

La dualidad onda partícula...

The wave/particle duality

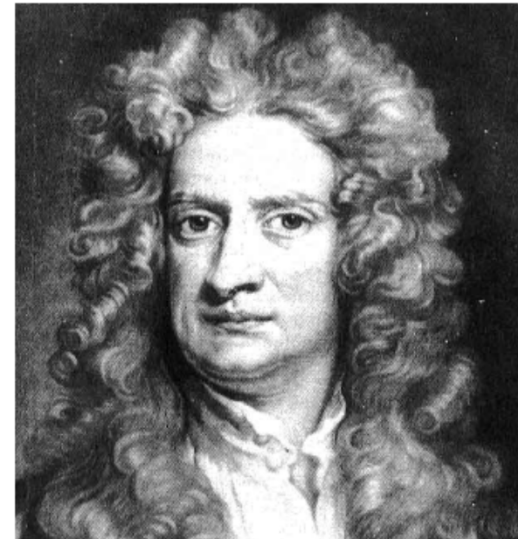
Question

Is the fundamental nature of radiation and matter described better by a wave or a particle representation? Or do we need both?

Does **light** consist of waves or particles?



Christiaan Huygens (1629-95):
waves



Isaac Newton (1643-1727):
particles

Properties of waves: diffraction

Diffraction pattern when light or another type of wave passes through a small circular hole (size similar to wavelength):



Further evidence for wave theory: Maxwell's electromagnetic wave theory of 1865.

⇒ in C19, physicists were convinced that light was a wave

Louis-Victor-Pierre-Raymond, 7th duc de Broglie (1892-1987)



Luis de Broglie era un estudiante graduado en la Sorbona (Paris) cuando introduce la idea de que **todas las partículas** pueden exhibir **comportamiento** tipo **ondulatorio**.

En su tesis doctoral (1924), de Broglie propone un Nuevo principio universal válido para toda la física:

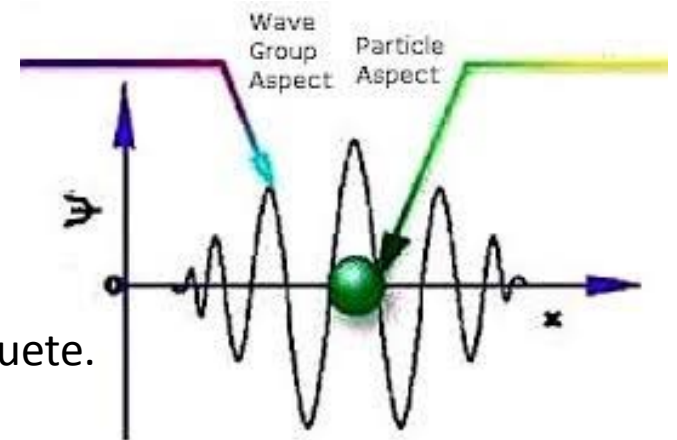
“Estoy convencido que la dualidad onda—partícula descubierta por Einstein es absolutamente general.”

“La propagación de una onda siempre esta asociada al movimiento de alguna partícula (fotones, electrons, protons, fonones,...)”

A aquellas ondas que acompañan/guian el movimiento de partículas de Broglie las denomina **ondas piloto** (un paquete de ondas que se mueve junto a la partícula).

Ondas piloto: de Broglie encuentra la frecuencia de la onda que acompaña el movimiento de partículas.

La velocidad de la partícula es la velocidad de grupo del paquete.



Dramatic conclusions

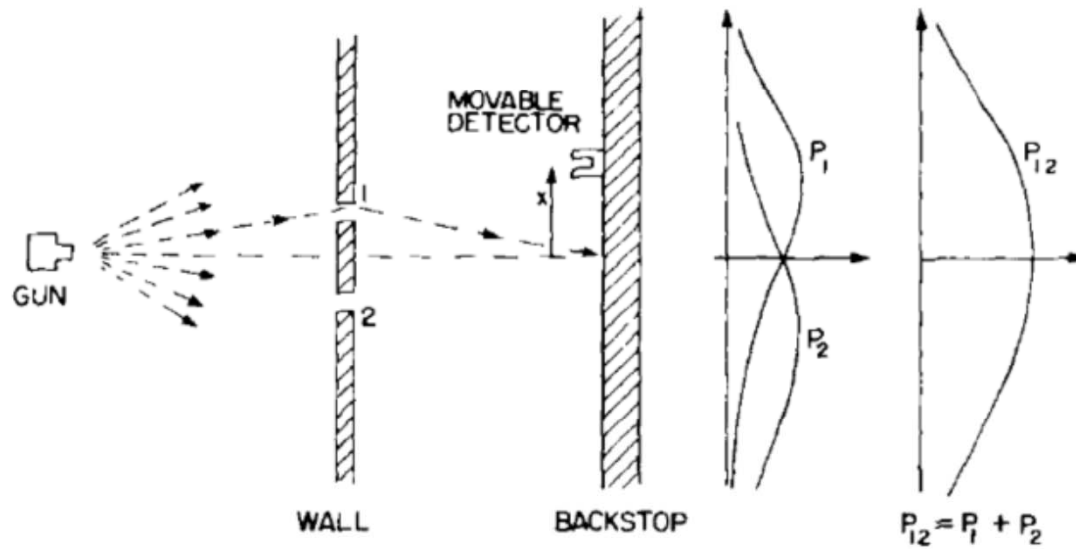
Para fotones de Broglie encuentra:

$$\begin{aligned} E &= mc^2 = (mc)(c), \\ &= (p)(c) = (p)(f\lambda), \\ (h)(f) &= (p)(f\lambda), \\ \Rightarrow \quad h/p &= \lambda. \end{aligned}$$

Si la longitud de la onda decrece, el momento de los fotones se incrementa. Esto es válido para cualquier partícula.

Experimento pensado de Feynman de difracción de electrones

Que pasaría con partículas clásicas (balas)?



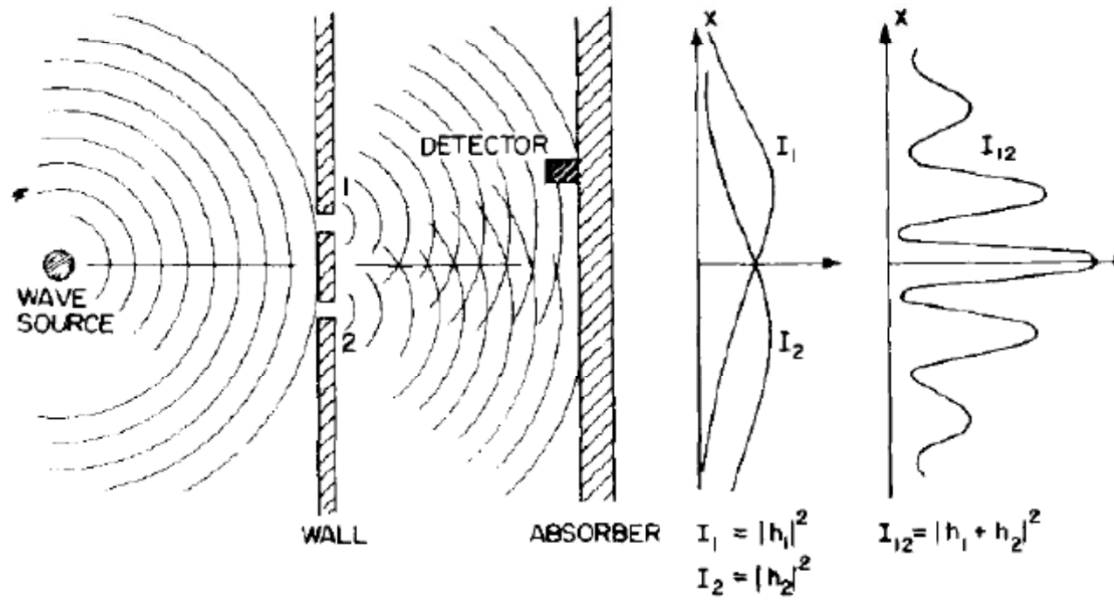
Feynman lectures on
Physics Vol3, Cap.1

$$P_{12} = P_1 + P_2.$$

Las probabilidades se suman... no hay interferencia.

Experimento pensado de Feynman de difracción de electrones

Que pasaría con ondas?

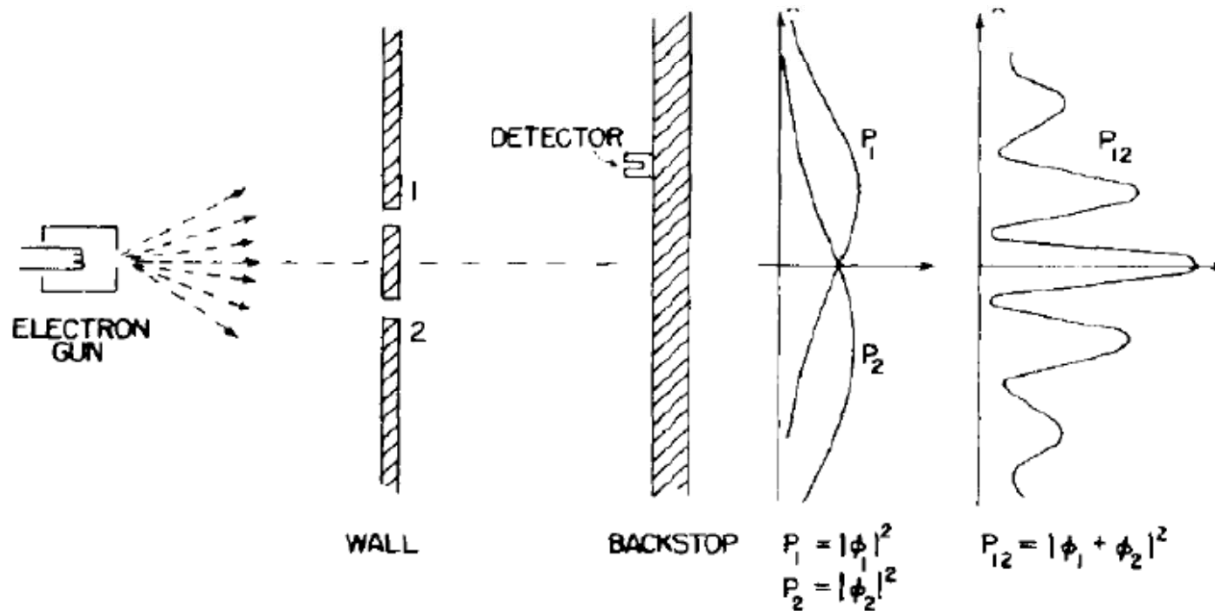


$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta.$$

Con ondas hay interferencia debido a la diferencia en longitud de camino

Experimento pensado de Feynman de difracción de electrones

Que pasaría con electrones (partículas cuánticas)?

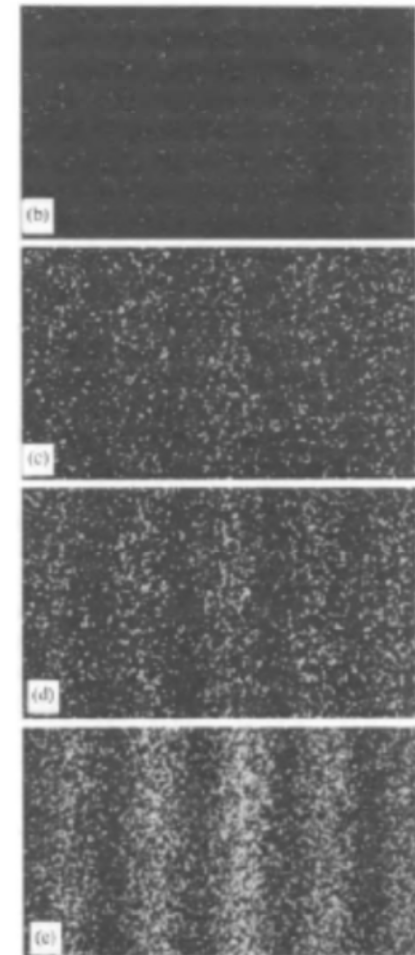
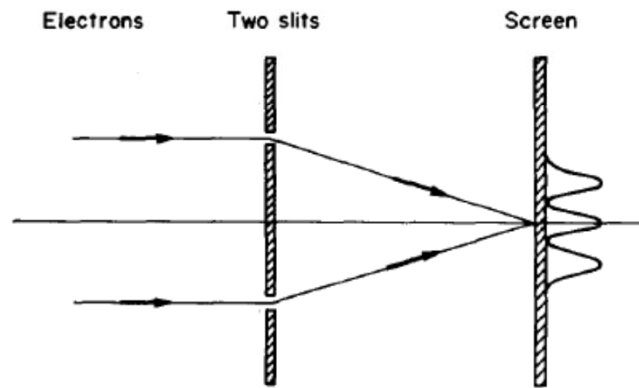


$$\textit{For electrons: } P_{12} \neq P_1 + P_2.$$

Los electrones pegan en la pared como si fueran partículas, pero están estadísticamente distribuidos con la intensidad de una onda.

En este sentido los electrones se comportan un poco como ondas, y un poco como partículas...

Experimento de difracción con electrons individuales



Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern

A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, and T. Kawasaki
Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Kokubunji, Tokyo 185, Japan

H. Ezawa
Department of Physics, Gakushuin University, Mejiro, Tokyo 171, Japan

(Received 17 December 1987; accepted for publication 22 March 1988)

The wave-particle duality of electrons was demonstrated in a kind of two-slit interference experiment using an electron microscope equipped with an electron biprism and a position-sensitive electron-counting system. Such an experiment has been regarded as a pure thought experiment that can never be realized. This article reports an experiment that successfully recorded the actual buildup process of the interference pattern with a series of incoming single electrons in the form of a movie.

Ondas Piloto a escala macroscópica

-Si las ondas piloto son universales a todas las partículas, porque no las vemos en la vida cotidiana? Por que nuestros cuerpos no muestran comportamiento ondulatorio?

-La respuesta a esta pregunta está asociada a la longitud de onda de objetos macroscópicos. Una persona de 100 kg que corre a 5 mts/seg tiene un momento de 500 kg mts/seg. La longitud de la onda piloto correspondiente a esta persona es muy chica!

$$h/p = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) / (500 \text{ kg}\cdot\text{m/s}) = 1.32 \times 10^{-36} \text{ m}$$

-Entonces, para ver algún efecto de difracción, la persona debería pasar por una puerta de ancho $\sim 10^{-36}$ mts!

-De esta forma, la longitud de onda de objetos de la vida cotidiana es mucho mas chica que los objetos mismos, con lo que todo caracter ondulatorio se pierde.

-Por el contrario, un electrón de masa $m \sim 10^{-31}$ kg que dentro de un átomo se mueve a una velocidad $v \sim 1000$ mts/seg, la longitud de onda es del orden de 10^{-7} mts.

-Entonces cuando el electron interactua con sistemas físicos con distancias típicas de este orden (por ejemplo con un cristal, donde la distancia entre atomos puede ser de este orden), aparecen los fenómenos ondulatorios.