

# Física Contemporánea

Dr. Víctor H. Cárdenas

Instituto de Física y Astronomía

Universidad de Valparaíso

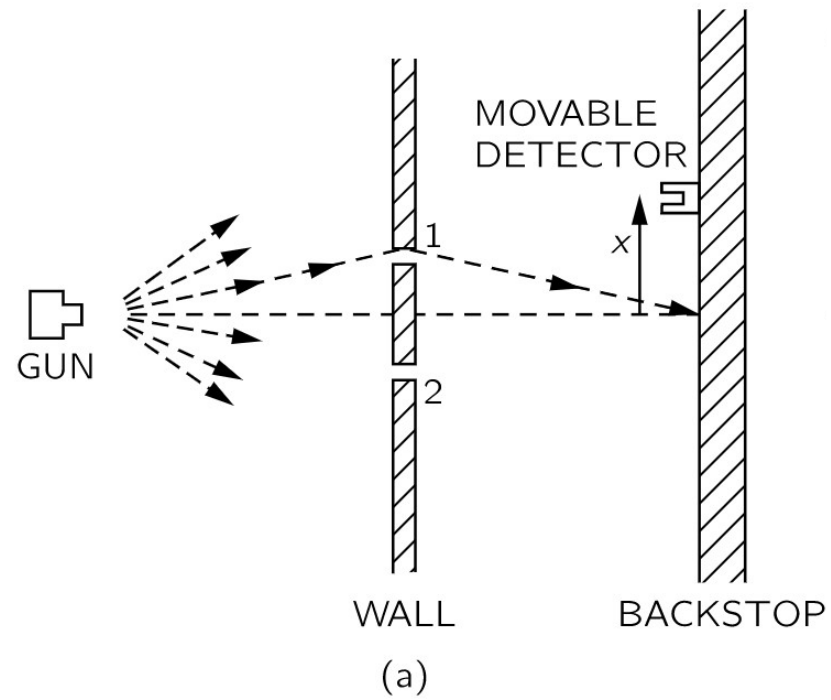
# 21. Cuántica

- Partículas y Ondas

## Ondas y partículas

### Balas

La probabilidad



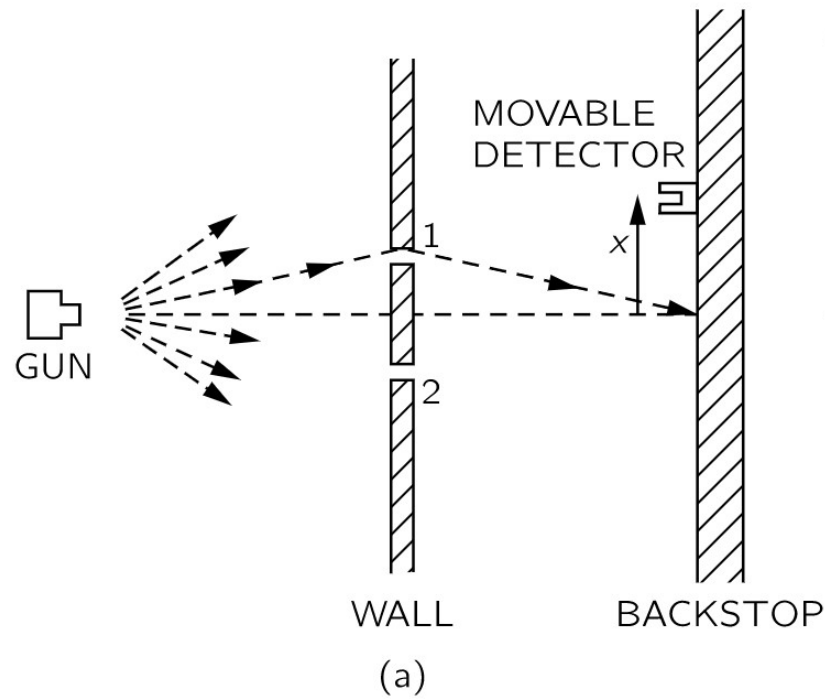
## Ondas y partículas

### Balas

La probabilidad

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

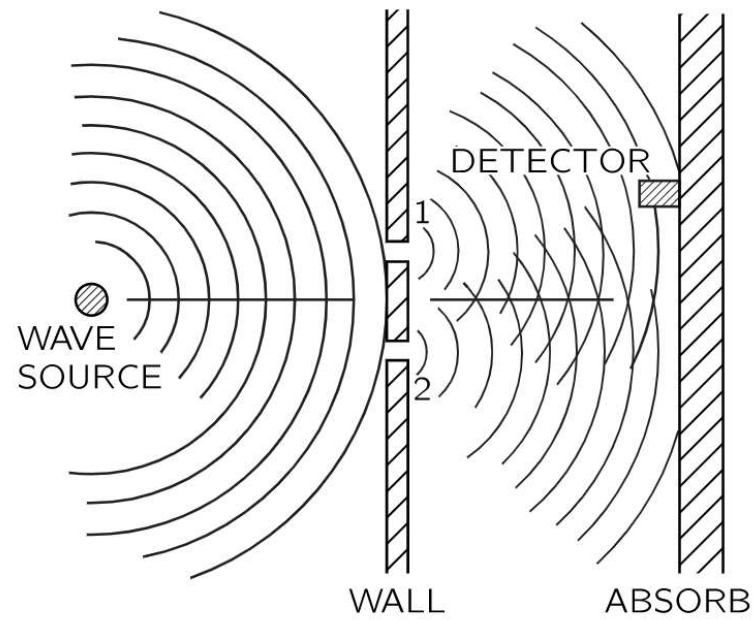
Patrón sin interferencia



## Ondas y partículas

### Ondas

La intensidad



(a)

## Ondas y partículas

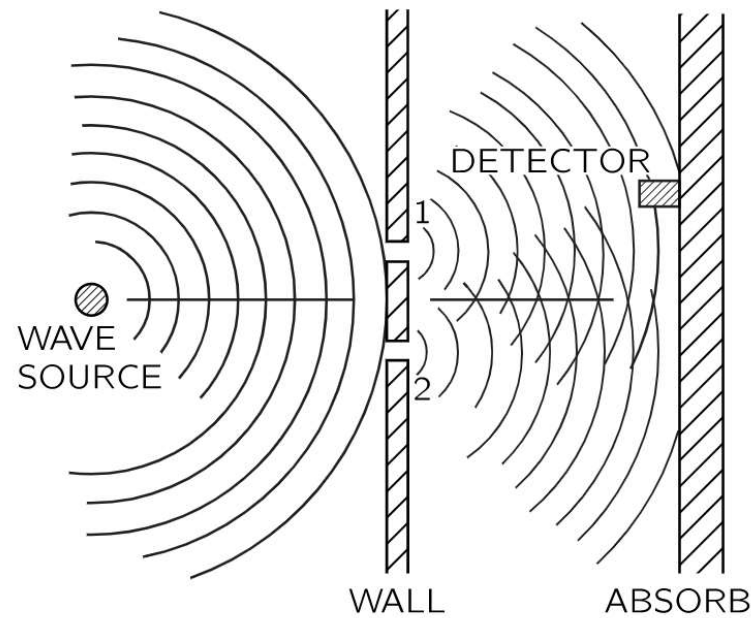
### Ondas

La intensidad  $I_1 = |\hat{h}_1|^2$ ,  $I_2 = |\hat{h}_2|^2$ ,  $I_{12} = |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$ .

$$|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2 = |\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 + 2|\hat{h}_1||\hat{h}_2| \cos \delta,$$

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

### Interferencia

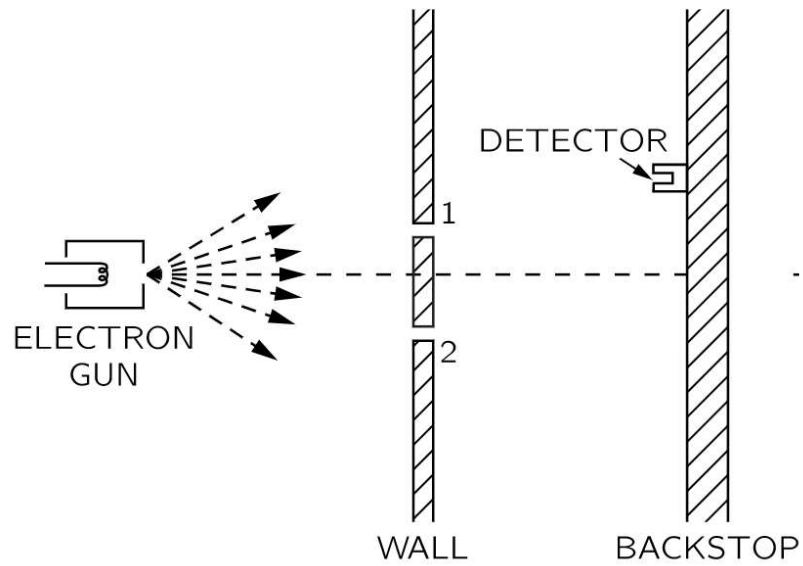


(a)

## Ondas y partículas

### Electrones

Clics



(a)

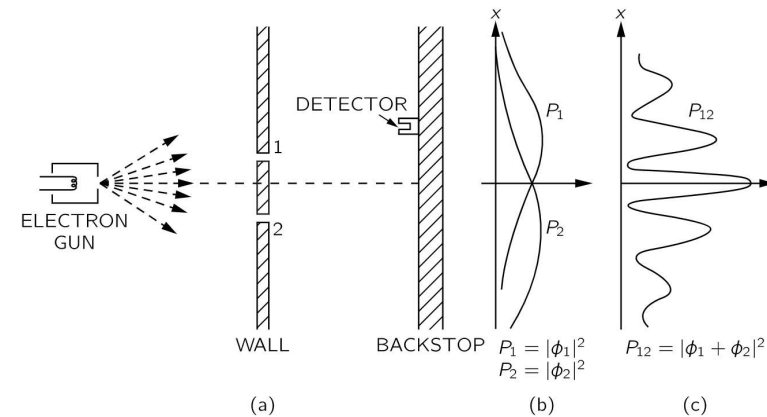
## Ondas y partículas

**Hipótesis:** cada electrón pasa ya sea por 1 o 2

Clics.

Los electrones detectados pertenecen a dos familias.

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



Entonces *no es posible asumir que los electrones provienen de 1 o 2*.

Asumiendo que  $P_1 = |\hat{\phi}_1|^2$   $P_2 = |\hat{\phi}_2|^2$  así entonces  $P_{12} = |\hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2|^2$

Concluimos:

Los electrones llegan en forma de grumos, como partículas, y la probabilidad de llegada de estos grumos se distribuye como la distribución de intensidad de una onda. Es en este sentido que un electrón se comporta "a veces como una partícula y a veces como una onda".

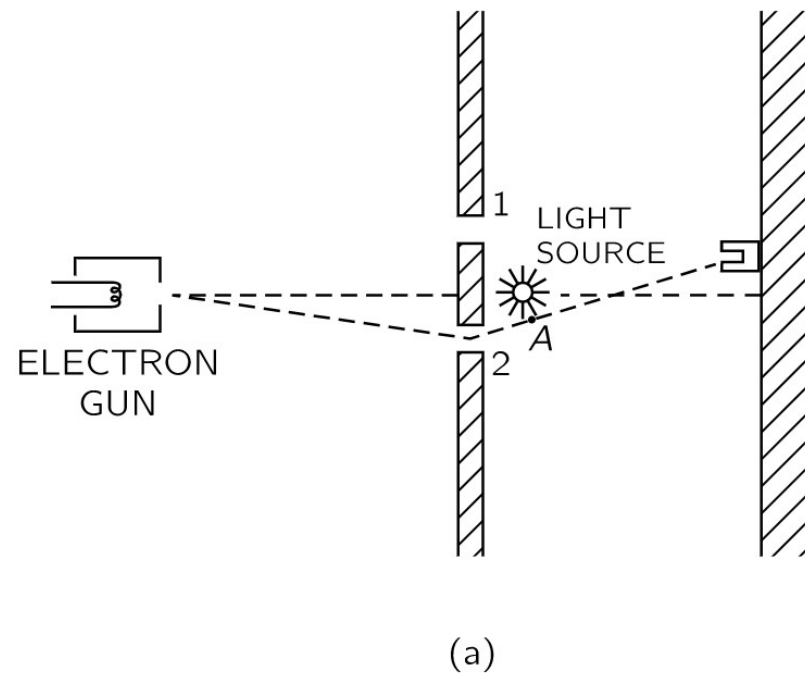


## Ondas y partículas

### Observando electrones

Cada vez que se escucha un clic, *se observa* un flash ya sea de 1 o de 2. (hipótesis esta OK!)

¿Qué está mal en nuestro argumento contra la hipótesis?



## Ondas y partículas

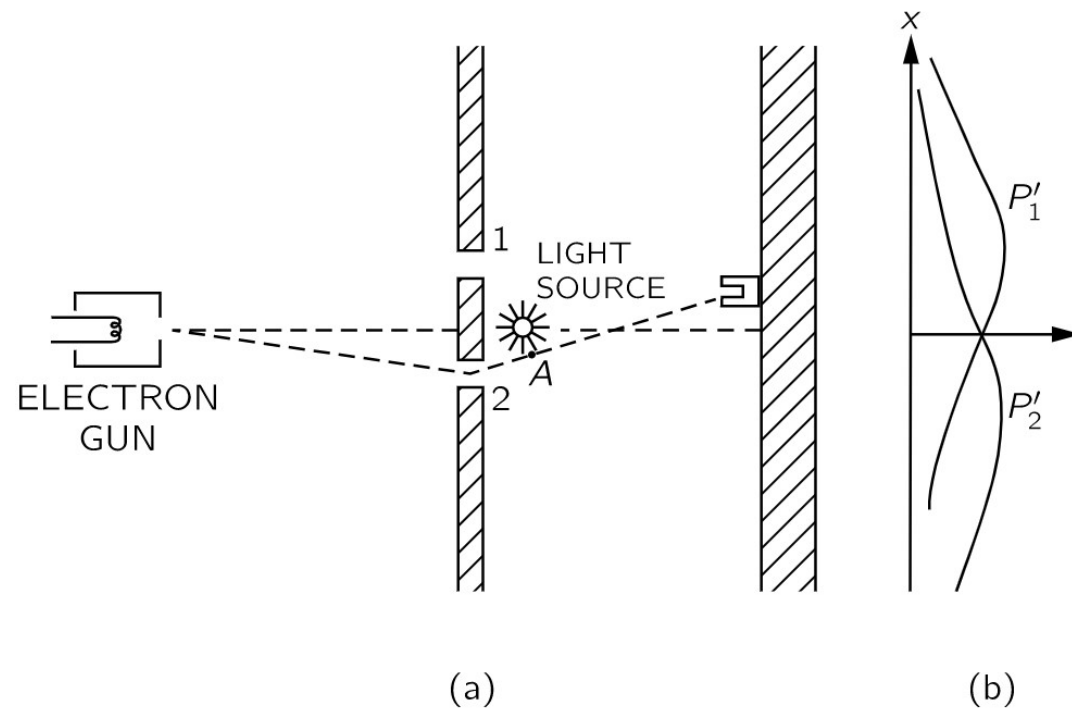
### Observando electrones

Cada vez que se escucha un clic, *se observa* un flash ya sea de 1 o de 2. (hipótesis esta OK!)

¿Qué está mal en nuestro argumento contra la hipótesis?

¿Y la probabilidad total?

Sólo si apagamos la luz  
obtenemos  $P_{12}$ :



## Ondas y partículas

Al parecer, al observar los electrones su distribución es distinta que cuando no los observamos.

¿Al iluminarlos, interferimos?

Bajemos la luminosidad.

Entonces, *a veces*, se escucha el clic pero no se ve el electrón.

Los fotones también se comportan como partículas (fotones).

Repitiendo el experimento con luz tenue, los resultados son:

- Los electrones vistos pasar por 1  $P'_1$
- Los electrones vistos pasar por 2  $P'_2$
- Los que no se detectan  $P_{12}$

Si no observamos los electrones, entonces interfieren!

## Ondas y Partículas

Y si tratamos con longitudes de onda mas grandes?

Poco a poco la distribución  $P'_{12}$  se vuelve  $P_{12}$

Pero...la resolución óptica no permite saber por donde pasó el electrón!!

Principio de incerteza

“Es imposible diseñar un aparato que permita determinar por cual agujero atraviesa el electrón, que al mismo tiempo no perturbe los electrones lo suficiente como para destruir el patrón de interferencia..”

Es la hipótesis válida o no?

Tenemos que pensar de una (nueva) manera especial que no lleve a inconsistencias.

Si existe un medio para saber por cual rendija pasa un electrón, entonces uno puede decir que tal o cual electrón pasa por la rendija 1 o 2.

Cuando no existe tal medio, entonces **no** lo podemos decir, de otra forma lleva a contradicciones.

Esta es la cuerda floja lógica sobre la que debemos caminar si deseamos describir la naturaleza con éxito.

## Ondas y Partículas

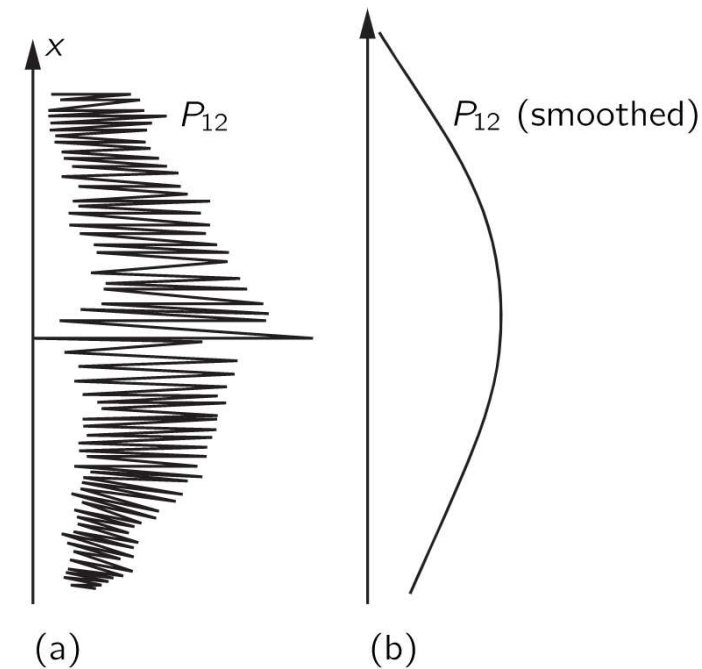
Si la descripción de la materia se debe hacer como un fenómeno ondulatorio, ¿Porqué se obtiene el resultado de las balas?

Porque la longitud de onda es pequeña

## Principios de Mecánica Cuántica

Resumiendo las conclusiones de nuestros experimentos  
Definimos que entendemos por un experimento ideal

"Un experimento ideal es aquel en el que todas las condiciones iniciales y finales del experimento están completamente especificadas".



## Principios de Mecánica Cuántica

1. La probabilidad de un evento en un experimento ideal viene dada por el cuadrado del valor absoluto de un número complejo  $\phi$  que se llama amplitud de probabilidad:

$$P = \text{probability}, \quad \phi = \text{probability amplitude}, \quad P = |\phi|^2.$$

2. Cuando un evento puede ocurrir de varias maneras alternativas, la amplitud de probabilidad para el evento es la suma de las amplitudes de probabilidad para cada forma considerada por separado. Hay interferencia:

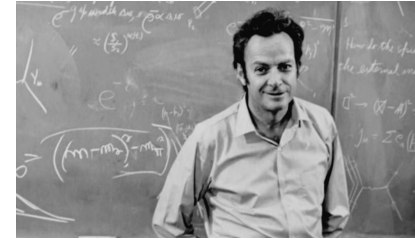
$$\phi = \phi_1 + \phi_2, \quad P = |\phi_1 + \phi_2|^2.$$

3. Si se realiza un experimento que es capaz de determinar si se toma una u otra alternativa, la probabilidad del evento es la suma de las probabilidades para cada alternativa. La interferencia se pierde:

$$P = P_1 + P_2.$$

## Principios de Mecánica Cuántica

¿Pero cómo funciona esto?



*“Nadie ha encontrado maquinaria detrás de la ley. Nadie puede "explicar" más de lo que acabamos de "explicar". Nadie le dará una representación más profunda de la situación. No tenemos ideas sobre un mecanismo más básico a partir del cual se puedan deducir estos resultados”. R.P. Feynman*

Tamaño del átomo vía principio de Heisenberg

En el estado fundamental del átomo de Hidrógeno, el electrón minimiza su energía. Clásicamente  $e$  estaría encima del núcleo con energía negativa infinita. Cuánticamente esto no puede ocurrir.

Al fijar la posición de  $e$  el momentum se indetermina (aumentando la K.E.)

Para una órbita circular

$$K.E. + P.E. = \frac{h^2}{8m\pi^2 r^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{h^2}{4m\pi^2 r} + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 0,$$

$$r_{\min} = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}.$$