

Física Cuántica

Juan Pablo Paz

Departamento de Física “Juan José Giambiagi”

FCEyN, UBA

<http://www.df.uba.ar/~paz/borges/borges2006.html>

CENTRO CULTURAL BORGES

MAYO 2006



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

Clase 1:

**Objeto de estudio: Imanes en movimiento
Resultados de experimentos que muestran:
1) Indeterminismo**

**Clase 2 (HOY): Un repaso. 2) Interferencia, 3)
Entrelazamiento**

**Cómo sabemos que el indeterminismo no
proviene de nuestra ignorancia?**

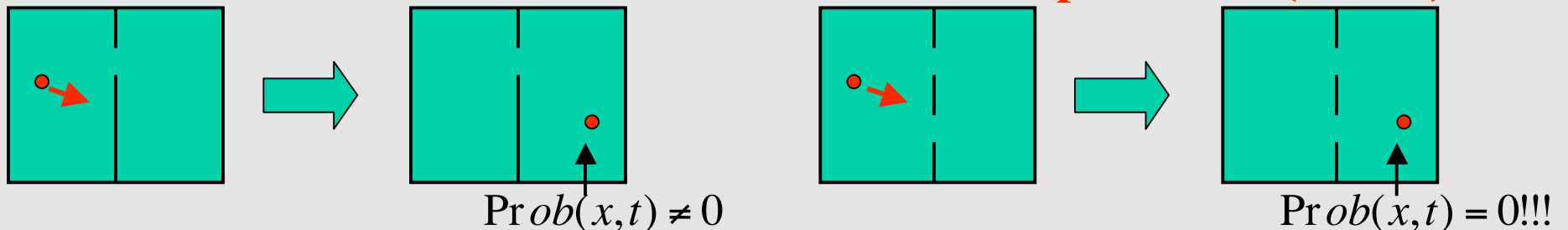
Mecánica cuántica: rara por tres motivos

1) Indeterminismo

Experimentos idénticos pueden dar resultados diferentes
Sólo es posible predecir probabilidades

2) Interferencia

Probabilidades: se calculan “sumando amplitudes” (ondas)



3) Entrelazamiento

Propiedades del todo no determinan las propiedades de las partes



Las partes están correlacionadas. Las correlaciones se mantienen a distancia y son incompatibles con todas las teorías en las que el azar se origina en nuestra ignorancia

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.

$$Masa = 1g$$

$$\Delta x = 1mm$$

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

$$Masa = M_{electrón}$$

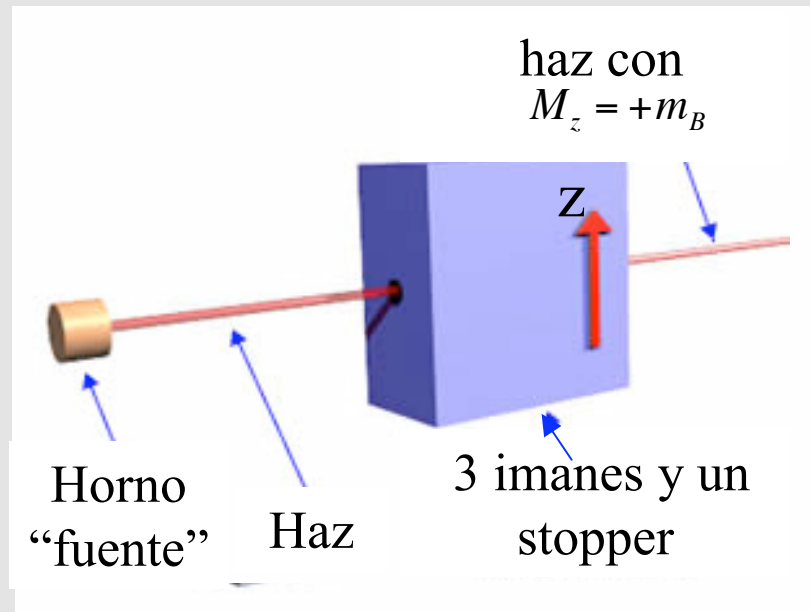
$$\Delta x = 0.00000001m$$

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

EXPERIMENTOS CON IMANES (Stern-Gerlach)

descripción idealizada de un experimento complejo

Aparato de medición:

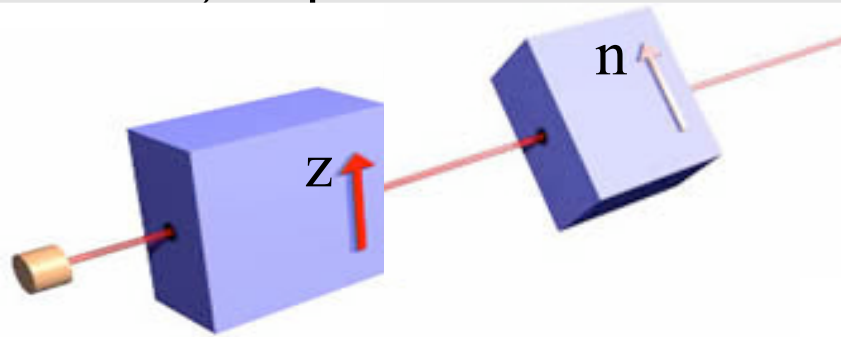


Notar: Este aparato de medición funciona como un filtro

Detalles de los que NO hablamos: Horno, vacío, colimación, construcción de imanes para generar campo variable, direccionamiento del haz, detección, etc

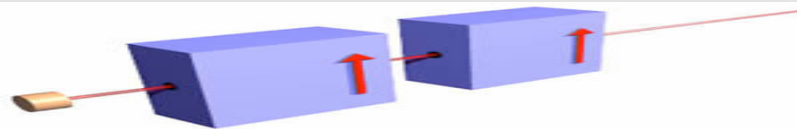
LOS RESULTADOS DE ESTOS EXPERIMENTOS MUESTRAN LOS ASPECTOS MAS RAROS DE LA FISICA CUANTICA

1) Experimentos idénticos pueden dar resultados distintos

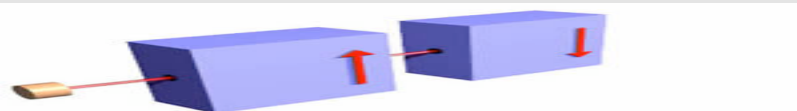


No hay forma de saber si cada átomo va a pasar el segundo filtro!
Pregunta: pasa o no pasa?

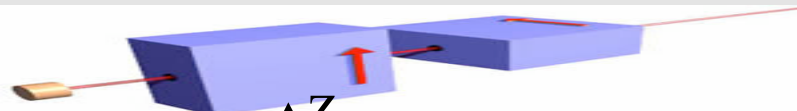
2) Solamente podemos predecir cual es la probabilidad de los distintos resultados (pasa o no pasa?)



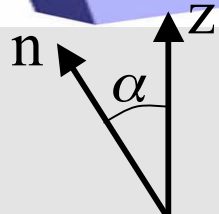
$$\text{Probabilidad}(\text{pasa } \hat{z} \text{ dado que pasa } \hat{z}) = 1 = \cos^2(0)$$



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



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



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

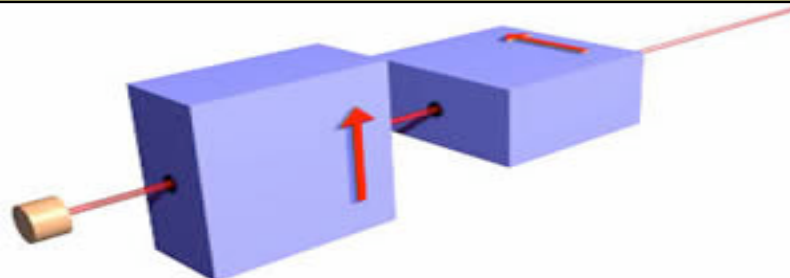
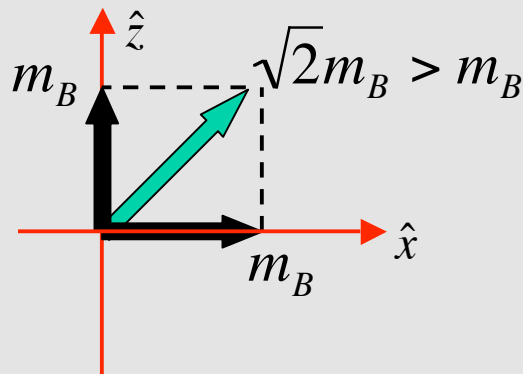
1) Indeterminismo para el spin

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’)

Las componentes de la magnetización en direcciones perpendiculares son propiedades **COMPLEMENTARIAS**. Si el valor de una de ellas está determinado, el valor de la otra es totalmente aleatorio. La magnetización no es una flecha ordinaria: los valores de sus componentes no pueden definirse simultáneamente.

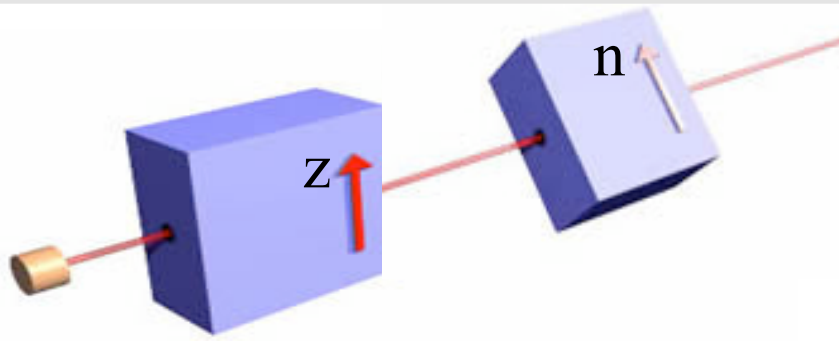
PROPIEDADES COMPLEMENTARIAS: dos caras de un objeto, que no pueden ser vistas simultáneamente



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

ADVERTENCIA!!

Si Usted siente **alergia** (y no alegría) al ver/escuchar esto:



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

Piense si lo suyo puede encuadrarse en alguno de los siguientes casos:

Motivo:

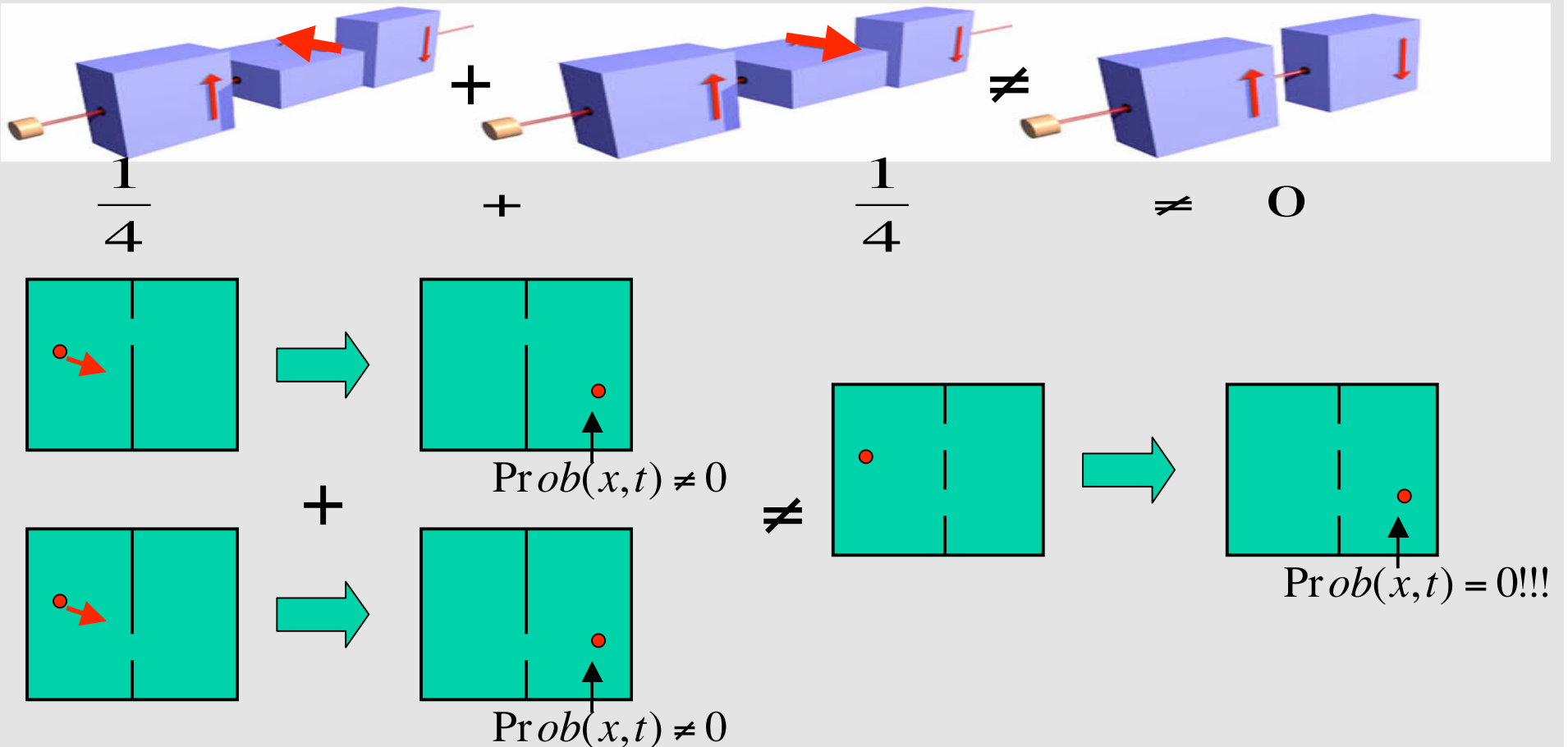
- A mi nunca me interesaron los imanes!
- Me asustan las funciones trigonométricas!
- Esto es demasiado raro...

Recomendación:

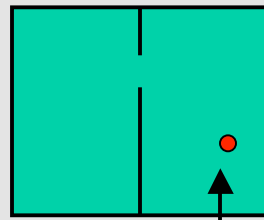
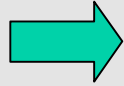
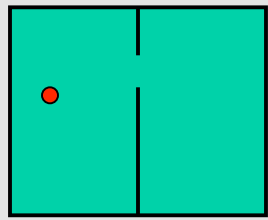
- Tenga en cuenta que lo que estamos viendo se aplica a “todo”!
- Prometo que no veremos cosas mucho mas complicadas que eso
- Es cierto. Y lo que viene es todavía más raro!

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

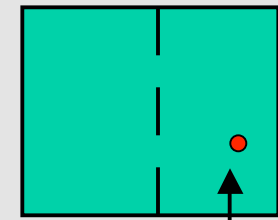
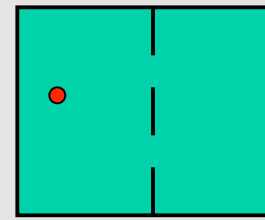
3) Interferencia: Estos experimentos no pueden comprenderse a menos que las probabilidades se calculen de manera “rara”



2) Interferencia: Ondas de probabilidad

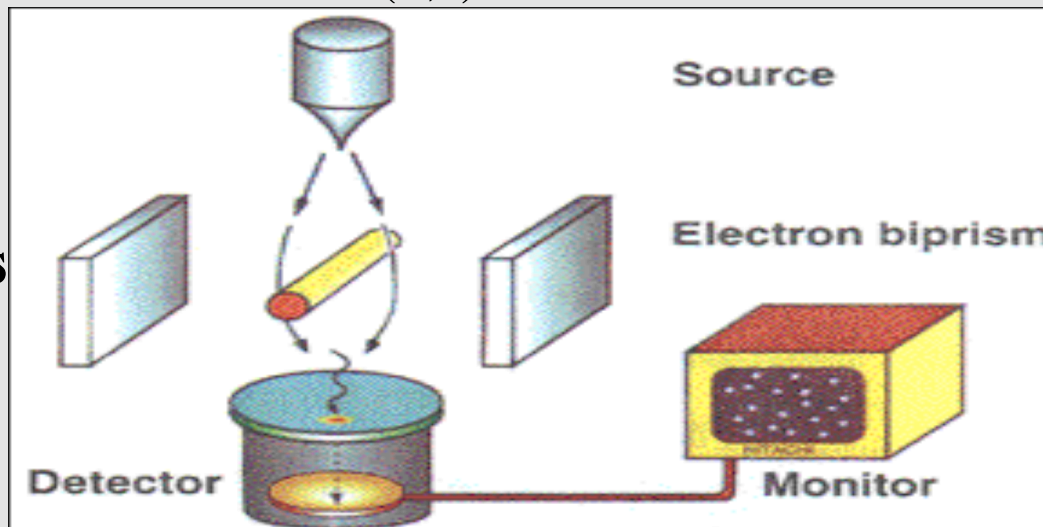


$Prob(x,t) \neq 0$



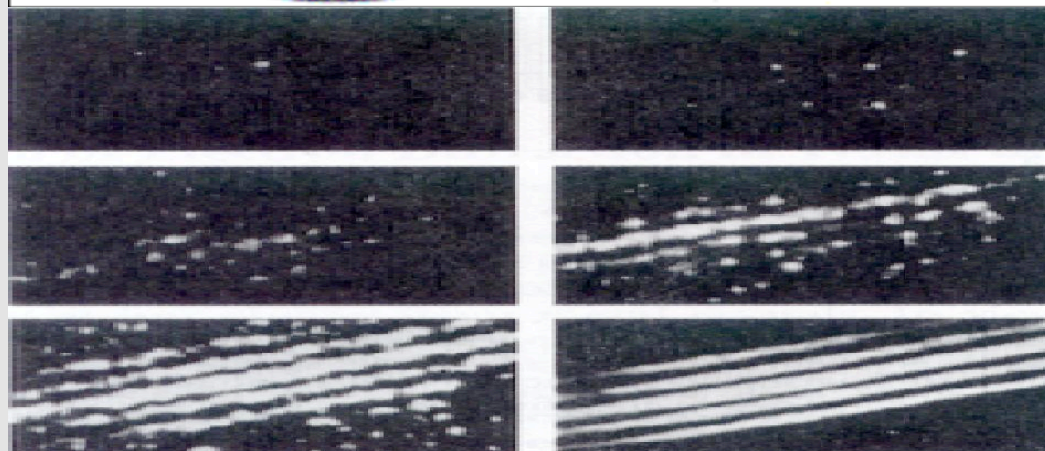
$Prob(x,t) = 0!!!$

Una fuente,
dos rendijas
y una
pantalla



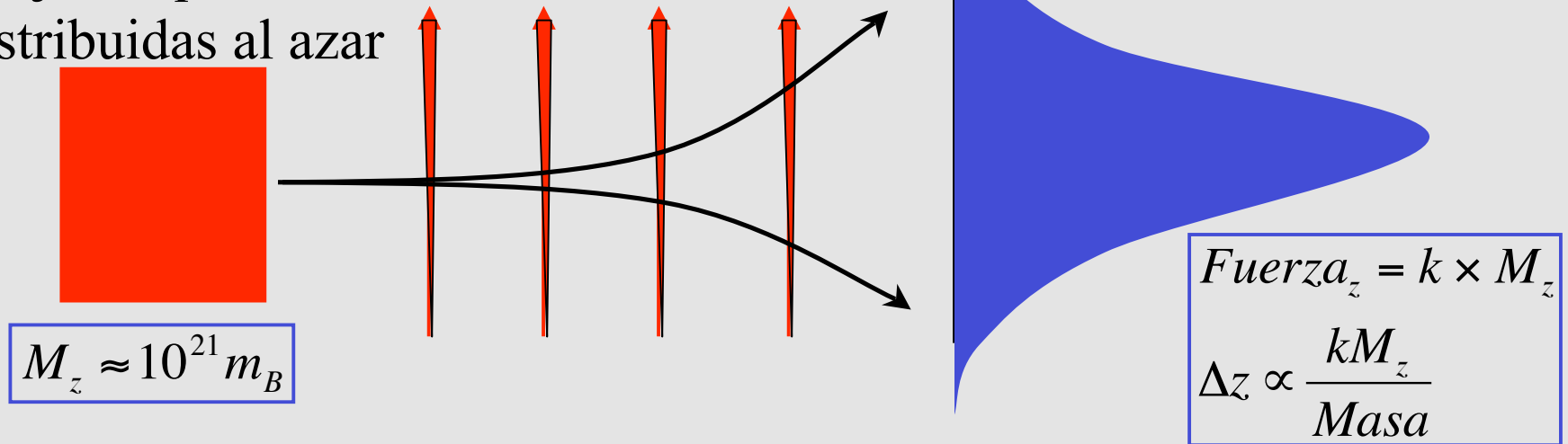
En la pantalla se
observan zonas
claras y oscuras:
Las ondas
INTERFIEREN

$$\lambda_{de\ Broglie} = \frac{h}{mv}$$



NOTA: QUE PASA SI EL EXPERIMENTO SE HACE CON IMANES NO MICROSCOPICOS?

Brújulas que salen distribuidas al azar



Se observa una mancha por cada múltiplo de m_B

Objetos macroscópicos parecen comporse de acuerdo al sentido común (no se pueden ver las oscilaciones porque las manchas están demasiado juntas: hay 10000000000000000000000 de manchas en lugar de 2!)

PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA: LA FISICA CLASICA SE OBTIENE COMO LIMITE DE LA CUANTICA

Resumen hasta ahora...

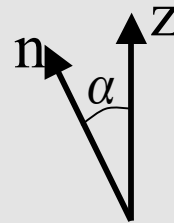
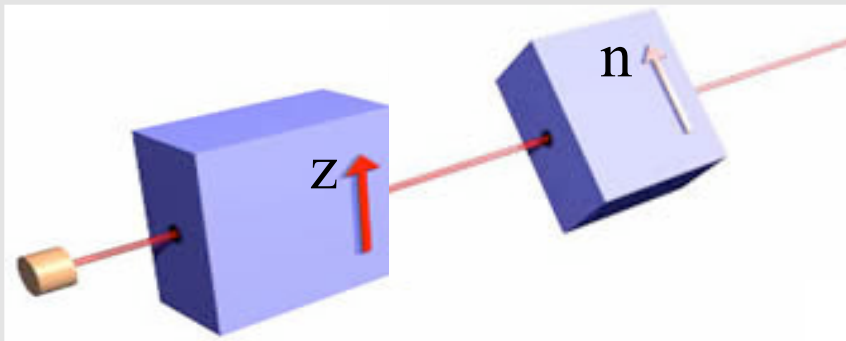
OBJETO DE ESTUDIO: IMANES EN MOVIMIENTO

1) Indeterminismo & 2) Interferencia

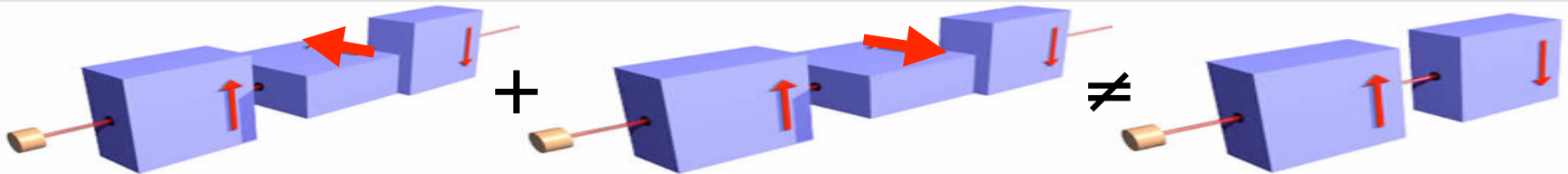
Experimentos idénticos pueden dar resultados diferentes

Sólo es posible predecir probabilidades

Probabilidades: se calculan “en forma rara” (ondas)



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

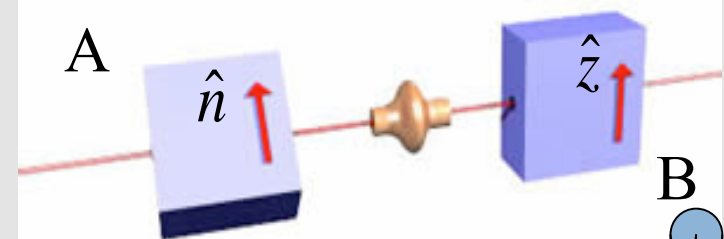


Ahora: 3) El entrelazamiento (Cómo sabemos que el azar no proviene de nuestra ignorancia?)

EXPERIMENTOS CON IMANES: PREDICCIÓN CUANTICA

Es posible preparar estados “entrelazados” de dos imanes.

Propiedades de los estados entrelazados:
Resultados “raros” para experimentos en los que se separan los imanes

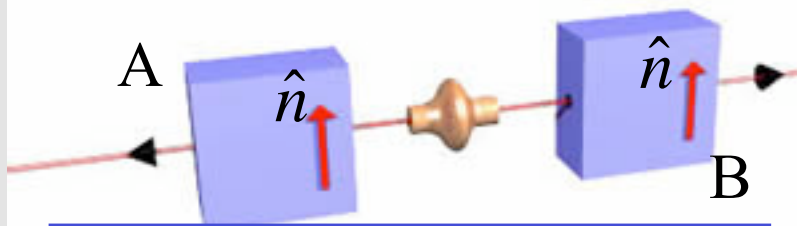


I) Si se separan los imanes y se mide la magnetización de cada uno los resultados $\pm m_B$ son equi-probables (en cualquier dirección)

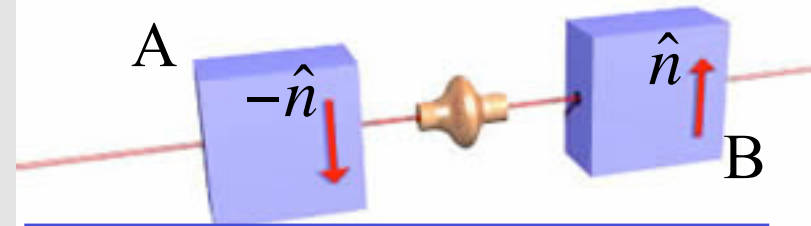
$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } \hat{n}) = \frac{1}{2}$$

$$\text{Probabilidad}(B \text{ pasa } \hat{k}) = \frac{1}{2}$$

II) Sin embargo, los resultados de los experimentos realizados sobre A están correlacionados con los que se realizan sobre B



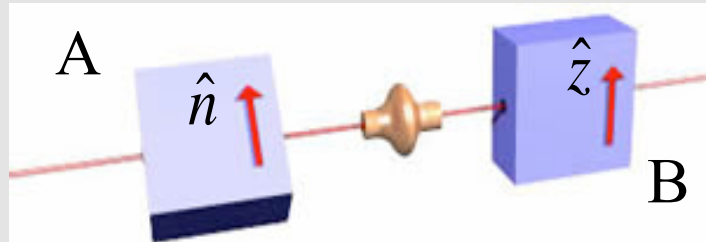
$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } \hat{n} \text{ si } B \text{ pasa } \hat{n}) = 0$$



$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } -\hat{n} \text{ si } B \text{ pasa } \hat{n}) = 1$$

LOS ESTADOS ENTRELAZADOS DE DOS IMANES

Si medimos componentes distintas en A y B



$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } \hat{n} \text{ si } B \text{ pasa } \hat{z}) = \text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

ESTADOS ENTRELAZADOS: SON MUY RAROS!



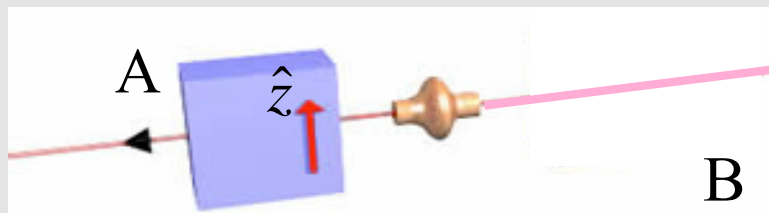
Schrödinger (1935): “Yo no diría que el entrelazamiento es tan solo otro de los razgos característicos de la mecánica cuántica sino que es aquel que nos obliga al abandono completo del pensamiento clásico”

Einstein: Las propiedades de los estados entrelazados muestran que la mecánica cuántica (como tantas otras cosas...) contiene el germen de su propia destrucción

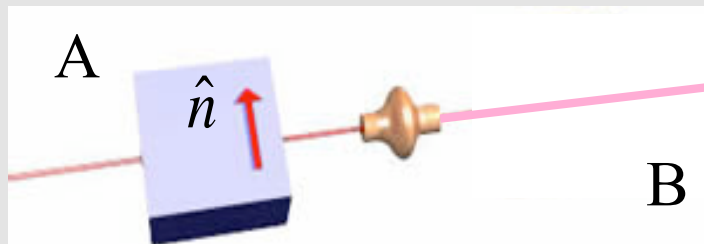
“Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”

A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen.

Physical Review 47, 1935, 777-780.



Si en B midiera la componente \hat{z} obtendría *con certeza* el valor $-m_B$!

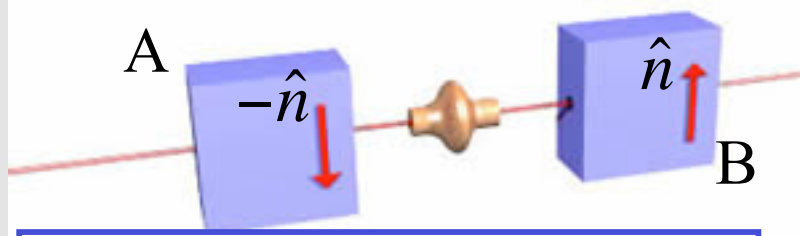


Si en B midiera la componente \hat{n} obtendría *con certeza* el valor $-m_B$!

Si A y B están suficientemente alejados (muy alejados...) nos vemos obligados a concluir que el valor de la magnetización de B (en las dos direcciones) pre-existe a la medición: está determinado (o “escrito” en B), es un ‘elemento de la realidad’

“Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”

A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen.
Physical Review 47, 1935, 777-780.



Probabilidad(A pasa $-\hat{n}$ si B pasa \hat{n}) = 1

Einstein concluye que la existencia de estos estados nos indica que la mecánica cuántica es incompleta (o incorrecta) ya que no permite asignar valores a la magnetización de B en direcciones perpendiculares

Pero tal vez Einstein tenía razón... Y el motivo por el cual en cada evento observamos resultados aleatorios es nuestra incapacidad (o nuestra ignorancia). Nombre elegante: “Variables ocultas”

Tal vez la naturaleza no es TAN rara! Podría pasar esto: Cada parte lleva consigo “información genética”. Resultados de todos los experimentos están determinados por las variables ocultas.

Laboratorio 1

Laboratorio 2



VARIABLES OCULTAS: CIENCIA OCULTA? (como podemos saber algo sobre las variables ocultas...?)

(1960-66) John Bell

Variables ocultas: de la metafísica a la física

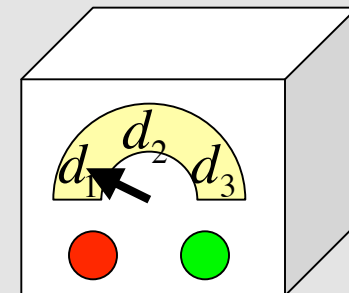
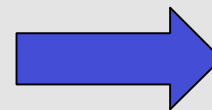
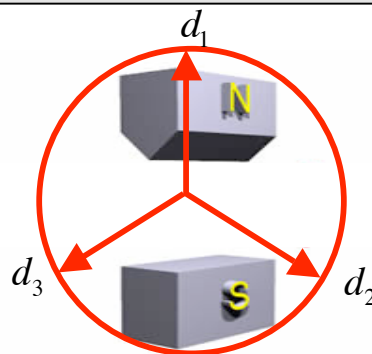
**TODAS las teorías de variables ocultas predicen ciertas propiedades “genéricas”
(desigualdades de Bell) que pueden ser violadas por la mecánica cuántica**

Nota histórica: Bell intentaba salvar el punto de vista de Einstein!
"Yo pensaba que la superioridad intelectual de Einstein sobre Bohr en este punto era enorme: una distancia gigante entre un hombre que veía claramente lo que se necesitaba (Einstein) y un oscurantista (Bohr)"

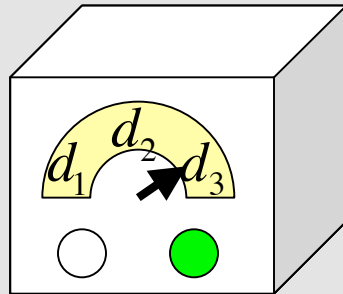
Logró exactamente lo contrario de lo que se proponía!

**Versión sencilla de las desigualdades de Bell
D. Mermin, Am. J. of Phys. 49, 940-943 (1981)**

Usaremos experimentos
donde se mide la
magnetización una
partícula en una de tres
direcciones



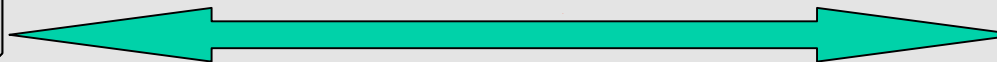
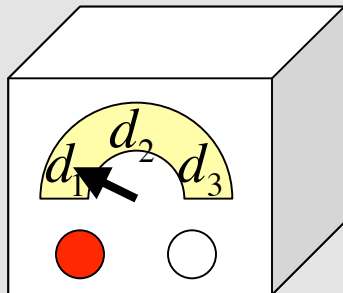
El aparato puede medir el spín en cualquiera de las tres direcciones (d_1, d_2, d_3) : el color de la lámpara que se prende indica el resultado. ROJO=+1, VERDE=-1



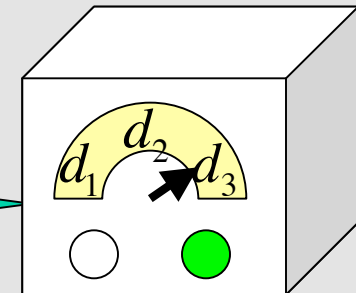
Aparato mide el spín en la dirección d_3
Aparato registra el resultado -1

Experimentos a analizar (tipo EPR). Sistema compuesto por dos partes que son analizadas en dos laboratorios distantes

Laboratorio 1



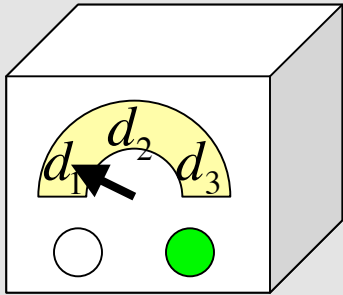
Laboratorio 2



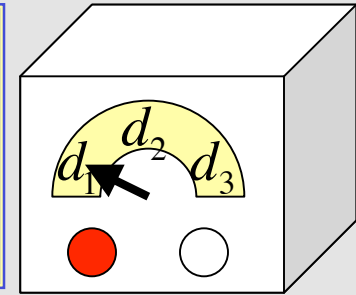
Repetimos muchas veces. Elegimos direcciones al azar y en forma independiente en los dos laboratorios. Registramos resultados.

¿Qué observamos?

Resultados de ambos laboratorios están correlacionados



Si en ambos laboratorios se mide la misma dirección, los resultados siempre son opuestos
(ROJO-VERDE) o (VERDE-ROJO)



PREDICCIÓN CUÁNTICA

La probabilidad de obtener resultados opuestos (independientemente de la dirección en que mida) es $p=0,5$ (o sea, el 50% de las veces se obtienen resultados opuestos)

?

PREDICCIÓN ANTI- CUÁNTICA (Bell)

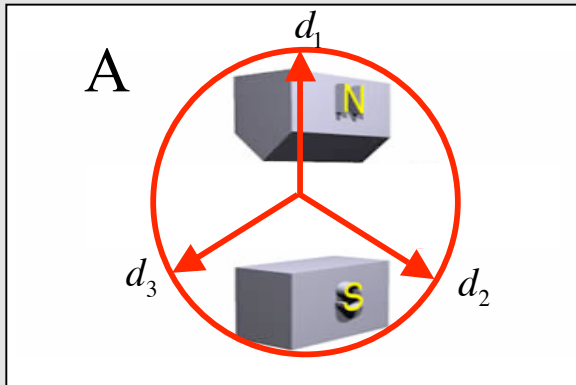
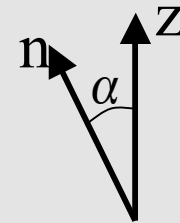
Toda teoría de variables ocultas predice que la probabilidad de obtener resultados opuestos (independientemente de la dirección en que mida) es mayor que $p=5/9=0,555..$ (o sea, el 55,5% de las veces se obtienen resultados opuestos)

PREDICCIÓN CUÁNTICA

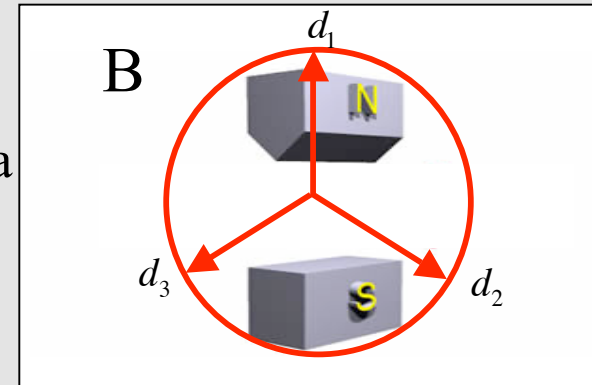
La probabilidad de obtener resultados opuestos es $p=0,5$ (o sea, el 50% de las veces se obtienen resultados opuestos)

$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } \hat{n} \text{ si } B \text{ pasa } \hat{z}) = \text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } \hat{n} \text{ si } B \text{ pasa } -\hat{z}) = 1 - \text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \text{cos}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$



Supongamos que en B mido d_1 y obtengo el resultado $+m_B$: ¿Cuál es la probabilidad de que en A el resultado de mi medición sea $-m_B$?



Una de cada tres veces mido en la dirección d_1

$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } d_1 \text{ si } B \text{ pasa } -d_1) = \text{cos}^2\left(\frac{0}{2}\right)$$

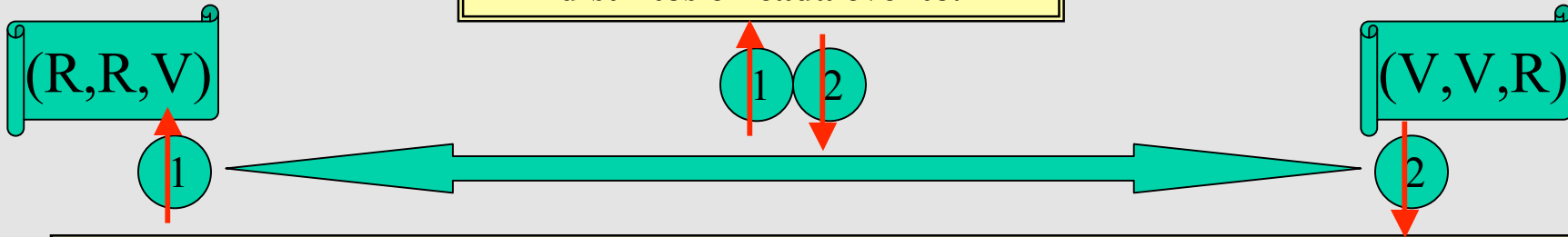
$$\text{Probabilidad}(A \text{ pasa } -d_2 \text{ si } B \text{ pasa } d_1) = \text{cos}^2\left(\frac{120}{2}\right)$$

$$\text{Probabilidad} = \frac{1}{3} \text{cos}^2\left(\frac{0}{2}\right) + \frac{1}{3} \text{cos}^2\left(\frac{120}{2}\right) + \frac{1}{3} \text{cos}^2\left(\frac{120}{2}\right)$$

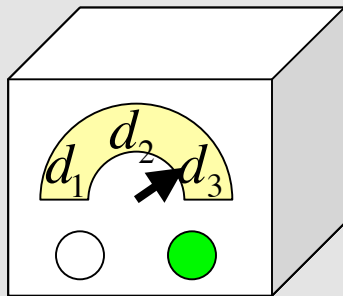
$$\text{Probabilidad} = \frac{1}{3} \times 1 + \frac{1}{3} \times \frac{1}{4} + \frac{1}{3} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{3} \times \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{2}$$

PREDICCIÓN ANTI- CUÁNTICA (Bell)

Grados de libertad desconocidos
distintos en cada evento.

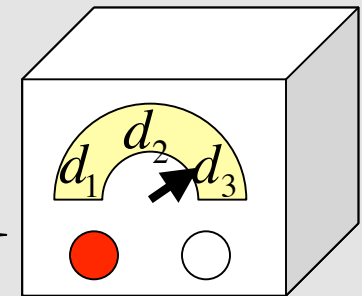


En cada evento, cada partícula es generada y viaja con un conjunto de “instrucciones” que determinan los resultados de las mediciones, p.ej (R,R,V) , etc
“Hipótesis de Realismo local”



(R,R,V)

(V,V,R)



Se puede hacer una lista completa de todos los conjuntos de instrucciones

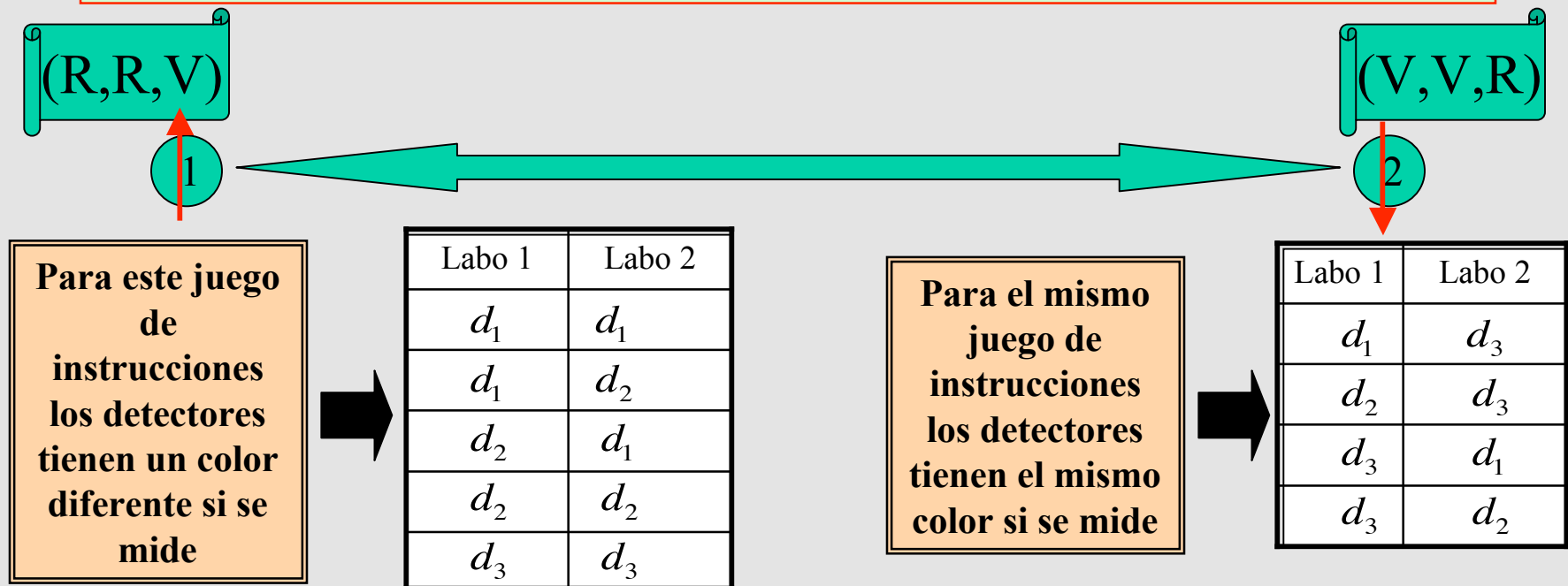
(R,R,R)
 (R,R,V)
 (R,V,R)
 (V,R,R)
 (R,V,V)
 (V,R,V)
 (V,V,R)
 (V,V,V)

(V,V,V)
 (V,V,R)
 (V,R,V)
 (R,V,V)
 (V,R,R)
 (R,V,R)
 (R,R,V)
 (R,R,R)

Solamente hay ocho “juegos” posibles de instrucciones

PREGUNTA A CONTESTAR: ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD DE OBSERVAR LOS DETECTORES (VERDE-ROJO) O (ROJO-VERDE)?

Para cada juego de instrucciones la respuesta solamente depende de la orientación de los detectores. Hay nueve combinaciones posibles (tenemos que contar...)



*En este caso (para este juego de instrucciones):
Probabilidad de que los detectores tengan color diferente = $5/9 = 0,555..$*

Para todos los juegos de instrucciones la probabilidad de que los detectores tengan distinto color es igual a $5/9$ salvo para (R,R,R) y (V,V,V) y en esos casos la probabilidad es 1 (para esas instrucciones los detectores siempre tienen color diferente).

“Instrucciones”

(R,R,R)
(R,R,V)
(R,V,R)
(V,R,R)
(R,V,V)
(V,R,V)
(V,V,R)
(V,V,V)



(V,V,V)
(V,V,R)
(V,R,V)
(R,V,V)
(V,R,R)
(R,V,R)
(R,R,V)
(R,R,R)

Probabilidad (R-V) o (V-R)

1
 $5/9$
 $5/9$
 $5/9$
 $5/9$
 $5/9$
 $5/9$
1

PREDICCIÓN ANTI- CUÁNTICA (Bell)

Toda teoría de variables ocultas predice que la probabilidad de obtener resultados opuestos es mayor que $p=5/9=0,555..$ (o sea, el 55,5% de las veces se obtienen resultados opuestos)

PREDICCIÓN CUÁNTICA

$$P=1/2 = 0,5$$

¿QUIÉN TIENE RAZÓN?
EL EXPERIMENTO DEBE DECIDIR!!!!

CONCLUSIÓN

MECÁNICA CUÁNTICA ES INCOMPATIBLE CON
TODAS LAS TEORÍAS DE VARIABLES OCULTAS
(DONDE EL AZAR PROVIENE DE LA IGNORANCIA)

EXPERIMENTOS: CONFIRMAN LA MECÁNICA CUÁNTICA!!

Y ENTONCES, CUAL ES ORIGEN DEL AZAR?: NO SABEMOS!
SABEMOS QUE NO PROVIENE DE LO QUE NO SABEMOS!!



Schrödinger (1935): “Yo no diría que el entrelazamiento es tan solo otro de los rasgos característicos de la mecánica cuántica sino que es aquel que nos obliga al abandono completo del pensamiento clásico”

CIENCIA Y TECNOLOGÍA CUÁNTICAS EN EL SIGLO XXI: IMPLICANCIAS, GENERACIÓN, MANIPULACIÓN Y CONTROL DEL ENTRELAZAMIENTO



HOY (2006)
CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA
COMPUTACIÓN CUÁNTICA
TELEPORTACIÓN