Gómez-Esteban** en su Blog: “**El Tamiz**”<sup>2</sup>.

Supongamos que existe un grupo de personas, denominados **heisenbéricos miopes** (representados en la Figura 2.9) que, como su propio nombre indica, son **miopes** y sólo ven bien de cerca. Otra particularidad es que, cuando nadie les ve, ¡¡bailan como locos!!

Sin embargo, también son **muy tímidos** y si alguien les está observando, se quedan totalmente quietos mirando fijamente a su observador. Lo que ocurre es que, como son miopes, el observador tiene que estar muy cerca de ellos para que se den cuenta y, en consecuencia, se queden quietos.

Supongamos ahora que entramos en una habitación con **20 de estas personas. 8 son muy “miopes”,** y puedes ver cómo bailan, mientras que **otros 12 son más bien “perceptivos”** y al entrar en la habitación ya están quietos mirándote.

Si fuésemos recorriendo estancias de ese edificio, terminaríamos concluyendo que todos sus usuarios son de dos tipos: bailarines y mirones.

Reflexionemos ahora por un momento: ¿estamos definiendo realmente lo que son (su enfermedad: heisenbéricos miopes)? O, por el contrario, ¿se está definiendo cómo se comportan frente a determinadas situaciones?

<sup>1</sup>Louis de Broglie provenía de una familia de la alta nobleza francesa

<sup>2</sup><http://eltamiz.com/2008/01/15/1a-dualidad-onda-corporusculo/>



**Figura 2.9.** Grupo de “Heisenbéricos miopes” (en realidad se trata de un grupo de ingleses bailando el “Morris dancing”). Fuente: <http://inciclopedia.wikia.com>. Licencia: CC-BY-SA 3.0

¿Qué ocurriría si instalásemos cámaras ocultas en las habitaciones?

**Todos serían bailarines.**

¿Qué ocurriría si fuésemos poniéndonos enfrente de cada uno? **Todos serían mirones.**

¿Por qué se ha recurrido a este ejemplo? Porque se puede realizar una extrapolación directa al caso de las ondas y las partículas: ¿por qué denominamos a ciertas cosas **ondas** o **partículas**? Porque cuando interaccionamos con ellas para ver cómo son, lo que realmente vemos es cómo reaccionan (como ondas o partículas) y por eso las denominamos de esa manera, pero no estamos percibiendo realmente lo que son.

Podríamos realizar una redacción alternativa:

*“El Universo está compuesto de ondículas. En determinadas circunstancias, esas ondículas se comportan de cierta manera, a la que hemos llamado tradicionalmente “onda”, y en otras se comportan de una manera diferente, a la que hemos venido llamando “partícula”. Pero las cosas no son ondas ni partículas: son ondículas<sup>1</sup>.”*

Lo que ocurre es que cuando tratamos de estudiar las “ondículas”, algunas son del tipo “muy onda” (como ocurre en general con la luz, por ejemplo a través del experimento de la rendija de Young) y hay que diseñar experimentos muy específicos para ver su comportamiento como partícula, como ocurre con el efecto fotoeléctrico<sup>2</sup>. Otras ondículas, como el electrón, presentan un comportamiento “muy partícula” y es muy complicado diseñar experimentos que demuestren

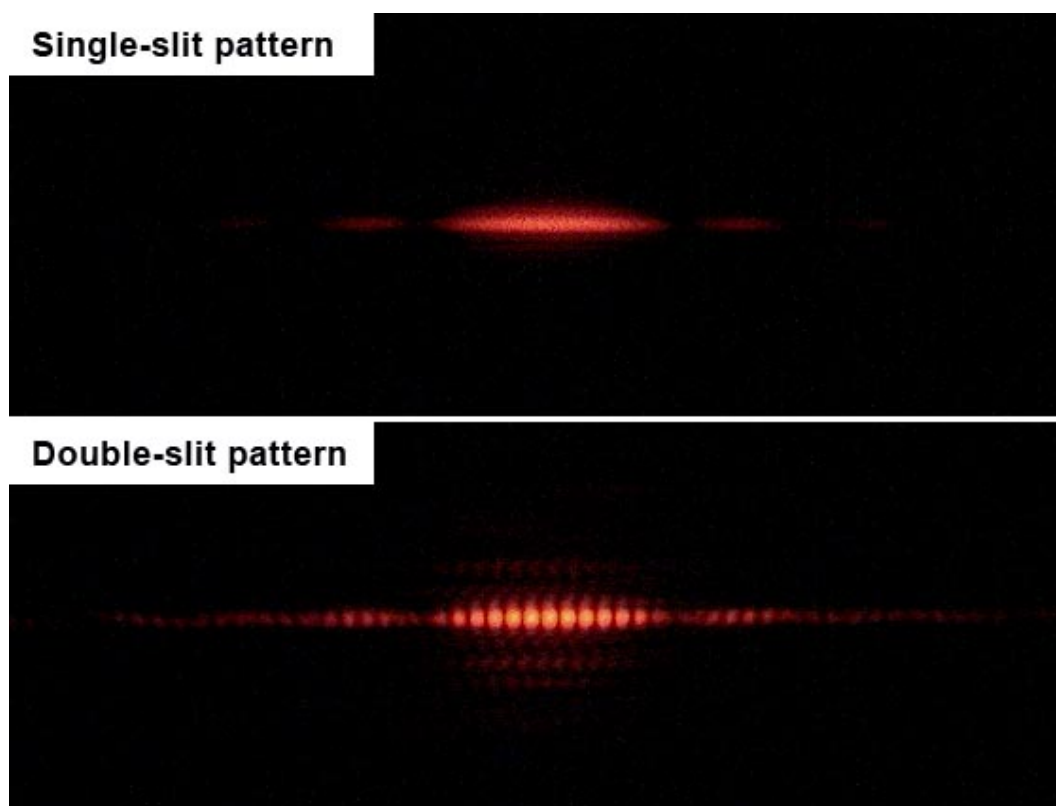
<sup>1</sup><http://eltamiz.com/2008/01/15/1a-dualidad-onda-corpusculo/>

<sup>2</sup>Del que hablaremos en el Capítulo 4.

su comportamiento de onda.

### 2.3. El experimento de la Doble Rendija 2.0

Ya en el capítulo anterior se presentó el famoso experimento de la doble rendija llevado a cabo por Young, el cual le convenció para apoyar la teoría ondulatoria de la luz. Sin embargo, recientemente se ha realizado una versión que denominaremos 2.0 de este experimento y que ha arrojado datos muy interesantes sobre todo este tema de la dualidad onda-partícula. Empecemos por el siguiente planteamiento: cuando se plantea la dualidad onda-partícula de la luz los científicos pensaron que las ondas se podían entender como compuestas por múltiples fotones, que interactuarían unos con otros para dar lugar a los fenómenos de interferencia, etc.



**Figura 2.10.** Ejemplo de resultado del experimento de la rendija con una (superior) y dos (inferior) rendijas. Fuente: Wikimwand. Licencia: CC-by-SA 3.0. [http://www.wikiwand.com/en/Double-slit\\_experiment](http://www.wikiwand.com/en/Double-slit_experiment).

Detengámonos unos momentos en explicar el **fenómeno de interferencia** y el **experimento de la rendija**. En la Figura 2.10 puede apreciarse el resultado de este experimento en el que la luz (en este caso generada con una fuente de luz roja) traspasa ambas rendijas y forma un patrón sobre la pantalla en la que se proyecta. Este patrón está formado por zonas de mucha intensidad de luz y zonas oscuras: ¿por qué se generan estas zonas?

Supongamos inicialmente que tenemos un **“disparador” de fotones** (genera partículas, no ondas), una lámina con 2 rendijas y una pantalla sobre la que incidirán finalmente los fotones, tal y como se ha representado en la Figura 2.11. Podemos pensar en las partículas como “canicas” del

tamaño de la rendija y que, dado el experimento, incidirán en la pantalla en la zona que queda aproximadamente enfrente de las rendijas, tal y como se ha indicado.

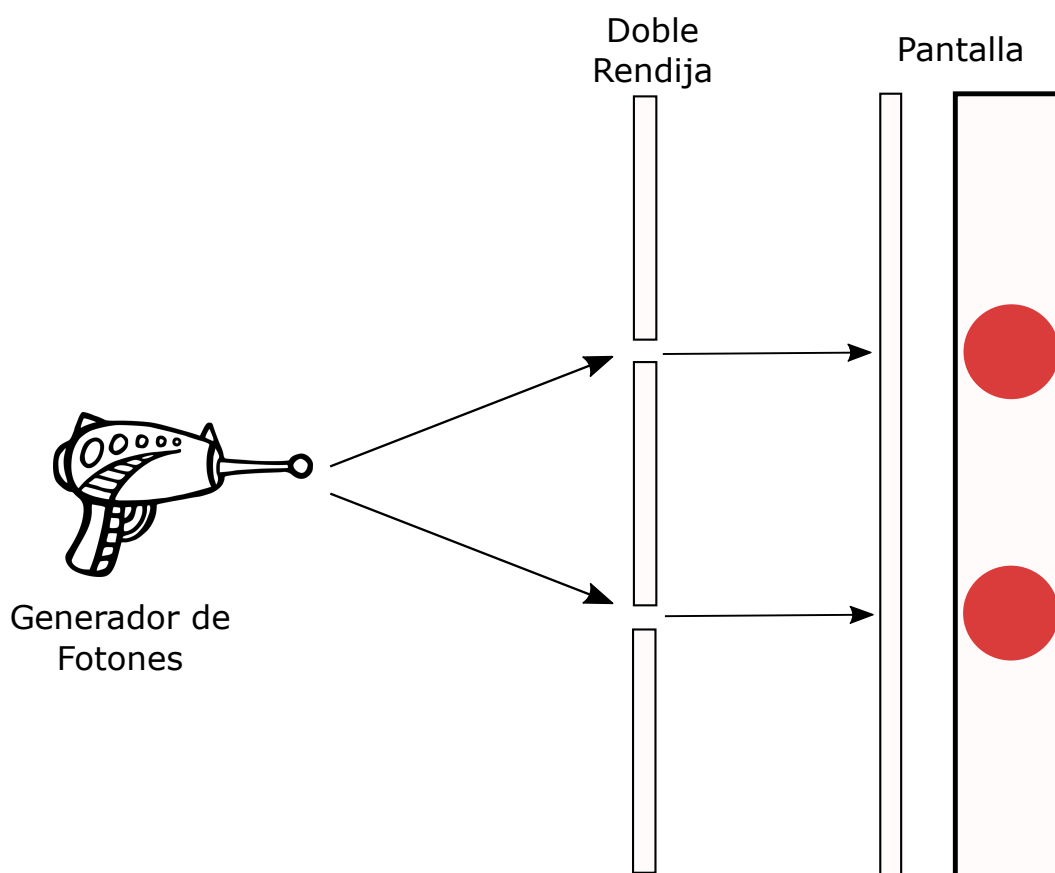


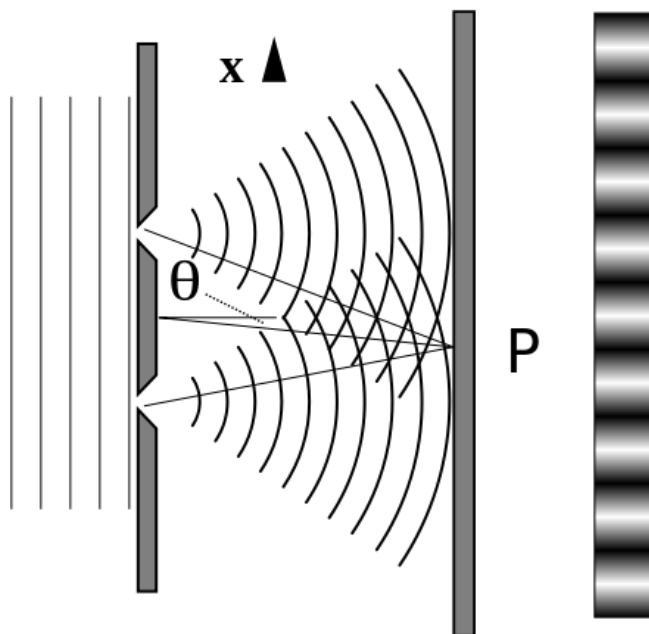
Figura 2.11. Representación esquemática del experimento de la rendija (partículas). Elaboración propia.

Sin embargo, ya sabemos que el resultado que ocurre en la realidad es otro, el famoso patrón de interferencia. Este fenómeno sólo puede explicarse si entendemos la luz como un conjunto de ondas que se propaga. En este caso, en cada rendija se genera un nuevo “frente de ondas”. Para cada punto de la pantalla, las ondas interactuarán sumándose o restándose, dependiendo de cómo coincidan, dando lugar al fenómeno de interferencia. En la Figura 2.12 se ha vuelto a representar el experimento de la rendija pero entendiendo en este caso que la luz se propaga como ondas.

El patrón que se genera en la pantalla, con varios puntos muy luminosos y otros oscuros, se debe a la **interferencia** entre las ondas. Para entenderlo mejor, en la Figura 2.13 se muestra un ejemplo de interferencia entre ondas. En el ejemplo superior, las ondas, cuando se encuentran, están “**en fase**”, por lo que el resultado es una *interferencia constructiva* dando lugar a un punto luminoso. Por contra, en el ejemplo inferior las ondas están en “**contrafase**”, dando lugar a una **interferencia destructiva** y a un punto negro (ausencia de luz) en la pantalla.

De este modo, en cada punto del espacio (en este caso sobre la pantalla en la que se proyecta la luz) las ondas interactuarán de una u otra manera, constructiva o negativamente, dando lugar a puntos de luz brillantes o ausencia de luz, y explicando por tanto el patrón de franjas ya comentado de la Figura 2.10. Este experimento parece confirmar que la luz es una onda, pero aún se le





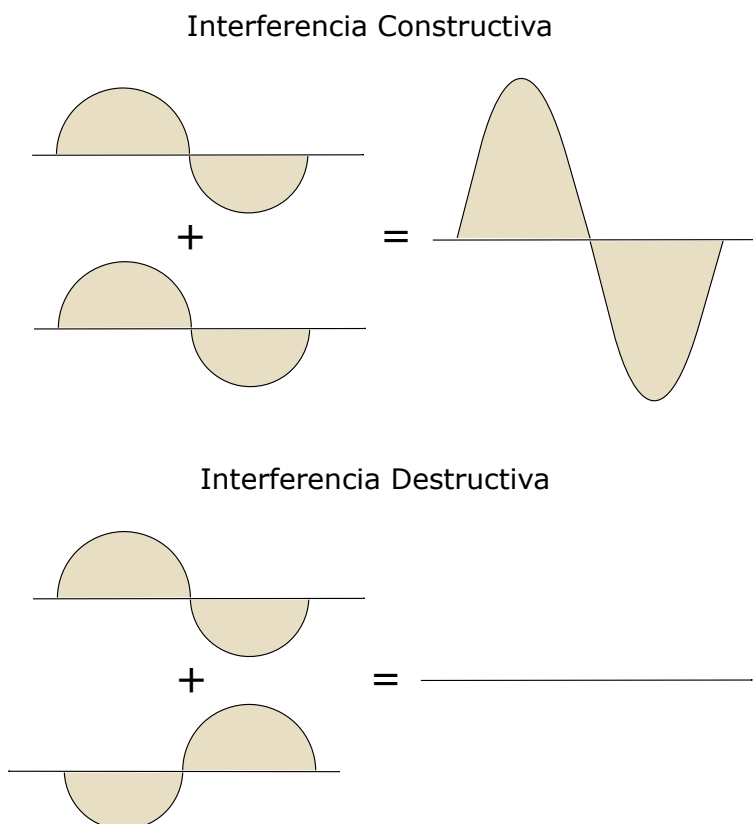
**Figura 2.12.** Representación esquemática del experimento de la rendija (ondas). Fuente: Wikipedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. [https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento\\_de\\_Young](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young)

puede dar una vuelta de tuerca más a este estudio.

Supongamos ahora que tenemos la situación de la Figura 2.11, donde tenemos un generador de partículas que van a ser lanzadas individualmente (de una en una) sobre las rendijas. Lo que esperamos es ver esas partículas impactar en la pantalla, tal y como se muestra en la imagen superior de la Figura 2.14. A medida que el número de partículas lanzadas aumenta, vamos viendo lógicamente como hay más impactos en la pantalla. Sin embargo, a partir de la imagen c, pero sobre todo en la d y en la e, apreciamos un efecto no esperado:

**¡Los electrones también se comportan como una onda, incluso lanzándose de uno en uno!**

Esto es algo no esperado, ya que el electrón es una ondícula muy partícula. Sin embargo, este resultado indica que el electrón actúa el mismo como una onda y que, de hecho, interfiere consigo mismo para generar el patrón de franjas ya visto.



**Figura 2.13.** Representación esquemática del fenómeno de interferencia. Fuente: Elaboración propia.

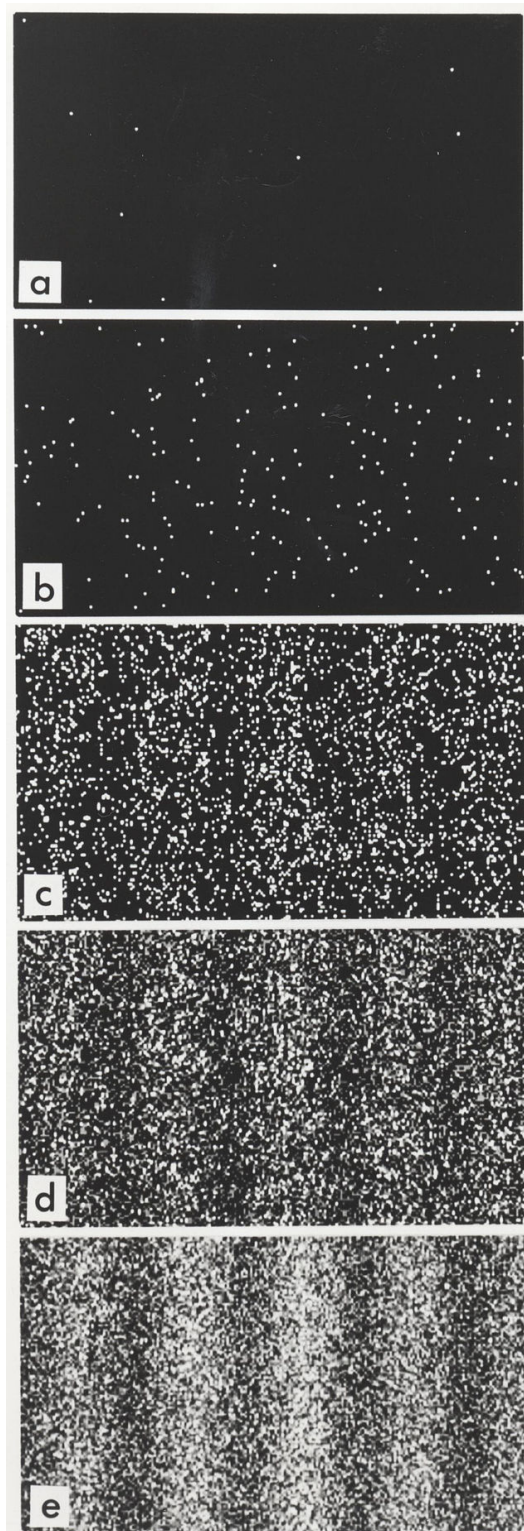
### Importante 3.1: La física cuántica y sus paradojas

No es objetivo de este curso ir más allá de lo explicado hasta el momento sobre ondas y partículas. El objetivo es acercar al alumno a la comprensión de la dualidad onda/partícula, habiendo comprendido anteriormente desde un punto de vista básico lo que son ondas y partículas.

Sin embargo, para el estudiante interesado en profundizar un poco más, le interesará saber que, para explicar el resultado del experimento anterior, es necesario suponer que el electrón, como onda, atraviesa ambas rendijas a la vez e interfiere por lo tanto consigo mismo. El siguiente paso “natural” consistió en poner 2 detectores en cada rendija para apreciar el paso simultáneo del electrón por ellas pero: ¡sorpresa! Al poner los detectores el electrón sólo pasa por una rendija y no aparece el patrón de interferencia en la pantalla.

¿Qué es lo que ocurre? Al poner los detectores estamos interaccionando con los electrones (por ejemplo, lanzando fotones para “verlos”) y, por lo tanto, modificándolos en cierta medida<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Para más información no dudes en consultar el Blod de “El Tamiz” (<https://eltamiz.com/2008/01/15/la-dualidad-onda-corporculo/>) y también este vídeo subtítulo en castellano en el que se explica todo lo hablado sobre el experimento de la doble rendija (<https://youtu.be/KYX4ki7y-xI>)



**Figura 2.14.** Experimento de la doble rendija realizado por el equipo del Dr. Tonomura. Fuente: Wikipedia (CC BY-SA 3.0). [https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento\\_de\\_Young](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young)

## 2.4. Conclusiones

En este capítulo se ha tratado de presentar algunas respuestas a la aparentemente inocente (pero en realidad, bastante profunda) pregunta: ¿qué es la luz?

En particular se ha pretendido introducir los conceptos de partícula y onda y sus características principales para, finalmente, concluir que la luz no es en realidad una onda ni una partícula, sino que se comporta como una u otra dependiendo de cómo la observemos. Para nuestros fines y para el resto de este curso, podremos usar indistintamente el concepto de partícula u onda para explicar el comportamiento de la luz.

En el siguiente capítulo se explicará brevemente el funcionamiento del Sol, la estrella que aporta energía y posibilita la vida en nuestro planeta. También dedicaremos un breve espacio al fenómeno de la fotosíntesis, otro responsable fundamental de la existencia de vida en la Tierra.

# Índice de figuras

1. Grupo de “Heisenbéricos miopes” (en realidad se trata de un grupo de ingleses bailando el “ <i>Morris dancing</i> ”). Fuente: <a href="http://inciclopedia.wikia.com">http://inciclopedia.wikia.com</a> . Licencia: CC-BY-SA 3.0 . . . . .	II
2.1. Representación de un átomo según el modelo atómico de Rutherford (núcleo representado en negro y electrones en rojo). Fuente: Wikimedia Commons (CC BY-SA 3.0). <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo">https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo</a> . . . . .	3
2.2. Experimento de la doble rendija realizado por el equipo del Dr. Tonomura. Fuente: Wikipedia (CC BY-SA 3.0). <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young">https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young</a> . . . . .	3
2.3. Dispositivos para el aprovechamiento de la energía undimotriz (izquierda: PB40 PowerBuoy por Ocean Power Technologies (Licencia: Dominio Público); derecha: sistema Pelamis (Licencia: Dominio Público)). . . . .	5
2.4. Onda medida y representada en la pantalla de un osciloscopio. Fuente: Wikipedia (CCO 1.0). <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Half-wave_rectifier_waveform.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Half-wave_rectifier_waveform.png</a> . . . . .	5
2.5. Amplitud y frecuencia de una onda. Fuente: Wikimedia Commons (CC-BY-SA 4.0) (Imagen original modificada). <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amplified_sine_wave.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amplified_sine_wave.svg</a> . . . . .	6
2.6. Representación de la evolución de la longitud de onda de las olas a medida que se acercan a la costa. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Local_wavelength.JPG">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Local_wavelength.JPG</a> . . . . .	6
2.7. Espectro electromagnético. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio público. <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:EM_Spectrum_Properties_es.svg">https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:EM_Spectrum_Properties_es.svg</a> . . . . .	7
2.8. Louis de Broglie. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio público. <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Louis-Victor_de_Broglie">https://es.wikipedia.org/wiki/Louis-Victor_de_Broglie</a> . . . . .	9
2.9. Grupo de “Heisenbéricos miopes” (en realidad se trata de un grupo de ingleses bailando el “ <i>Morris dancing</i> ”). Fuente: <a href="http://inciclopedia.wikia.com">http://inciclopedia.wikia.com</a> . Licencia: CC-BY-SA 3.0 . . . . .	10
2.10. Ejemplo de resultado del experimento de la rendija con una (superior) y dos (inferior) rendijas. Fuente: Wikimwand. Licencia: CC-by-SA 3.0. <a href="http://www.wikiwand.com/en/Double-slit_experiment">http://www.wikiwand.com/en/Double-slit_experiment</a> . . . . .	11

2.11. Representación esquemática del experimento de la rendija (partículas). Elaboración propia. . . . .	12
2.12. Representación esquemática del experimento de la rendija (ondas). Fuente: Wikipedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young">https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young</a> . . . . .	13
2.13. Representación esquemática del fenómeno de interferencia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	14
2.14. Experimento de la doble rendija realizado por el equipo del Dr. Tonomura. Fuente: Wikipedia (CC BY-SA 3.0). <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young">https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young</a> . . . . .	15