

# *Física Cuántica*

**Juan Pablo Paz**

*Departamento de Física “Juan José Giambiagi”*

*FCEyN, UBA*

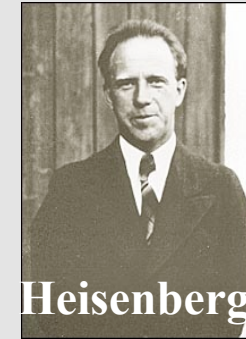
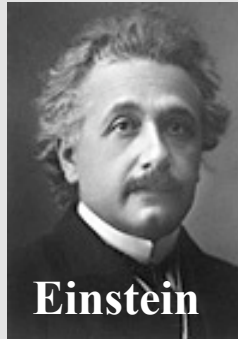
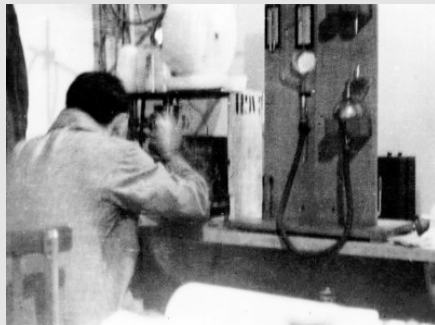
*<http://www.df.uba.ar/~paz>*

*CENTRO CULTURAL BORGES*

*MAYO 2006*



# *La mecánica cuántica comenzó en los laboratorio universitarios*



*...y produjo nuevas tecnologías que cambiaron el mundo...*

LASER

ENERGIA  
NUCLEAR

ENERGIA  
SOLAR

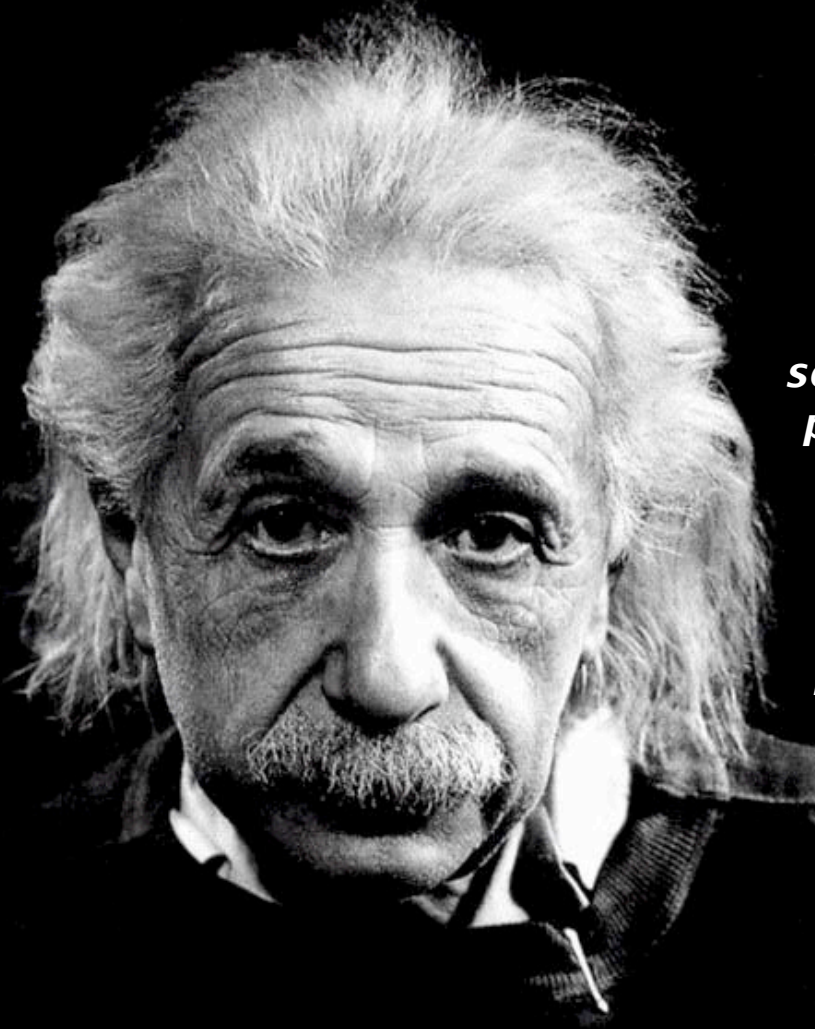
TRANSISTOR  
MICROELECTRONICA  
INTERNET..

MEDICINA: RAYOS X,  
RMN, PET, etc



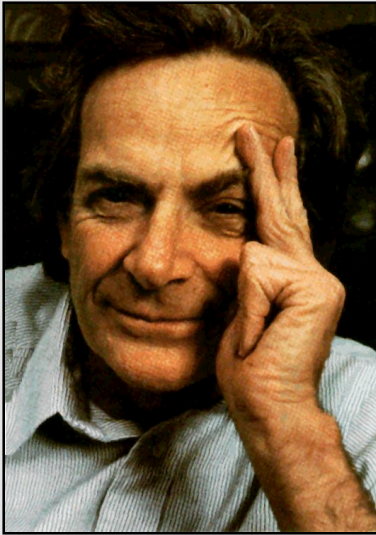
***Cuanto más éxitos logra, más tonta me parece***  
*(Albert Einstein a Heinrich Zangger on Quantum Theory, May 20, 1912)*

***Usted cree que Dios juega a los dados mientras que yo creo en la existencia de leyes y de orden en un mundo ... que yo, de una forma salvajemente especulativa, estoy tratando de comprender.*** (Albert Einstein a Max Born, Sept 1944, 'The Born-Einstein Letters')



***Todavía no creo que los métodos estadísticos de la mecánica cuántica sean la última palabra, pero por el momento soy el único que sostiene esa opinión...*** (Albert Einstein, 1936, 'The Born-Einstein Letters' Max Born, traducida por Irene Born, Macmillan 1971)

***A pesar de sus notables avances parciales, el problema está lejos de tener una solución satisfactoria.*** (Albert Einstein, 1950)



## *Un consejo*

*Richard Feynman (1918-1988)*

*Premio Nobel de Física 1965*

“No tomen esta charla de manera solemne..., relájense y disfruten!

Les voy a hablar sobre el comportamiento de la naturaleza. Si admiten que ella se porta de este modo, ... seguramente lo encontrarán cautivante y encantador. Pero si se quedan diciendose a ustedes mismos: “*Cómo es que ella puede ser así?*”, entrarán en un callejón sin salida del que nunca nadie escapó hasta ahora. Nadie sabe cómo es que la naturaleza puede portarse de este modo... NADIE ‘entiende’ la mecánica cuántica!”.

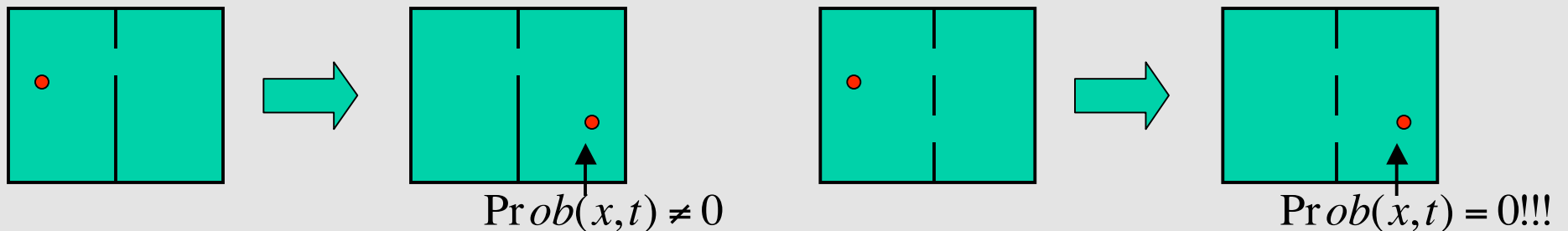
# Mecánica cuántica: rara por tres motivos

## 1) Indeterminismo

Experimentos idénticos pueden dar resultados diferentes  
Sólo es posible predecir probabilidades  
El azar es intrínseco, no se origina en nuestra ignorancia

## 2) Interferencia

Probabilidades: se calculan “sumando amplitudes” (ondas)



## 3) Entrelazamiento

Propiedades del todo no determinan las propiedades de las partes



Correlaciones entre las partes se mantienen a distancia y son  
“incompatibles con el sentido común”

**El enfoque de este curso será “no histórico”  
(enfrentaremos de entrada el estudio de las  
propiedades “mas cuánticas de todas”)**

***Clase 1:***

**1) Indeterminismo**

**2) Interferencia**

**objeto de estudio: imanes (spin)**

**Clase 2: El entrelazamiento**

**Clase 3: Que nos dice la mecánica cuántica?**

**Clase 4: Un poco de historia y una revisión**

# 1) Indeterminismo: dos principios 'horribles'

## *Principio de complementariedad*

Si preparamos cualquier objeto de modo tal que la propiedad observable "X" toma un valor preciso, entonces siempre existe otra propiedad observable "P" cuyo valor es completamente aleatorio (X y P se dicen 'complementarias')

## *Principio de incertidumbre*

Para una partícula, la posición X y el momento P son propiedades complementarias. Las incertezas en los valores de la posición y el momento satisfacen:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (p = mv), \quad h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Joules seg}$$

*W. Heisenberg*

Cuanto más precisamente determino la posición, menos precisamente puedo predecir la velocidad y viceversa.

$$Masa = 1g$$

$$\Delta x = 1mm$$

$$\Delta v \geq 6.67 \cdot 10^{-28} m / seg$$

$$Masa = M_{electrón}$$

$$\Delta x = 0.00000001m$$

$$\Delta v \geq 60000m / seg$$

# El poder predictivo de la física: Determinismo: Laplace (1749-1827)



**MECANICA CUANTICA DERRUMBA ESTA IDEA.  
NO PREDICE CERTEZAS,  
PREDICE PROBABILIDADES**

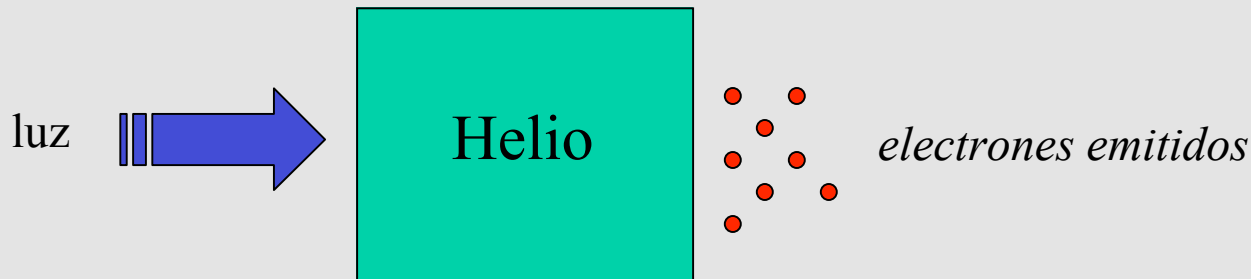
Una inteligencia en cualquier instante, conociese las fuerzas que el mundo debe así la posición y la velocidad de

los movimientos de los mayores objetos del Universo y las partes mas pequeñas”.

“Nada... tanto el futuro como... estarían presentes ante sus ojos...”.



**OJO: Pese a su indeterminismo la mecánica cuántica tiene un ENORME poder predictivo**



*Átomos de Helio iluminados con luz*

**Predicción cuántica: Se emiten electrones si la longitud de onda de la luz es**  $\lambda \leq 50.4259310 \text{ nm} \pm 0.0000020 \text{ nm}$

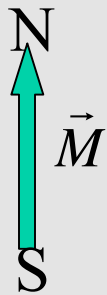
**Observación: Se emiten electrones si la longitud de onda de la luz es**  $\lambda \leq 50.4259299 \text{ nm} \pm 0.00000040 \text{ nm}$

**Equivalente a predecir la distancia entre Ushuaia y La Quiaca con un error menor que 10 cm!!**

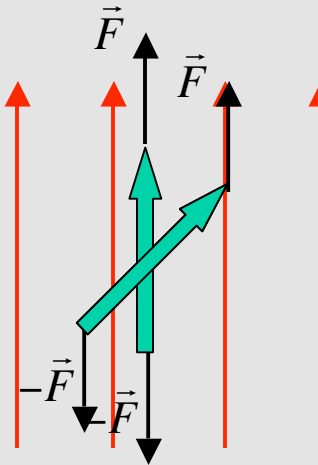
**LA TEORÍA MEJOR TESTEADA DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA**

# OBJETO DE ESTUDIO: IMANES EN MOVIMIENTO

IMAN = “flecha”

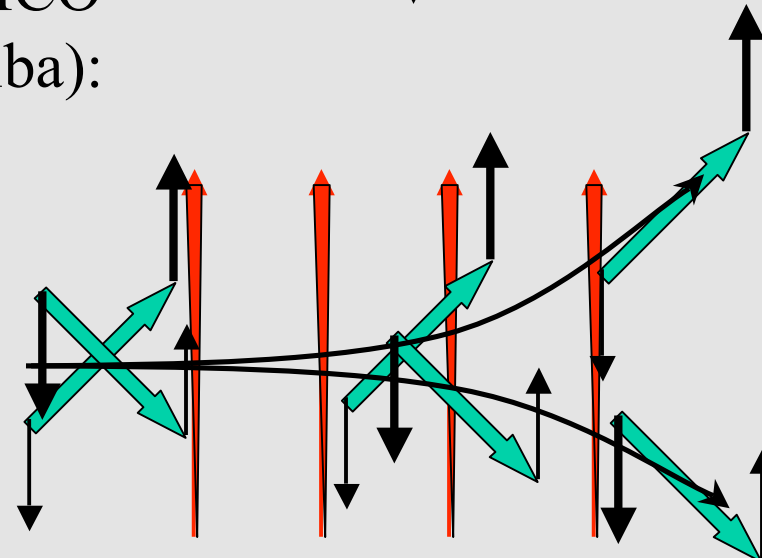
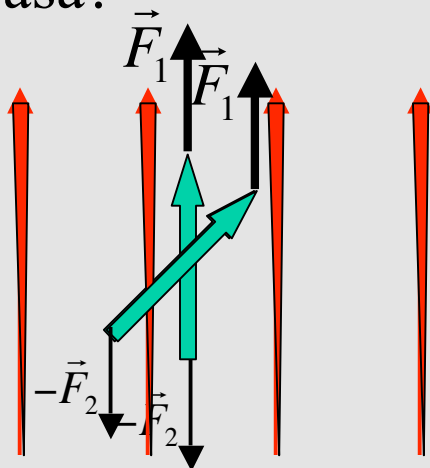


IMAN EN UN CAMPO MAGNETICO  
“brújula”

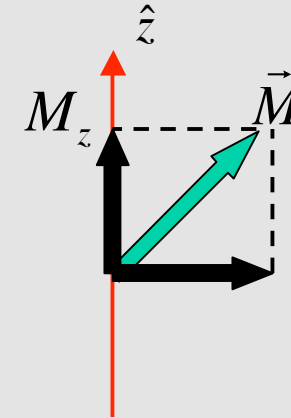
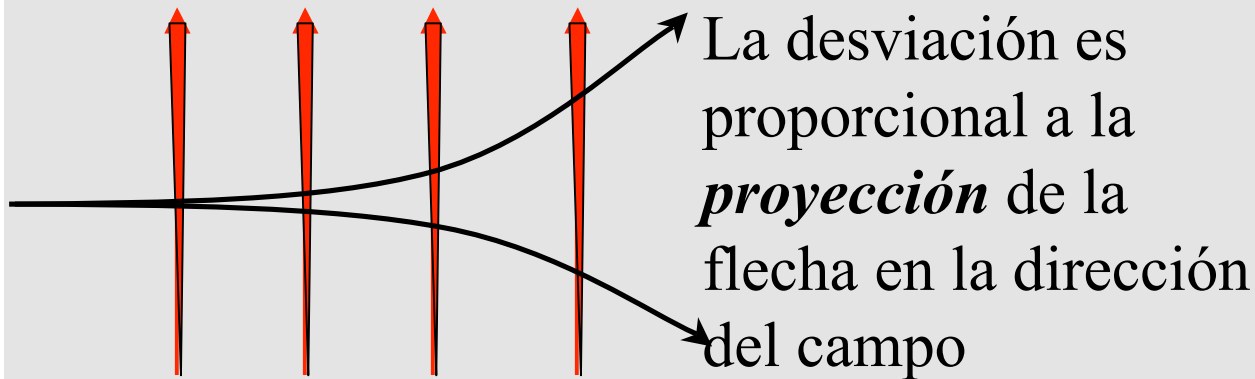


IMAN EN UN CAMPO MAGNETICO  
INHOMOGENEO (mas intenso arriba):

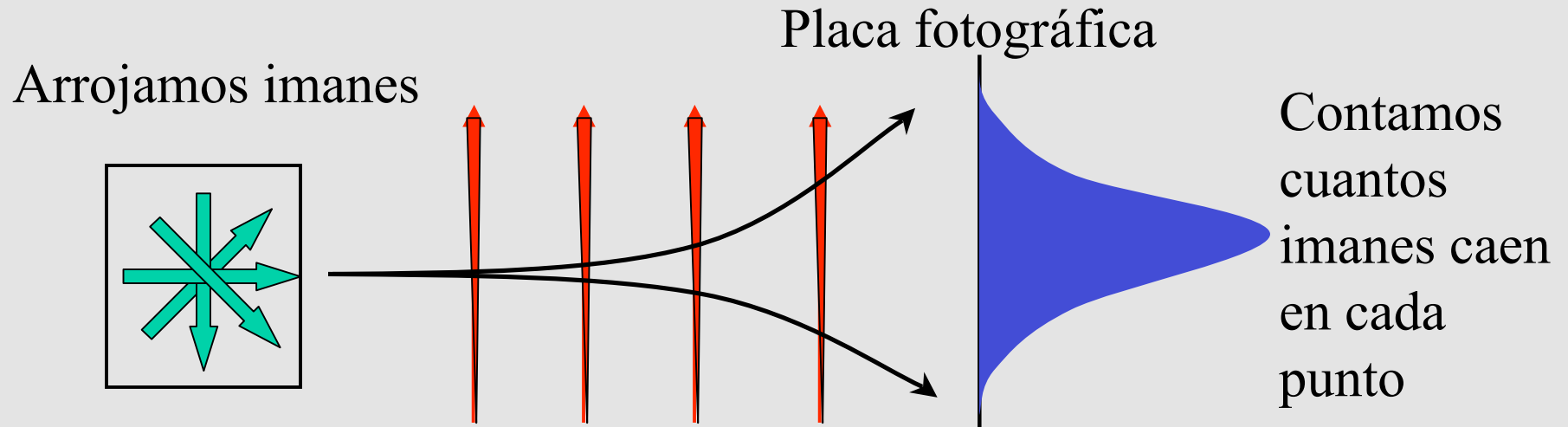
Qué pasa?



La trayectoria se curva



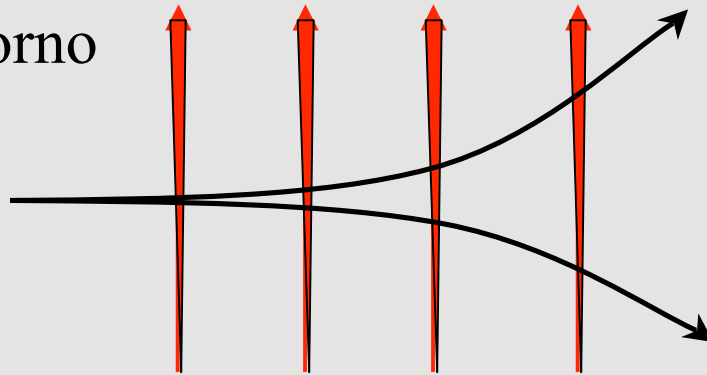
## ANALISIS DE UN EXPERIMENTO IMAGINARIO



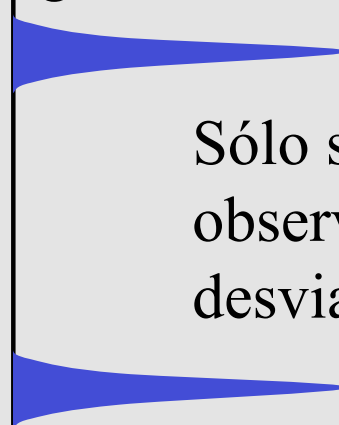
# PERO LA FISICA SE BASA EN EL ANALISIS DE UN EXPERIMENTOS REALES!

Stern & Gerlach (Berlin, 1922)

Atomos de plata salen de un horno



Placa fotográfica

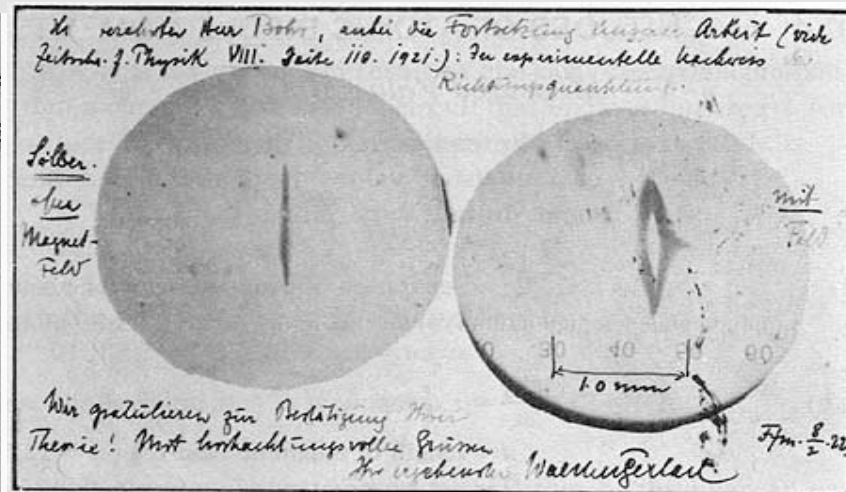


Sólo se observan dos desviaciones!

$$M_z = \pm 9.27 \times 10^{-22} \text{ ergios/Gauss}$$

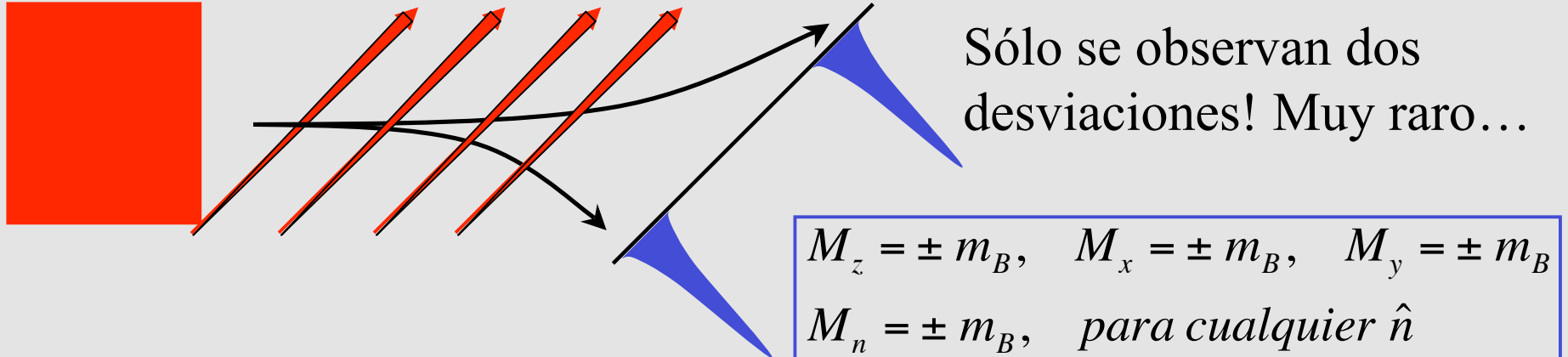
$$= \pm m_B$$

Stern y Gerlach descubrieron el imán más chiquito que existe! 10000000000000000000000 de veces más chico que el de una brújula! (el imán está asociado al spín del electrón)



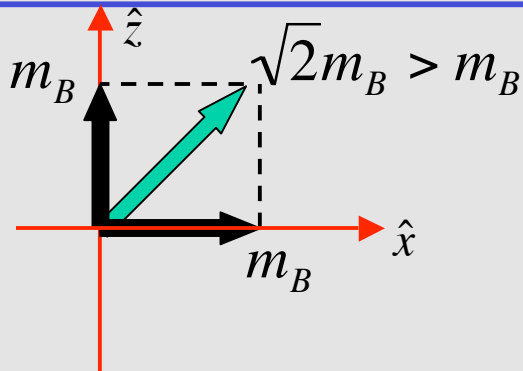
# COMENTARIOS SOBRE EL EXPERIMENTO

1) Variando la dirección del campo magnético el resultado es idéntico



2) Para otros átomos se observan mas desviaciones, que siempre corresponden a valores de  $M_z$  que son múltiplos de  $\pm m_B$

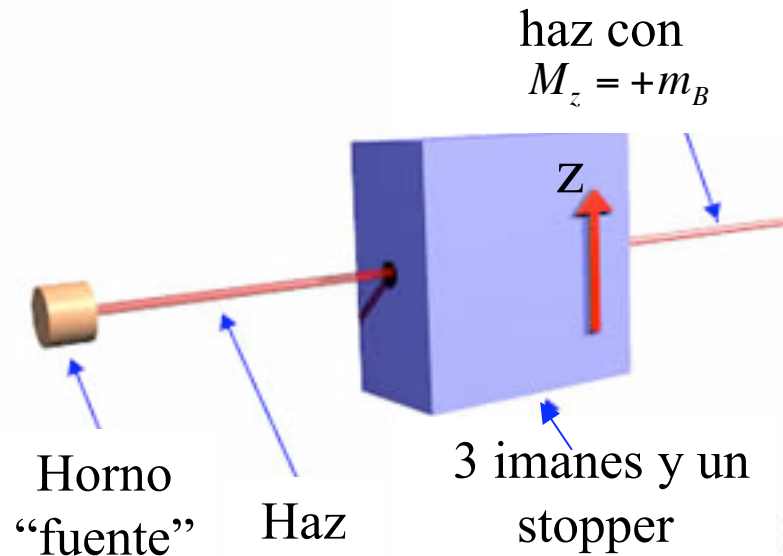
## MODELOS COMPATIBLES CON EXPERIMENTOS...



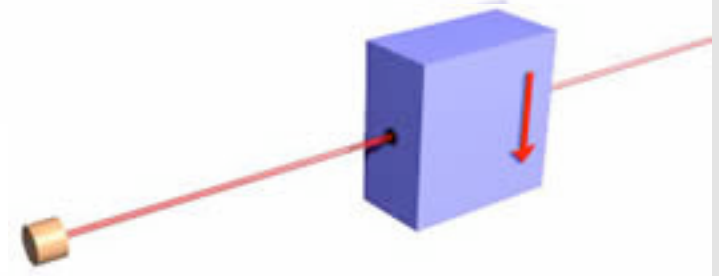
Los resultados de los experimentos parecen desafiar toda lógica!: No podemos siquiera imaginar una flecha cuyas proyecciones en cualquier dirección sean iguales a  $\pm m_B$  !!!

# LA FISICA REQUIERE UN ESTUDIO SISTEMATICO DE LOS EXPERIMENTOS REALES...

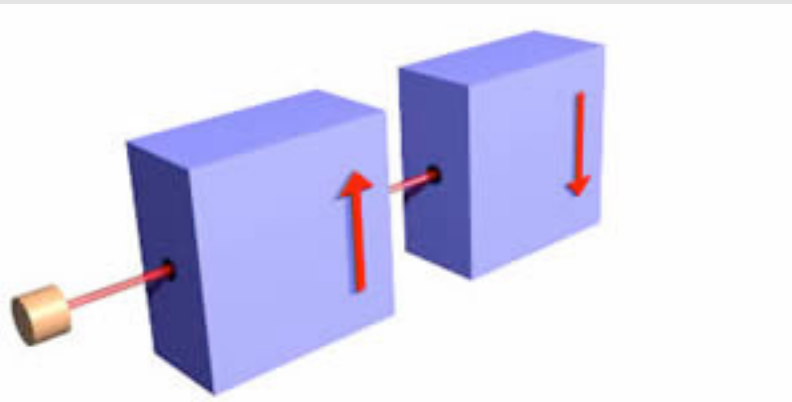
Diseñamos un aparato de medición:



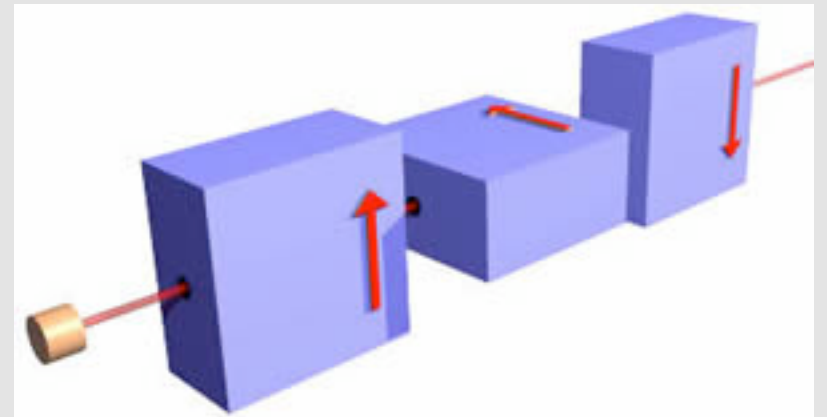
Puede orientarse en cualquier dirección:



Puede usarse para realizar secuencias de experimentos:

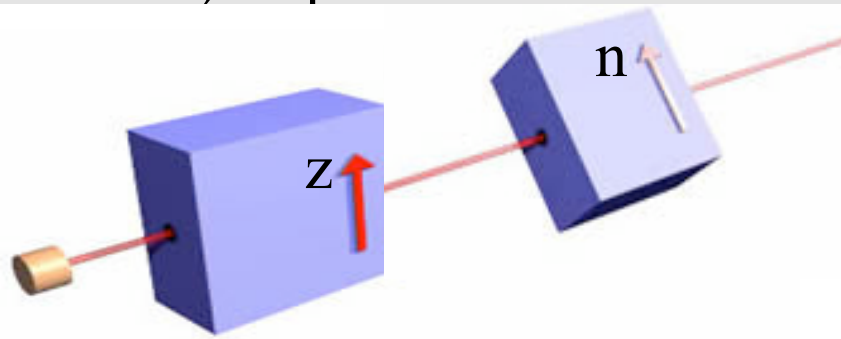


y descubrir resultados sorprendentes...



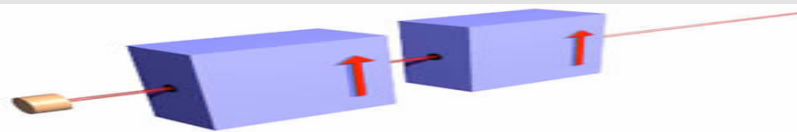
# LOS RESULTADOS DE ESTOS EXPERIMENTOS MUESTRAN LOS ASPECTOS MAS RAROS DE LA FISICA CUANTICA

1) Experimentos idénticos pueden dar resultados distintos

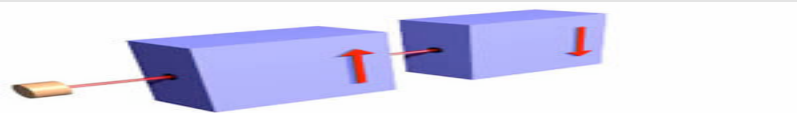


No hay forma de saber si cada átomo va a pasar el segundo filtro!  
Pregunta: pasa o no pasa?

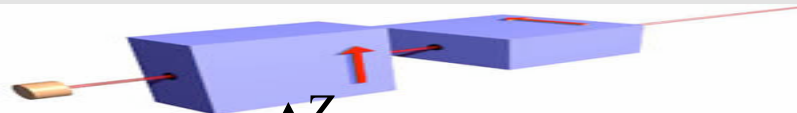
2) Solamente podemos predecir cual es la probabilidad de los distintos resultados (pasa o no pasa?)



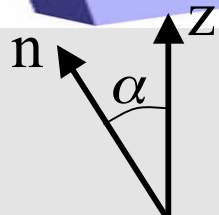
$$\text{Probabilidad}(\text{pasa } \hat{z} \text{ dado que pasa } \hat{z}) = \cos^2(0) = 1$$



$$\text{Probabilidad}(\text{pasa } -\hat{z} \text{ dado que pasa } \hat{z}) = \cos^2\left(\frac{180^\circ}{2}\right) = 0$$



$$\text{Probabilidad}(\text{pasa } \hat{x} \text{ dado que pasa } \hat{z}) = \cos^2\left(\frac{90^\circ}{2}\right) = 0.5$$



$$\text{Probabilidad}(\text{pasa } \hat{n} \text{ dado que pasa } \hat{z}) = \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$