

# La mecànica quàntica

*una nova concepció de la  
realitat*

IES Miquel Biada, Mataró.

15 de Novembre de 2006

Arnau Riera Graells. Dept.ECM, UB.

# Abans de començar

*“La mecànica quàntica és la teoria més posada a prova i amb més èxit de tota la història de la ciència.”*

Jackiw and Kleppner, 2000

*“Calla i calcula!”*

Paul Dirac

*“...estic convençut que Déu no juga als daus.”*

Albert Einstein

*“Us explicaré com es comporta la natura. Si la accepteu tal com és, us semblarà esplèndida i maravellosa. Però si no ho podeu evitar i us pregunteu: com és possible?!, entrareu en un carreró del que ningú no ha pogut sortir encara. I es que ningú sap encara com és possible la mecànica quàntica.”*

Richard Feynman

# Context històric

La **física** a finals del s. XIX:

- Mecànica clàssica (cinemàtica, dinàmica).
- Òptica.
- Termodinàmica.
- Electromagnetisme.

Satisfacció en la comunitat científica.

*“El llibre de la física està pràcticament acabat”.* M. Gibbs

Faltaven per lligar alguns **experiments**;  
però tot era qüestió de temps.

-Experiment de Michelson Morley.

RELATIVITAT

- Radiació del cos negre.

- Efecte fotoelèctric.

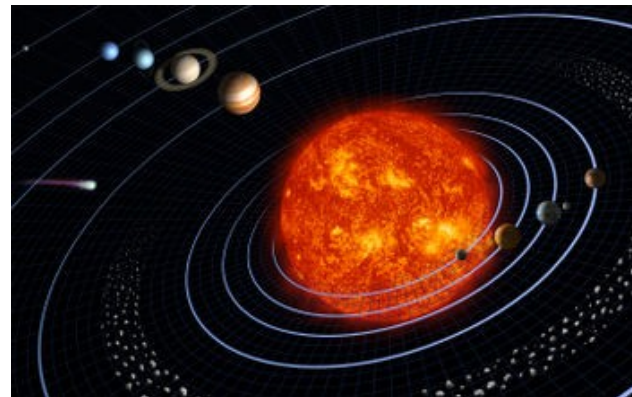
MECÀNICA  
QUÀNTICA

# Descripció (clàssica) de la realitat

Descriure fins a última instància un sistema a un instant donat no és altra cosa que ser capaç de dir les **posicions** i **velocitats** (moments) de totes les partícules que el formen.

- Si coneixem les **posicions** i les **velocitats** en un moment donat,  $x(t_0)$ ,  $v(t_0)$ ,
- les **lleis de la física** ens permeten saber quin serà l'estat del sistema en qualsevol altre instant de temps, és a dir quines seran les **posicions** i les **velocitats** en **qualsevol moment** del futur o del passat:  $x(t)$ ,  $v(t)$ .

**exm:** el sistema solar



# Conseqüència: causalitat i determinisme

Si donem per bona la **mecànica clàssica**, estem condemnats a acceptar el **determinisme**: tot està determinat per les condicions inicials.

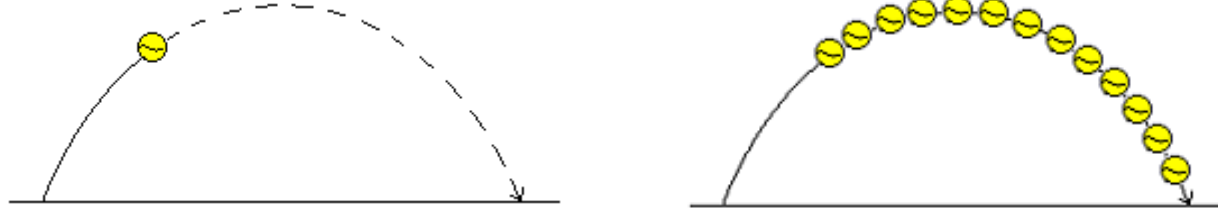
Hi ha un **destí** escrit per a tot i tothom. Ens podríem plantejar on quedaria la **llibertat**.

D'aquí la reflexió de Pierre Simon **Laplace** en el llibre *Essai Philosophique sur les Probabilités, 1819*.

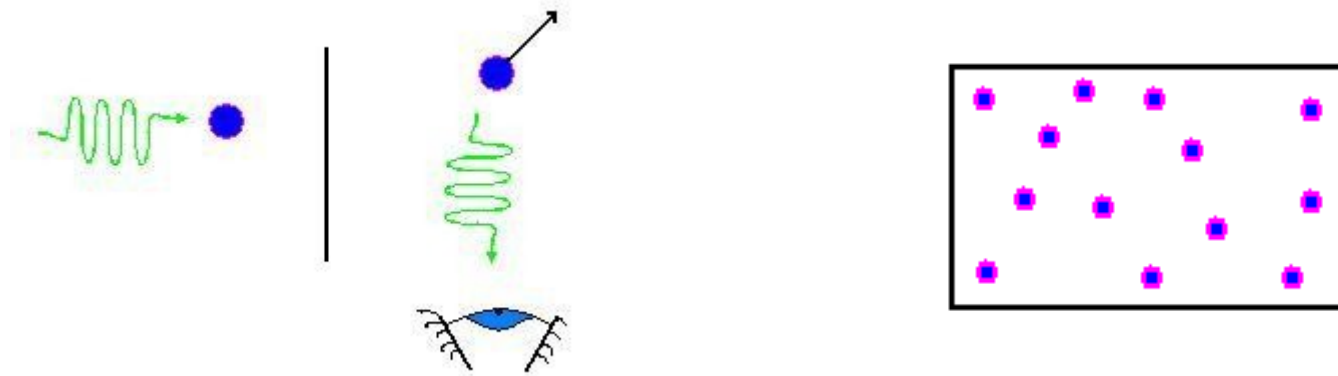
*“Preveiem l'estat present de l'univers com l'efecte del seu estat anterior i la causa del seu estat futur. Una intel·ligència que en un instant donat, conegués totes les forces de la natura i la situació dels objectes que la componen, i pogués sotmetre a l'anàlisi des dels cossos més grans de l'univers fins a l'àtom més lleuger; res no seria incert per ella, i tant el futur com el passat serien present als seus ulls.”*

# Sistemes grans vs. sistemes petits

1) Una pilota de tennis. Apliquem la **mecànica clàssica** i funciona.



2) Un electró. **Problema!!!!** No podem **conèixer/mesurar** quina és la posició i velocitat de l'electró simultàniament. Si mesuro la posició perdo informació de la velocitat, i a l'inversa. L'observació canvia l'**estat** del **sistema** observat. **Principi d'incertesa de Heisenberg.**



**Conseqüència:** desaparició de la noció de **trajectòria**.

# Sistemes grans vs. sistemes petits

Així doncs per a sistemes molt petits tenim:

- 1) La impossibilitat d'aplicar la **mecànica clàssica**.
- 2) La pèrdua de la noció de **trajectòria**.

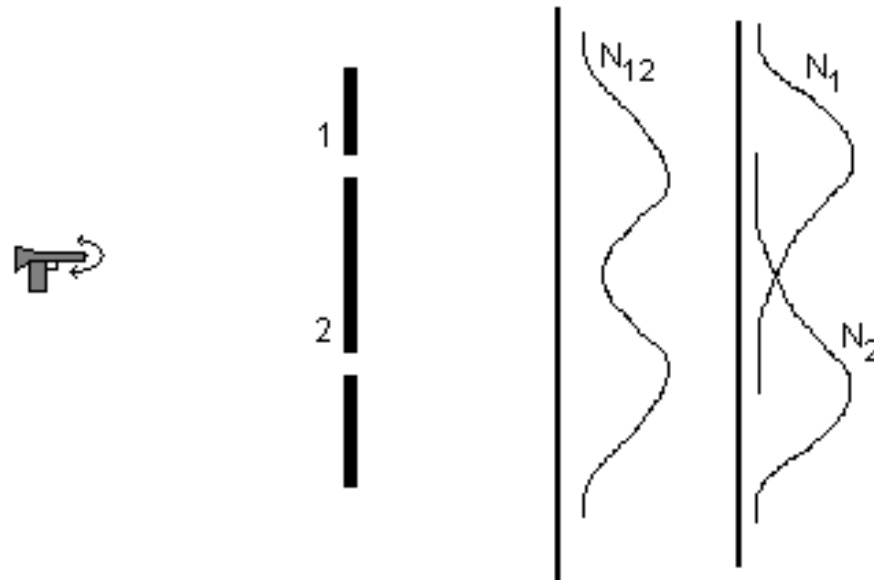
Ara bé, com **interpretem** aquestes novetats?

- a) Aquesta és una limitació tècnica, i l'electró té naturalment una posició i velocitat ben definides, encara que jo les ignoro.
- b) Si jo no podré saber mai on és exactament l'electró i quina velocitat té, és perquè són propietats indefinides d'aquest.

Per trobar resposta a aquesta pregunta plantegem un **experiment**...

# L'experiment de les dues escletxes

Amb **partícules (matèria)**: per exemple bales



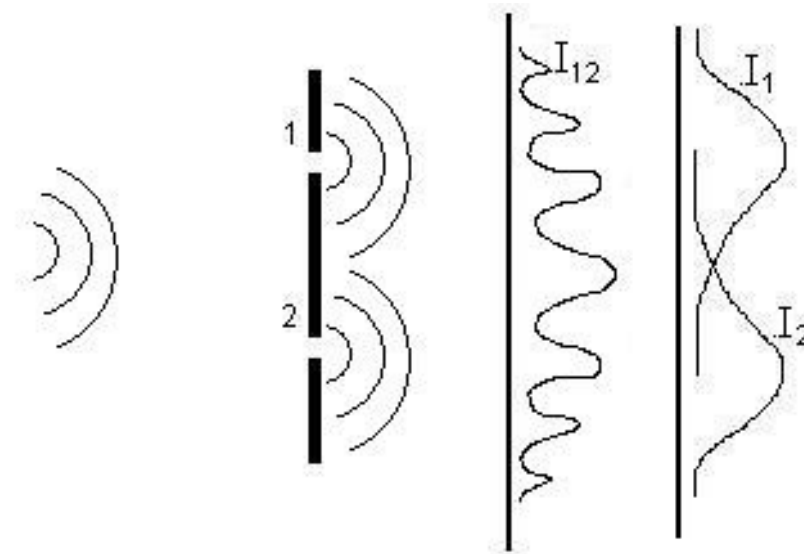
Cada bala quan surt de la pistola té la seva **posició** i **velocitat** perfectament definides (encara que jo les ignoro).

Una bala per arribar a la pantalla, o bé passa per l'escletxa 1, o per la 2.



# L'experiment de les dues esclertes

Amb **ones** (so, llum...): per exemple ones d'aigua

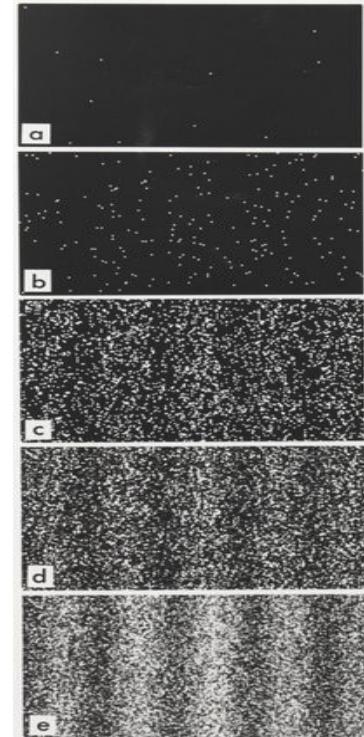
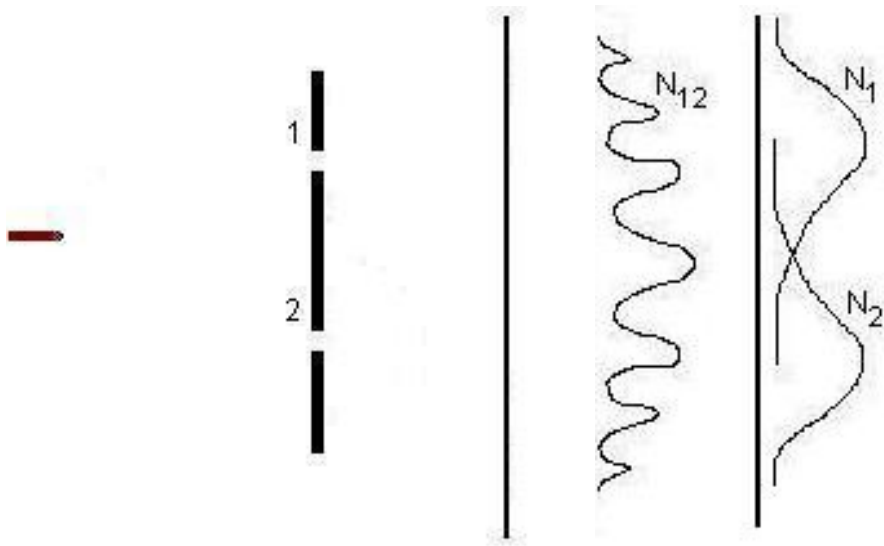


Observem un patró d'**interferències**. Els punts on hi ha un màxim és perquè les ones estan en fase, i on hi ha un mínim és perquè estan en oposició de fase.

# L'experiment de les dues esclotxes

Amb **electrons** (matèria): Igual que amb les bales llançarem els electrons d'un amb un.

Què esperariem?



Observem una figura d'**interferències** !!! Els electrons, tot i ser **partícules**, es comporten com **ones**!!!

Intentem entendre què passa exactament...

# Anàlisi de l'experiment de les dues escletxes amb electrons.

Què fa l'electró des que surt del filament fins que impacta en la pantalla?

**Hipòtesi 1:** Tot electró que arriba a la pantalla, o ha passat pel forat 1 o ha passat pel forat 2.

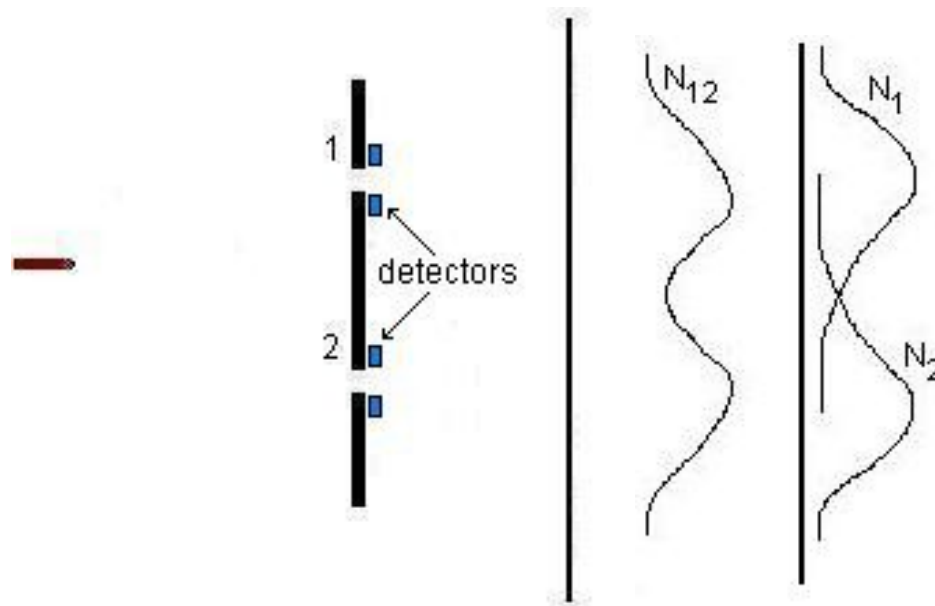
Si acceptem la **hipòtesi** 1, una conseqüència directa és que el nombre total detectat ( $N_{12}$ ) seria igual als electrons que passen per l'escletxa 1 ( $N_1$ ) més els electrons que passen per la 2 ( $N_2$ ).

Però nosaltres observem **interferències**. Per tant la **lògica** ens descarta la proposició 1.

Què passa doncs, realment, entre el filament i la pantalla? Veiem-ho...

# Anàlisi de l'experiment de les dues esclatxes amb electrons.

Posarem dos **detectors** que ens comptin quants electrons passen per cada esclatxa.



S'esborra el patró d'**interferència**!!!!

Tenim dues opcions:

- Aquests físics estan sonats i els agrada anar pel món enganyant la gent.
- La **natura** a escala tan petita no té res a veure amb la meva **intuïció**.

# Conclusions de l'experiment de les dues escletxes amb electrons

Observem un **comportament dual** dels electrons. Es comporten com a **ones** o **partícules** depenent de l'experiment.

Així doncs, en la experiència **sense** detectors hem vist que:

- 1) Els electrons no poden tenir una **posició** i **velocitat** perfectament definides, ja que sinó no observariem interferències.
- 2) Els electrons “passen” per les dues escletxes alhora.

I en la experiència **amb** detectors:

- 1) La **interacció** dels detectors (aparell de mesura) amb els electrons fa que passin només per una de les escletxes (aquella que el detecta), i recuperem així el **comportament corpuscular**.

# La mecànica quàntica

## 1. Estat d'un sistema: la superposició

Un **sistema** pot tenir **propietats** (posició, velocitat, nombre de partícules, l'energia...) **indefinides**.

**Exm:** Juguem al joc d'amagar una moneda en una de les dues mans.

**Clàssicament:** la moneda o està a la mà dreta o a la mà esquerra.

**Quànticament:** la moneda pot estar en un estat tal que no tingui la posició ben definida, és a dir que estigui difusa entre la mà dreta i la mà esquerra.

$$|\Psi\rangle = a|E\rangle + b|D\rangle$$

D'altra banda, quan **mesuri** en quina mà està, només la trobaré en una de les dues: o la dreta o l'esquerra.

En funció dels coeficients ***a*** i ***b*** serà més **probable** trobar-la en la mà dreta o en l'esquerra.

# La mecànica quàntica

## 2. La mesura

Tenim un aparell “X” que ens **mesura** una **propietat** del sistema, per exemple la posició.

Quan apliquem “X” sobre el sistema passen dues coses:

- Obtenim un **resultat** de la mesura.
- Si la propietat que hem mesurat estava **indefinida**, instantàneament es defineix amb el valor del **resultat** obtingut. (col·lapse de la funció d'ona).

**Exm:** continuem amb la moneda.

$$|\Psi\rangle = a|E\rangle + b|D\rangle \xrightarrow{\text{apliquem X}}$$

amb una probabilitat  $|a|^2$ :  
obtenim el resultat  $x_E$   
el sistema queda en l'estat  $|E\rangle$

amb una probabilitat  $|b|^2$ :  
obtenim el resultat  $x_D$   
el sistema queda en l'estat  $|D\rangle$

# La mecànica quàntica

## 3. Propietats complementàries

Hi ha **propietats** (posició-velocitat, nombre de partícules-fase,...) que no poden estar **mai definides alhora**.

Suposem que tenim dos aparells “X” i “P” que mesuren dues propietats complementàries. Per exemple “X” mesura la posició i “P” la velocitat.

- Inicialment tenim el sistema amb tan posició com velocitat **indefinides**. El nostre objectiu es determinar aquestes dues propietats.
- Apliquem “X” sobre el sistema i definim així la seva **posició**. El seu moment continua indefinit.
- Apliquem “P” sobre el sistema i definim així la seva **velocitat**.  
**Pregunta:** Què passa amb la posició?



# Resum de la MQ

- **Estats superposició:** Un **sistema** pot tenir **proprietats** (posició, velocitat, nombre de partícules, l'energia...) **indefinides**.
- **Interacció de aparell de mesura amb el sistema observat:** Quan mesurem una **proprietat** d'un sistema físic, aquesta queda **definida** amb el resultat de la mesura.
- **Variables dinàmiques complementàries:** Hi ha **proprietats** (posició-velocitat, nombre de partícules-fase,...) que no poden estar **mai definides alhora**.

# Conseqüències filosòfiques: L'atzar ha entrat en joc

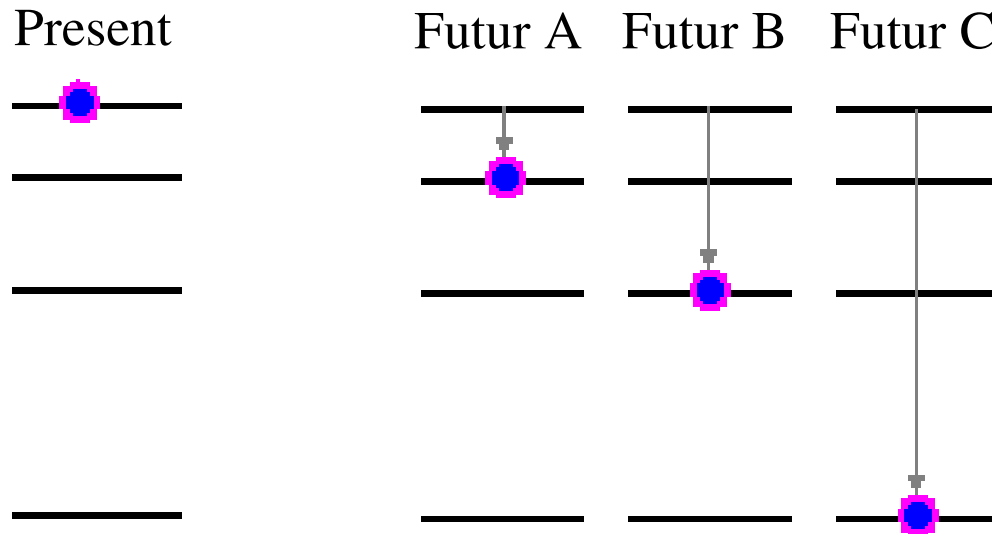
Mecànica **Clàssica**

Present  $\longrightarrow$  Futur

Mecànica **Quàntica**

Present  $\begin{cases} \nearrow \text{Futur A} \\ \searrow \text{Futur B} \end{cases}$

**exm:** desexcitació d'un àtom excitat



# Primer impacte de la MQ: la discussió Einstein-Bohr

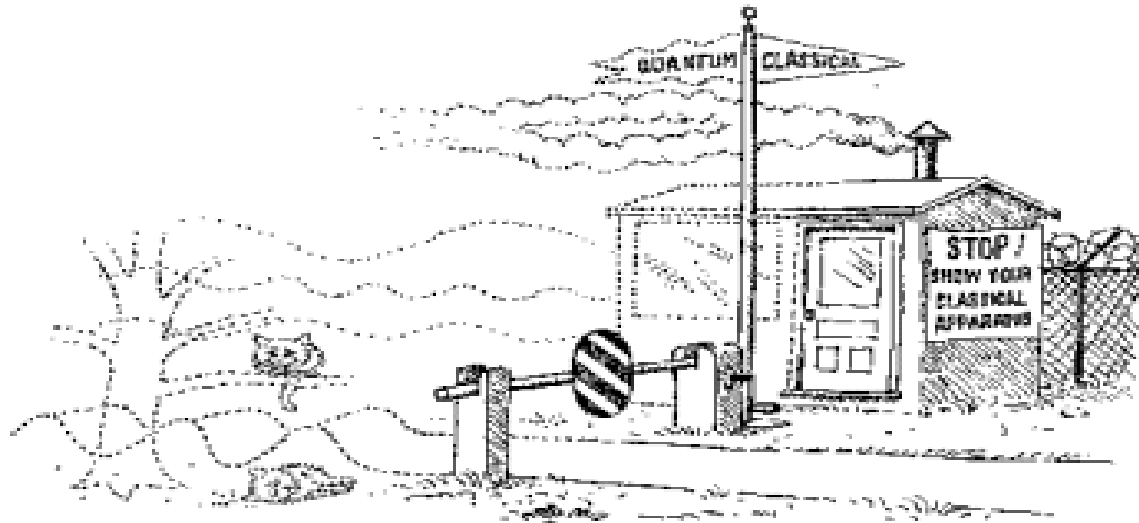
Aquests estranys resultats van portar a diferències entre els grans científics del moment.

- La reacció d'**Einstein** (i Schrödinger...): “La **MQ** és una teoria incompleta”. Einstein no vol renunciar a una **descripció espacio-temporal**. Per a ell ha d'existir una altra teoria més **realista** i profunda.
- La reacció de **Bohr** (i Heisenberg, Born...): Acceptació/ressignació total i absoluta. Desenvolupa la interpretació de *Copenhagen*. Per ell la **ciència** és un seguit de **regles** que prediuen els **experiments**, sense cap necessitat de fer-nos-en una **imatge mental**.

*“La teoria quàntica és molt impressionant. Però una veu interna em diu que això no és encara allò autèntic. La teoria dóna molt, però difícilment ens apropa al secret. De totes maneres, estic convençut que Déu no juga als daus”*

# Decoherència: Els orígens quàntics del món clàssic (macroscòpic)

Si el món **microscòpic** és tan estrany, per què el món **macroscòpic** no té aquestes propietats? On està la frontera entre clàssic i quàntic?



The border between quantum and classical.

La resposta és l'**ambient**. Les **interaccions** del sistema amb el seu **entorn** fan que es destrueixin els estats barreja.

# Aplicacions de la MQ

- Un pilar fonamental per a la mateixa **ciència**. Tota disciplina que hagi d'explicar fenòmens a **curtes distàncies** ha de fer ús de la **MQ**: física **atòmica i nuclear**, física de l'**estat sòlid**, **química**...
- 3) Les aplicacions de les disciplines esmentades han donat lloc a:
- L'energia **nuclear**.
  - La indústria **química**.
  - Tota l'**electrònica** (ordinadors, telefonia, MP3,...).
  - La física **mèdica** (ressonàncies magnètiques, tac's, radiografies, quimioteràpia,...).

Actualment,

- 3) Les **nanotecnologies**.
- 4) La teoria de la **informació i computació quàntiques**.

# La informació i computació quàntiques

*“La teoria de la computació ha estat tradicionalment estudiada com una cosa abstracta, com un tòpic en la matemàtica pura. Això és perdre de vista l'essència de la computació. Els ordinadors són objectes físics i els càlculs processos físics. El que els ordinadors poden o no calcular està determinat exclusivament per les lleis de la física, i no per la matemàtica pura.”*

D. Deutsch

- 1) **Computació quàntica.**
- 3) **Criptografia quàntica.**
- 5) **Teleportació.**
- 7) **Codificació super-densa.**
- 9) **Simuladors quàntics.**

# Computació quàntica

## Les limitacions de l'ordinador clàssic

Hi ha molts problemes que un ordinador “clàssic” no pot resoldre, ja que el nombre d'operacions que hauria de fer és massa gran.

Per exemple: Trobar els factors d'un nombre molt molt gran.

## Què és un ordinador quàntic?

Un ordinador quàntic és un ordinador que té per unitat mínima de memòria el quantum bit (Qbit).

Un bit clàssic està en 0 o en 1, un Qbit en canvi...  $a|0\rangle + b|1\rangle$

## Què podria fer un ordinador quàntic?

Si existís un ordinador quàntic alguns d'aquests problemes es podrien resoldre. Es podria trobar els factors de manera molt ràpida d'un nombre tan gran com es vulgui.

Es podria fer simulacions de sistemes quàntics.

# Criptografia quàntica

L'objectiu de la criptografia és transmetre **informació** de tal manera que només el receptor desitjat hi pugui accedir.



Emissor: Alice

Canal



Receptor: Bob

- 1) Alice envia a Bob un estat quàntic **indefinit**,
- 2) si apareix un espia i vol desxifrar el missatge, ha de **mesurar** sobre l'estat quàntic (què passa?)
- 3) ...i Bob s'adona que algú els està espiant.

La **criptografia quàntica** no és més segura que la **clàssica**, però permet detectar a l'instant si entra un espia en el canal.



# QIC UB

## Quantum information and Computation Group



### Professors

José Ignacio Latorre, Núria Barberán, Josep Taron

### Post-docs

Sofyan Iblidir, Luca Tagliacozzo

### PhD students

José María Escartín, Thiago Rodrigues, Dani Dagnino, Vicent Picó i Arnau Riera.



<http://ecm.ub.es/~ariera>

