



# INTERNATIONAL YEAR OF Quantum Science and Technology

**Any Internacional de la Ciència i la Tecnologia Quàntiques:  
Dels inicis a la Segona Revolució Quàntica – Lliçó 1**

Dr. Jordi Mur-Petit

*57a UCE, Prada, 20-22 agost*

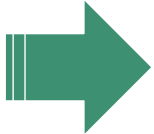


<https://www.linkedin.com/in/jordimur>



<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.

# Per saber-ne més

## Uns punters cap a fonts més detallades

- Proclamació de l'IYQST per la UNESCO: <https://www.unesco.org/en/years/quantum-science-technology> (en anglès)
- Web oficial de l'Any Internacional: <https://quantum2025.org/>
- J. Mur Petit, «[2025: Any Internacional de la Ciència i la Tecnologia Quàntiques](#)», blog *divulcat.cat* (2 feb. 2025)
- J. Mur Petit, «[Cent anys de la mecànica quàntica](#)», *Revista Mètode* 125, 14-21 (2025)
- Editorial «[Quantum mechanics at 100: an unfinished revolution](#)», *Nature* 637, 251-252 (2025) (en anglès)
- Robert P. Crease: «[Return to Helgoland: celebrating 100 years of quantum mechanics](#)», *Physics World* (1 des. 2024) (en anglès)
- Podcast BBC "In Our Time": "[Heisenberg's Uncertainty Principle](#)" (29 feb 2024) (en anglès)
- Carlos M. Madrid-Casado: «A brief history of the mathematical equivalence between the two quantum mechanics», *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 2, 152-155 (2008). Disponible en PDF a [dialnet](#) (U. Rioja) (en anglès)
- L. de Broglie (1924), *Matière et lumière* (1937) (en francès) és un excel·lent recull dels desenvolupaments històrics amb una perspectiva anterior a l'esclat de la Segona Guerra Mundial. N'hi ha traducció en castellà, *Materia y luz* (Espasa-Calpe, 1939 , descatalogat). Vegeu també Juan Arnau, "[Louis de Broglie, materia y luz](#)", *Babelia (El País)*, 24 de setembre de 2021).
- W. Heisenberg: «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik* 33, 879–893 (1925). <https://doi.org/10.1007/BF01328377> (en alemany)
- J. Mur Petit, «[2024: A quantum leap year for Cybersecurity](#)», blog *Technology Quanta* (6 feb. 2024) (en anglès)



## Parlem de vosaltres

- Què us ha portat a apuntar-vos a un curs de quàntica a mig agost?

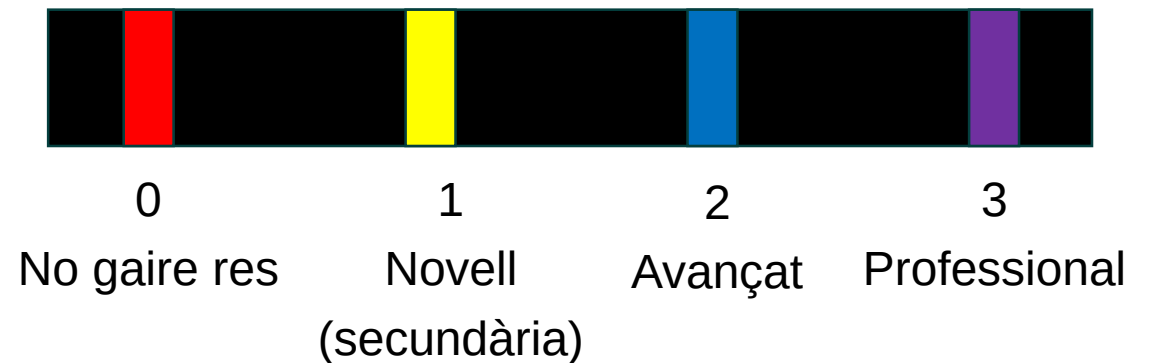






## Parlem de vosaltres

- Com considereu que és el vostre coneixement de la ciència quàntica?





# Parlem de vosaltres

- Què espereu d'aquest curs?

# 2025: l'Any Internacional de la Quàntica

## Una perspectiva històrica (per part d'un científic)

- J. Mur Petit, «[2025: Any Internacional de la Ciència i la Tecnologia Quàntiques](#)», *Divulcat* (2025)
- J. Mur Petit, «[Cent anys de la mecànica quàntica](#)», *Mètode* 125, 14-21 (2025)

# Per què un Any Internacional de la Ciència i la Tecnologia Quàntiques?

## Fites de la ciència quàntica

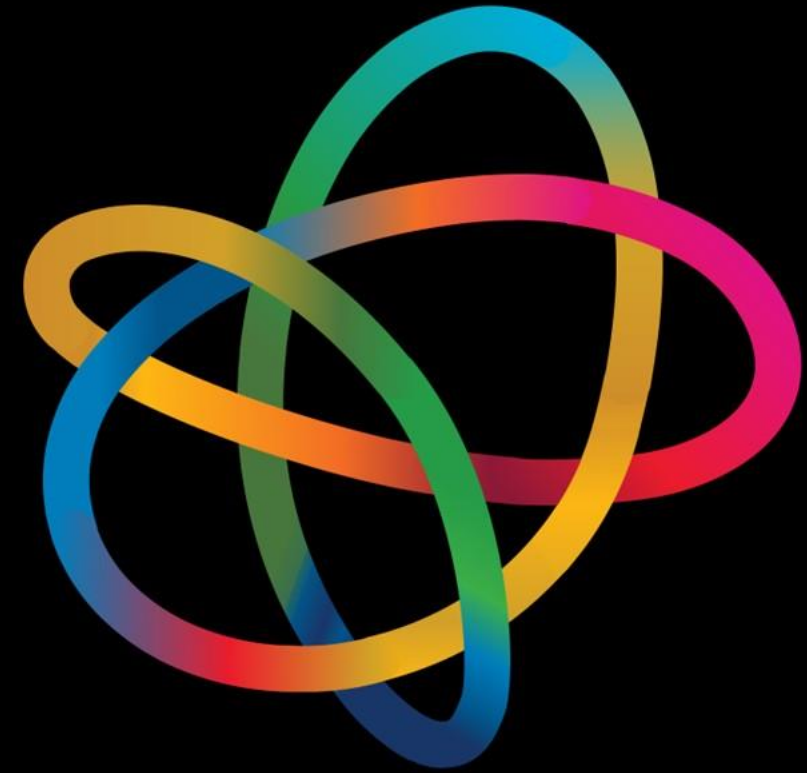
El 2025 celebrem aniversaris importants que marquen avenços en la teoria quàntica i els avenços tecnològics.

## Impacte en la ciència i la tecnologia

La ciència quàntica impulsa innovacions que transformen la informàtica, la comunicació i la ciència dels materials.

## Consciència i col·laboració global

L'any promou la cooperació mundial en recerca per accelerar el progrés de la ciència quàntica i els seus beneficis socials.



**INTERNATIONAL YEAR OF  
Quantum Science  
and Technology**





«La mecànica quàntica ens ha donat gairebé tot el que considerem tecnologia moderna... Gairebé tothom a la Terra viu una vida enriquida per la tecnologia quàntica»

**William D. Phillips**

**Premi Nobel de Física 1997**



**1900**

## **Max Planck i el naixement de la «teoria quàntica»**

### **La radiació de cos negre i la «catàstrofe ultraviolada»**

La teoria clàssica de com els cossos emeten llum preveu una densitat creixent d'energia emesa a longituds d'ona curtes (llum ultraviolada), en contra de les observacions

### **Una «idea desesperada» quantificar l'energia**

Planck introduí la idea que l'energia de la llum està quantificada, derivant una nova llei per a l'emissió de llum dels cossos negres.



Max Planck l'any 1901

# 1900

## Max Planck i el naixement de la «teoria quàntica»

### La radiació de cos negre i la «catàstrofe ultraviolada»

La teoria clàssica de com els cossos emeten llum preveu una densitat creixent d'energia emesa a longituds d'ona curtes (llum ultraviolada), en contra de les observacions

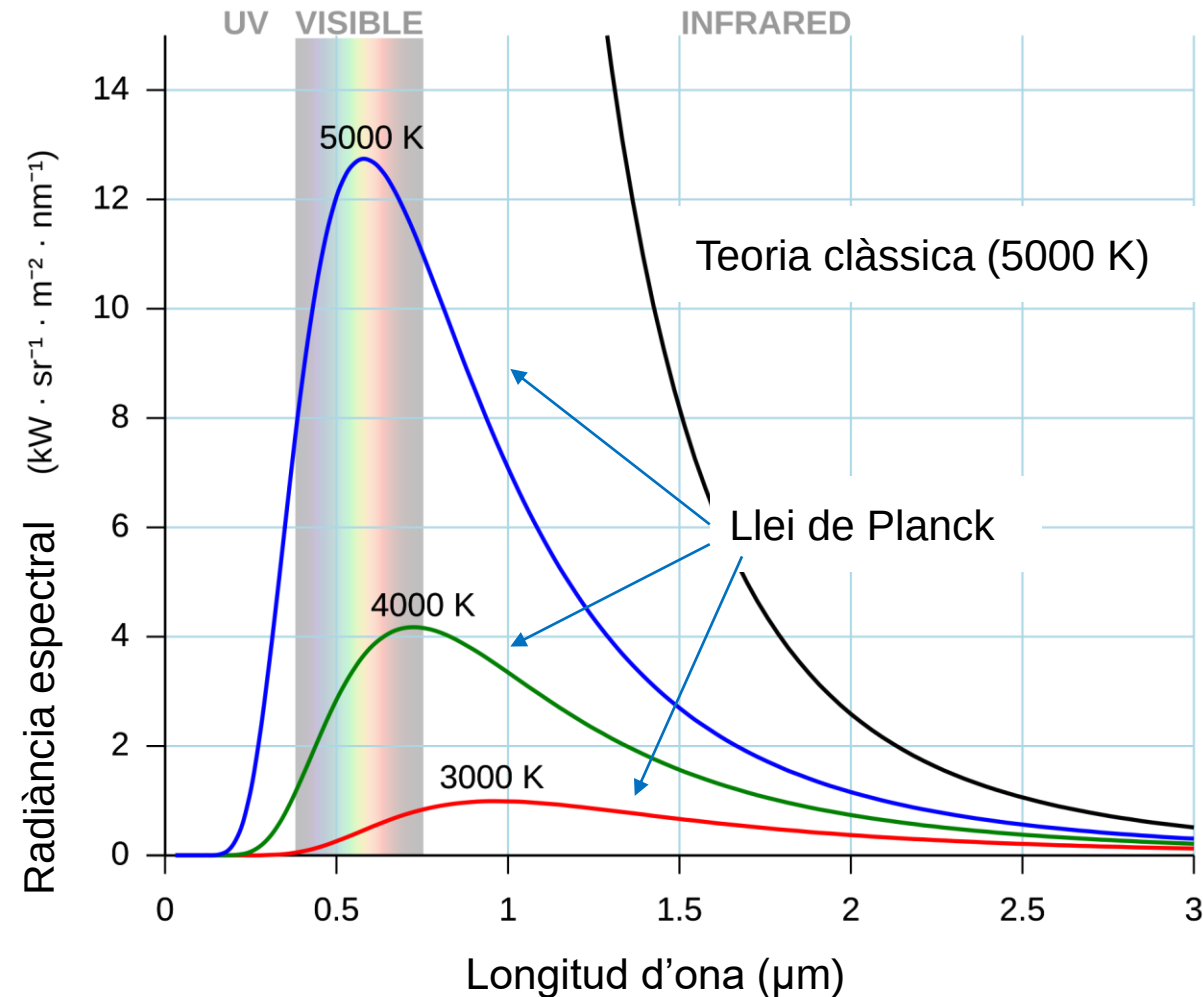
### Una «idea desesperada» quantificar l'energia

Planck introduí la idea que l'energia de la llum està quantificada, derivant una nova llei per a l'emissió de llum dels cossos negres.

Matemàticament, el punt clau va ser introduir una constant 'h' (constant de Planck) per enllaçar la freqüència (f) de la llum amb la seva energia (E):

$$E = h \cdot f \quad h: \text{“constant de Planck”}$$

*Però no hi havia una teoria fonamental de perquè això havia de ser així!*

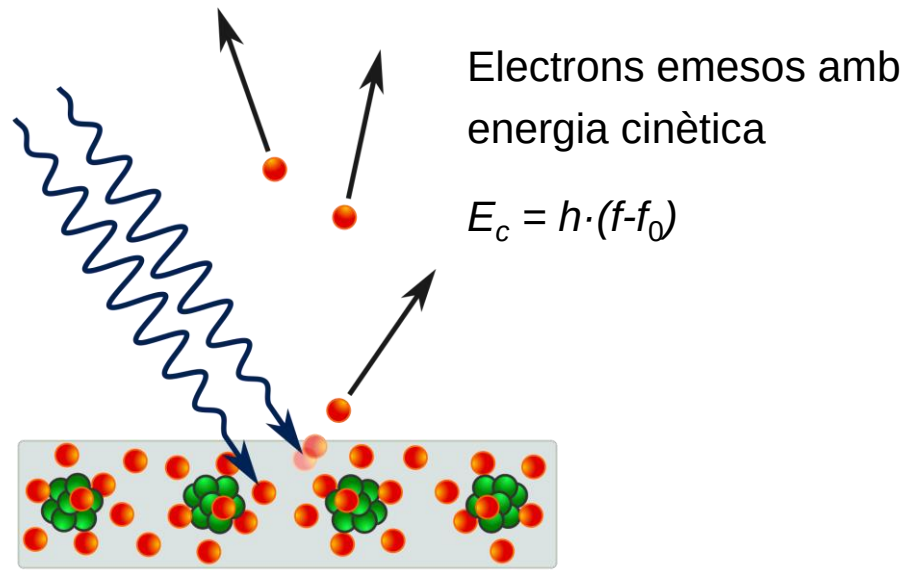


# 1905-1909

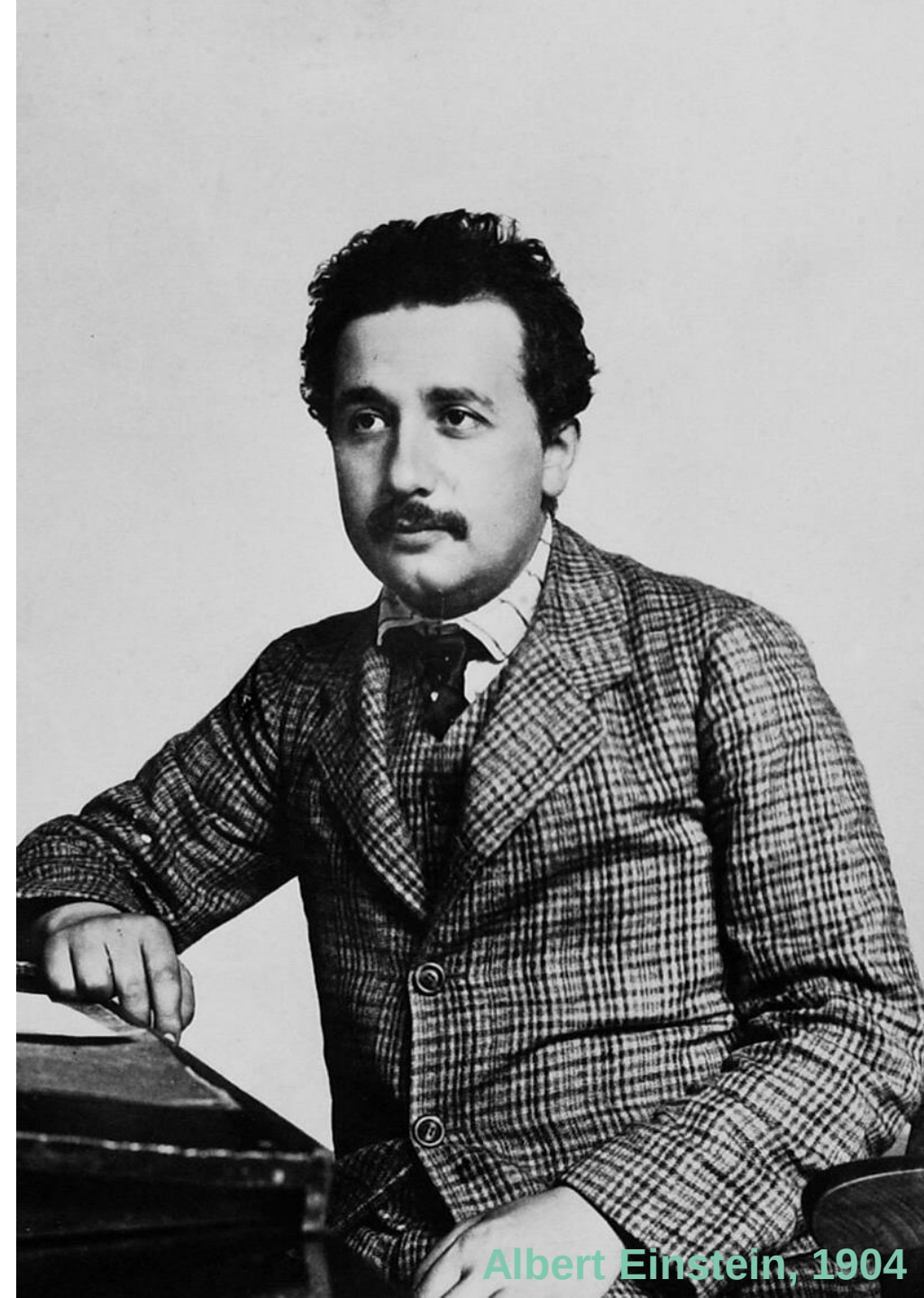
## Einstein i el naixement dels fotons

### 1905 – Explicació de l'efecte fotoelèctric

Einstein va aplicar la fórmula de Planck,  $E=h \cdot f$ , en un context totalment diferent: l'efecte fotoelèctric, o explicar com la llum pot fer saltar electrons d'un material.



Efecte fotoelèctric en un sòlid (Wikipedia: Ponor)



Albert Einstein, 1904



# 1905-1909

## Einstein i el naixement dels fotons

### 1905 – Explicació de l'efecte fotoelèctric

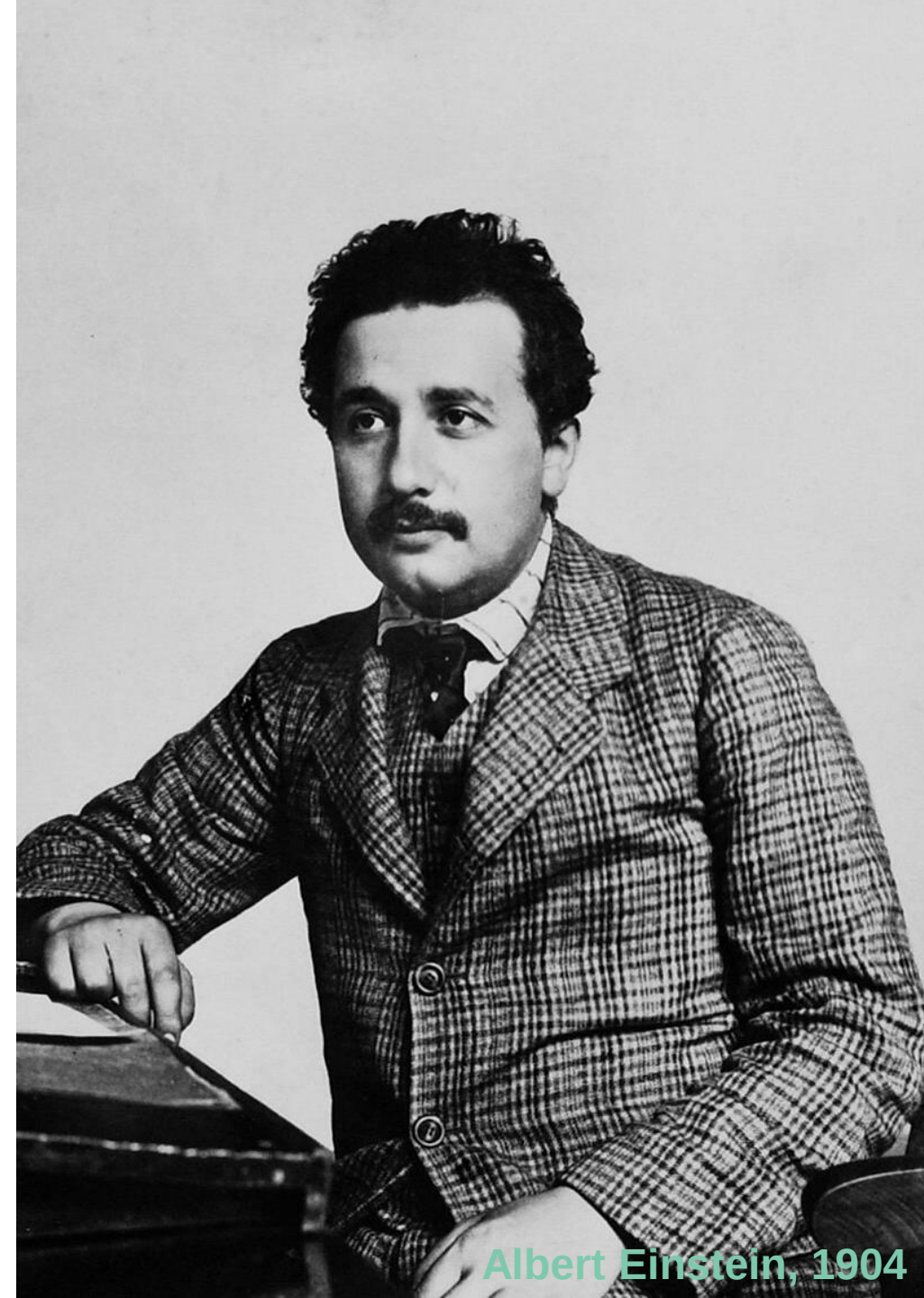
Einstein va aplicar la fórmula de Planck,  $E=h \cdot f$ , en un context totalment diferent: l'efecte fotoelèctric, o explicar com la llum pot fer saltar electrons d'un material.

### 1909 – Neix el *fotó*, la partícula de llum

Combinant la seva teoria de la relativitat especial amb la Llei de Planck, conclou que els «quanta de llum» (fotons) han de tenir moment lineal  $p = h \cdot c / f$ .

*Ha nascut el fotó, el quàntum o partícula de llum!*

*Einstein rebria el Premi Nobel per la seva innovadora explicació de l'efecte fotoelèctric l'any 1921.*

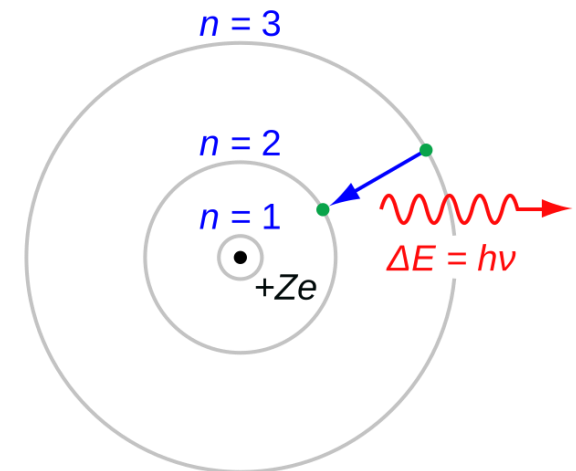


Albert Einstein, 1904





Niels Bohr, 1922

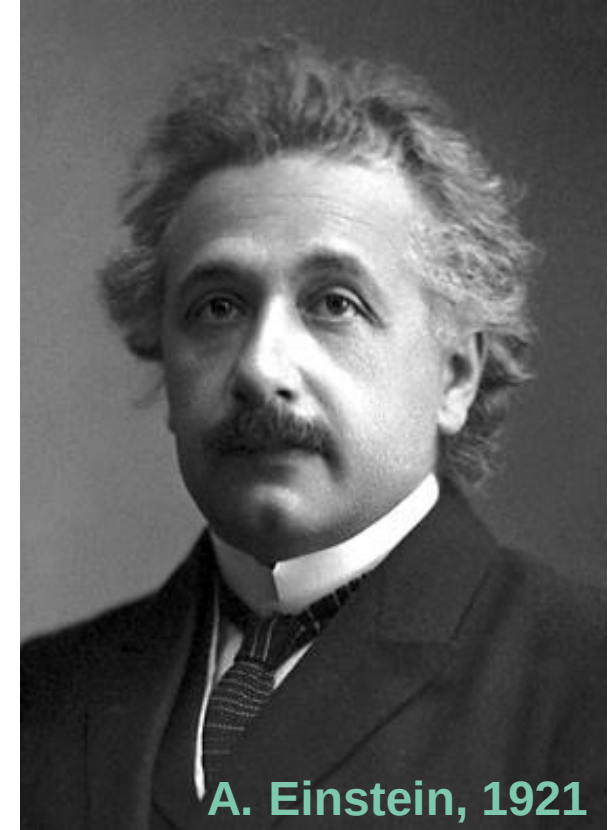


Model de l'àtom de Bohr  
(Wikipedia: JabberWok)

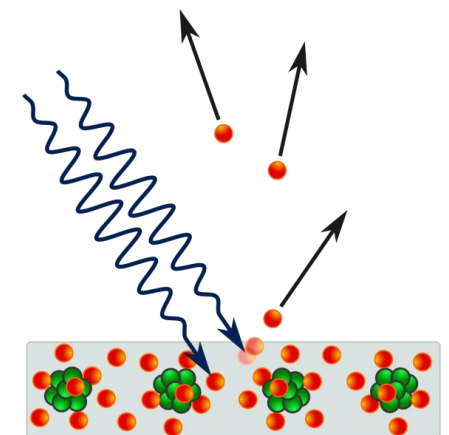
# 1900-1925 'Teoria quàntica antiga'

## Dues escoles

| Copenhagen (Bohr)                                                                                                   |                                | Einstein                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Nivell d'energia quantitzats</li> <li>Principi de correspondència</li> </ul> | <b>Conceptes clau</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dualitat ona-partícula</li> <li>El fotó com a partícula</li> </ul> |
| Observacions espectroscòpiques                                                                                      | <b>Dóna gran importància a</b> | Conservació de l'energia i moment                                                                         |
| Model de Bohr                                                                                                       | <b>Contribucions</b>           | Efectes fotoelèctric i Compton                                                                            |



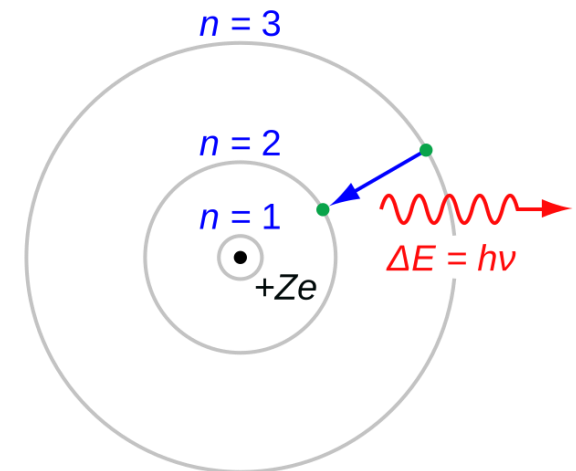
A. Einstein, 1921



Efecte fotoelèctric  
(Wikipedia: Ponor)



Niels Bohr, 1922

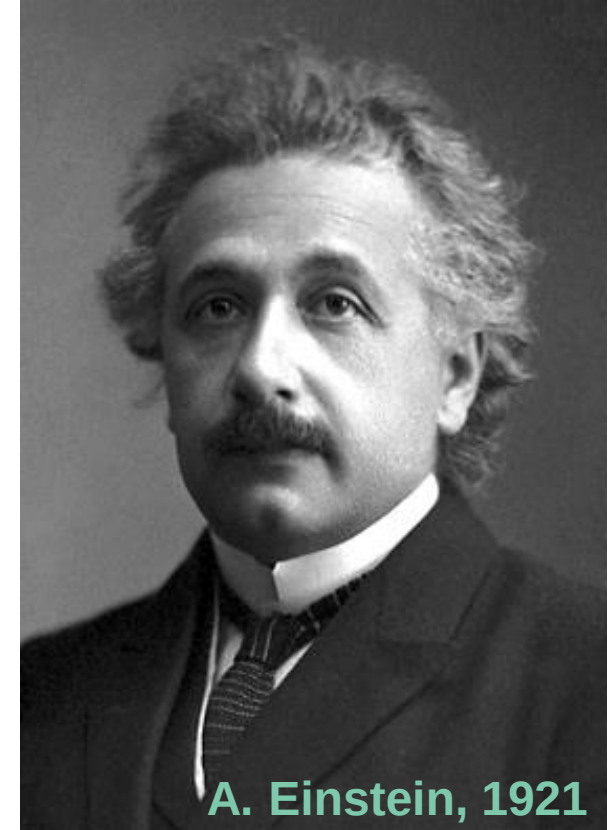


Model de l'àtom de Bohr  
(Wikipedia: JabberWok)

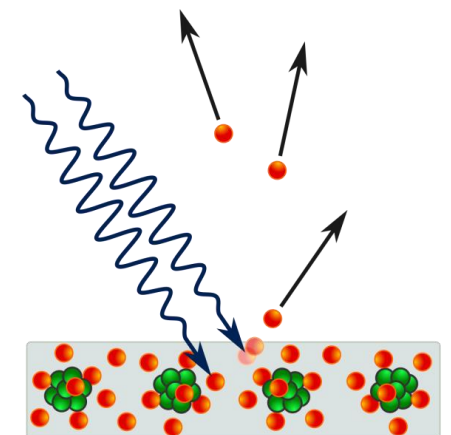
# 1900-1925 'Teoria quàntica antiga'

## Dues escoles

| Copenhagen (Bohr)                                                                                                   |                                | Einstein                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Nivell d'energia quantitzats</li> <li>Principi de correspondència</li> </ul> | <b>Conceptes clau</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dualitat ona-partícula</li> <li>El fotó com a partícula</li> </ul> |
| Observacions espectroscòpiques                                                                                      | <b>Dóna gran importància a</b> | Conservació de l'energia i moment                                                                         |
| Model de Bohr                                                                                                       | <b>Contribucions</b>           | Efectes fotoelèctric i Compton                                                                            |
| Fórmula de <b>Kramers-Heisenberg</b> (1924) per a transicions entre estats                                          | <b>Punt culminant</b>          | Hipòtesi de <b>Louis de Broglie</b> (1924): tota matèria té propietats ondulatòries, $\lambda = h/p$      |



A. Einstein, 1921



Efecte fotoelèctric  
(Wikipedia: Ponor)

# 1924

## La tesi de Louis de Broglie:

De Broglie va proposar que les partícules com els electrons presenten propietats ondulatòries conegudes com a **«ones de matèria»**:

- Una partícula amb moment lineal  $p$  té associada una ona de longitud d'ona  $\lambda = h/p$
- Una ona (com la llum) amb longitud d'ona  $\lambda$  té associades unes partícules (els fotons) amb moment lineal  $p = h/\lambda$ .
- Pot explicar les òrbites del model de Bohr imposant una condició de quantització.
- **Introdueix la idea de «dualitat ona-partícula»**: ones i partícules “clàssiques” presenten propietats tant ondulatòries com corpusculars en la Teoria quàntica, segons com sigui l'experiment/observació.

□ ***Spòiler: Aquestes idees son a la base de la formulació de la “mecànica d'ones” de Schrödinger de 1925...***



Louis de Broglie, 1929





Hans Kramers, 1928

## Fórmula de Kramers-Heisenberg per a transicions entre estats (1924)

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega_{k'} d(\hbar\omega'_{k'})} = \frac{\omega'_k}{\omega_k} \sum_{|f\rangle} \left| \sum_{|n\rangle} \frac{\langle f | T_2 | n \rangle \langle n | T_1 | i \rangle}{E_i - E_n + \hbar\omega_k + i \frac{\Gamma_n}{2}} \right|^2 \delta(E_i - E_f + \hbar\omega_k - \hbar\omega'_k)$$

Dona la probabilitat de l'emissió de fotons d'energia  $\hbar\omega_k$  en l'angle sòlid  $d\Omega_{k'}$  (centrat en la direcció  $k'$ ), després de l'excitació del sistema amb fotons d'energia  $\hbar\omega_k$ :

**Observem el focus en:**

- **Nivells i energies quantitzats:**  $|i\rangle$ ,  $|n\rangle$ ,  $|f\rangle$ ,  $E_i$ ,  $E_n$ ,  $E_f$
- **Observacions espectroscòpiques:** “quants fotons veiem en quina direcció amb quina energia?”

□ **Spòiler:** Aquestes idees son a la base de la formulació de la “mecànica de matrius” de Heisenberg de 1925...

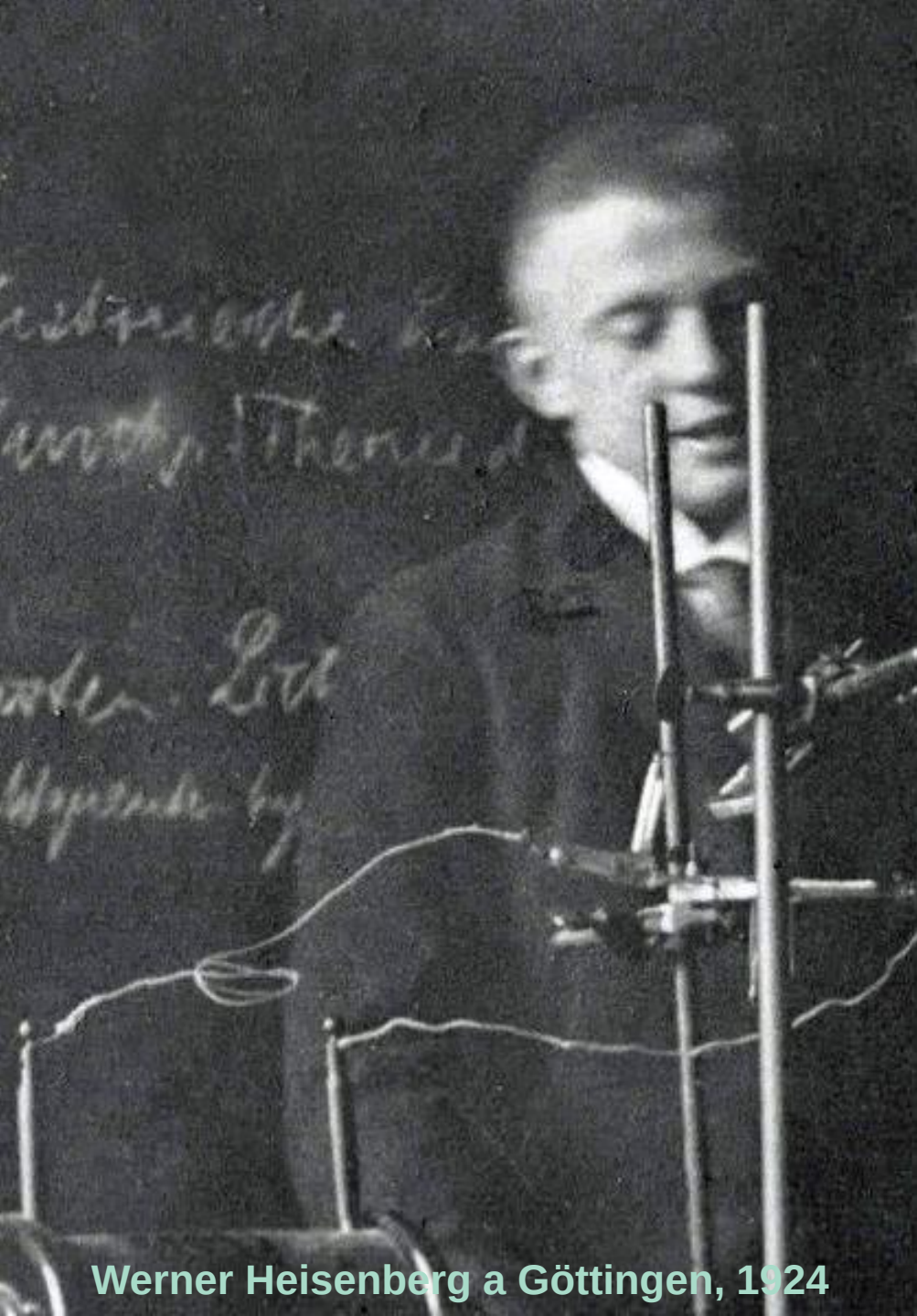




1925 🎂



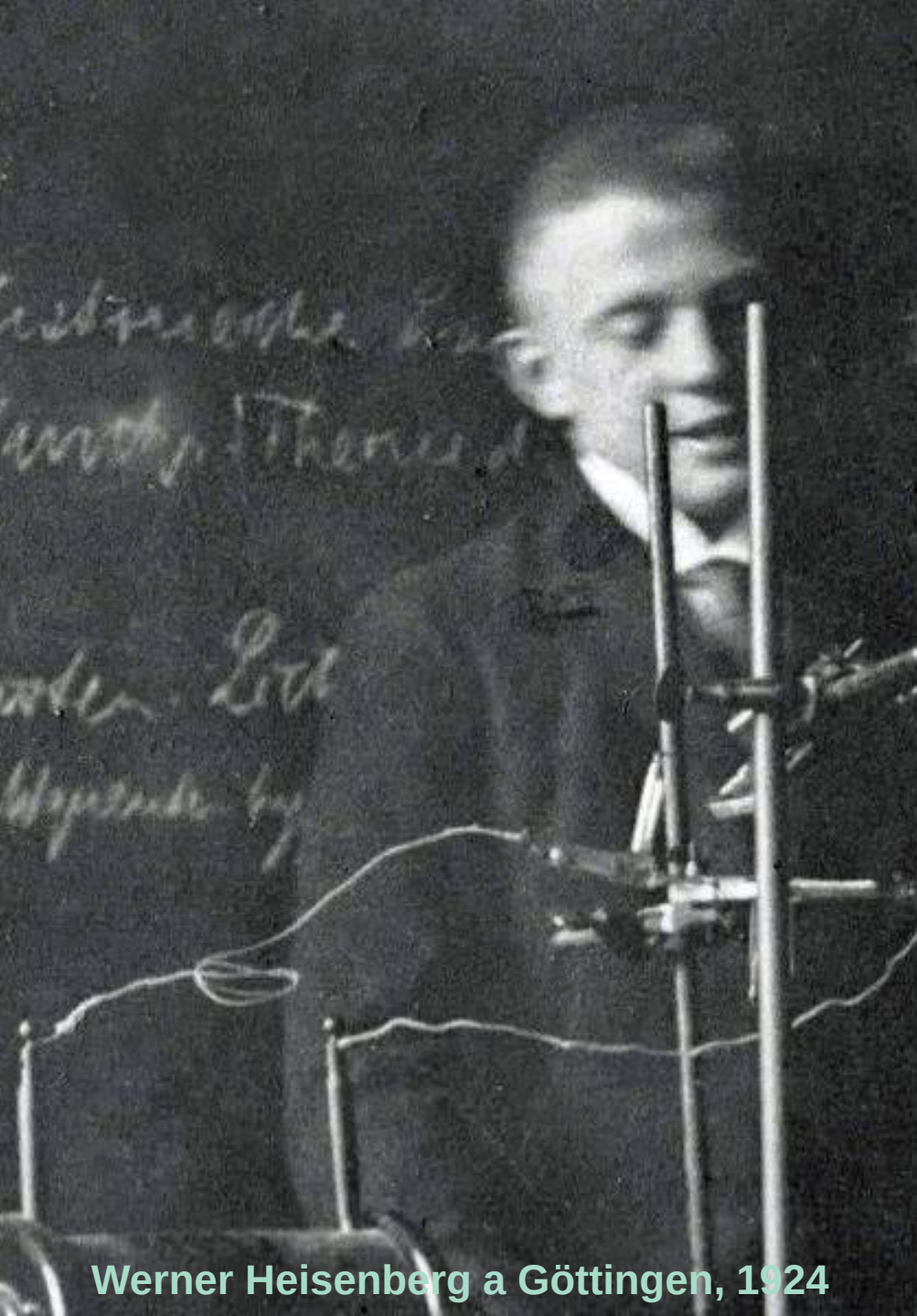




## Werner Heisenberg

- ***Doctorat a Munich amb Sommerfeld (1923)***, havent estudiat física amb Wilhelm Wien, Max Born i James Franck, i matemàtiques amb David Hilbert
- Reb l'Habilitació a Göttingen el 1924 amb un treball sobre l'efecte Zeeman dirigit per Born. Treballa com a Privatdozent a Göttingen de 1924 a 1927.
- Obté una beca de la Fundació Rockefeller per treballar amb Bohr a Copenhagen entre setembre 1924 i maig 1925

Werner Heisenberg a Göttingen, 1924



Werner Heisenberg a Göttingen, 1924

## Werner Heisenberg

- ***Doctorat a Munich amb Sommerfeld (1923)***, havent estudiat física amb Wilhelm Wien, Max Born i James Franck, i matemàtiques amb David Hilbert
- Reb l'Habilitació a Göttingen el 1924 amb un treball sobre l'efecte Zeeman dirigit per Born. Treballa com a Privatdozent a Göttingen de 1924 a 1927.
- Obté una beca de la Fundació Rockefeller per treballar amb Bohr a Copenhagen entre setembre 1924 i maig 1925
- *També pateix d'al·lèrgia al pol·len, i l'estiu de 1925 està sent horrible a Göttingen...  
Ni l'aspirina ni la cocaïna (!) alleugen els símptomes, i va a passar unes setmanes a respirar l'aire pur del mar del Nord... i treballar en la teoria quàntica*





# Heisenberg a Helgoland

Fa una «reinterpretació» (*Umdeutung*) de la teoria quàntica «*basada exclusivament en relacions entre [magnituds] observables*»

- ✓ Obvia tota referència a les òrbites de Bohr dels electrons
- ✓ Relaciona directament les freqüències i intensitats de la radiació emesa per un àtom als seus nivells d'energia
- Desenvolupa un **formalisme nou per al càlcul d'observables**, com ara posicions i velocitats dels electrons...
  - Els observables físics apareixien com a quantitats no commutatives (cosa ben estranya!)



**Über quantentheoretische Umdeutung  
kinematischer und mechanischer Beziehungen.**

Von W. Heisenberg in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

**Über quantentheoretische Umdeutung  
kinematischer und mechanischer Beziehungen.**

Von W. Heisenberg in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten. Diese Hoffnung könnte als berechtigt angesehen werden, wenn die genannten Regeln in sich konsequent und auf einen bestimmt umgrenzten Bereich quantentheoretischer Probleme anwendbar wären. Die Erfahrung zeigt aber, daß sich nur das Wasserstoffatom und der Starkeffekt dieses Atoms jenen formalen Regeln der Quantentheorie fügen, daß aber schon beim Problem der „gekreuzten Felder“ (Wasserstoffatom in elektrischem und magnetischem Feld verschiedener Richtung) fundamentale Schwierigkeiten auftreten, daß die Reaktion der Atome auf periodisch wechselnde Felder sicherlich nicht durch die genannten Regeln beschrieben werden kann, und daß schließlich eine Ausdehnung der Quantenregeln auf die Behandlung der Atome mit mehreren Elektronen sich als unmöglich erwiesen hat. Es ist üblich geworden, dieses Versagen der quantentheoretischen Regeln, die ja wesentlich durch die Anwendung der klassischen Mechanik charakterisiert waren, als Abweichung von der klassischen Mechanik zu bezeichnen. Diese Bezeichnung kann aber wohl kaum als sinngemäß angesehen werden, wenn man bedenkt, daß schon die (ja ganz allgemein gültige) Einstein-Bohrsche Frequenzbedingung eine so völlige Absage an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, an die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an

## **Sobre la reinterpretació quàntica de les relacions cinemàtiques i mecàniques**

En aquest treball s'intentarà obtenir les bases d'una mecànica quàntica que es basi exclusivament en relacions entre quantitats en principi observables

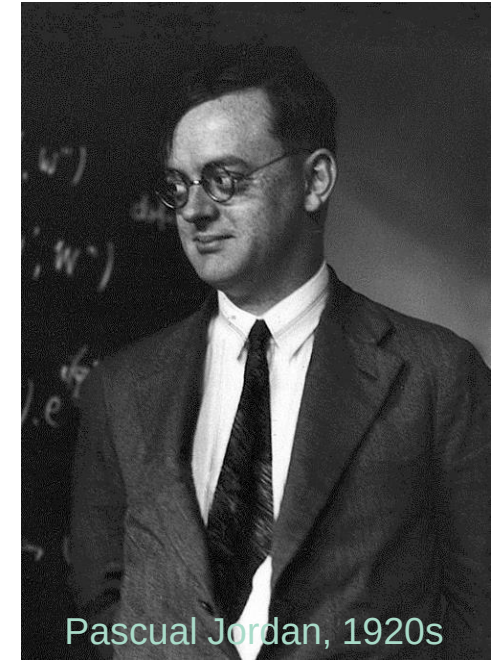
W. Heisenberg, "[Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen](#)", Z. Phys. 33, 879-893 (1925) (hi ha [traducció a l'anglès](#))

# Treball en equip

- **W. Heisenberg:** «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Z. Phys.* **33**, 879–893 (jul. → des. 1925)
  - ✓ Reformulació de la teoria quàntica, introdueix quantitats no-commutatives
- **M. Born i P. Jordan:** «Zur Quantenmechanik», *Z. Phys.* **34**, 858–888 (set. → des. 1925)
  - ✓ Formulació matemàtica rigorosa de la nova «mecànica quàntica» en el llenguatge de matrius
  - ✓ **Demostren la conservació de l'energia** en el formalisme de Heisenberg
- **M. Born, W. Heisenberg i P. Jordan:** «Zur Quantenmechanik II», *Z. Phys.* **35**, 557–615 (nov. 1925 → ago. 1926)
  - ✓ Deriven fórmules per a la intensitat de llum emesa/absorbida



Max Born, 1930s



Pascual Jordan, 1920s



W. Heisenberg, 1933



# Treball en equip

- **W. Heisenberg:** «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Z. Phys.* **33**, 879–893 (jul. → des. 1925)
  - ✓ Reformulació de la teoria de la mecànica commutatives
- **M. Born i P. Jordan:** «Zur Quantenmechanik», *Z. Phys.* **34**, 858–888 (set. → des. 1925)
  - ✓ Formulació matemàtica rigorosa en el llenguatge de matrius
  - ✓ **Demostren la conservació de l'energia** Heisenberg
- **M. Born, W. Heisenberg i P. Jordan:** «Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern», *Z. Phys.* **35**, 557–615 (nov. → des. 1925)
  - ✓ Deriven fórmules per a la intensitat de difracció de raigs X
- **W. Pauli:** «Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik», *Z. Phys.* **36**, 336 (gen. → maig 1926)
  - ✓ Demostra que el nou formalisme pot calcular correctament les línies d'hidrogen i supera les dificultats de l'antiga teoria

*Va significar això el triomf de l'escola de Bohr sobre la d'Einstein?*



Pascual Jordan, 1920s



W. Heisenberg, 1933



W. Pauli, 1929



# Erwin Schrödinger i les ones de matèria

|                                | Escola d'Einstein                                                                                          |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conceptes clau</b>          | <ul style="list-style-type: none"><li>• Dualitat ona-partícula</li><li>• El fotó com a partícula</li></ul> |
| <b>Dona gran importància a</b> | Conservació de l'energia i moment                                                                          |
| <b>Contribucions</b>           | Efectes fotoelèctric i Compton                                                                             |
| <b>Punt culminant</b>          | <b>Hipòtesi de Louis de Broglie</b> (1924): tota partícula té associada una ona, $\lambda=h/p$             |



Erwin Schrödinger, 1914

1925

## Erwin Schrödinger: una equació per a les ones de matèria de Broglie

De Broglie havia proposat que cada partícula té associada una ona amb certa longitud d'ona,  $\lambda = h/p$ .

Però com evoluciona aquesta ona associada?

Erwin Schrödinger parteix de l'equació d'ones clàssica, i hi substitueix la longitud d'ona de de Broglie.

Arriba així a l'**equació d'ona, o equació de Schrödinger**:

$$\Delta\psi + 8\pi^2m(E - V)\psi/h^2 = 0$$

- ✓ Deriva l'espectre discret de l'àtom d'hidrogen
- ✓ Obté l'espectre de l'efecte Stark d'acord amb els experiments — i *en acord amb el que s'obté amb la teoria de Heisenberg-Born-Jordan*

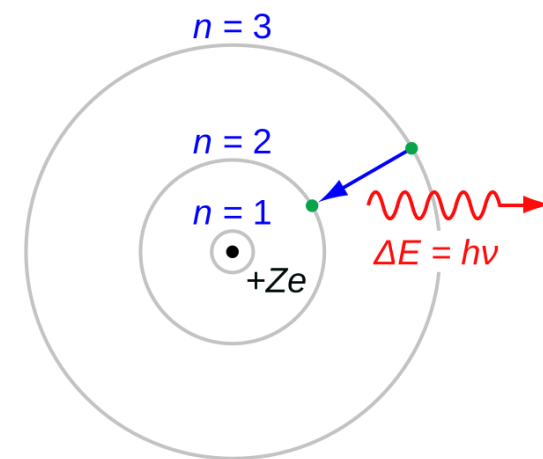
E. Schrödinger: "Quantisierung als Eigenwertproblem (I-IV)" *Ann. D. Phys.* [384, 361](#); [384, 489](#), [385, 437](#); [386, 109](#) (1926); "[An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules](#)", *Physical Review* [28](#), 1049–70 (1926)



Erwin Schrödinger, 1914



Niels Bohr, 1922

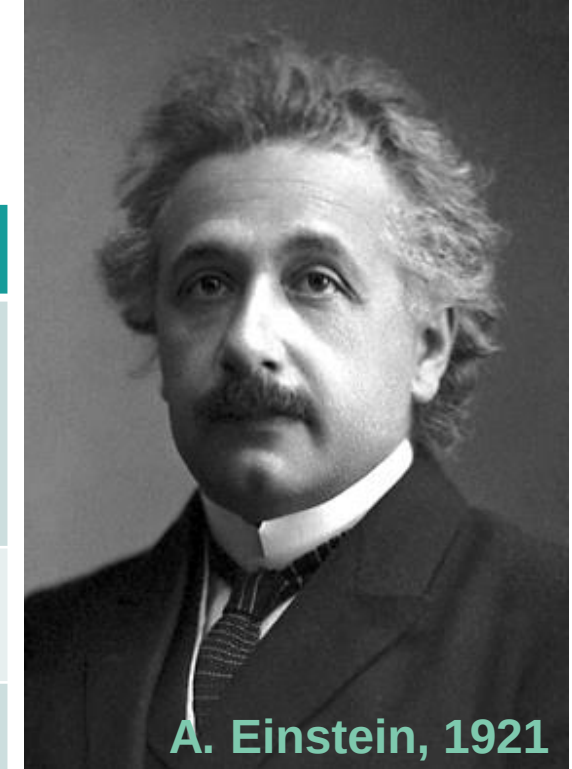


Model de l'àtom de Bohr  
(Wikipedia: JabberWok)

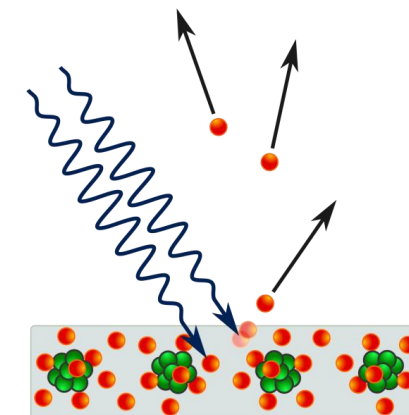
## 1925-1926

### De 'Teoria quàntica' a 'Mecànica quàntica'

| Copenhagen (Bohr)                                                                                                   |                                | Einstein                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Nivell d'energia quantitzats</li> <li>Principi de correspondència</li> </ul> | <b>Conceptes clau</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dualitat ona-partícula</li> <li>El fotó com a partícula</li> </ul> |
| Observacions espectroscòpiques                                                                                      | <b>Dóna gran importància a</b> | Conservació de l'energia i moment                                                                         |
| Model de Bohr                                                                                                       | <b>Contribucions</b>           | Efectes fotoelèctric i Compton                                                                            |
| <b>Fórmula de Kramers-Heisenberg</b> per a transicions entre estats (1924)                                          | <b>Punt culminant</b>          | <b>Hipòtesi de Louis de Broglie</b> (1924): tota partícula té associada una ona, $\lambda = h/p$          |
| <b>Mecànica de matrius</b> de Heisenberg-Born-Pascual (1925)                                                        | <b>Formulació matemàtica</b>   | <b>Mecànica d'ones</b> de Schrödinger (1925)                                                              |



A. Einstein, 1921



Efecte fotoelèctric  
(Wikipedia: Ponor)

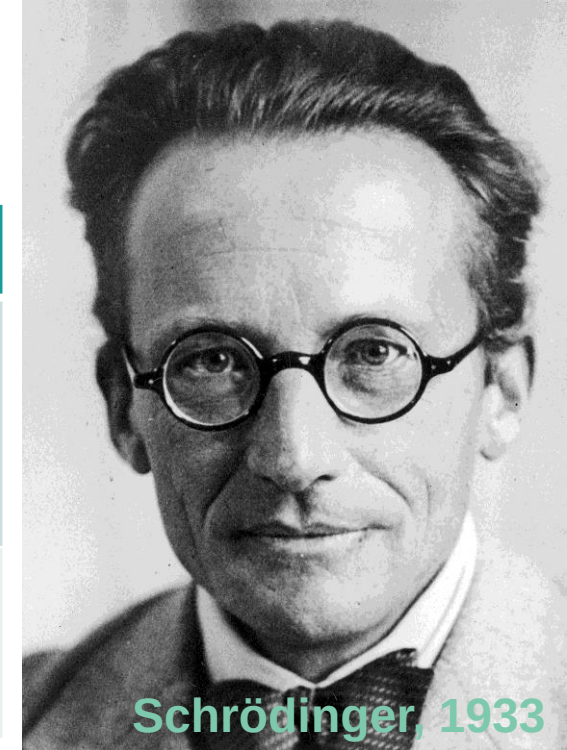




Heisenberg, 1933

# 1925-1926: Mecànica quàntica

| Mecànica de matrius                                                                                                 |                              | Mecànica d'ones                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Nivell d'energia quantitzats</li> <li>Principi de correspondència</li> </ul> | <b>Conceptes clau</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dualitat ona-partícula</li> <li>El fotó com a partícula</li> </ul> |
| <b>Mecànica de matrius</b> de Heisenberg-Born-Pascual (1925)                                                        | <b>Formulació matemàtica</b> | <b>Mecànica d'ones</b> de Schrödinger (1925)                                                              |



Schrödinger, 1933

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p} = \frac{1}{m} p,$$

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q} = -\frac{\partial U}{\partial q}.$$

Equació dinàmica en formalisme matricial

- Dues formulacions matemàtiques rigoroses per a una nova «mecànica quàntica»
- Ambdues d'acord amb experiments
- Primeres prediccions coincideixen
- Formalismes molt diferents: matrius vs. camps**
  - Són incompatibles?
  - Són equivalents?
  - Una engloba l'altre?

$$\Delta\psi + 8\pi^2m(E - V)\psi/h^2 = 0$$

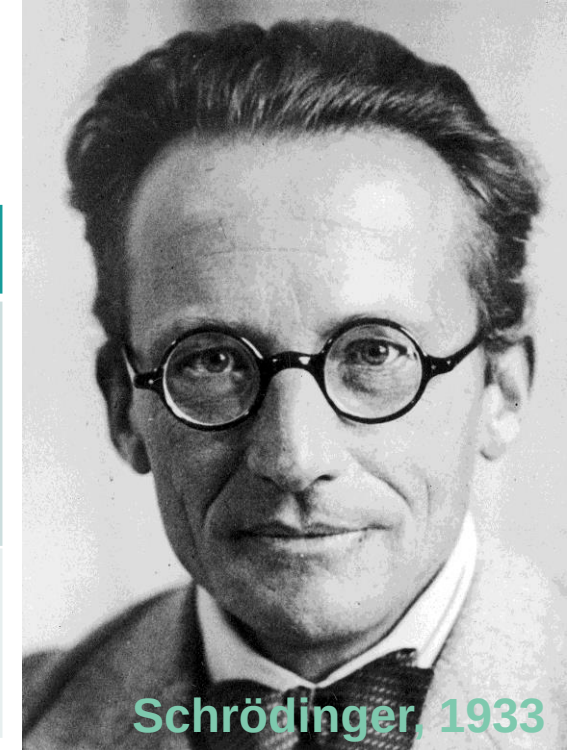
Equació de Schrödinger independent del temps



Heisenberg, 1933

# 1925-1926: Mecànica quàntica

| Mecànica de matrius                                                                                                 |                              | Mecànica d'ones                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Nivell d'energia quantitzats</li> <li>Principi de correspondència</li> </ul> | <b>Conceptes clau</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dualitat ona-partícula</li> <li>El fotó com a partícula</li> </ul> |
| <b>Mecànica de matrius</b> de Heisenberg-Born-Pascual (1925)                                                        | <b>Formulació matemàtica</b> | <b>Mecànica d'ones</b> de Schrödinger (1925)                                                              |



Schrödinger, 1933

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p} = \frac{1}{m} p,$$

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q} = -\frac{\partial U}{\partial q}.$$

Equació dinàmica en formalisme matricial

- **Formalismes molt diferents: matrius vs. camps**
  - Són incompatibles?
  - Són equivalents?
  - Una engloba l'altre?
- von Neumann demostrarà (1932) que el formalisme matricial engloba el de Schrödinger
- Avui parlem de dues «imatges» o «representacions»

$$\Delta\psi + 8\pi^2m(E - V)\psi/h^2 = 0$$

Equació de Schrödinger independent del temps

# Una etapa daurada de la física

|                   | Premi Nobel | Altres premis                                       |
|-------------------|-------------|-----------------------------------------------------|
| Max Planck        | 1918        |                                                     |
| Albert Einstein   | 1921        |                                                     |
| Niels Bohr        | 1922        |                                                     |
| Hans Kramers      | -           | Medalles Lorentz (KNAW 1947) i Hughes (RSL 1951)    |
| Louis De Broglie  | 1929        |                                                     |
| Heisenberg        | 1932        |                                                     |
| Max Born          | 1954        |                                                     |
| Pascal Jordan     | -           | Medalla Max Planck (1942), premi K. Adenauer (1971) |
| Erwin Schrödinger | 1933        | Paul Dirac                                          |
| Wolfgang Pauli    | 1945        |                                                     |



Medalla del premi Nobel



# Una mirada esbiaixada



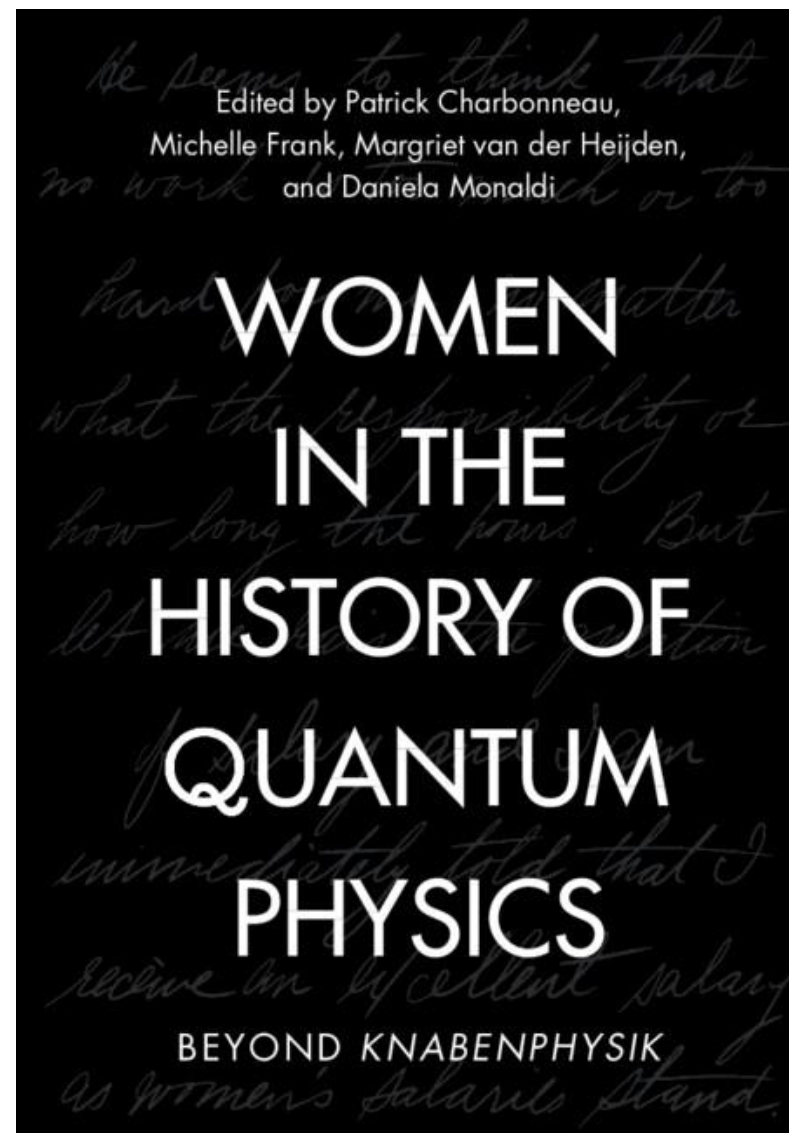
Hertha Sponer, 1913



Maria Lluïsa Canut  
(Fons Canut-Amorós IME)



Satyendra Nath  
Bose, 1925



Cambridge University Press (2025)



# 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:

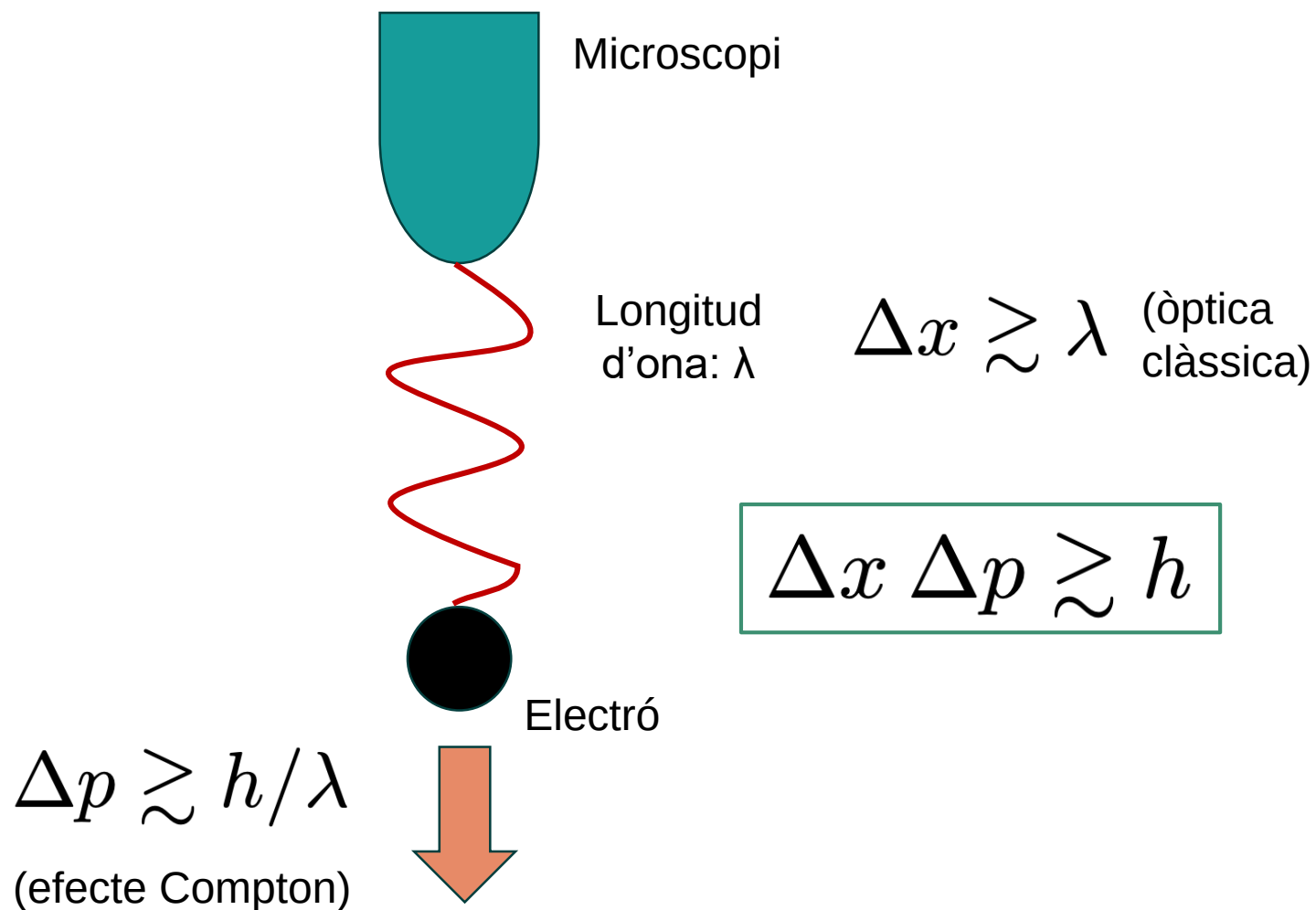
$$\Delta x \Delta p \gtrsim h$$

Relació d'incertesa posició-  
moment



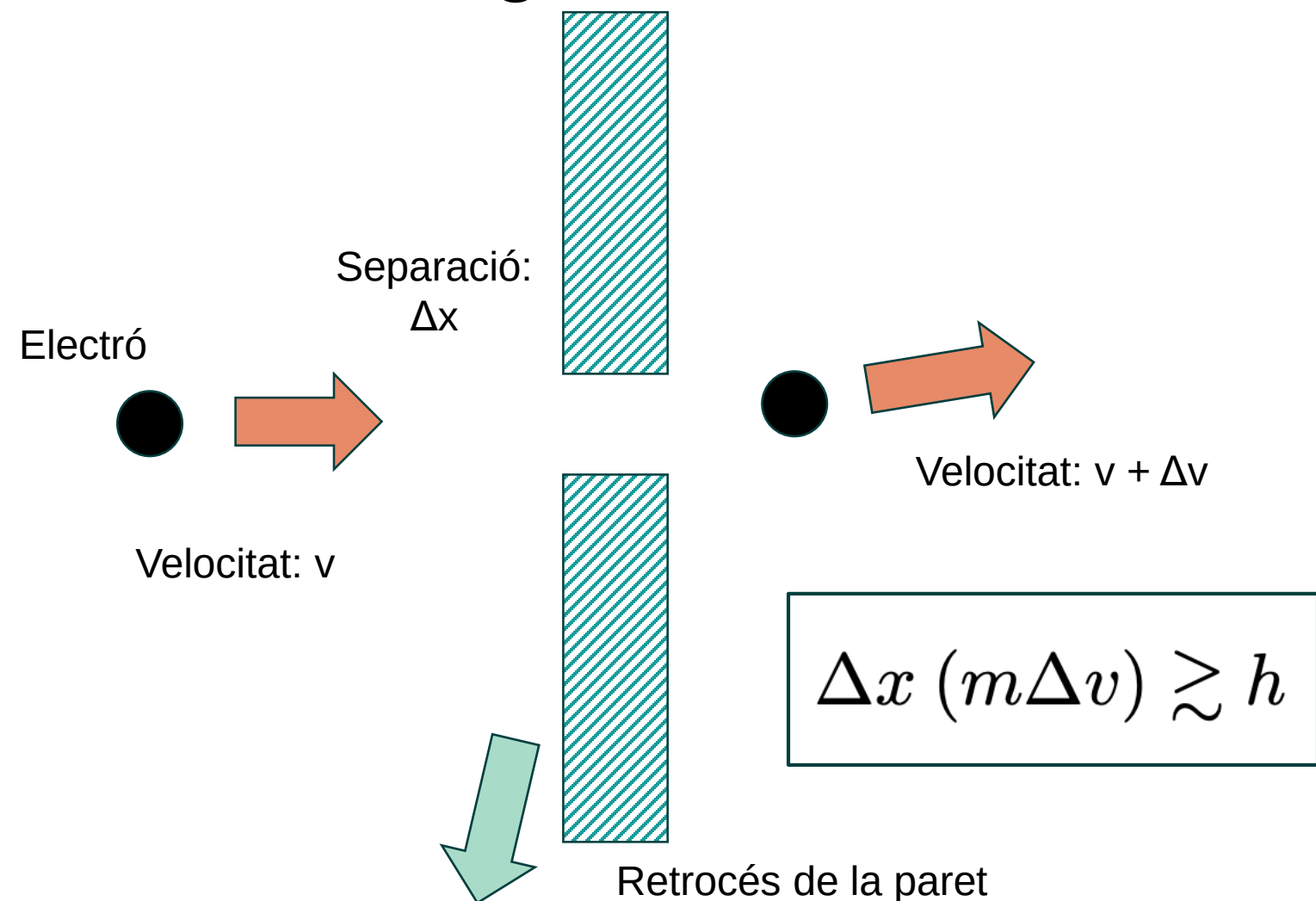
W. Heisenberg, 1933

# 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

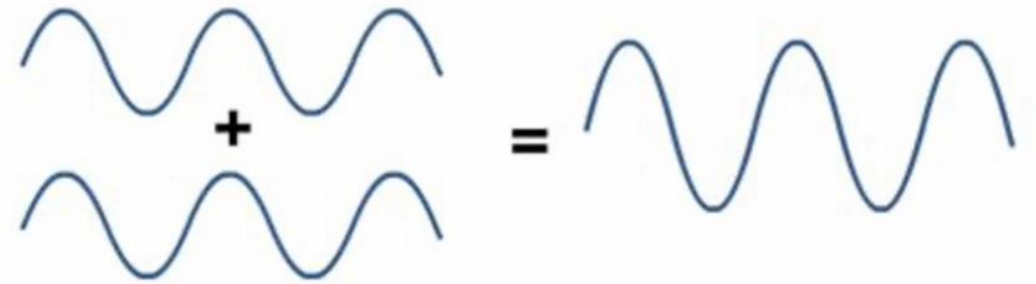
- Si dues funcions d'ona  $\Psi_1, \Psi_2$  són solucions vàlides de l'equació de Schrödinger, la seva suma també ho és.
- Si un electró o àtom pot estar en principi en dos estats diferents, també **pot estar en una superposició lineal** dels mateixos:

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

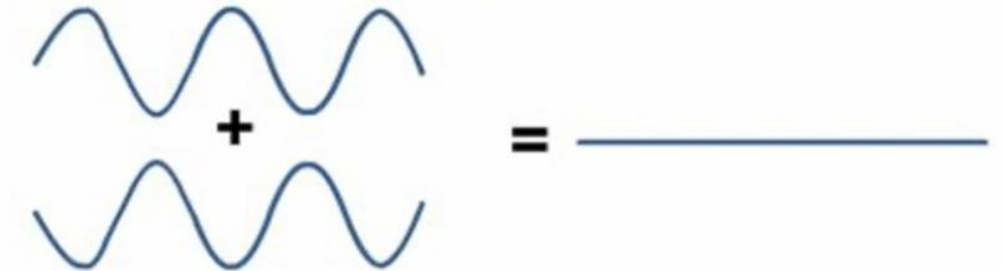
$$|\Psi_2\rangle = |1P\rangle$$

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

### 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?**

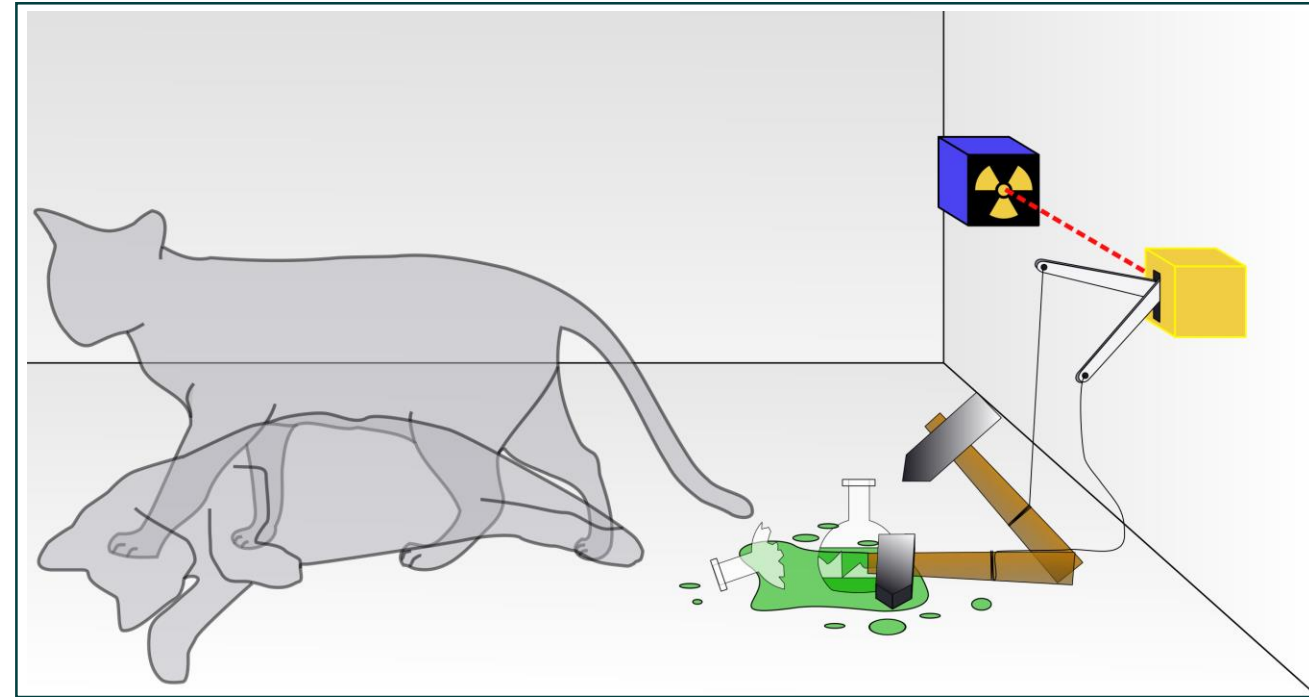




# Superposició d'estats: El gat de Schrödinger

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

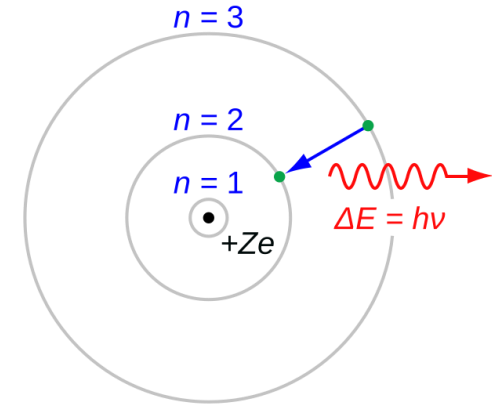
## Superposició en mecànica quàntica

- 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].”*

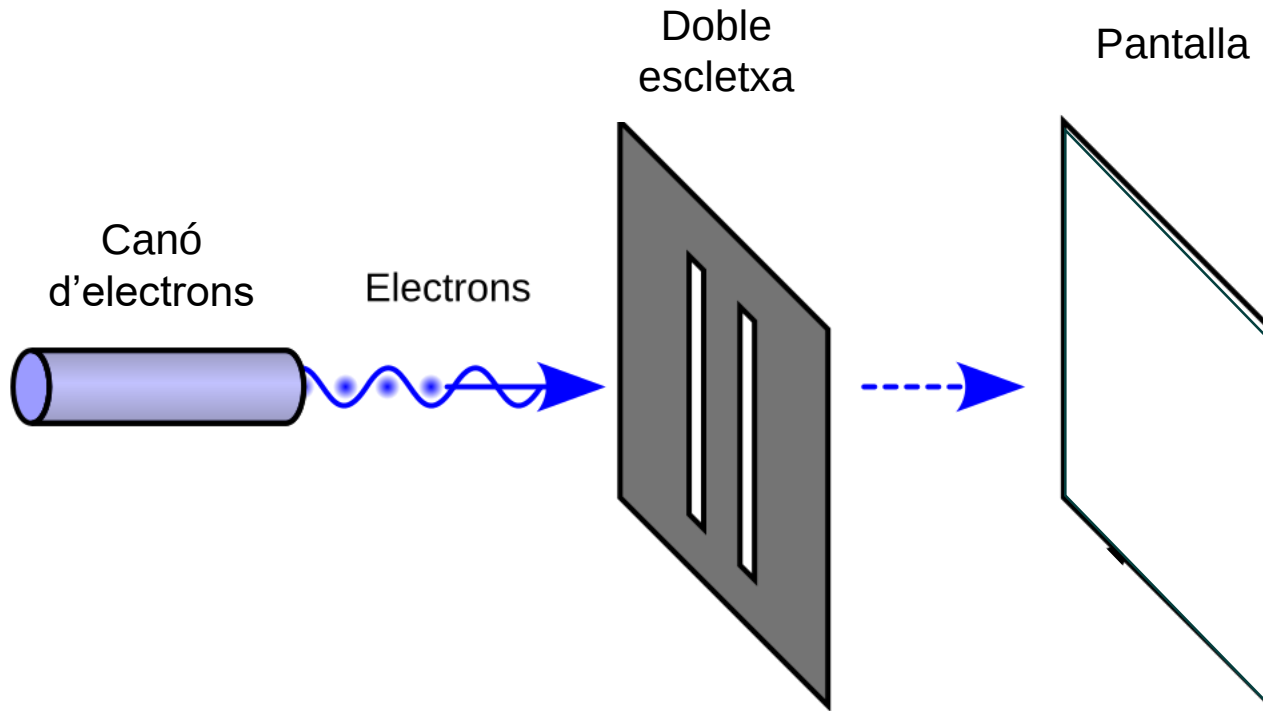
Richard P. Feynman

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



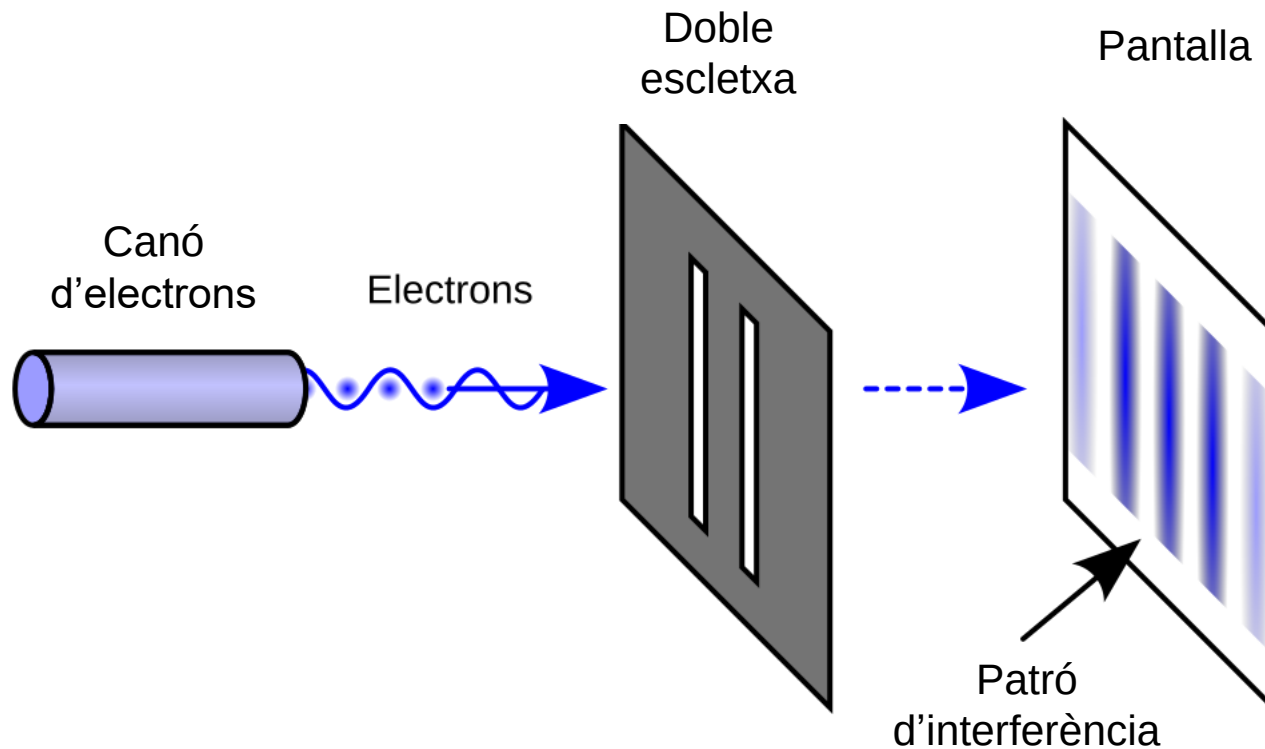
# L'experiment de la doble escletxa

## Dualitat ona-partícula i interferència quàntica

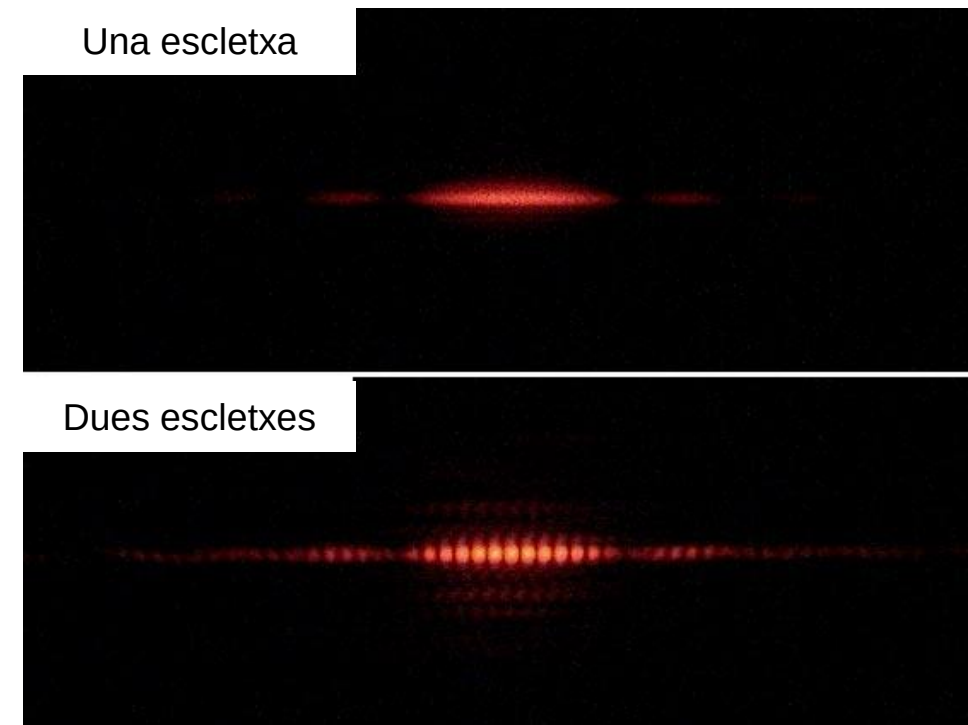


# L'experiment de la doble escletxa

## Dualitat ona-partícula i interferència quàntica



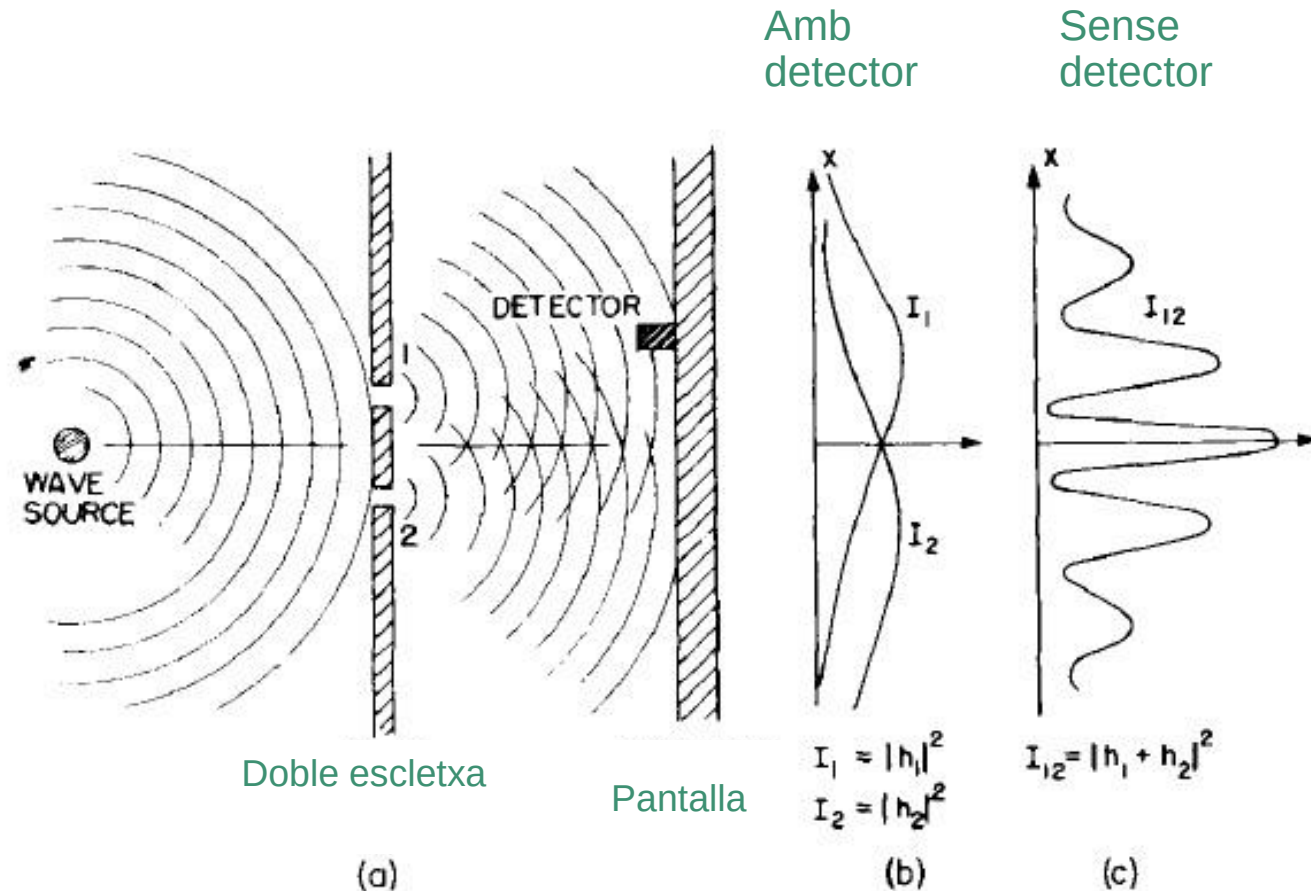
Wikimedia: NekoJaNekoJa



Wikimedia: Jordgette



# L'experiment de la doble escletxa – amb un detector

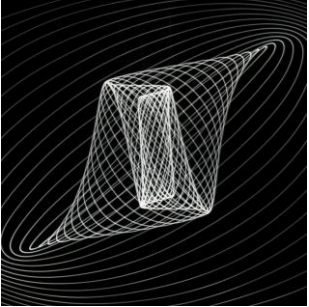


## Observacions i conclusions:

- 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)**

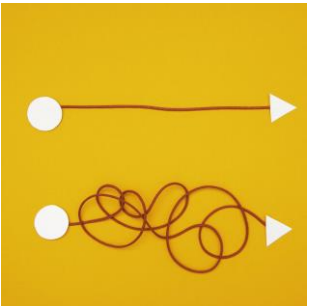


# La superposició i el seu significat conceptual



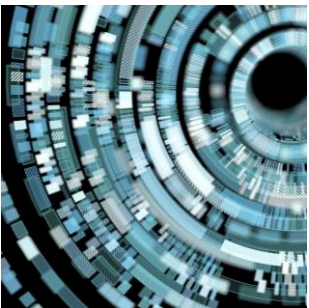
## **Estats múltiples quàntics**

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)

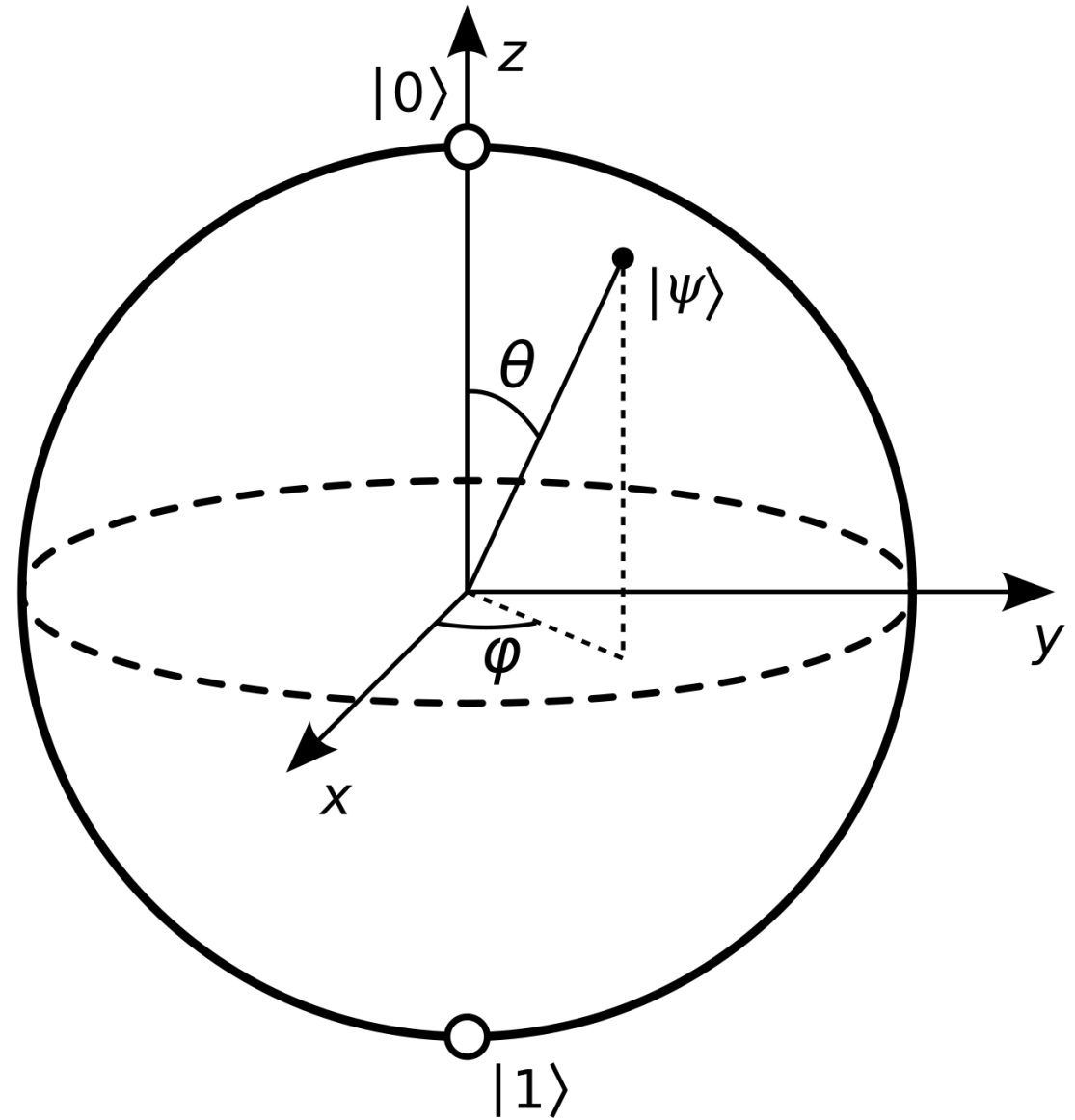


Aparell RMN a hospital Narayana, Jaipur  
(Wikipedia: GeorgeWilliams21)

# 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)

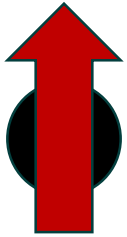




## **Entrellaçament i la paradoxa EPR**



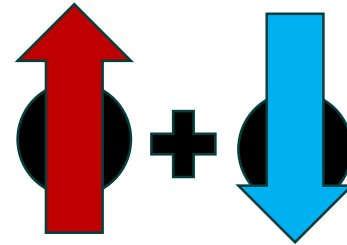
# Superposició i entrellaçament



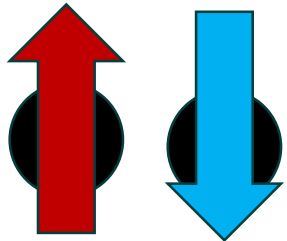
Electró  
amb espí  
'amunt'



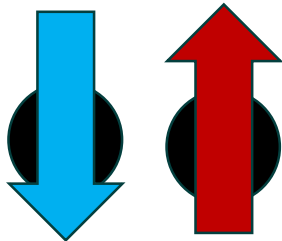
Electró  
amb espí  
'avall'



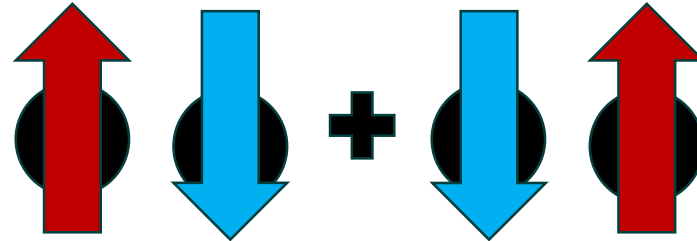
Electró en estat  
superposició  
 $|\text{amunt}\rangle + |\text{avall}\rangle$



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

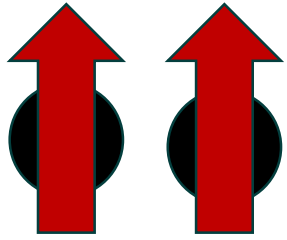


Dos electrons  
en l'estat  
 $|\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

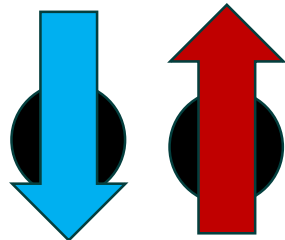


Dos electrons en estat  
superposició  
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

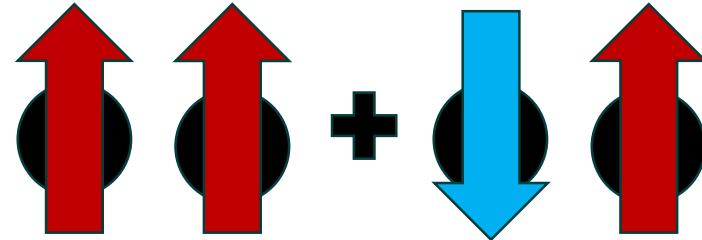
# Superposició i entrellaçament



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

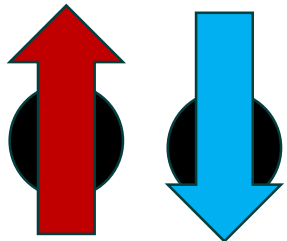


Dos electrons en l'estat  $|\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

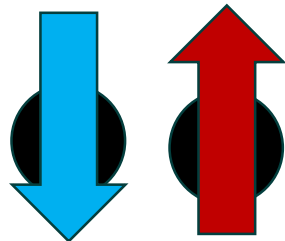


Dos electrons en estat superposició  $|\text{amunt}, \text{amunt}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

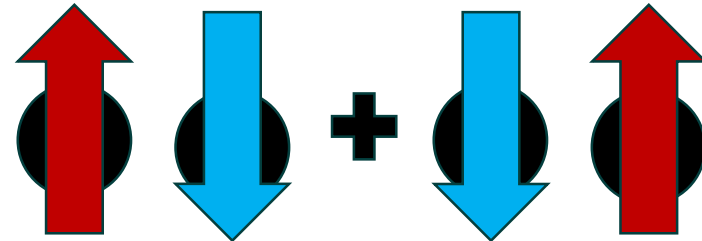
Estat  
«separable»



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



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

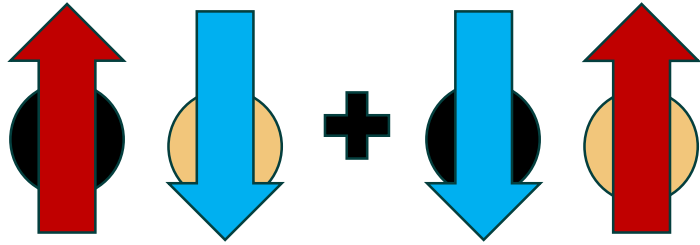


Dos electrons en estat superposició  $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

Estat  
«entrellaçat»

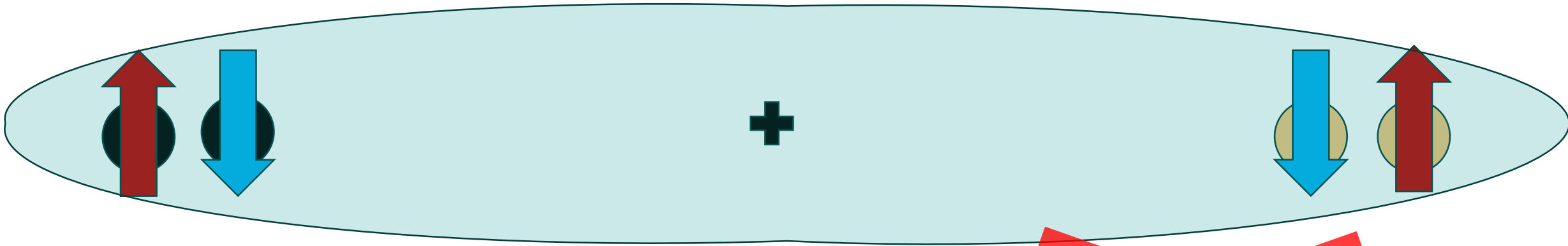


# Entrellaçament i la paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR): podem enviar informació més ràpid que la llum?



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  $|amunt\rangle$

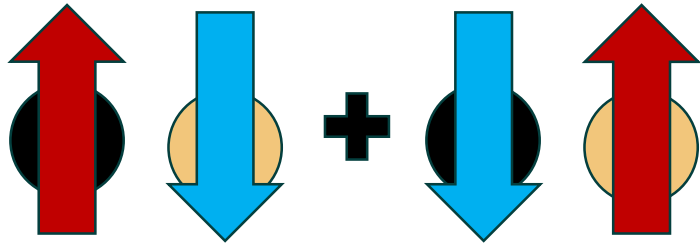


Dos electrons en estat superposició  
 $|amunt, avall\rangle + |avall, amunt\rangle$

$\neq$

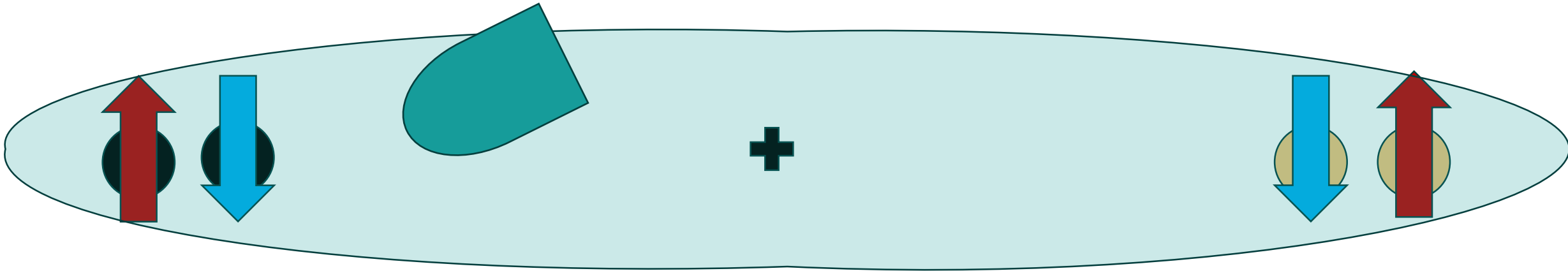
~~Dos electrons en els estats  
 $|amunt\rangle + |avall\rangle$  i  $|avall\rangle + |amunt\rangle$~~

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



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

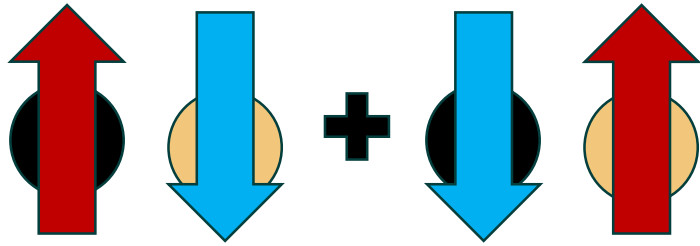
- Si veiem el *primer electró* en estat  $|\text{amunt}\rangle$ , sabem que *el segon* està  $|\text{avall}\rangle$
- Si veiem el *primer electró* en estat  $|\text{avall}\rangle$ , sabem que *el segon* està  $|\text{amunt}\rangle$



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

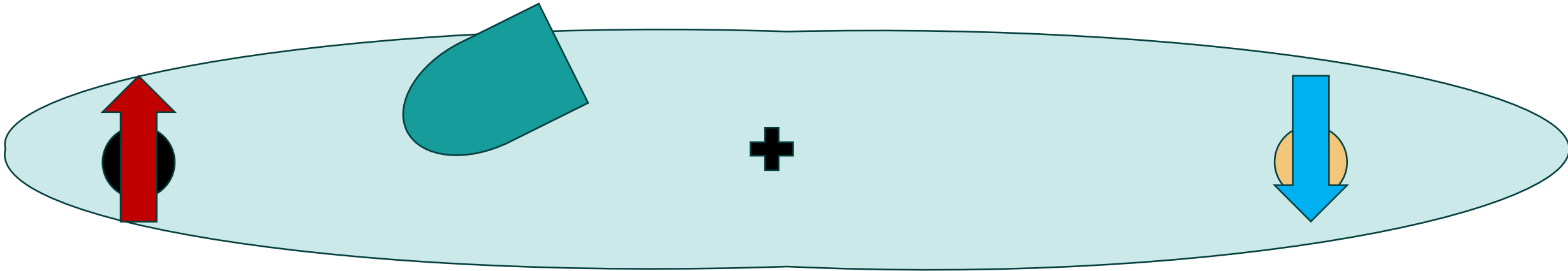


# Entrellaçament i la paradoxa d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR): podem enviar informació més ràpid que la llum?



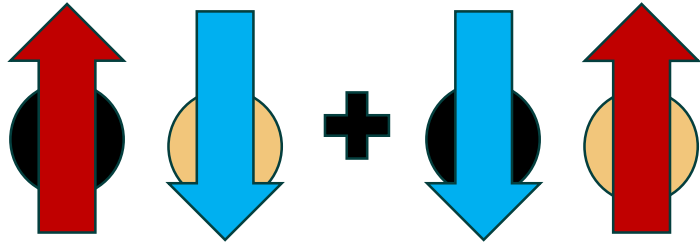
Dos electrons en estat superposició  
 $|amunt, avall\rangle + |avall, amunt\rangle$

- 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  $|amunt\rangle$



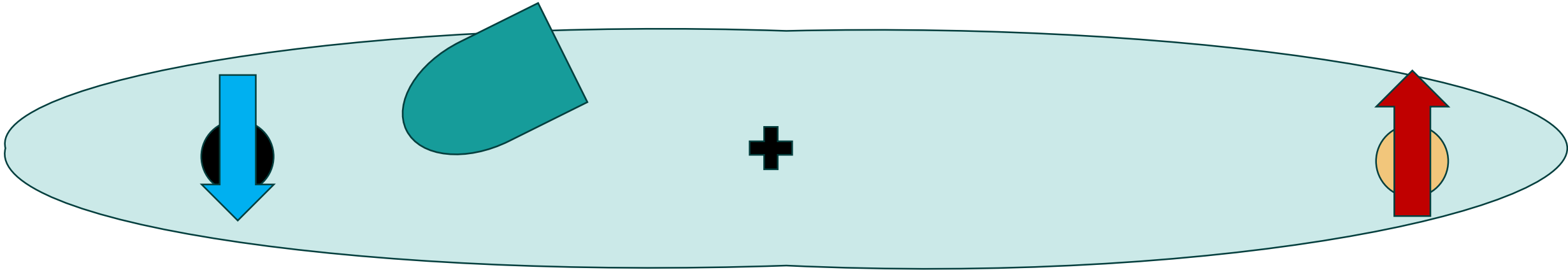
Dos electrons en estat superposició  
 $|amunt, avall\rangle + |avall, amunt\rangle$

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



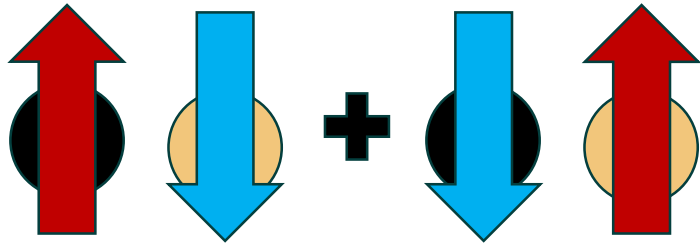
Dos electrons en estat superposició  
 $|\text{amunt}, \text{avall}\rangle + |\text{avall}, \text{amunt}\rangle$

- 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





# INTERNATIONAL YEAR OF Quantum Science and Technology

**Any Internacional de la Ciència i la Tecnologia Quàntiques:  
Dels inicis a la Segona Revolució Quàntica – Lliçons 3 i 4**

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.

**La segona revolució quàntica:  
tecnologies quàntiques  
establertes i emergents**



Heu fet servir cap aparell que depèn de les lleis de la física quàntica?

♦ **A:** No, no existeixen (encara)

♦ **B:** No, no me'n refiaria 🎲

♦ **C:** Sí, ocasionalment

♦ **D:** Sí, cada dia





Heu sentit a parlar de...?  
(marqueu totes les opcions correctes)

♦ A: GPS / GNSS / Galileo

♦ B: Relotges atòmics

♦ C: Làsers

♦ D: Circuits integrats



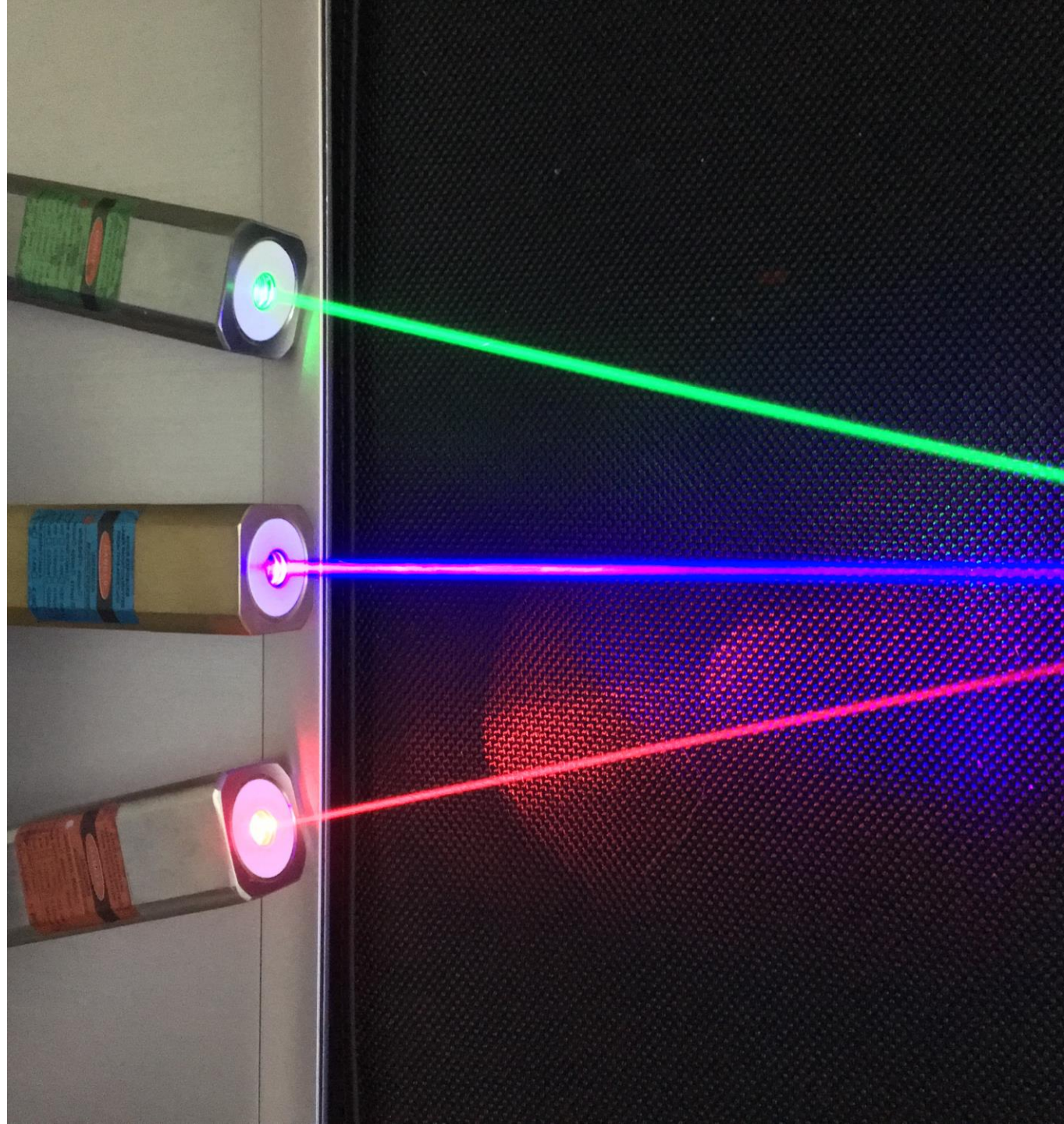
## Què en penseu?

- En què penseu quan sentiu a parlar de “tecnologies quàntiques”?
- Quines empreses us venen al cap?
- Quins països?
- I quines persones?



# La primera revolució quàntica

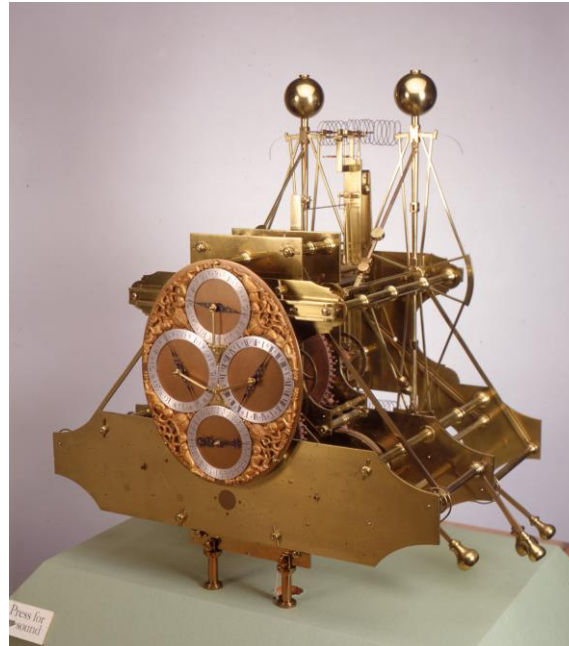
- Els rellotges més precisos
- Imatges mèdiques
- La bretxa que dona lloc a l'electrònica



# Mesurant el temps al llarg del temps



Stonehenge (~2500 aC) (Wikimedia: garethwiscombe)



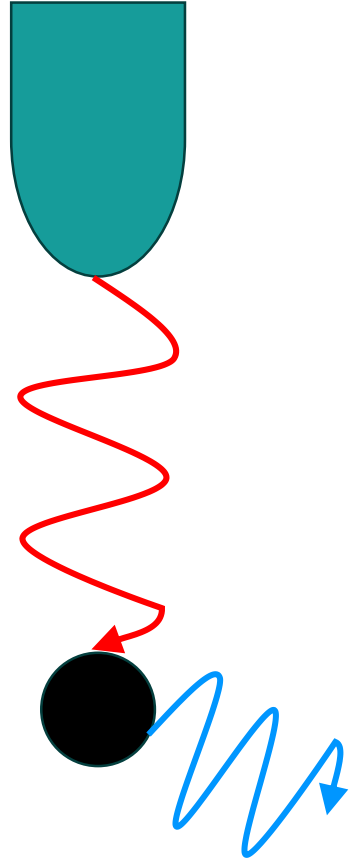
Harrison's H1 marine timekeeper (1730)  
(Royal Museums Greenwich)



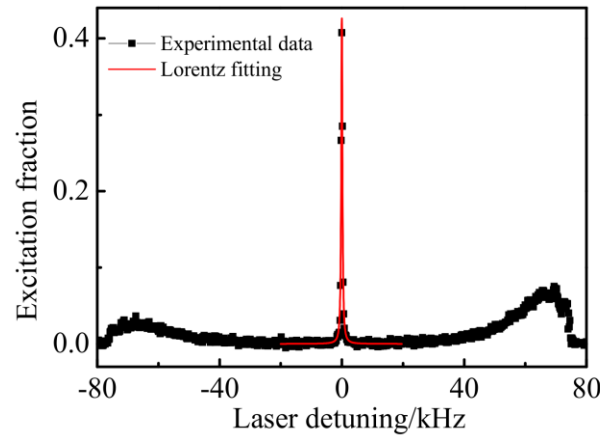
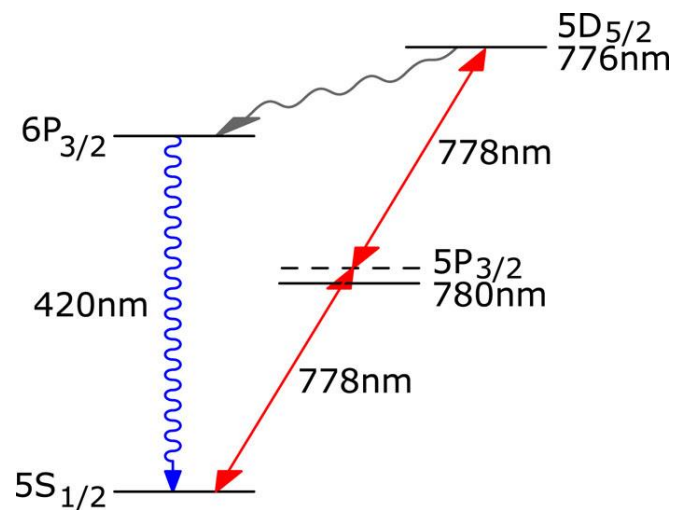
Smartwatch (2025) (AMZSA)



# Relotges atòmics: Precisió quàntica en el cronometratge

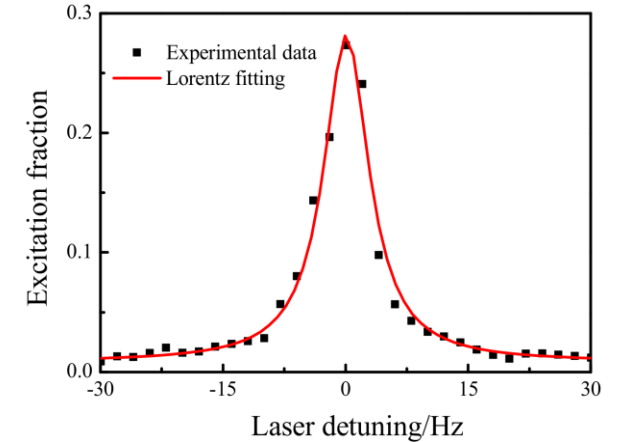


## Nivells atòmics del rubidi



(a)

Wang et al. Appl. Sci. 8, 2194 (2018)



(b)

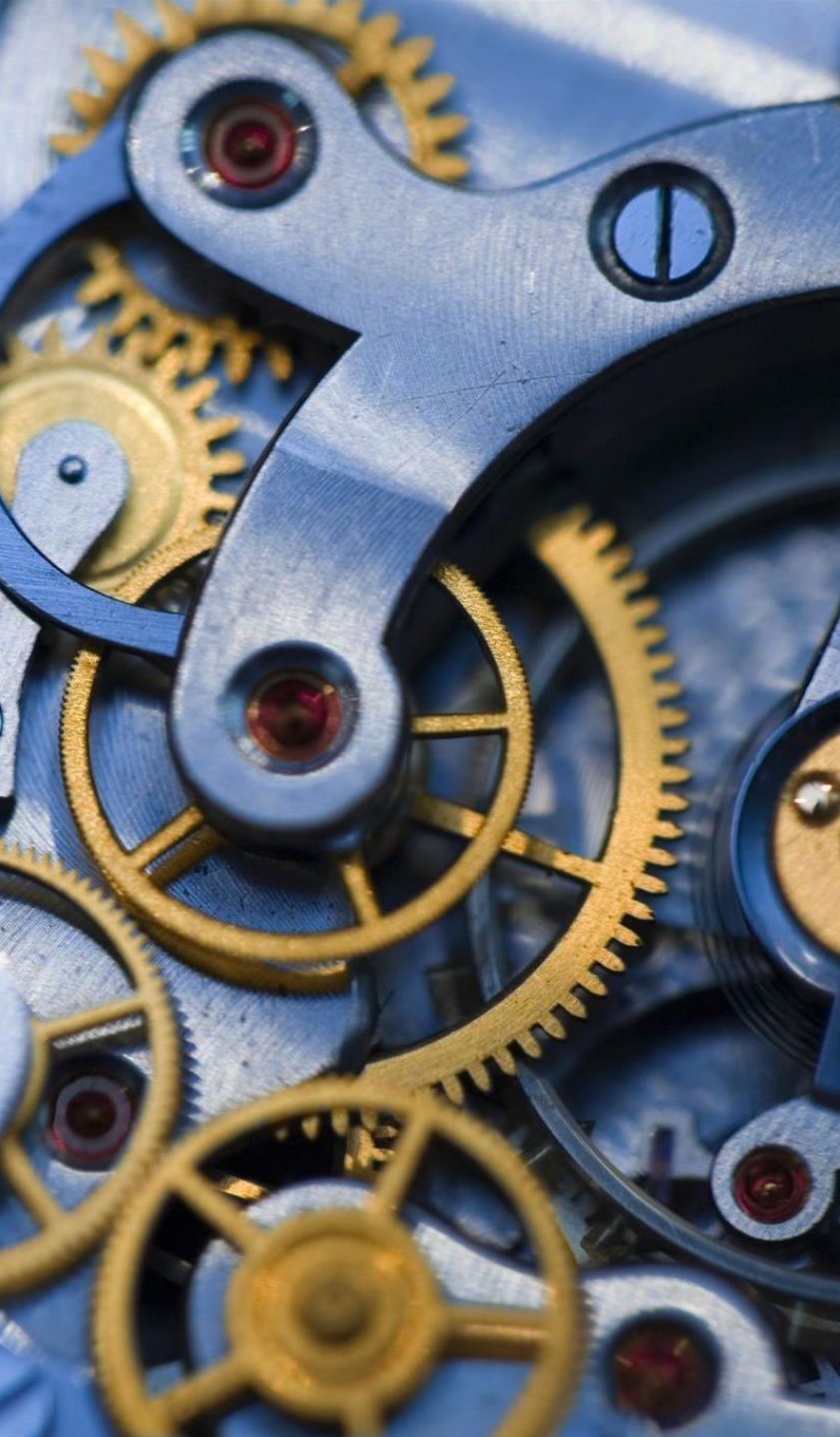
Incertesa en la  
mesura del rellotge:

$$\sigma_{y, \text{atoms}}(\tau) \approx \frac{\Delta \nu}{\nu_0 \sqrt{N}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}},$$

- $\nu(\text{maser H}) = 1,4 \text{ GHz}$
- $\nu(\text{Cs}) = 9,2 \text{ GHz}$
- $\nu(\text{Yb}^+) = 688 \text{ THz}$

Rècord actual:  $\sigma \approx 10^{-18}$

S'endarreriria 1 segon cada  $10^{18} \text{ s}$ , aprox. 3 vegades l'edat de l'univers.



# Relotges atòmics: Precisió quàntica en el cronometratge

## Definició del segon (Sistema Internacional, SI)

- Des de 1967, el segon està definit oficialment en termes d'una transició hiperfina del cesi (9.19... GHz)

## Aplicacions en tecnologia GPS

El cronometratge precís dels rellotges atòmics és fonamental per a la precisió dels sistemes de navegació i posicionament GPS.

- Errors d'1 ns ( $10^{-9}$  s) en el temps corresponen a 30 cm
- Correccions per la gravetat terrestre

## Paper en telecomunicacions i finances

- Els rellotges atòmics proporcionen un temps exacte essencial per a la sincronització a les xarxes de telecomunicacions.
- Les transaccions financeres estan regulades amb una precisió d'1 ms («high-frequency trading»)

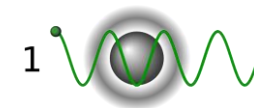
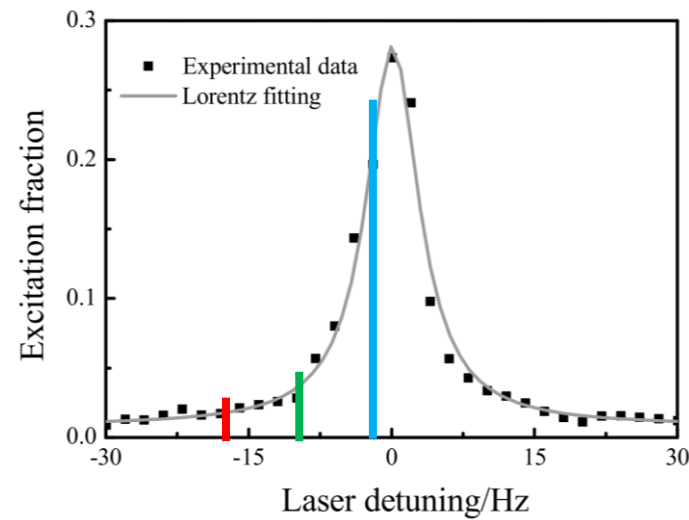
## Impacte en la física fonamental

- La precisió del rellotge atòmic permet la investigació avançada en física fonamental i proves de lleis físiques.



# Petit detour: Refredant amb llum

Wang et al. Appl. Sci. 8, 2194 (2018)

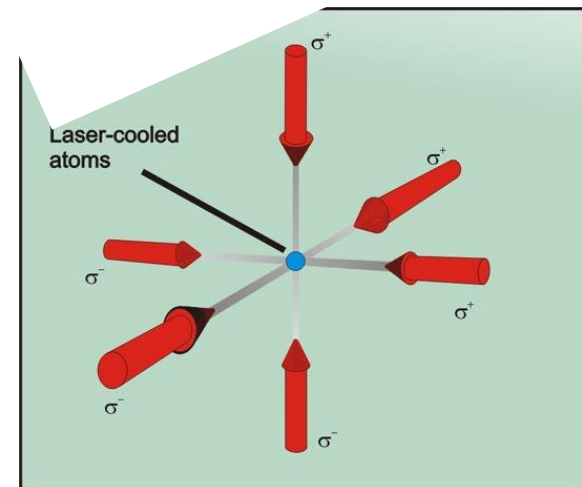


$$f' = \left(1 + \frac{v}{c}\right) f_0$$



**Premi Nobel de Física 1997**

S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W.D. Phillips



# Ressonància magnètica nuclear (RMN): de la ciència fonamental a la imatge mèdica

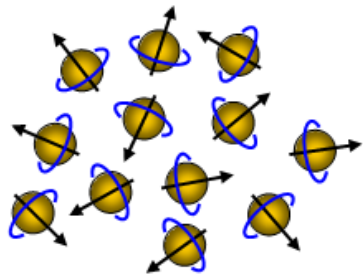
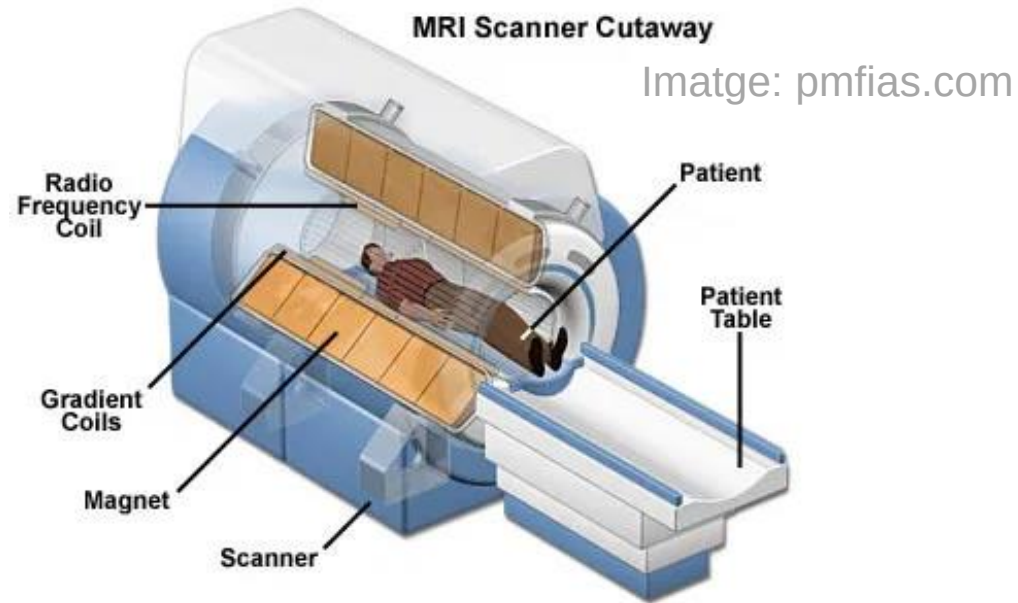


Figure 1

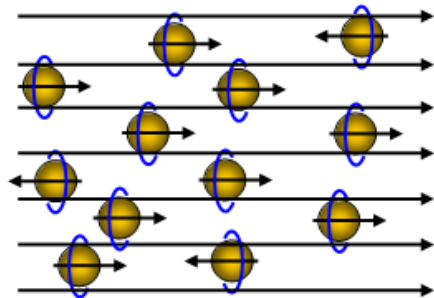
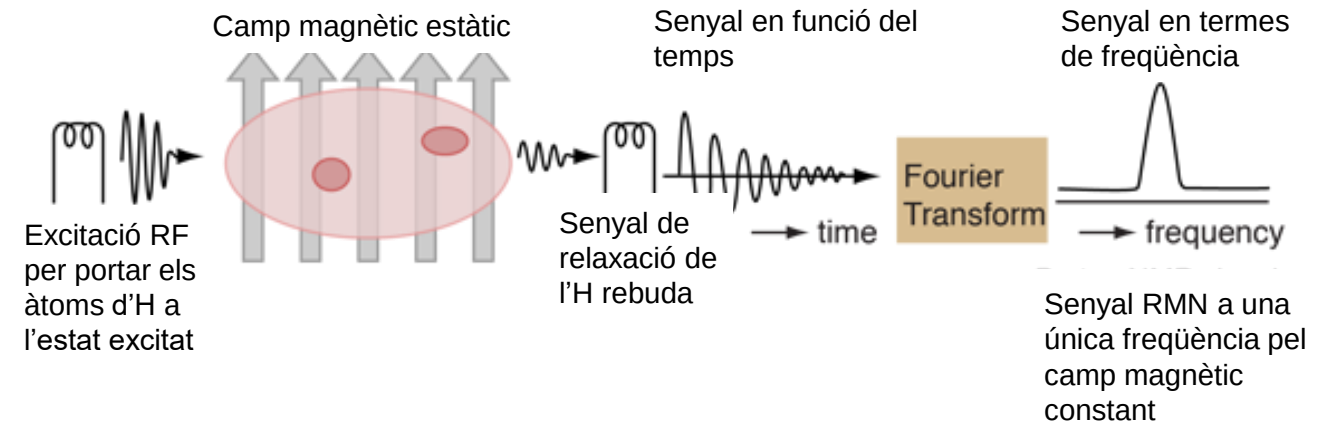
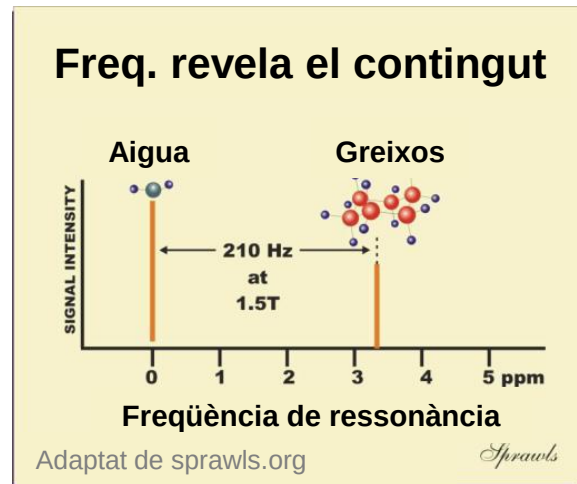


Figure 2





# Ressonància magnètica nuclear (RMN): de la ciència fonamental a la imatge mèdica



P.N. Física 1902 – Lorentz & Zeeman

P.N. Física 1930 – Raman

P.N. Física 1944 – Rabi

P.N. Física 1952 – Bloch & Purcell

P.N. Física 1955 – Lamb

P.N. Física 1966 – Kastler

P.N. Física 1989 – Ramsey

Premi Nobel de Medicina/Fisiologia 2003

P. Lauterbur, Peter Mansfield



Adaptat de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/mri.html>

# Làsers: aprofitar la coherència quàntica per a la tecnologia

## Coherència quàntica i emissió estimulada

Els làsers funcionen basant-se en la coherència quàntica i l'emissió estimulada, principis fonamentals de la física quàntica.

## Aplicacions mèdiques

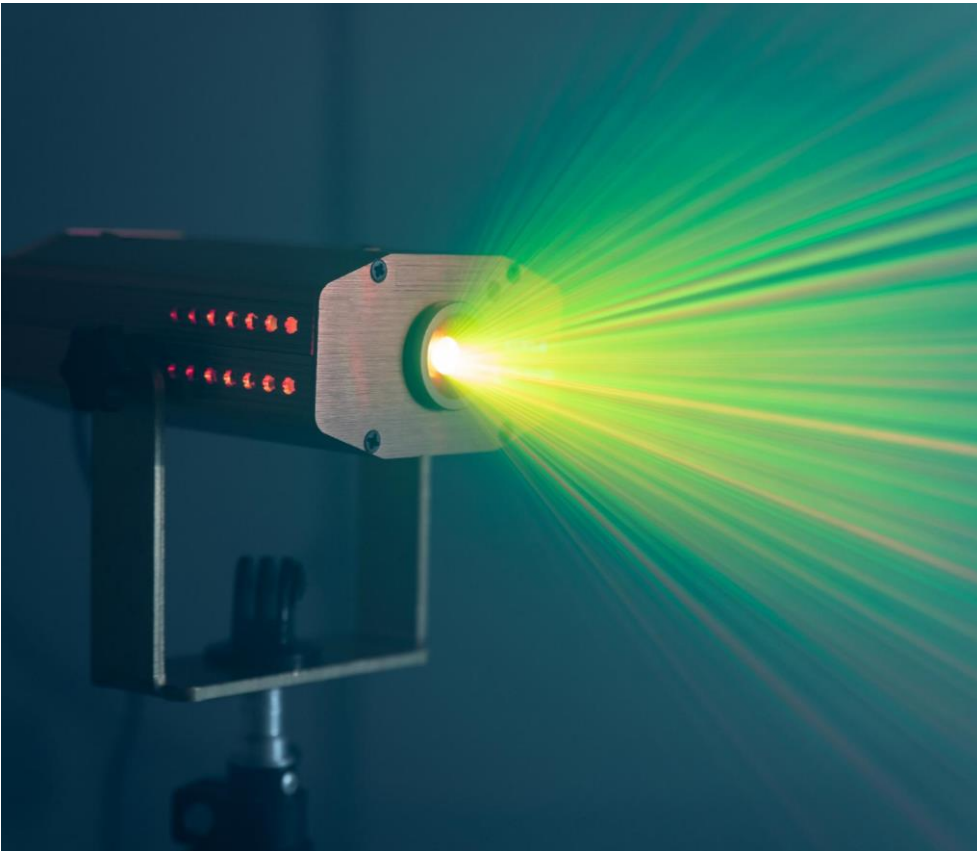
Els làsers s'utilitzen àmpliament en medicina per a cirurgia de precisió, diagnòstic i tractaments terapèutics.

## Tecnologies de la comunicació

La tecnologia làser permet la transmissió de dades d'alta velocitat en sistemes de comunicació de fibra òptica.

## Fabricació i Indústria

Els làsers són fonamentals en la fabricació per tallar, gravar i processar materials de precisió.



# Matèria condensada i electrònica

**METALS  
AND INSULATORS**

All the animations and explanations on  
[www.toutestquantique.fr](http://www.toutestquantique.fr)

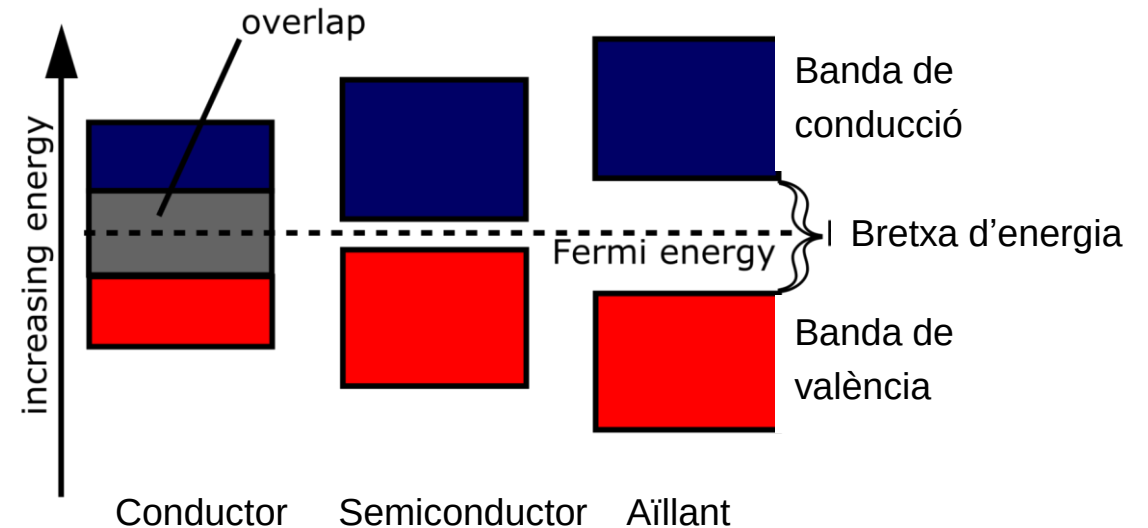
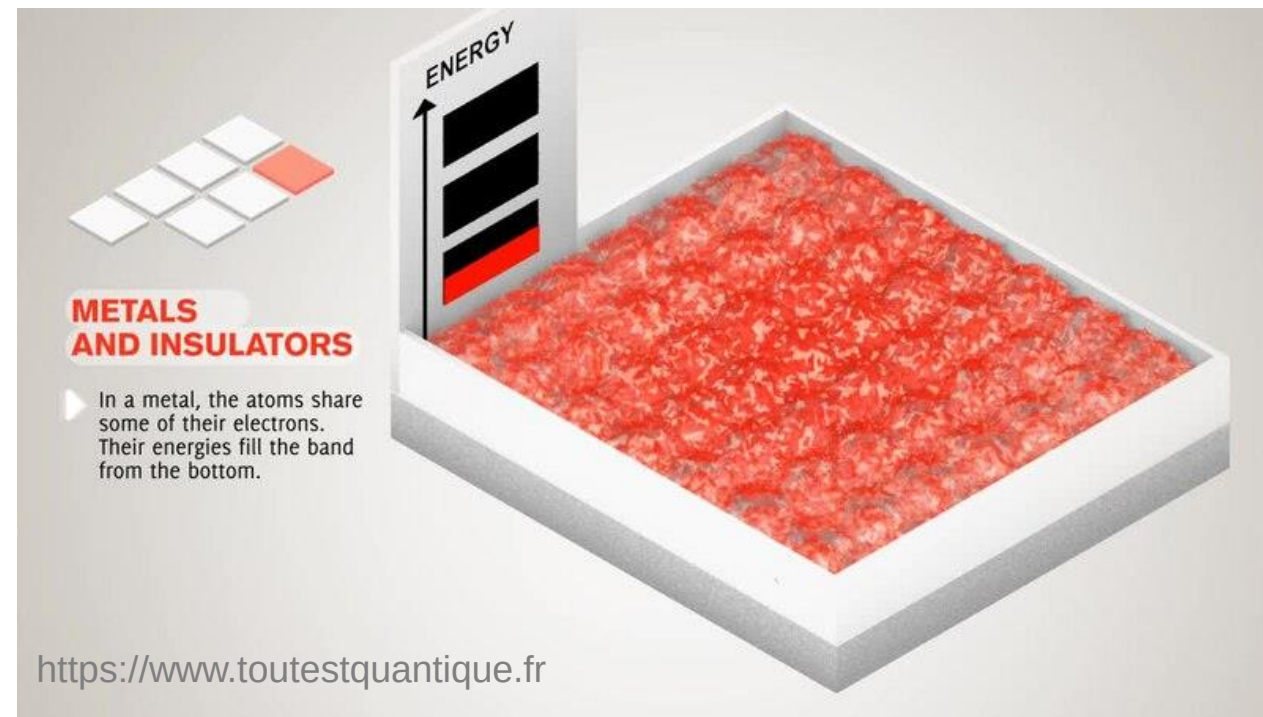
# Matèria condensada i electrònica

## El silici: ni conductor ni aïllant: semiconductor

- Entre la banda de valència i la de conducció hi ha una petita «bretxa (gap) d'energia»
- En el silici, aquesta bretxa és prou petita perquè els electrons puguin saltar quan reben energia (com l'energia elèctrica), fent-lo un «semiconductor»
- Això ens permet 'encendre' i 'apagar' el silici elèctricament — fent possibles els transistors, els xips i els dispositius digitals!

## Pensa en la bretxa com una tanca:

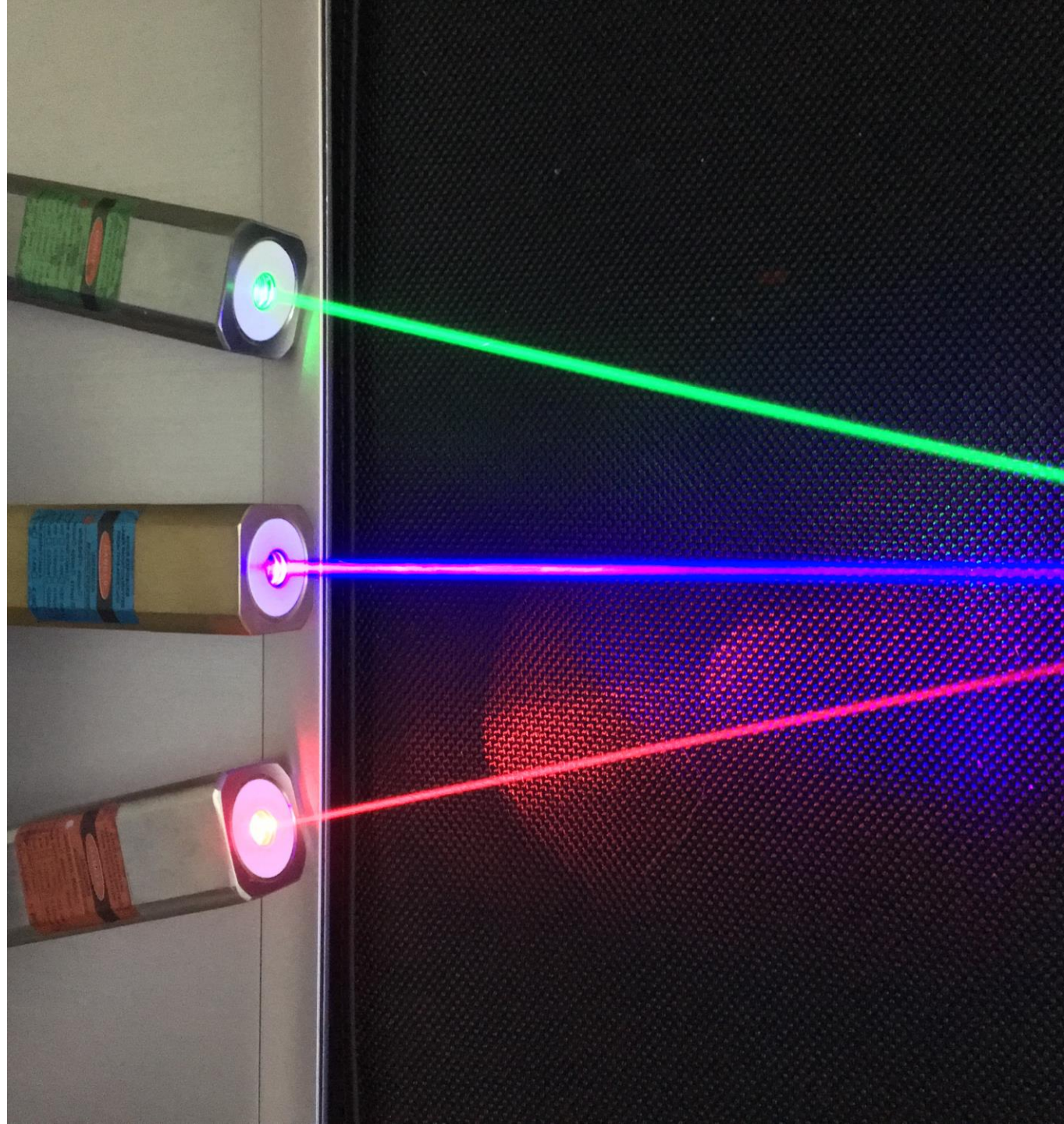
- En els metalls, la tanca no existeix (el flux és fàcil)
- En els aïllants és molt alta (no hi ha flux)
- En el silici té la 'mida justa' — permetent controlar quan els electrons la creuen.





# La primera revolució quàntica

- ✓ Els rellotges més precisos
- ✓ Imatges mèdiques
- ✓ La bretxa que ens dona les tecnologies digitals



# Quina és la segona revolució quàntica?

## Primera revolució

La primera revolució quàntica és a la base de l'electrònica, els làsers i mesures de precisió com els rellotges atòmics.

Es basa sobretot en aprofitar les propietats quàntiques de:

- **Estadística quàntica** – en electrònica
- **Coherència** – en làsers
- **Superposició** – en rellotges atòmic, però a nivell de sistemes de molts àtoms

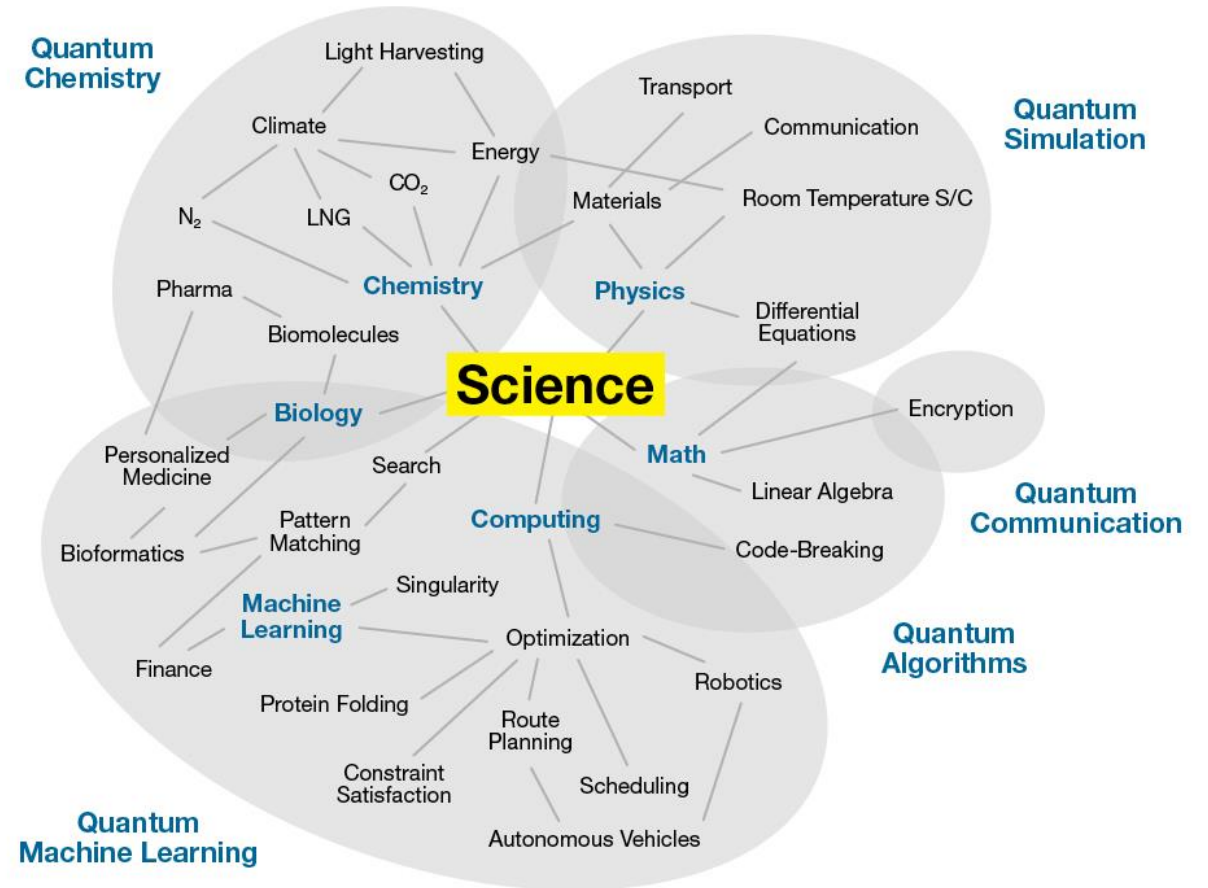
## Segona revolució

La segona revolució quàntica aprofita **les noves capacitats tècniques per manipular la matèria a nivell quàntic individual** (un fotó, un àtom, un electró) l'entrellaçament per aprofitar de manera intencionada les propietats quàntiques de:

- **Superposició** – ara, a nivell individual (un fotó, un àtom, un electró, una molècula)
- **Entrellaçament** – amb poques partícules (*moltes per a ordinadors quàntics*)

# Una revolució en marxa

## Quantum Computing Use Cases



Font: Gartner (2017)



# Una revolució en marxa

IBM

Google

Microsoft

QILIMANJARO  
QUANTUM TECH



PASQAL

aws

QUANTINUUM



BASF  
We create chemistry

BOSCH  
Robert Bosch Venture Capital GmbH

Roche

gsk

Qubit  
pharmaceuticals

Morgan Stanley

BARCLAYS

Standard Chartered

BCG

BAE SYSTEMS

Quantum Computing

AIRBUS

Honeywell



BT



Quantum Communication

[dstl]



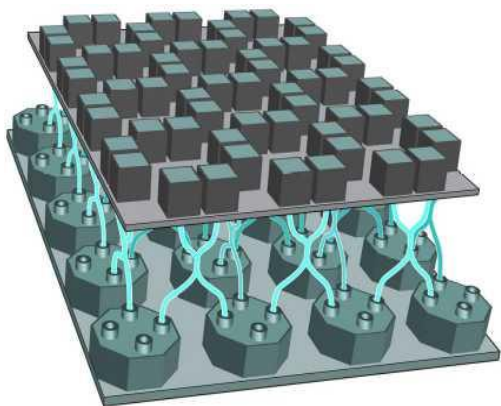
Zurich Instruments

Gartner

Font: Gartner (2017)

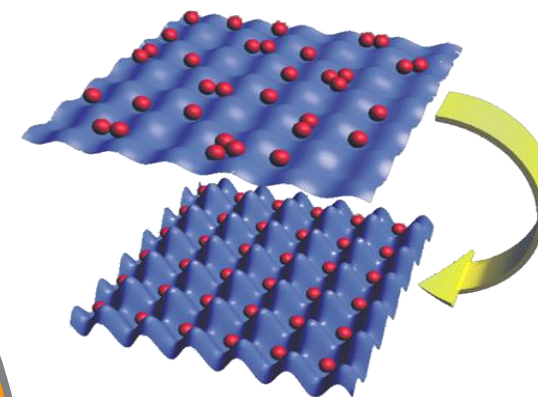
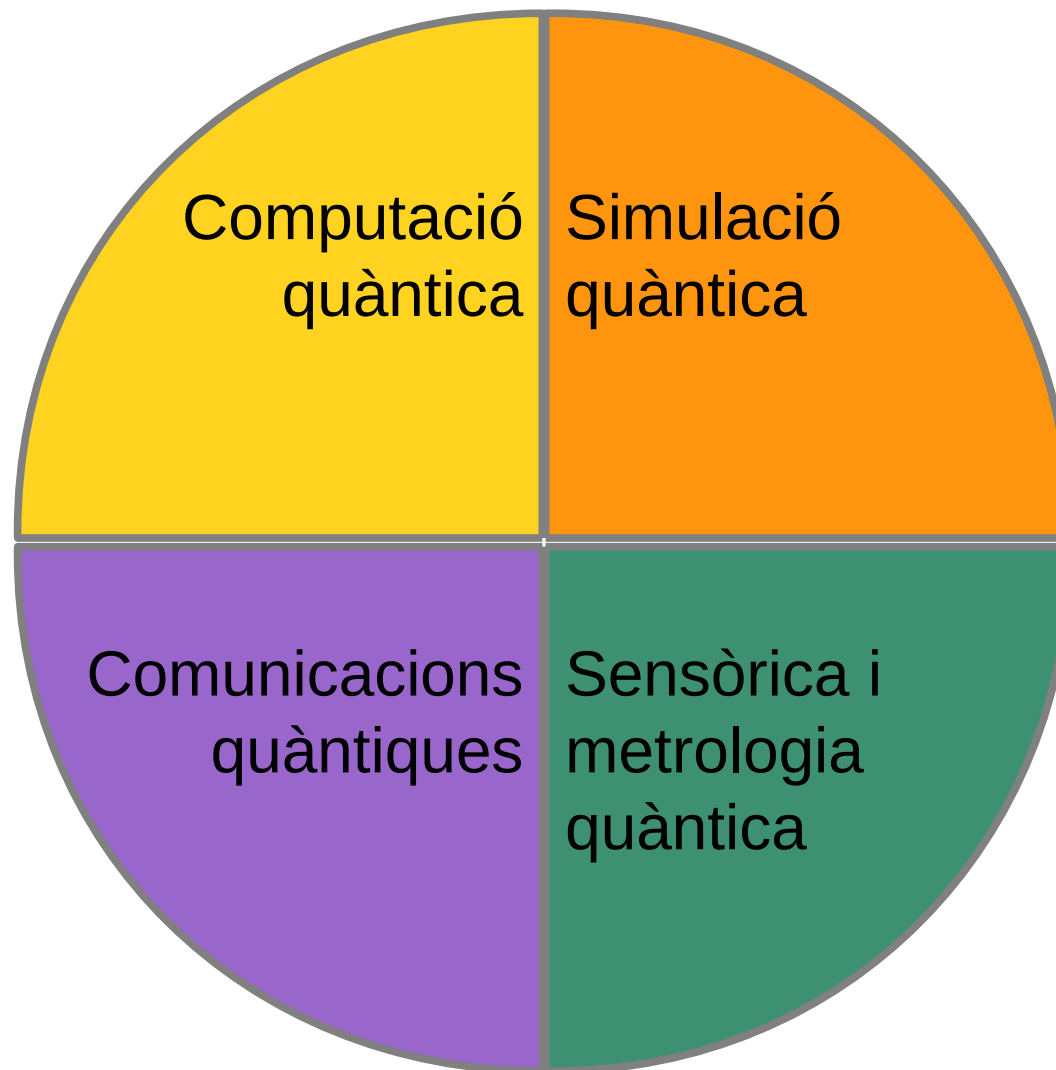


# Quatre verticals tecnològics



NQIT/U. Oxford

NQIT/U. Oxford

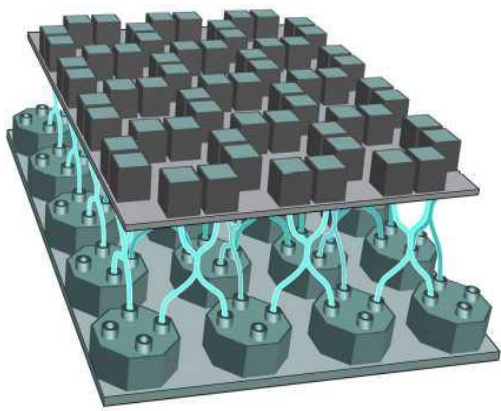


LMU/MPQ

U. Nottingham



# Quatre verticals tecnològics



NQIT/U. Oxford

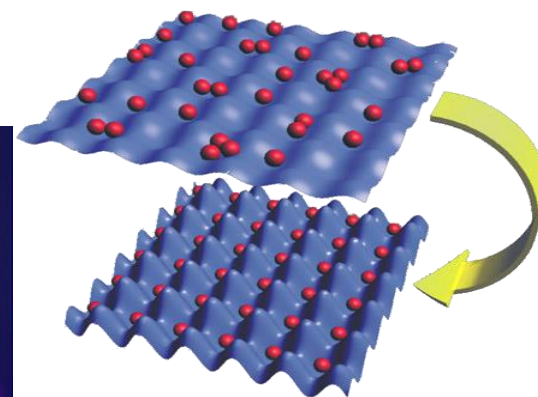
NQIT/U. Oxford



**THE QUANTUM FLAGSHIP**

European Commission

- 2016 anunciat
- 2018 inici
- 10 anys durada
- 1000 M€ (1 GEUR)
- [www.qt.eu](http://www.qt.eu)

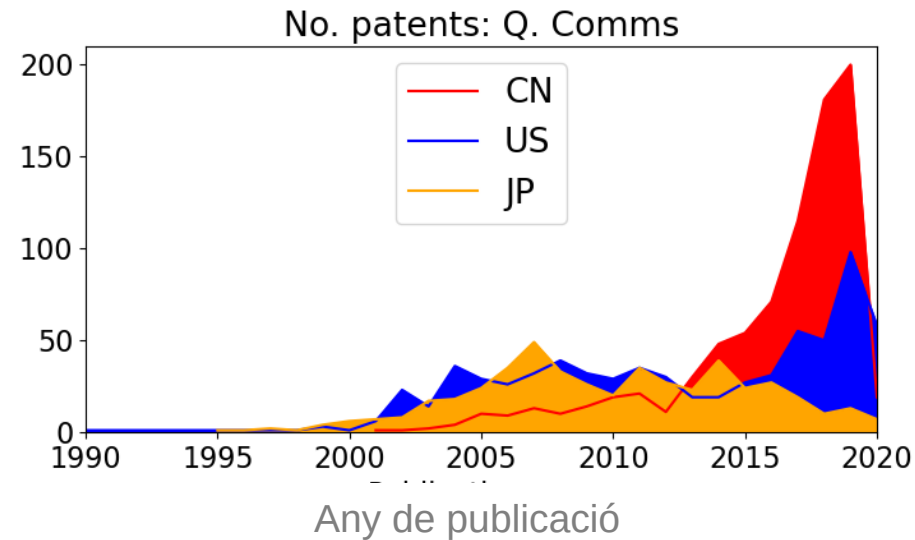
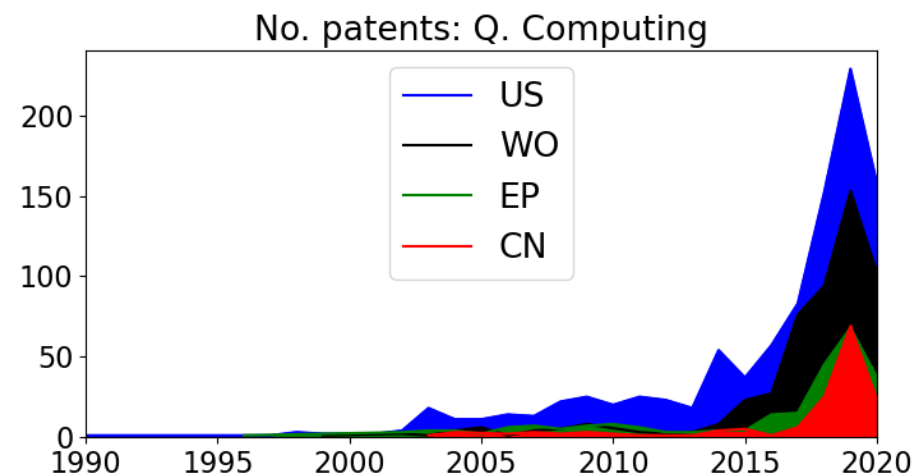
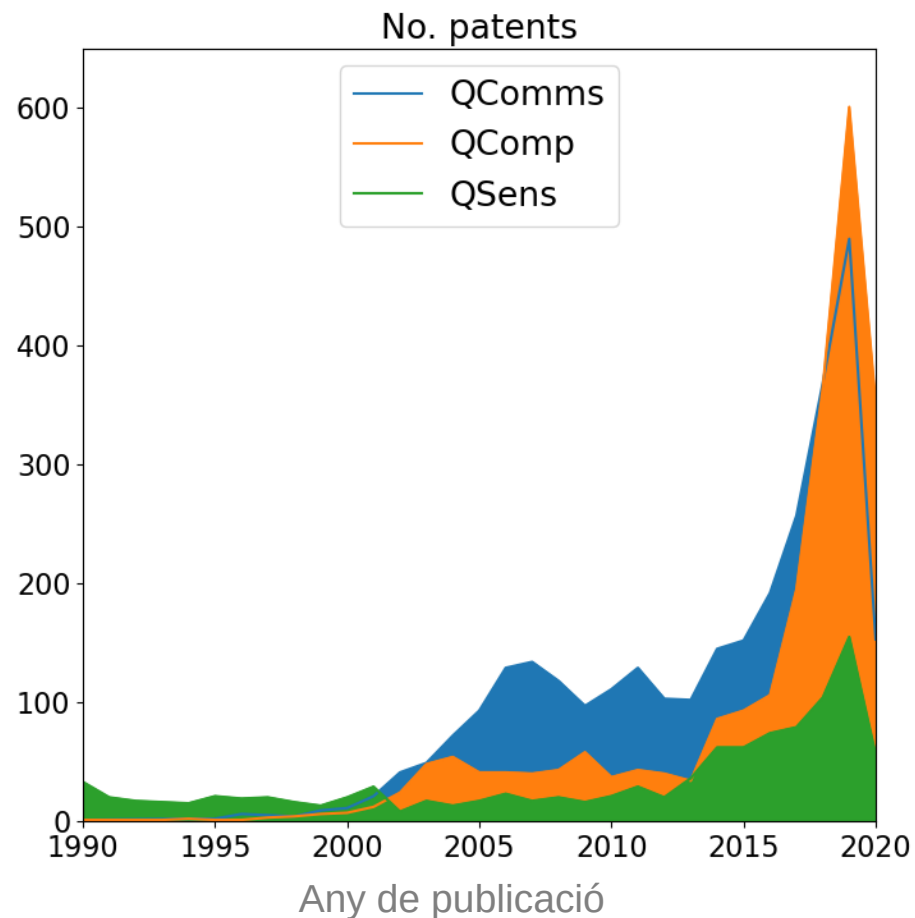


LMU/MPQ

U. Nottingham



# Patents quàntiques



Dades: Espacenet (EPO), 6483 patents (1967-2020)

- G06N\*: 2339
- q. crypto\*: 2997
- q. sens\*: 1147



# Entendre les paradoxes és important per a la tecnologia

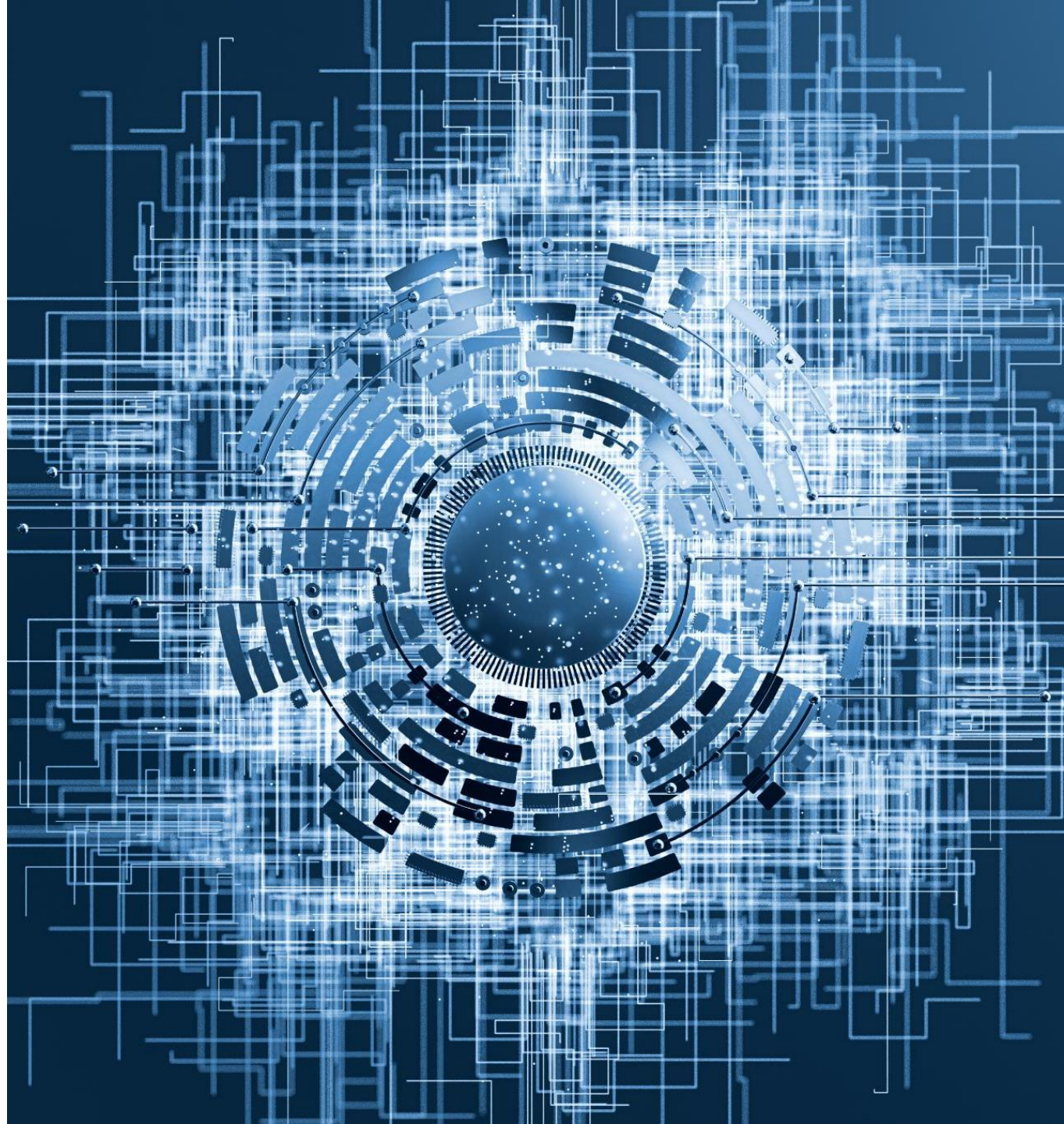
## Importància de les paradoxes quàntiques

Entendre les paradoxes quàntiques és crucial per desbloquejar el potencial de les tecnologies quàntiques de manera efectiva.



## Tecnologies quàntiques fiables

Comprendre paradoxes ajuda a desenvolupar dispositius quàntics fiables utilitzats en computació, comunicació i detecció.





# Introducció als bits quàntics (qubits)

## Visió general de Quantum Bits

Els qubits representen l'equivalent quàntic dels bits clàssics, essencials per a la computació quàntica.

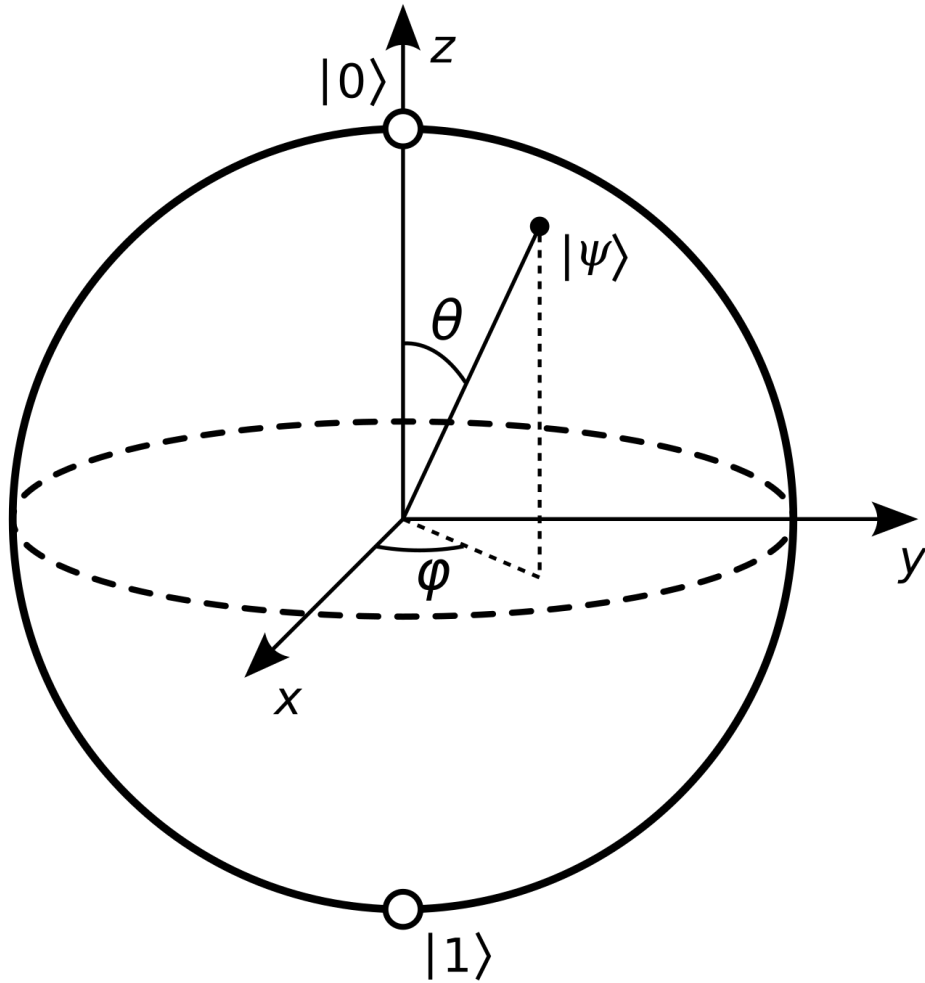
## Principi de superposició

Els qubits poden existir en superposició, permetent múltiples estats simultàniament per a una computació millorada.

## Fundació d'Informàtica Quàntica

Els qubits formen la base bàsica dels ordinadors quàntics, permetent una potència computacional molt superior.





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

# Qubits versus bits clàssics: superposició i entrellaçament

## Conceptes bàsics de bits clàssics

Els bits clàssics representen les dades com a 0 o 1, limitant el processament a estats definits.

## Superposició quàntica

Els qubits poden existir en diversos estats simultàniament a través de la superposició, permetent càlculs paral·lels.

## Entrellaçament quàntic

L'entrellaçament enllaça els qubits de manera que els seus estats són interdependents, millorant la resolució de problemes complexos més enllà dels mitjans clàssics.



Lov Grover (Columbia U.)

# Computació quàntica: complexitat computacional i algoritmes quàntics

## Algoritme de Grover

Permet trobar **ràpidament** un element en una llista desordenada

classic:  $t \propto N$

p.ex.  $10^6$  passos

Grover:  $t \propto \sqrt{N}$

p.ex.  $10^3$  passos

## Algoritme de Shor

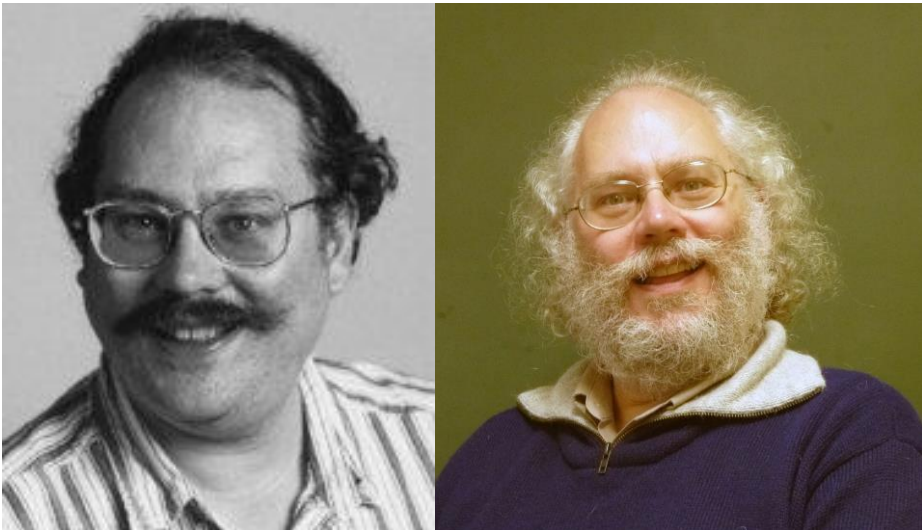
Permet factoritzar un nombre enter **molt ràpidament**

classic (GNFS):  $t \propto \exp \left( 1.9(\log N)^{1/3}(\log \log N)^{2/3} \right)$  sub-exponencial

Shor:  $t \propto (\log N)^2(\log \log N)(\log \log \log N)$  "polinomial"

Per un número de 2048 bits:

- Clàssic: complexitat  $\sim 3 \times 10^{53}$  operacions [@1 GHz:  $10^{37}$  anys]
- Shor: complexitat  $\sim 160$  milions d'operacions [@1 MHz:  $< 3$  min]



Peter Shor (1998/Bell Labs- actual/MIT)



## CLINT EASTWOOD



## Computació quàntica: el bo, el lleig i el dolent

- **El Bo:** Permeten resoldre certs problemes numèrics molt més ràpidament – moltes possibles aplicacions ☐
- **El Dolent:** Això de (no poder) factoritzar és la base de la criptografia que protegeix les nostres comunicacions electròniques (email, whatsapp, pagaments amb targeta, etc.) 😱
- **El Lleig:** Les dificultats tècniques existents per construir aquests ordinadors quàs
  - Fragilitat de superposició i l'entrellaçament ("decoherència")
  - Número de qubits (millions) i passos (milers-milions) requerits
- **El Guapo:** Les tecnologies molt diverses amb què els estem intentant constuir: circuits superconductors, ions atrapats, fotons, àtoms neutres en xarxes òptiques, molècules polars, centres Nitrogen-vacant en diamants...



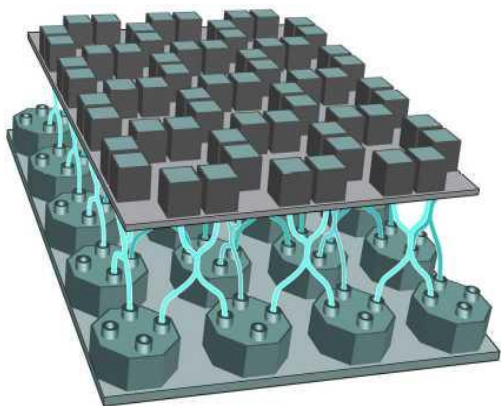
**Les noves tecnologies quàntiques  
– i el paper de les companyies  
emergents catalanes**



## Què en penseu...?

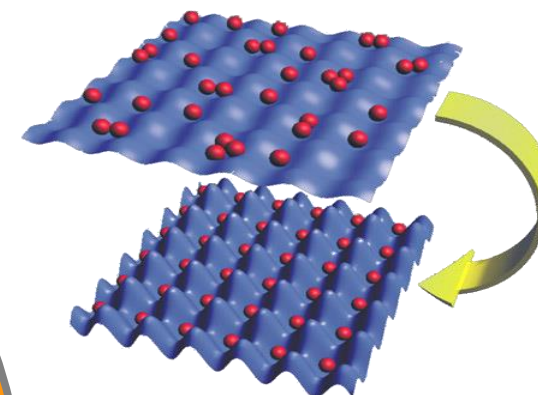
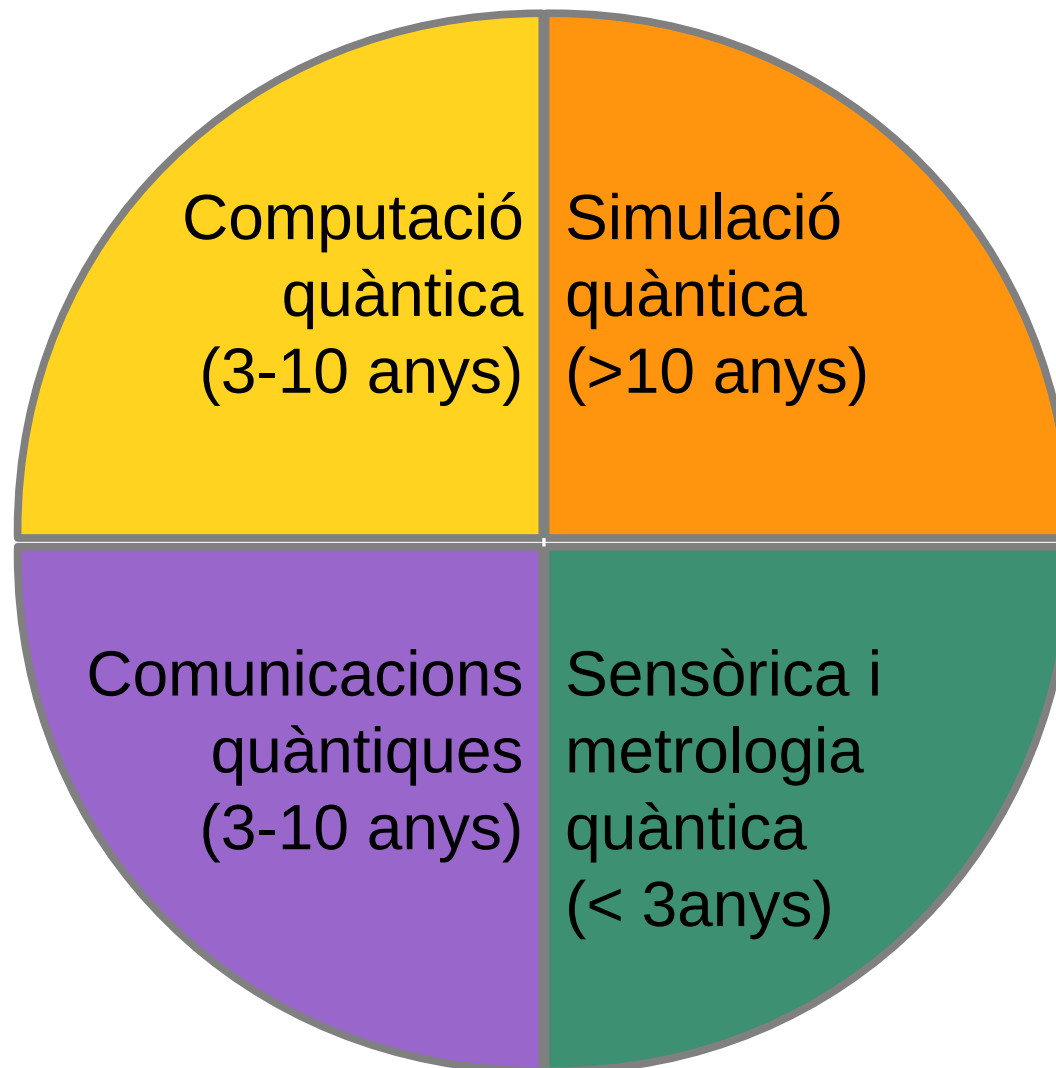
- Quantes empreses catalanes es dediquen a les tecnologies quàntiques “de segona generació”?
- Quants llocs de treball generen?

# Quatre verticals tecnològics



NQIT/U. Oxford

NQIT/U. Oxford



LMU/MPQ

U. Nottingham



D

# On impactaran les tecnologies quàntiques?

| Tecnologia                      | Comunicacions Q                                                                                                                    | Computació Q                                                                                                                          | Simulació Q                                                                                                                           | Sensòrica Q                                                                                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oportunitats, beneficis, riscos | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pèrdua de dades</li> <li>• Intercepció de comunicacions privades</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solucions més ràpides</li> <li>• Solucions més acurades</li> <li>• Sostenibilitat</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Processos industrials més ràpids i segurs</li> <li>• Simulació de molècules grans</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Detecció d'objectes</li> <li>• Mesures EM</li> <li>• Mesures de gravitació</li> </ul>               |
| Casos d'ús                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Criptografia postquàntica (PQC)</li> <li>• Distribució quàntica de claus (QKD)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Predicció de producció/ vendes</li> <li>• Optimització en logística</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descobriment de molècules –nous medicaments, nous materials</li> </ul>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Magneto-encefalografia</li> <li>• Inspecció de paquets (aeroport)</li> <li>• Construcció</li> </ul> |
| Quan?                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PQC: &lt;5 anys</li> <li>• QKD: &gt;10 anys</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optim: 3-5 anys</li> <li>• QML: &gt;5 anys</li> </ul>                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt;10 anys</li> </ul>                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt;3 anys</li> </ul>                                                                               |



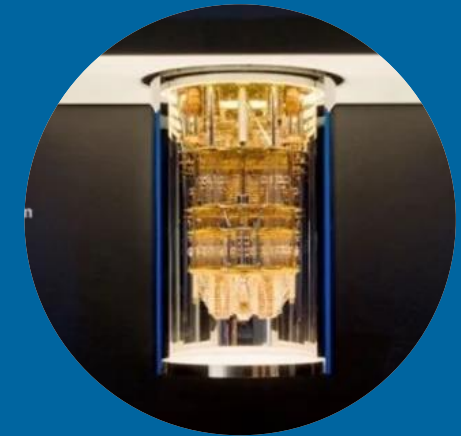
# Què és la computació quàntica?

**La computació quàntica és una manera radicalment nova de processar informació**

Fa servir les lleis de la física quàntica per manipular la informació de maneres noves.

Canviarà *dràsticament* com fem *alguns* càlculs:

- Permetrà resoldre alguns problemes molt més ràpid
- Permetrà resoldre alguns problemes avui irresolubles
- Altres possibilitats que encara no hem imaginat



IBM Quantum System One

# «Una manera radicalment nova de processar informació»

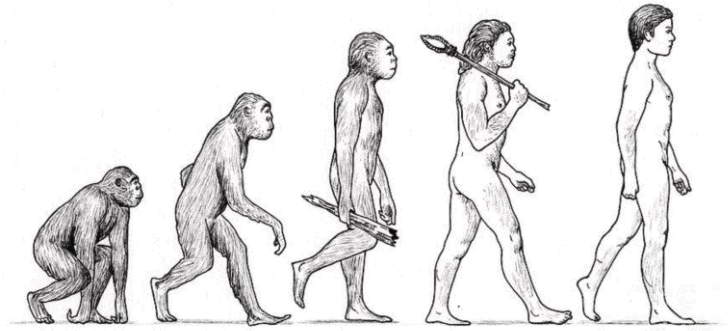


Comptant amb els dits



**Abacus (2700 BC)**

- Comptabilitat



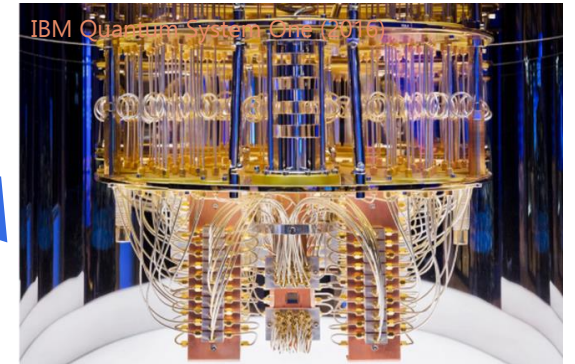
Karen Humpage / Evolution of Man / Getty Images



Premeditated/Wikimedia

## Ordinadors electrònics (1940s)

- **Bits + Portes: AND, XOR...**
- Desencriptar *Enigma*
- Trajectòries de projectils
- ...
- Powerpoint
- Tiktok



## Ordinadors quàntics (2016-)

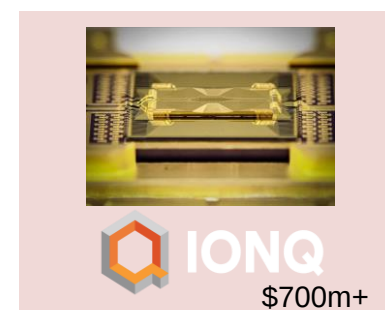
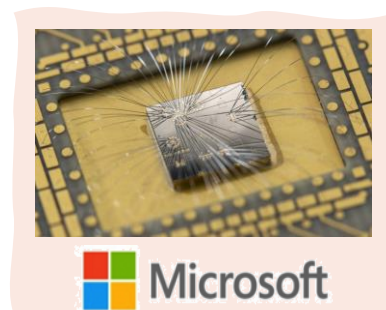
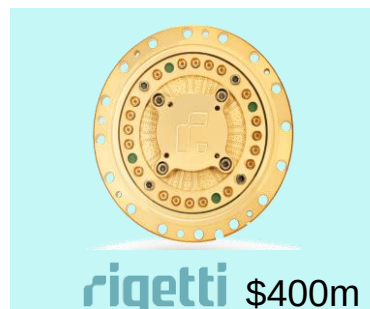
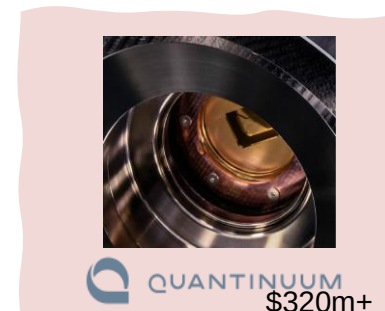
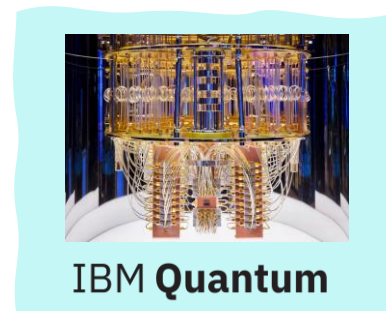
- **Qubits + Portes quàntiques: H, X, T...**
- Trencar la criptografia RSA (Shor)
- Trobar elements en BBDD (Grover)
- Noves heurístiques per a optimització
- Química quàntica
- ...

# Mite o realitat?

## Qui és qui? Actors en l'ecosistema quàntic

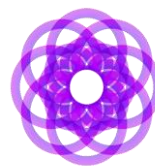
### Maquinari:

- Més de 100 ordinadors quàntics arreu del món avui!
- Inversions per 45 GUSD el 2025
- 100,000 llocs de treball el 2030
- Valor total per a clients d'uns 80-170 GUSD el 2040 (BCG)



### Programari:

1QBit



Q-CTRL



HQS  
QUANTUM  
SIMULATIONS

QILIMANJARO  
QUANTUM · TECH



PHASECRAFT



algorithmiq



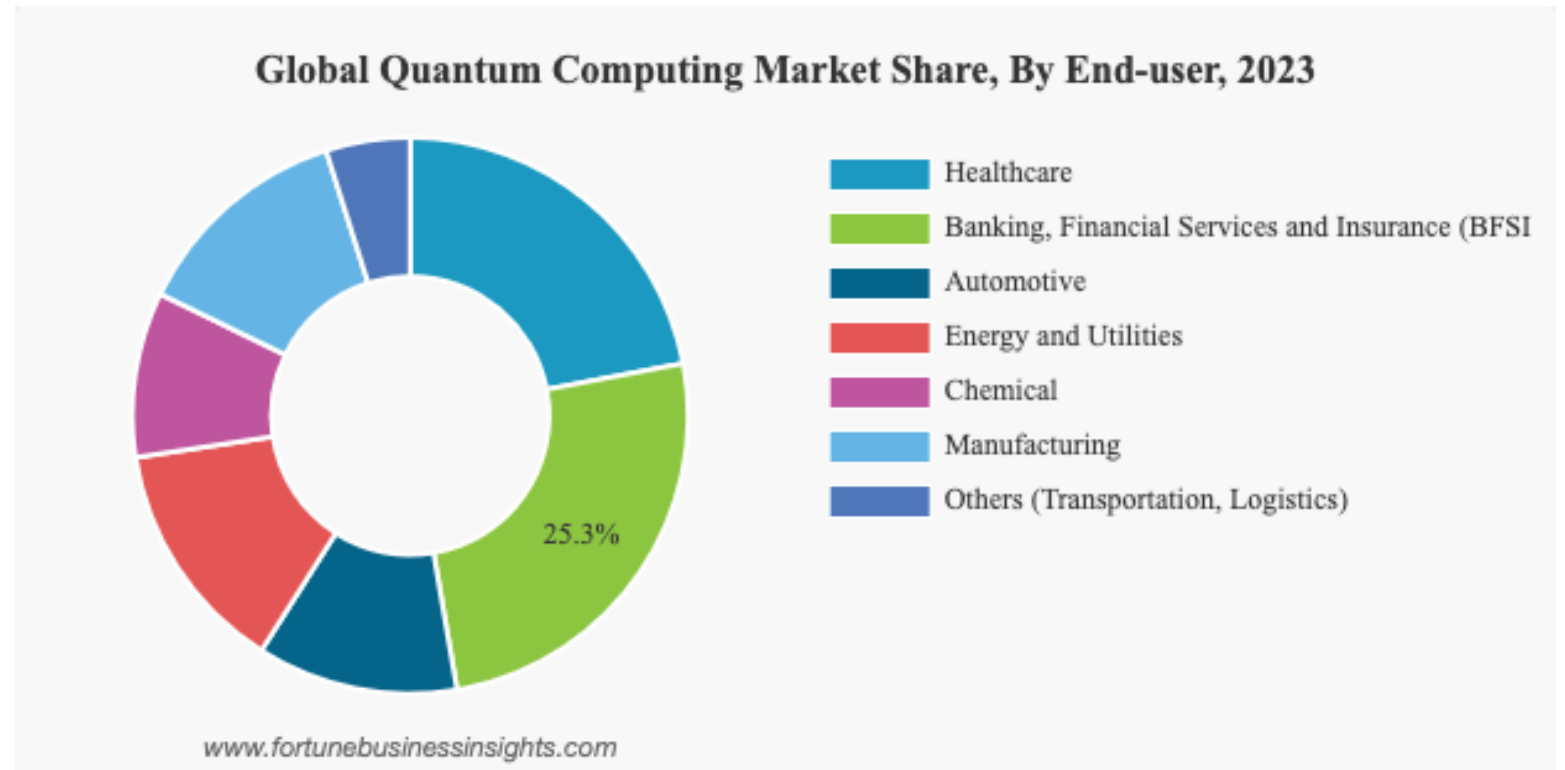
MULTIVERSE  
COMPUTING



inspirationQ  
QUANTUM NOW

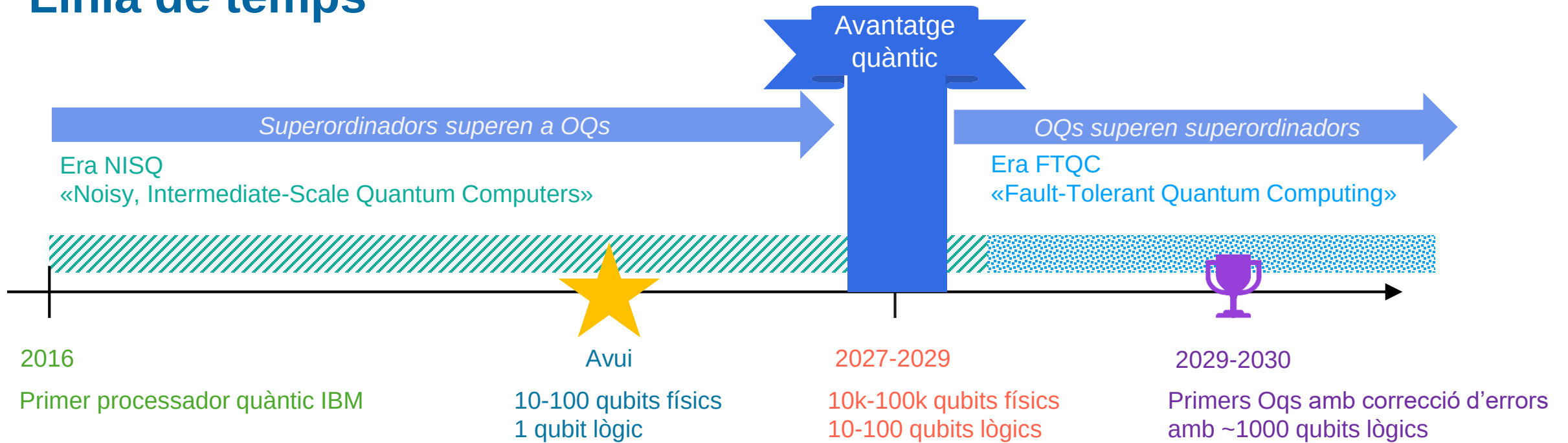
# Mite o realitat?

- Més de 100 ordinadors quàntics arreu del món avui!
- **Inversions** per 45 GUSD el 2025
- **100,000 llocs de treball** el 2030
- **Valor total per a clients** d'uns 80-170 GUSD el 2040 ([BCG](#))





# Línia de temps



Wright Flyer I (1903)



Lockheed Vega (1927)



Boeing 707 (1958)

Què és possible avui?

## Casos d'ús explorats per multinacionals «no Big Tech»

Optimització  
(3 – 5 anys)

J.P.Morgan

BBVA

Coca-Cola



BAHN



NIPPON STEEL

EDPs (dinàmica de fluids)  
(5 – 10 anys)

AIRBUS



Porsche Digital

Disseny molecular,  
ciència de materials  
(> 10 anys)

Roche

BASF

We create chemistry



Boehringer  
Ingelheim



PEPSICO



Peter Shor (actual, MIT)

# I del problema amb la criptografia, què?

## PQC vs QKD

### Algoritme de Shor

Permet factoritzar un nombre enter molt ràpidament

“Encara no tenim ordinadors quàntics, i trigarem 10 anys a tenir-ne de prou potents per implementar l’algoritme de Shor.

**Ens hem de preocupar realment o n’esteu fent un gra massa?”**

x = Temps a mantenir  
dades confidencials

z = Temps que trigarà a arribar  
un ordinador quàntic “potent”



2025

2030

2035

2040

Temps (anys)





Peter Shor (actual, MIT)

# I del problema amb la criptografia, què?

## PQC vs QKD

### Algoritme de Shor

Permet factoritzar un nombre enter molt ràpidament

“Encara no tenim ordinadors quàntics, i trigarem 10 anys a tenir-ne de prou potents per implementar l’algoritme de Shor.

Ens hem de preocupar realment o n’esteu fent un gra massa?”

**“Teorema” de Mosca:** “Si  $x+y>z$ , llavors tens un problema” (2015)

x = Temps a mantenir dades confidencials

y = Temps que cal per actualitzar els sistemes

z = Temps que trigarà a arribar un ordinador quàntic “potent”

*Dades en risc!!*

2025

2030

2035

2040

Temps (anys)





Peter Shor (actual, MIT)

# I del problema amb la criptografia, què?

## PQC vs QKD

### Algoritme de Shor

Permet factoritzar un nombre enter molt ràpidament

### Opció 1: PQC (Criptografia postquàntica)

- **Problema:** les comunicacions estan protegides per uns problemes matemàtics (com el de factorització) que són “fàcils” per als ordinadors quàntics.
- **Solució:** trobem nous problemes que no siguin fàcils per als ordinadors quàntics (ni per als convencionals)
  - Ruta liderada per EUA: nous algoritmes estandaritzats agost 2024 i que es desplegaran els propers anys (2030-2035). UE s’hi alinea, així com altres països (necessitat de compatibilitat!)

### Opció 2: QKD (Distribució quàntica de claus)

- **Solució:** oblidem-nos de confiar en problemes “difícils”. Protegim les comunicacions amb les lleis de la mecànica quàntica
  - Ruta “oficialment” descartada per EUA
  - Opció on UE està apostant fort
  - Terreny on la Xina ens porta avantatge (!)

**Les noves tecnologies quàntiques**  
– i el paper de les **companyies**  
**emergents catalanes**



## Quside: generadors quàntics de números aleatoris

- Especialitzada en **generadors quàntics de números aleatoris** (QRNGs).
- Clau per a la criptografia postquàntica segura: Contribueix a la **ciberseguretat del futur**
- **Spin-off de l'ICFO** amb base tecnològica avançada.
- CEO: Carlos Abellán
- ~100 treballadors





## Aplicacions pràctiques de la generació quàntica de números aleatoris

- Essencial per a criptografia postquàntica robusta.
- Millora la seguretat en transaccions digitals.
- Permet la generació de claus imprevisibles.
- «[NIST and Partners Use Quantum Mechanics to Make a Factory for Random Numbers](#)» (11 juny 2025)





## Qilimanjaro: ordinadors quàntics «made in Barcelona»

- Desenvolupa ordinadors quàntics analògics des de Poblenou (BCN).
- Ha aportat dos ordinadors quàntics al Barcelona Supercomputing Center (BSC).
- [Spin-off de la UAB](#) amb fort vincle acadèmic.
- Impulsa la computació quàntica a nivell local i internacional.
- CEO: Marta Estarellas. ~70 treballadors.
- [«El BSC presenta el primer ordinador quàntic d'Espanya desenvolupat amb tecnologia 100% europea»](#) (6 feb 2025)

# Computació analògica quàntica: el cas de Qilimanjaro

- Aposta per ordinadors quàntics analògics més accessibles.
- Facilita simulacions complexes en ciència i indústria.
- Col·laboració amb centres de supercomputació de renom.
- Contribueix a expandir l'ús de la computació quàntica.





# LUXQUANTA



## LuxQuanta: líder en distribució quàntica de claus

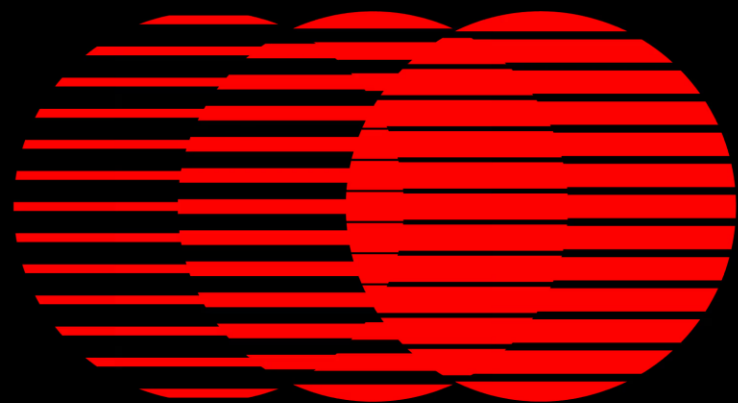
- Especialitzada en **distribució quàntica de claus (QKD)** de variable contínua
- La QKD garanteix l'**establiment de claus ultra-segures** amb les lleis de la quàntica – més enllà del **paradigma de la criptografia tradicional** basat en assumpcions sobre complexitat computacional.
- **Spin-off de l'ICFO** amb tecnologia pròpia.
- CEO: Vanesa Díaz. ~50 treballadors

# Tecnologies de distribució quàntica de claus amb LuxQuanta



- QKD permet comunicacions virtualment inviolables.
- Clau per a sectors amb alta demanda de seguretat.
- LuxQuanta desenvolupa solucions adaptades al mercat.
- Innovació constant per millorar la fiabilitat i l'eficiència.
- «[Monitoring a quantum network on AWS](#)» (agost 2024)
- «[LuxQuanta Launches Second-Generation NOVA LQ® Quantum Key Distribution System](#)» (4 mar 2025)



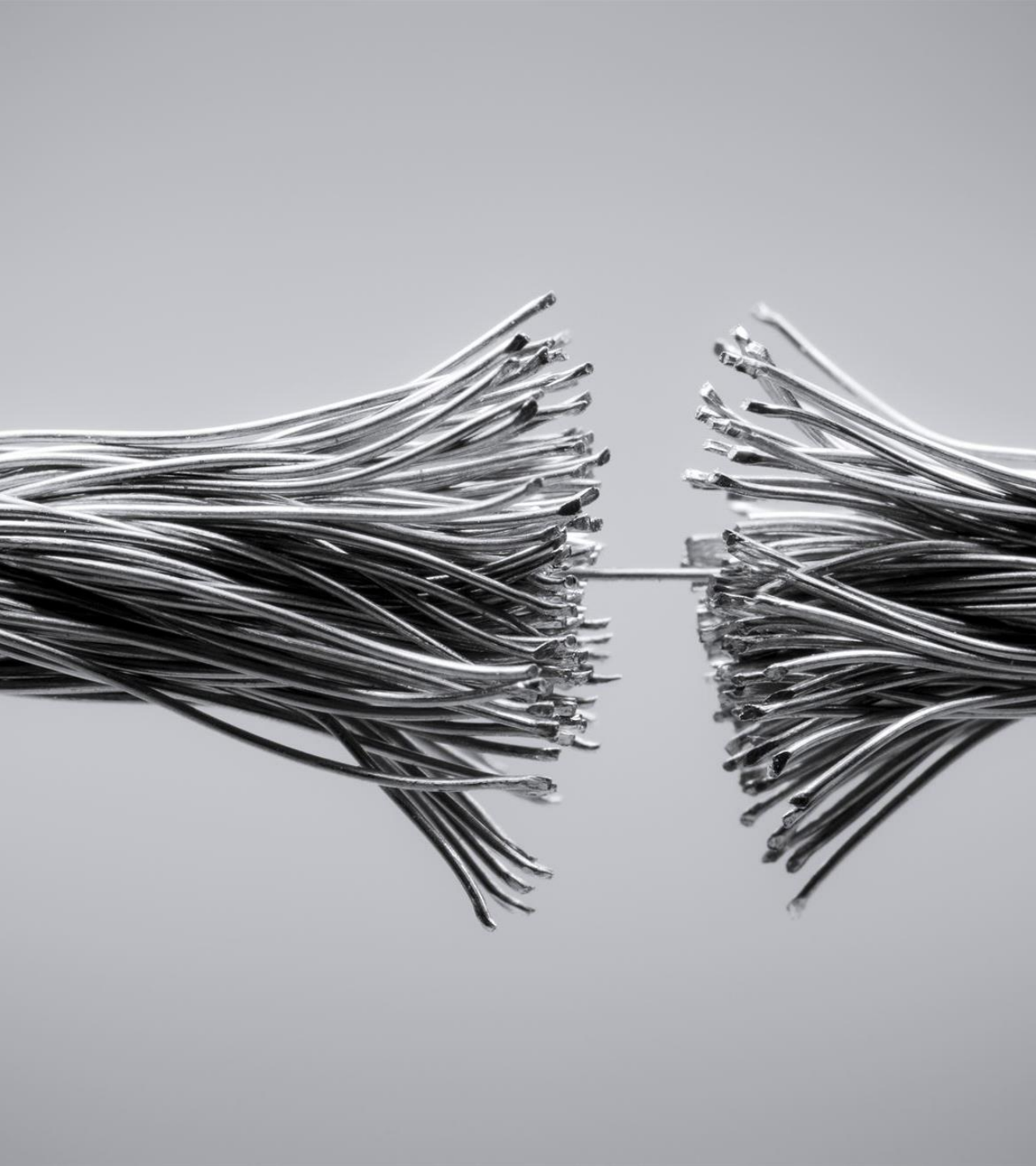


MULTIVERSE  
COMPUTING

# Multiverse Computing: programari per a computació quàntica i IA

- Especialitzada en software per a computació quàntica.
- Treballa **en computació inspirada en la quàntica**: Aplica la teoria de xarxes de tensors per a millorar models d'IA.
- Basada a Donosti.
- CEO: Enrique Lisazo. CSO: Roman Orús
- [«El Gobierno potencia la IA sostenible con la inversión de la SETT de 59,2 M€ en la empresa española Multiverse Computing»](#) (3 jun 2025)
- [«Multiverse Computing levanta 189 millones de euros en su última ronda de financiación»](#) (24 jun 2025)





# La computació inspirada en la quàntica de Multiverse

- Aplica principis quàntics a models clàssics d'IA.
- Utilitza xarxes de tensors per optimitzar càlculs.
- Contribueix a nous algorismes per a la intel·ligència artificial.
- Impulsa solucions computacionals més eficients.



## L'impacte de les empreses emergents catalanes en la quàntica

- Les spin-offs impulsen la recerca i aplicacions quàntiques
- Col·laboracions amb centres com ICFO, BSC i UAB són claus – com també ho ha de ser amb empreses clients
- Desenvolupen tecnologies de comunicacions, computació i seguretat – així com **tecnologies habilitadores**
- Contribueixen a posicionar Catalunya en l'escena global
- **Generen llocs de treball d'alt valor afegit**
- **Atrauen inversions europees i de més enllà**





# El futur de les tecnologies quàntiques a Catalunya

- Les empreses emergents són motor d'innovació i creixement
- **Col·laboracions entre acadèmia i indústria són essencials**
- **Catalunya està ben posicionada** en l'ecosistema quàntic fruit de la bona recerca i de l'atractiu de Barcelona – **cal aprofitar-ho**.
- El **suport i inversions institucionals *continuats*** fomenten el desenvolupament.
- **Formació de talent:** la Catalonia Quantum Academy i el [Màster oficial en ciència i tecnologia quàntiques](#) (UB-UAB-UPC + ICFO + BSC + IFAE + ICN2) són importants però no suficients



# 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.

# Apunts finals

## **Impacte de la ciència quàntica**

La ciència quàntica desafia la comprensió tradicional sobre el món que ens envolta.

La reflexió sobre el seu significat, també en forma de 'paradoxes', impulsa la innovació en múltiples disciplines.

## **Revolucions tecnològiques**

Les tecnologies quàntiques emergents prometen revolucionar la computació, les comunicacions i molt més.

L'èxit d'aquestes tecnologies raurà que permeïn a un nombre creixent de camps i indústries.

## **Futur de la ciència i la societat**

L'adopció d'avenços quàntics donarà forma al desenvolupament futur de la ciència i al progrés social.

Cal treballar per assegurar que hi contribueixen veus diverses (des de dins i des de fora).

## **La quàntica als Països Catalans**

Estem ben posicionat per contribuir a partir de la recerca bàsica i aplicada.

Cal una aposta forta per incentivar les carreres i les start-ups més prometedores, així com vies per a "up/re-skilling" de treballadors.

Gràcies! ☐  
Felicitats! 🙌

Interès

Atenció

Preguntes

Etc.



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