



INTERNATIONAL YEAR OF Quantum Science and Technology

**Any Internacional de la Ciència i la Tecnologia Quàntiques:
Dels inicis a la Segona Revolució Quàntica – Lliçó 2**

Dr. Jordi Mur-Petit

57a UCE, Prada, 20-22 agost



<https://www.linkedin.com/in/jordimur>



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ca>

El curs a vol d'ocell

1. ✓ **Per què 2025 és l'Any Internacional de la Quàntica?**
Breu repàs històric de Planck i Einstein fins a De Broglie, Heisenberg, Schrödinger (1925)
2. ▶ **Grans paradoxes de la quàntica**
Incertesa i mesura. Superposició i el gat de Schrödinger. Entrellaçament i la paradoxa EPR.
3. **Tecnologies quàntiques de primera i segona generació**
Tecnologies quàntiques que ja tenim entre nosaltres. Els quatre pilars de les noves tecnologies quàntiques.
4. **La segona revolució quàntica – i el paper de les companyies emergents catalanes**
Què prometen i quin és l'estat de l'art. Grups de recerca i empreses emergents catalanes en aquestes àrees.

Principals paradoxes de la ciència quàntica: la mesura, el gat de Schrödinger i l'experiment EPR

**Principals sorpreses de la
ciència quàntica: incertesa,
superposició i
entrellaçament**



Què en penseu?

- Quines paradoxes de la quàntica coneixeu?
- Com hem d'interpretar l'existència d'aquestes paradoxes? Penseu que indiquen que no entenem la quàntica (és a dir, que ningú l'entén)?

El principi d'incertesa de Heisenberg (1927)

Relacions d'anticommutació

Des de la formulació l'any 1925 en llenguatge “matricial” de la Mecànica Quàntica s'obtenen unes relacions d'anticommutació entre observables com ara posició-moment o energia-temps:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} 1$$

Relació d'anti-commutació
entre posició i moment

El principi d'incertesa

El 1927, Heisenberg demostra que aquestes relacions impliquen una relació d'incertesa en les mesures respectives:

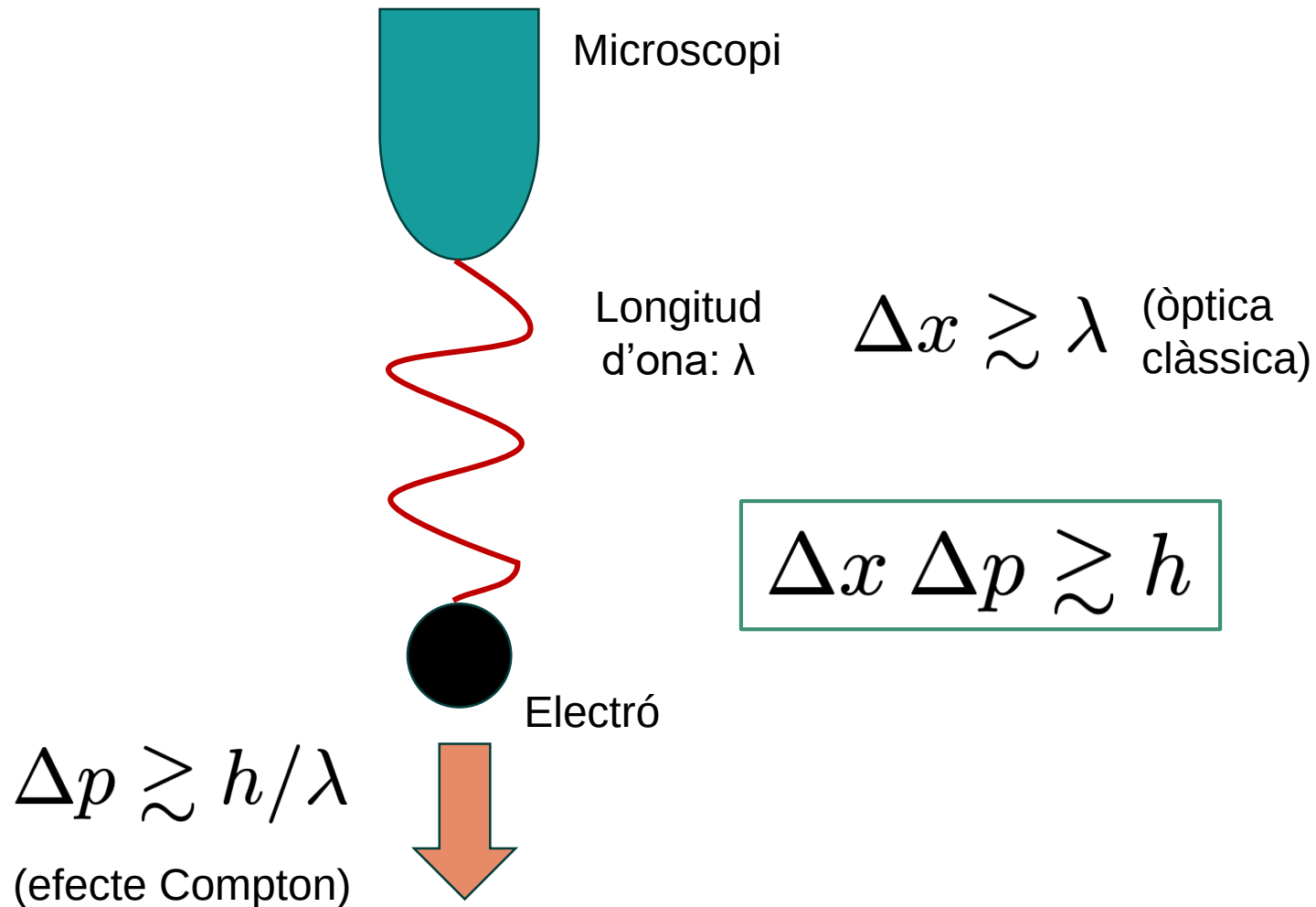
$$\Delta x \Delta p \gtrsim h$$

Relació d'incertesa posició-
moment



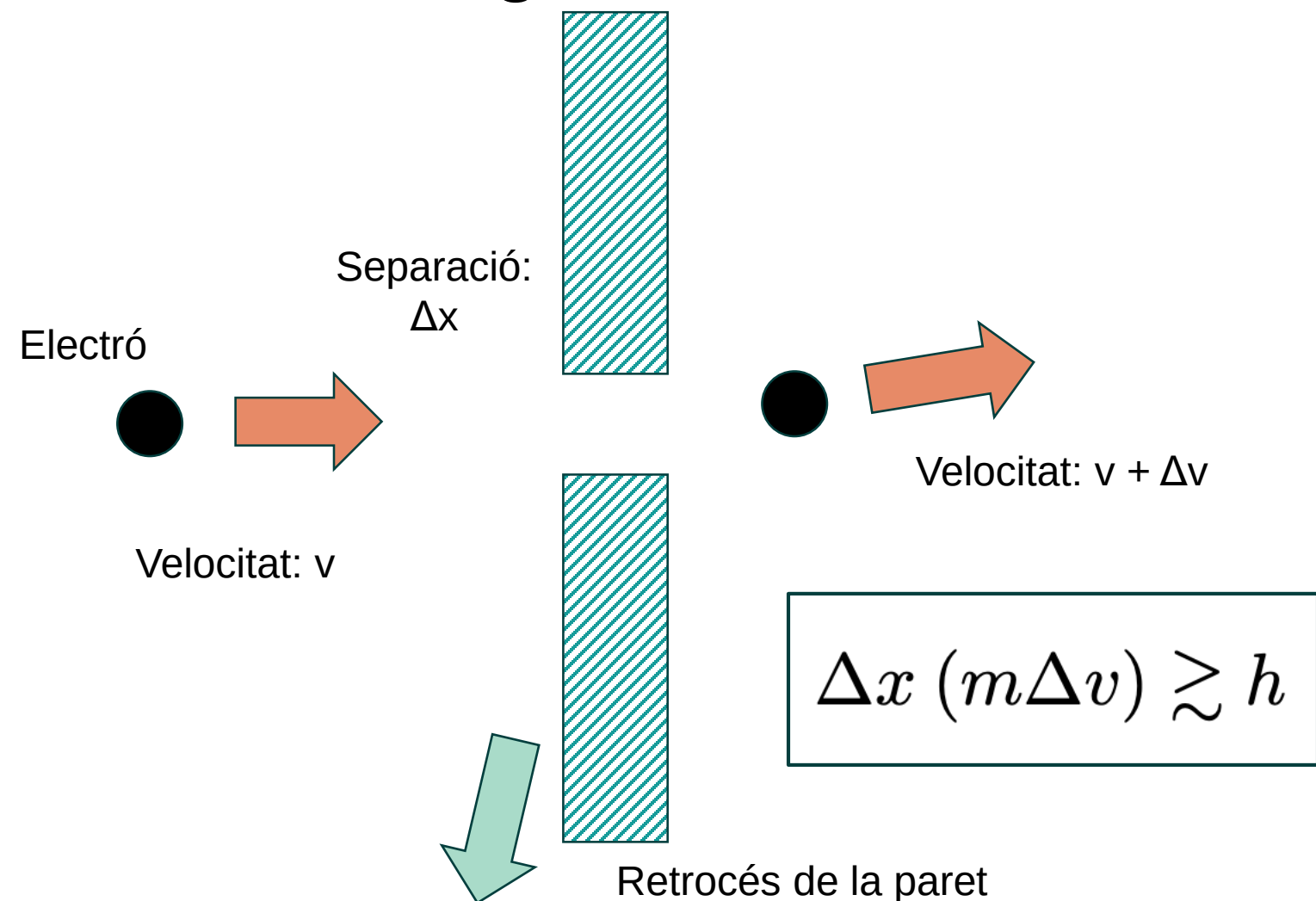
W. Heisenberg, 1933

El principi d'incertesa de Heisenberg i la mesura



W. Heisenberg, 1933

El principi d'incertesa de Heisenberg i la mesura



- 😲 Que magnituds “clàssiques” com posició i velocitat no es puguin determinar a la vegada amb precisió arbitrària va causar **gran malestar entre molts físics**, com ara Einstein.
 - Què vol dir “mesurar”? Què vol dir “posició” o “velocitat”?
 - Quin és el paper de l'observador(a)?

- Pressió de radiació
 - ☐ **Emprada per a refredar** àtoms amb llum làser – és la tècnica per assolir les temperatures més baixes conegudes (10^{-9} K)
 - *Premi Nobel 1997*
 - ☐ Aquestes idees són clau per a la **metrologia quàntica** – la ciència de mesurar amb precisió aprofitant les lleis de la mecànica quàntica



**El gat de
Schrödinger:
explicant la
paradoxa**

Superposició d'estats

Superposició en ones (llum, so...)

- Harmonies en instruments musicals
- Interferència en la llum

Superposició en mecànica quàntica

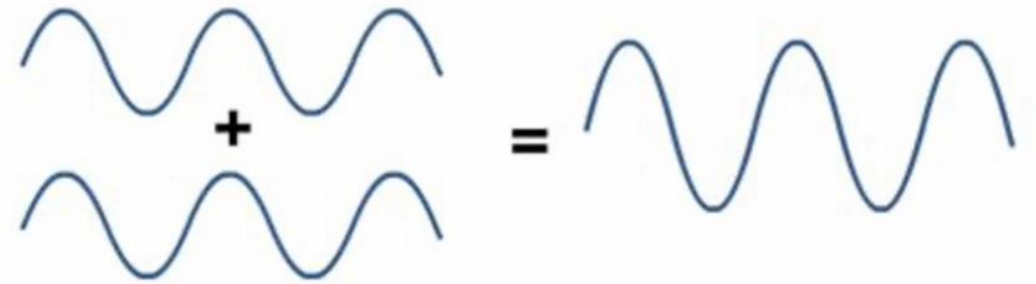
- Si dues funcions d'ona Ψ_1, Ψ_2 són solucions vàlides de l'equació de Schrödinger, la seva suma també ho és.
- Si un electró o àtom pot estar en principi en dos estats diferents, també **pot estar en una superposició lineal** dels mateixos:

$$|\Psi_1\rangle = |1S\rangle$$

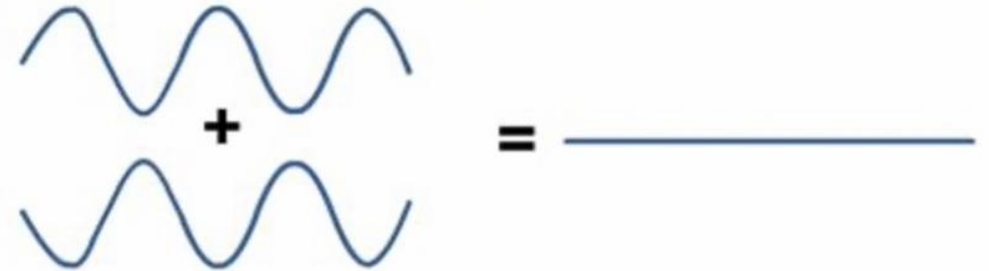
$$|\Psi_2\rangle = |1P\rangle$$

$$|\Psi_3\rangle = |1S\rangle + |1P\rangle$$

Interferència constructiva



Interferència destructiva



$n = 3$

Quines implicacions té que una partícula es comporti així?

Superposició d'estats: El gat de Schrödinger

☢️📦 Imaginem una capsa amb un àtom en un estat inestable...

$$|\Psi_1\rangle = |\text{excitat}\rangle$$

$$|\Psi_2\rangle = |\text{des-excitat}\rangle$$

$$|\Psi_3\rangle = |\text{excitat}\rangle + |\text{des-excitat}\rangle$$

💣 Posem un detector, que si veu el fotó emès per l'àtom en decaure, allibera un verí

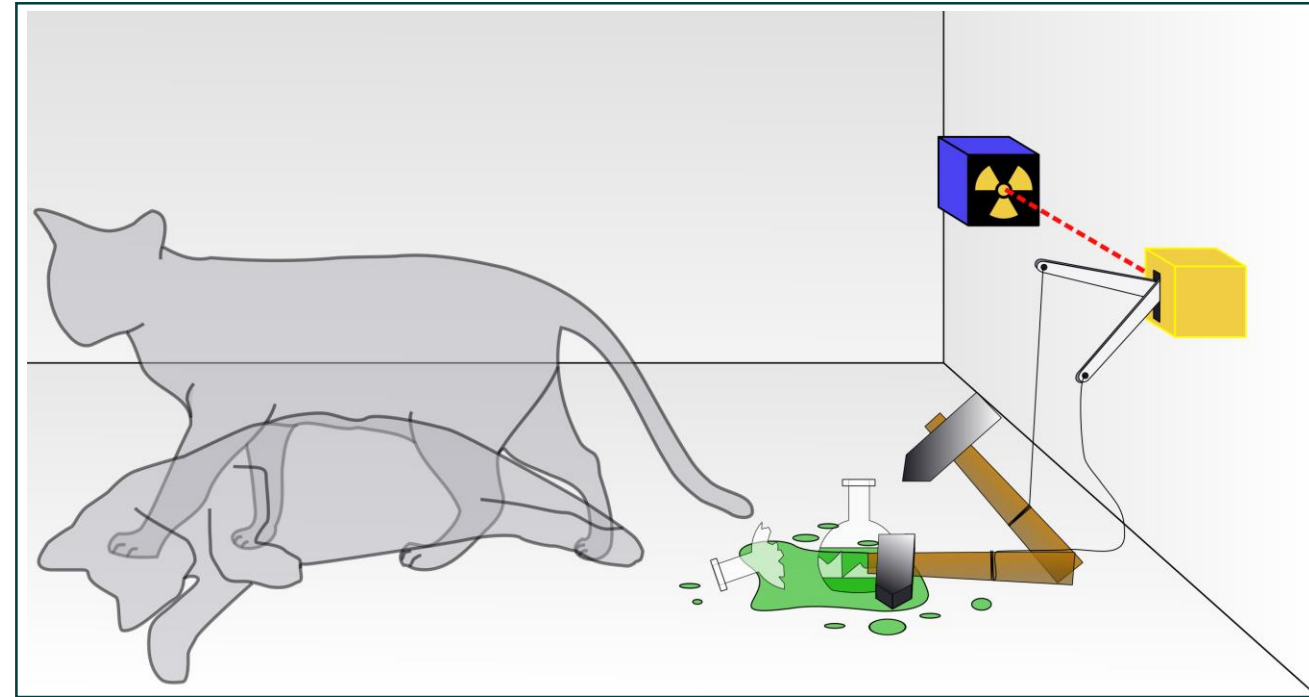
🐱 I posem un gat en la mateixa capsa. **En quin estat està el gat?**



Superposició d'estats: El gat de Schrödinger

Algunes respostes:

- No pot ser veritat 🙈
- La mecànica quàntica no pot ser correcta o **és incompleta** ☐
- El gat viu i el gat mort estan en «**universos paral·lels**» 🤪🌀
- La mecànica quàntica no abarca coses tan grans com un gat o un flascó amb verí. No té sentit pensar en «**l'estat quàntic del gat**» ☐
- Aquest experiment mental exposa les **limitacions de la nostra manera d'expressar amb paraules** i equacions
–en resum, d'entendre– el comportament quàntic del món ☐



Superposició d'estats

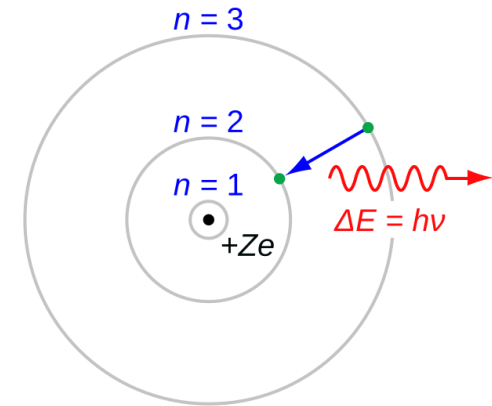
Superposició en mecànica quàntica

- Si un electró o àtom pot estar en principi en dos estats diferents, també pot estar en una superposició lineal dels mateixos:

$$|\Psi_1\rangle = |1S\rangle$$

$$|\Psi_2\rangle = |1P\rangle$$

$$|\Psi_3\rangle = |1S\rangle + |1P\rangle$$



□ Spòiler: Aplicació a sensòrica quàntica

Superposició i mesures de precisió

- Imaginem que els dos possibles estats de l'àtom tenen una propietat diferent. Per exemple, tenen un moment magnètic diferent.
- Si posem l'àtom en superposició, serà un sensor excel·lent de camps magnètics per l'efecte Zeeman:

radiofreqüència



Àtom de Rb-87

U. Nottingham



$$\Delta E = g_F \mu_B B \Delta m_F$$

$$|^{87}\text{Rb} : 5^2S_{1/2}, F = 1, m_F = 1\rangle \leftrightarrow |^{87}\text{Rb} : 5^2S_{1/2}, F = 1, m_F = 0\rangle$$

Si $B=1$ Gauss, $\Delta E=h(-0.7 \text{ MHz})$

L'experiment de la doble escletxa

Dualitat ona-partícula i interferència quàntica

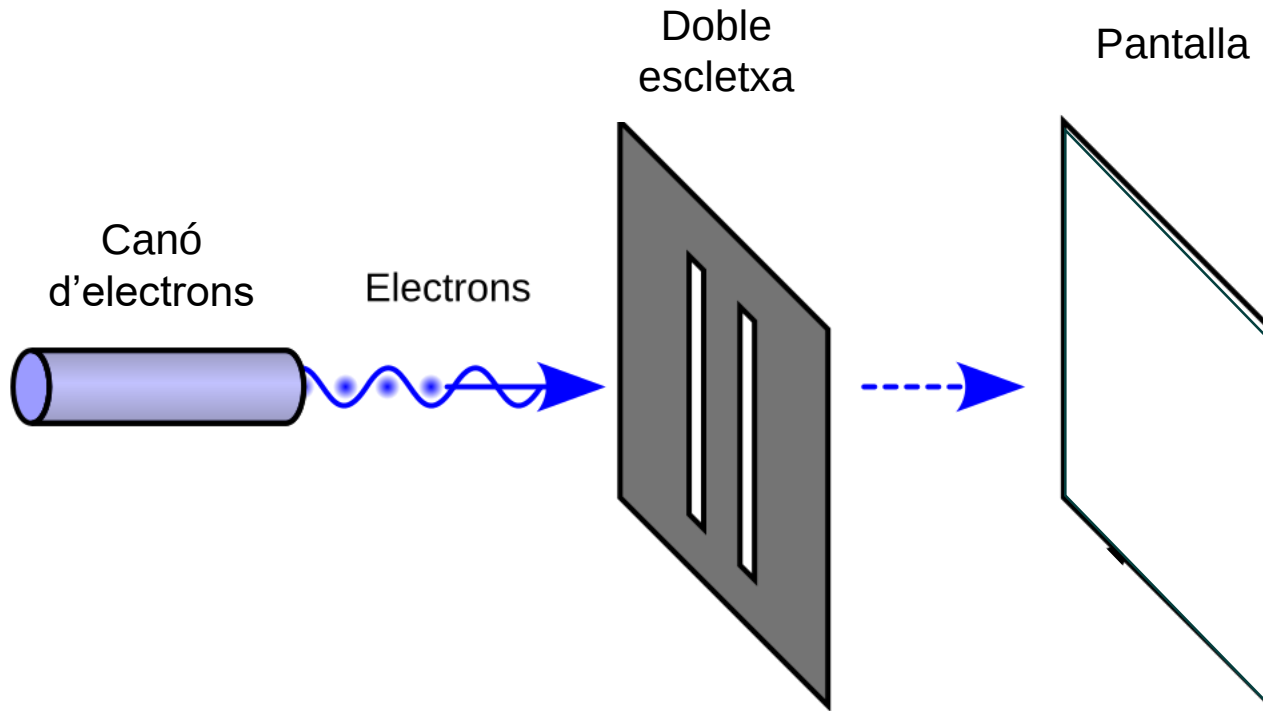
”un fenomen que és impossible [...] d'explicar clàssicament, i que conté el cor de la mecànica quàntica. De fet, conté l'únic misteri [de la mecànica quàntica].”

Richard P. Feynman

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 3 (1965)

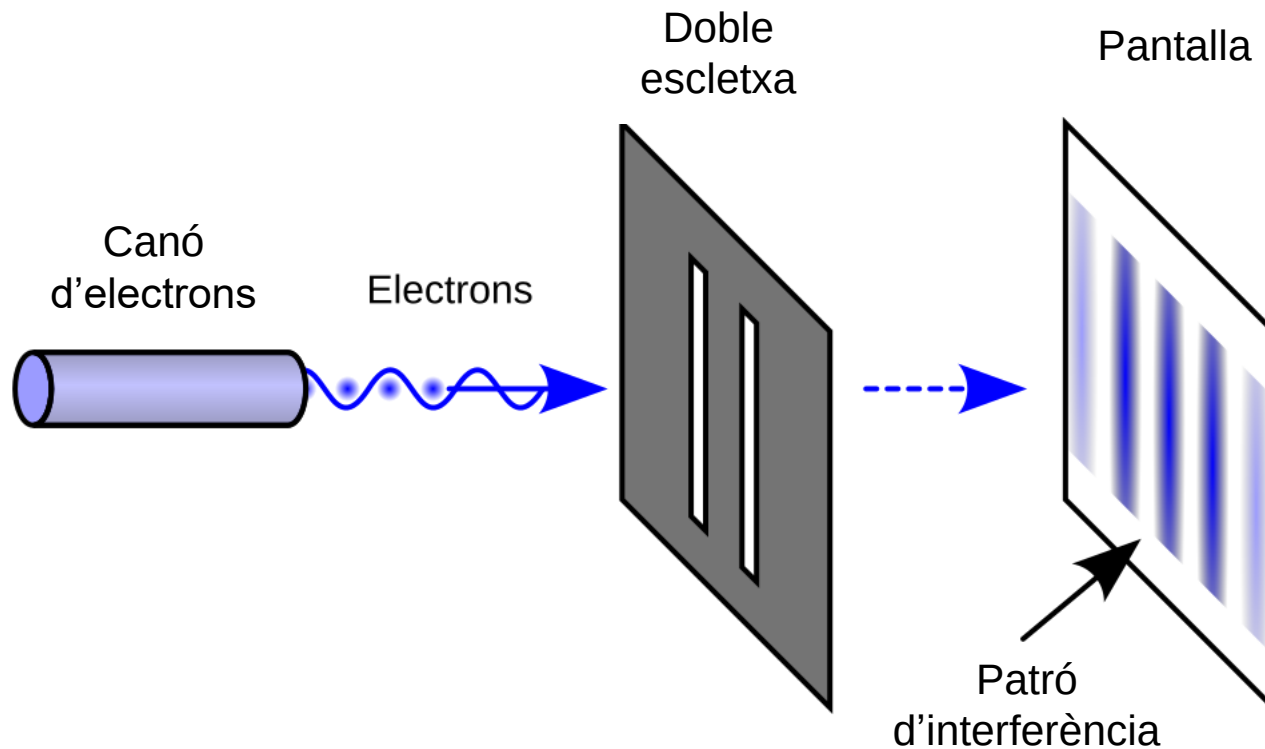
L'experiment de la doble escletxa

Dualitat ona-partícula i interferència quàntica

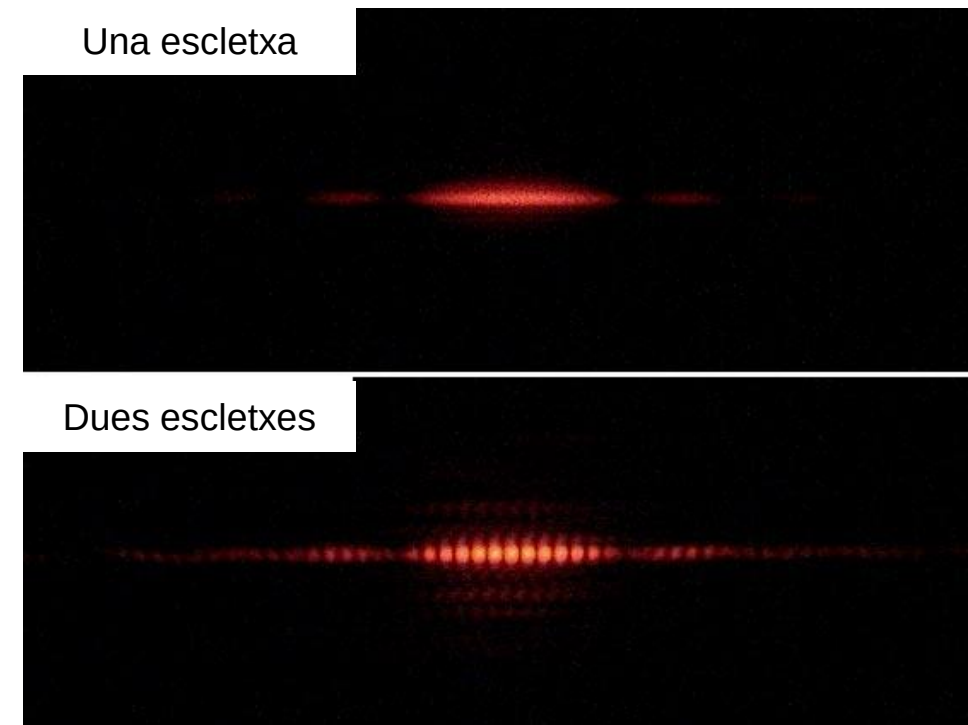


L'experiment de la doble escletxa

Dualitat ona-partícula i interferència quàntica



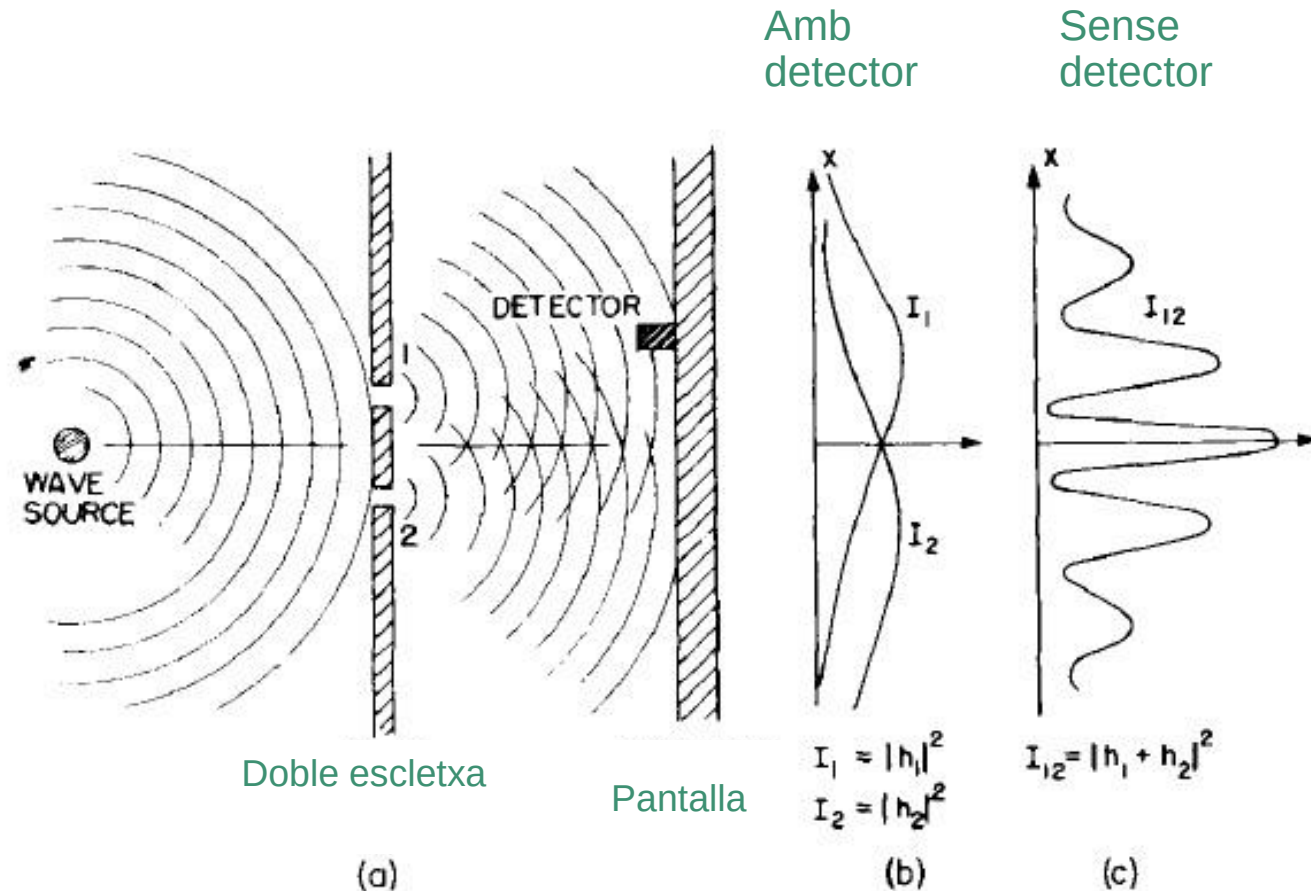
Wikimedia: NekoJaNekoJa



Wikimedia: Jordgette



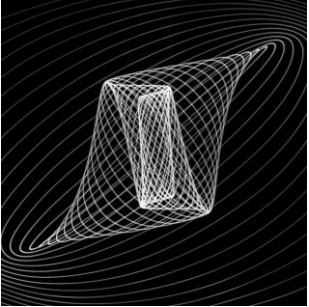
L'experiment de la doble escletxa – amb un detector



Observacions i conclusions:

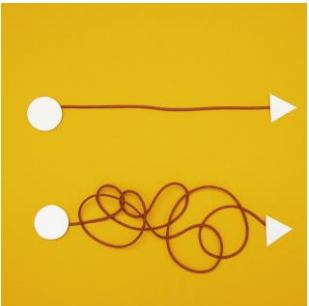
- Veiem patró d'interferència → **electrons es comporten com a ones (de Broglie, Schrödinger)**
- La interferència està present fins i tot si només hi ha 1 electró en l'aparell → no és degut a interaccions. És un fenomen purament quàntic.
- Si observem “per quin camí” ha passat l'electró, la interferència desapareix: l'electró passa a comportar-se com una partícula ‘clàssica’ → evidència de **dualitat ona-partícula en electrons**
 - També es pot interpretar com efecte de la mesura sobre l'electró (princ. d'incertesa)
- Hi ha moltes variants:
 - Elecció retardada (Wheeler)
 - Amb molècules com C_{60} (1999), 810 àtoms (2013), i **2000 àtoms (2019)**

La superposició i el seu significat conceptual



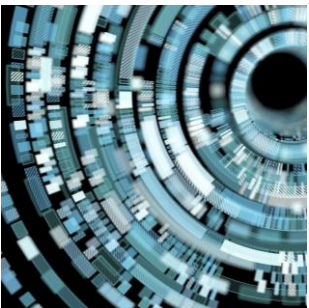
Estats múltiples quàntics

La superposició permet que els sistemes quàntics existeixin simultàniament en múltiples estats abans de la mesura.



Desafiament a la intuïció clàssica

La superposició desafia la física clàssica permetent que les partícules estiguin en diversos estats alhora.



Fonaments de la computació quàntica

La superposició és fonamental per a la computació quàntica i els processos d'informació quàntica.

Superposició d'estats: Una realitat amb aplicacions

Tot això serveix per a res?

- Relotges atòmics
- GPS
- Ressonància magnètica
- Làsers
- Metrologia quàntica, sensòrica quàntica
- Espintrònica (electrònica d'espí)

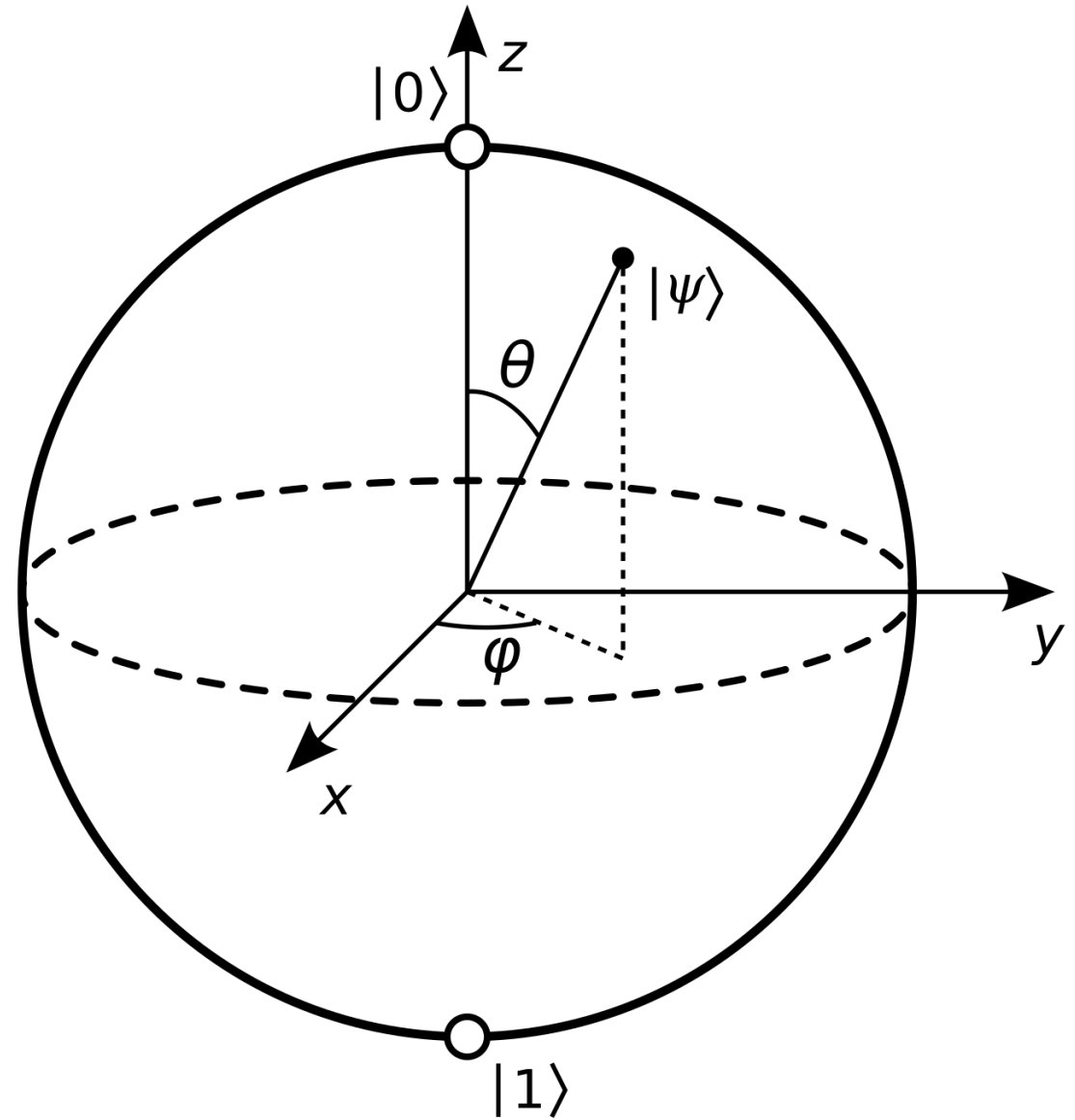


Aparell RMN a hospital Narayana, Jaipur
(Wikipedia: GeorgeWilliams21)

Superposició d'estats: Una realitat amb aplicacions

Tot això serveix per a res?

- Relotges atòmics
- GPS
- Ressonància magnètica
- Làsers
- Metrologia quàntica, sensòrica quàntica
- Espintrònica (electrònica d'espí)
- *Spòiler: Computació quàntica*

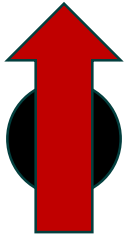


Qubit (esfera de Bloch)
(Wikimedia: Smite-Meister)



Entrellaçament i la paradoxa EPR

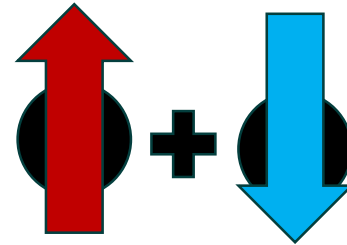
Superposició i entrellaçament



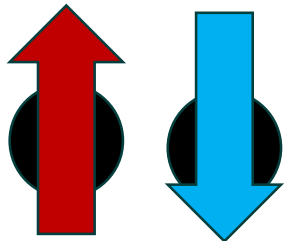
Electró
amb espí
'amunt'



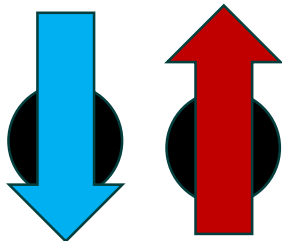
Electró
amb espí
'avall'



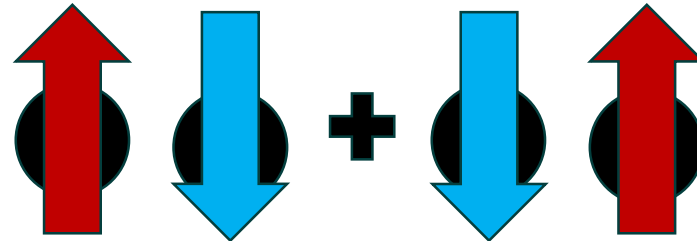
Electró en estat
superposició
 $|amunt\rangle + |avall\rangle$



Dos electrons
en l'estat
 $|amunt, avall\rangle$

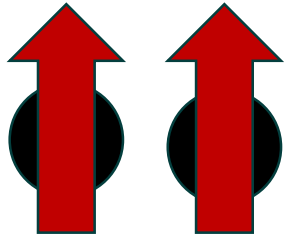


Dos electrons
en l'estat
 $|avall, amunt\rangle$

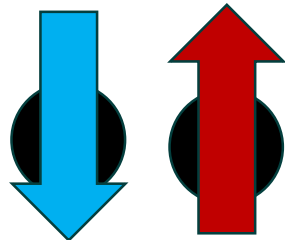


Dos electrons en estat
superposició
 $|amunt, avall\rangle + |avall, amunt\rangle$

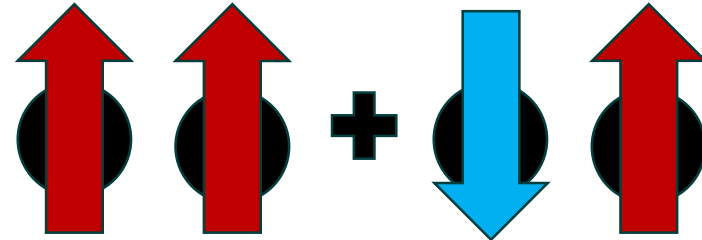
Superposició i entrellaçament



Dos electrons en l'estat $|\text{amunt}, \text{amunt}\rangle$

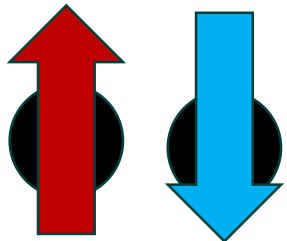


Dos electrons en l'estat $|\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

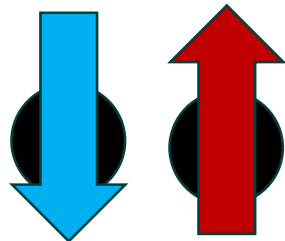


Dos electrons en estat superposició $|\text{amunt}, \text{amunt}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

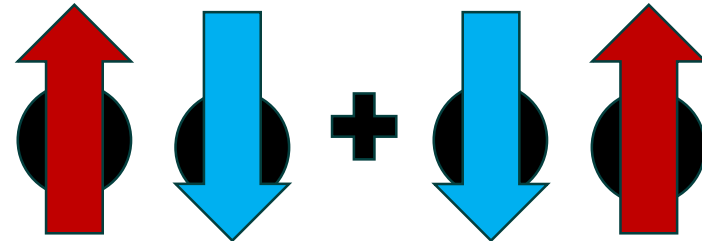
Estat «separable»



Dos electrons en l'estat $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle$



Dos electrons en l'estat $|\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

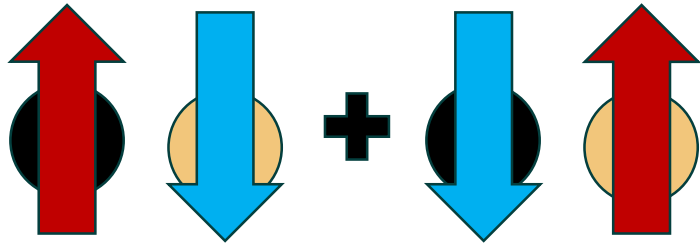


Dos electrons en estat superposició $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

Estat «entrellaçat»

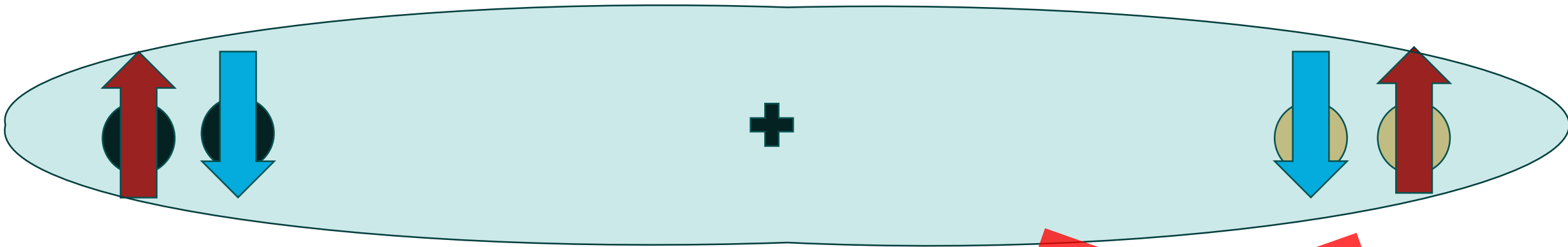


Entrellaçament i la paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR): podem enviar informació més ràpid que la llum?



Dos electrons en estat superposició
 $|amunt, avall\rangle + |avall, amunt\rangle$

- Si veiem el **primer electró** en estat $|amunt\rangle$, sabem que **el segon** està $|avall\rangle$
- Si veiem el **primer electró** en estat $|avall\rangle$, sabem que **el segon** està $|amunt\rangle$

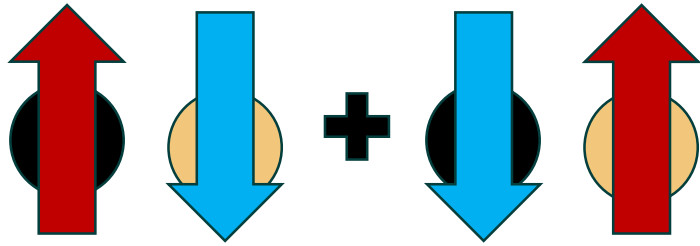


Dos electrons en estat superposició
 $|amunt, avall\rangle + |avall, amunt\rangle$

$\neq$

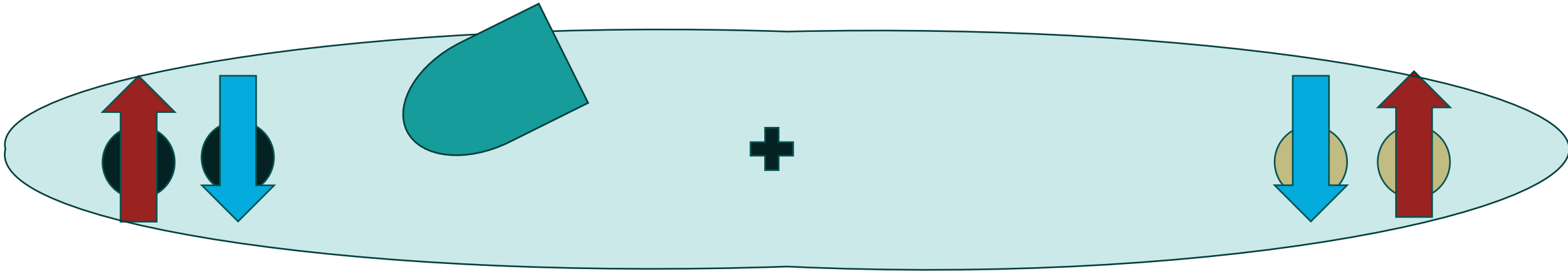
~~Dos electrons en els estats
 $|amunt\rangle + |avall\rangle$ i $|avall\rangle + |amunt\rangle$~~

Entrellaçament i la paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR): podem enviar informació més ràpid que la llum?



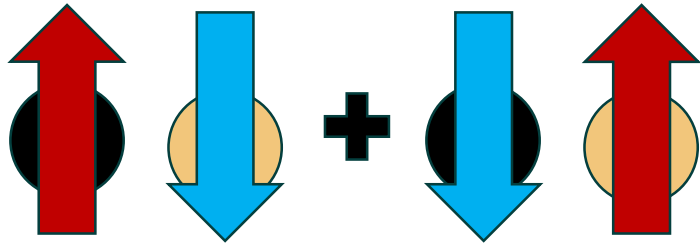
Dos electrons en estat superposició
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

- Si veiem el *primer electró* en estat $|\text{amunt}\rangle$, sabem que *el segon* està $|\text{avall}\rangle$
- Si veiem el *primer electró* en estat $|\text{avall}\rangle$, sabem que *el segon* està $|\text{amunt}\rangle$



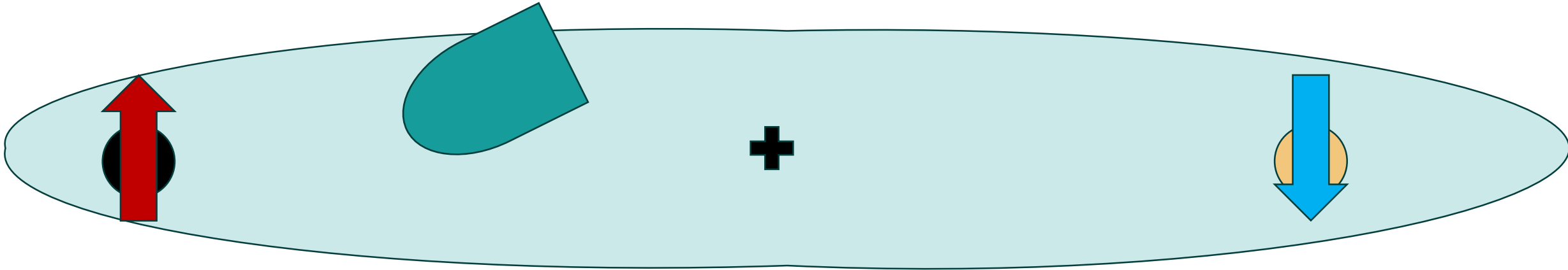
Dos electrons en estat superposició
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

Entrellaçament i la paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR): podem enviar informació més ràpid que la llum?



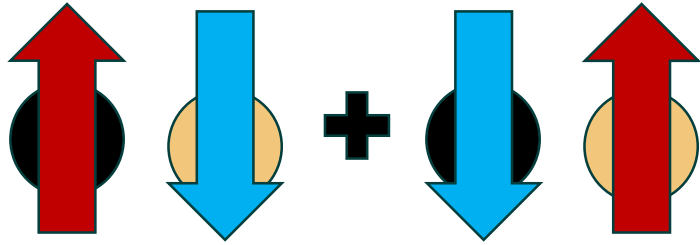
Dos electrons en estat superposició
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

- Si veiem el *primer electró* en estat $|\text{amunt}\rangle$, sabem que *el segon* està $|\text{avall}\rangle$
- Si veiem el *primer electró* en estat $|\text{avall}\rangle$, sabem que *el segon* està $|\text{amunt}\rangle$



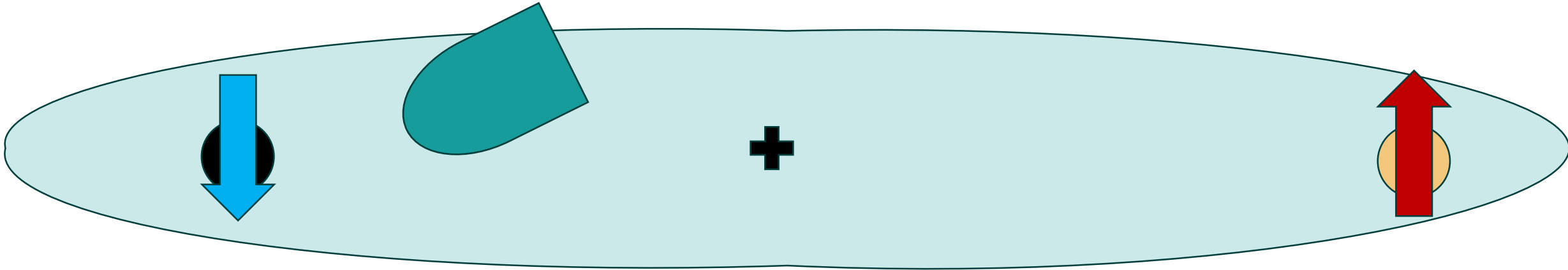
Dos electrons en estat superposició
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

Entrellaçament i la paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR): podem enviar informació més ràpid que la llum?



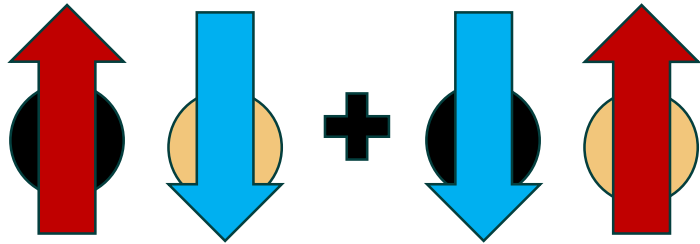
Dos electrons en estat superposició
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

- Si veiem el *primer electró* en estat $|\text{amunt}\rangle$, sabem que *el segon* està $|\text{avall}\rangle$
- Si veiem el *primer electró* en estat $|\text{avall}\rangle$, sabem que *el segon* està $|\text{amunt}\rangle$



Dos electrons en estat superposició
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

Entrellaçament i la paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)



Dos electrons en estat superposició
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

- Si veiem el **primer electró** en estat $|\text{amunt}\rangle$, sabem que **el segon** està $|\text{avall}\rangle$
- Si veiem el **primer electró** en estat $|\text{avall}\rangle$, sabem que **el segon** està $|\text{amunt}\rangle$

- Com s'ho fa un electró per “saber” l'estat de l'altre?
- Com s'ho fa un electró per “saber” el resultat de la mesura feta a l'altre? ***S'envien informació a velocitat superlumínica?***

Algunes respostes:

- La mecànica quàntica no pot ser correcta o **és incompleta**
 - Hi ha alguna altra informació «amagada» compartida pels electrons que cadascun porta amb si («variables locals ocultes»)
- El món que descriu la mecànica quàntica no és «local»
 - Quan parlem d'estats entrellaçats de més d'una partícula, no té sentit pensar en l'estat d'una partícula
 - Desigualtats de Bell

Entrellaçament: una realitat amb aplicacions

Tot això serveix per a res?

- Desigualtats de Bell
- Computació quàntica
- Comunicacions quàntiques
- Metrologia quàntica



IBM System One