



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

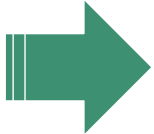


<https://www.linkedin.com/in/jordimur>



<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

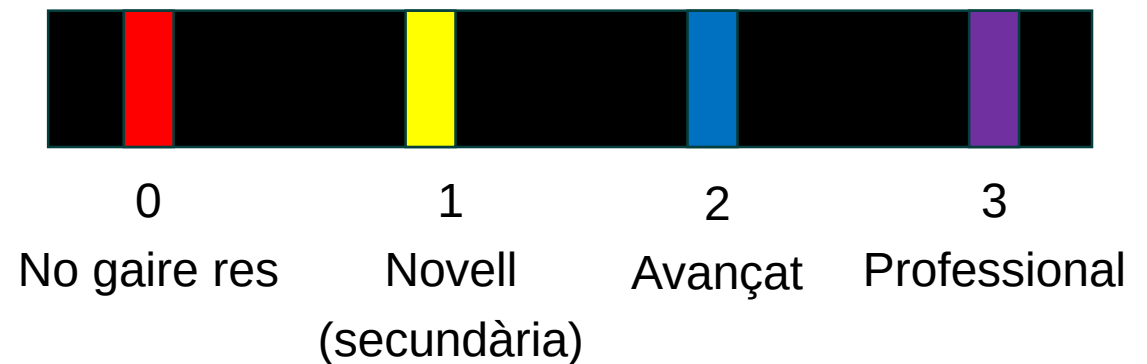
- Què us ha portat a apuntar-vos a un curs de quàntica a mig agost?





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

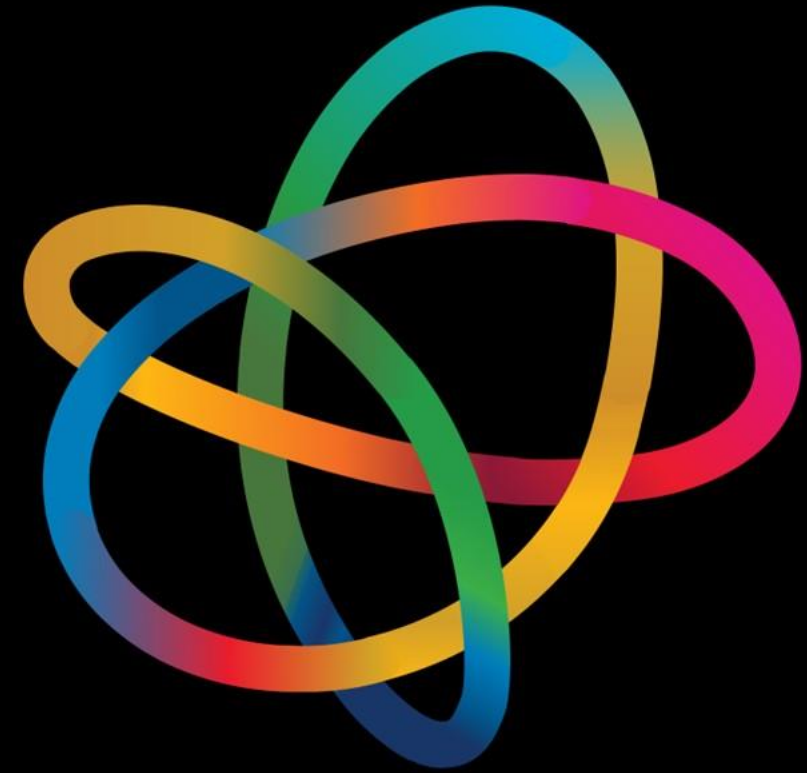
El 2025 celebrem aniversaris importants que marquen avenços en la teoria quàntica i els avenços tecnològics.

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

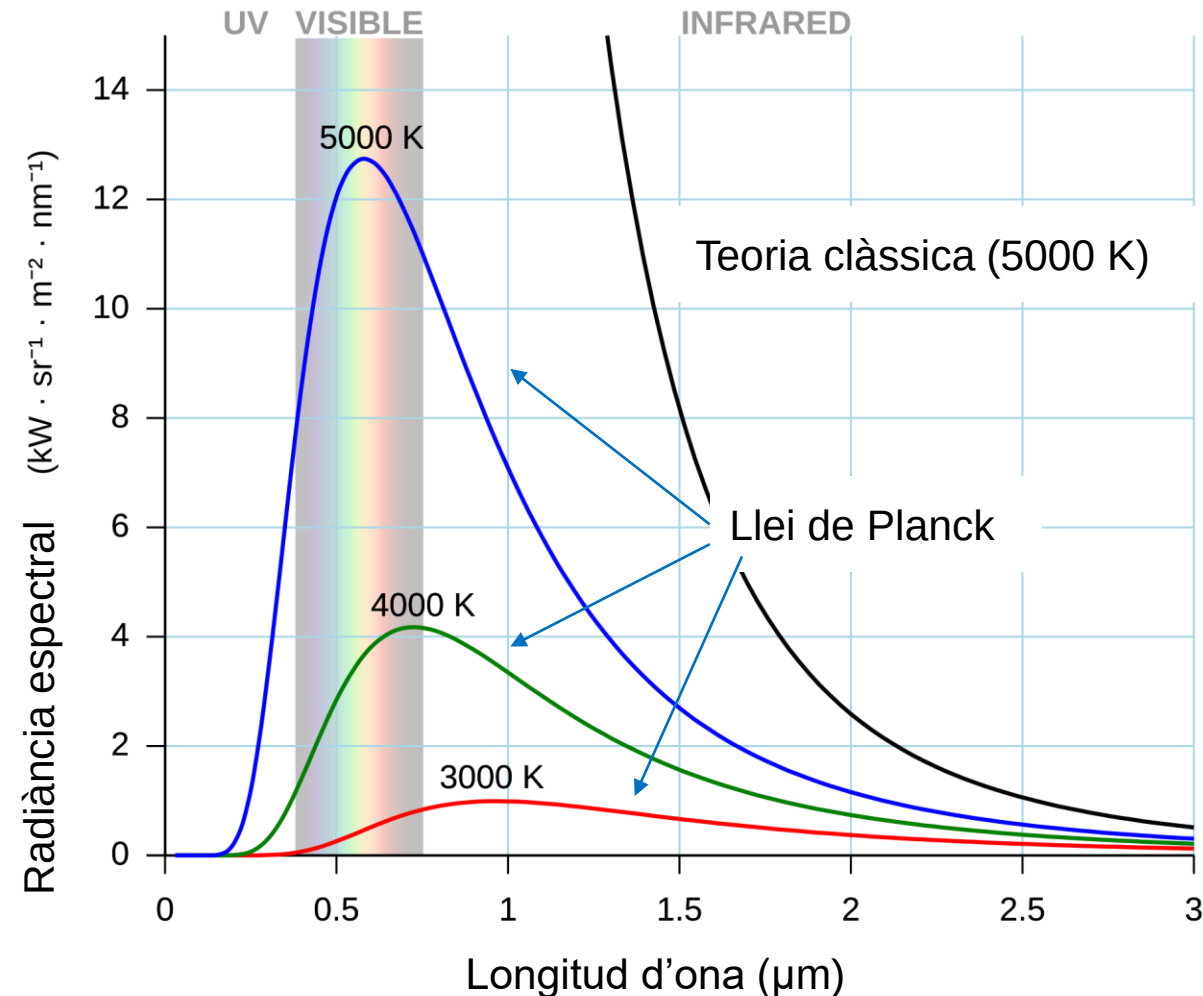
Una «idea desesperada» quantificar l'energia

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!

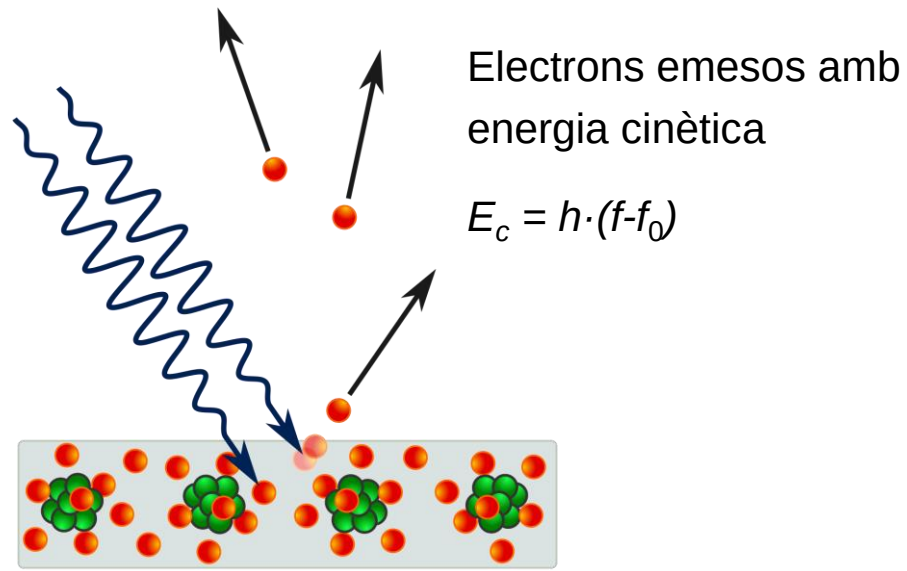


1905-1909

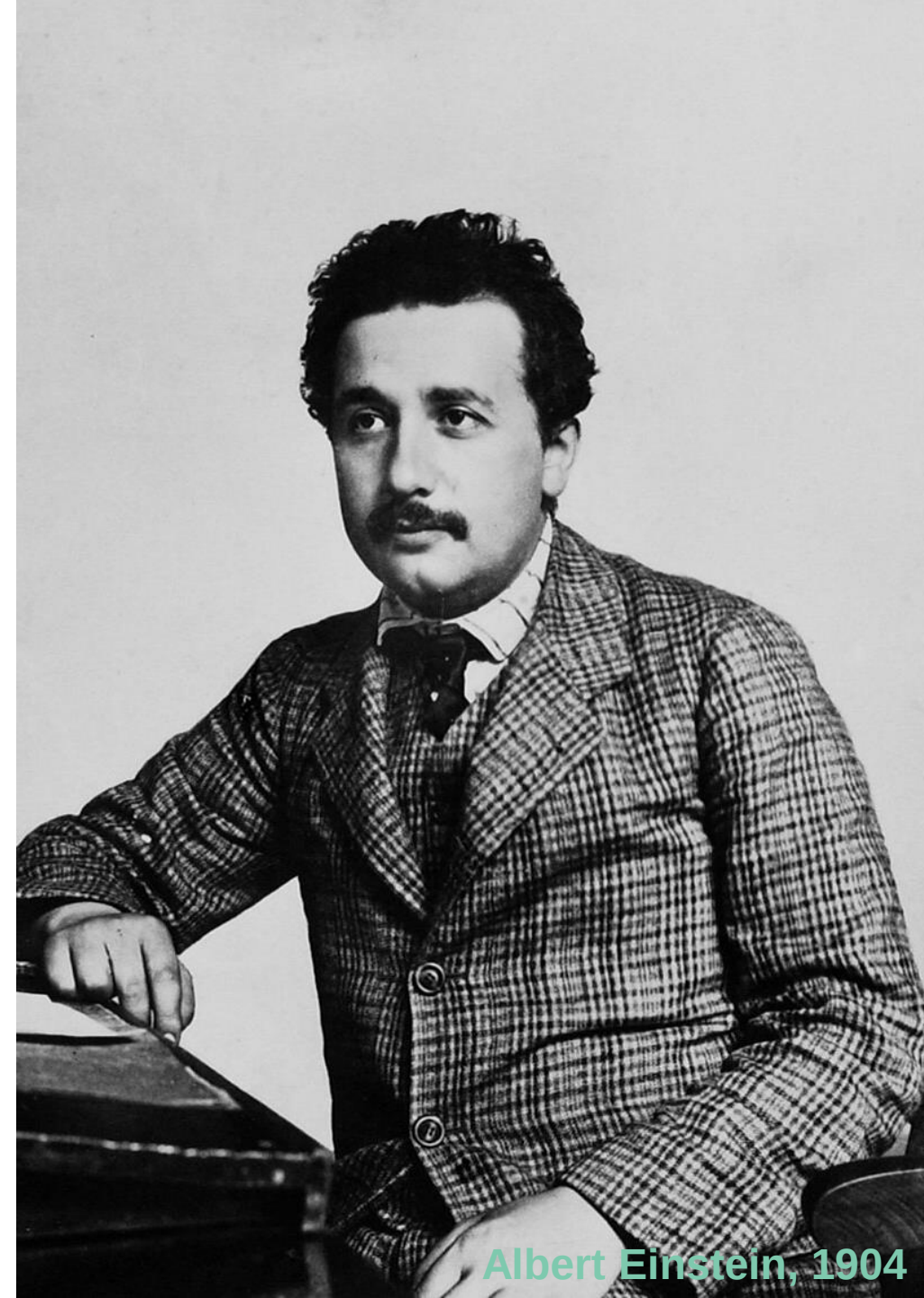
Einstein i el naixement dels fotons

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

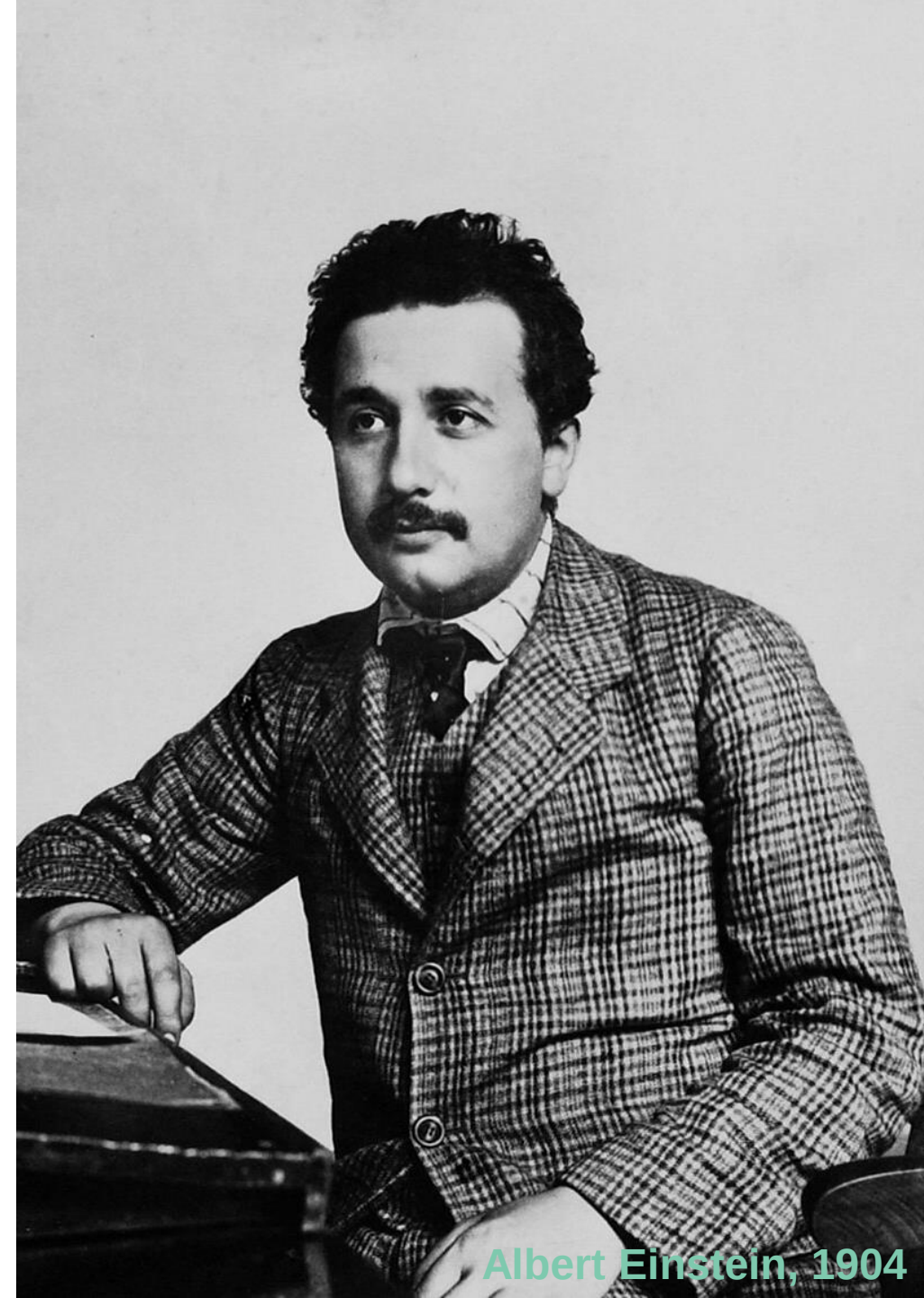
Einstein va aplicar la fórmula de Planck, $E=h \cdot f$, en un context totalment diferent: l'efecte fotoelèctric, o explicar com la llum pot fer saltar electrons d'un material.

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!

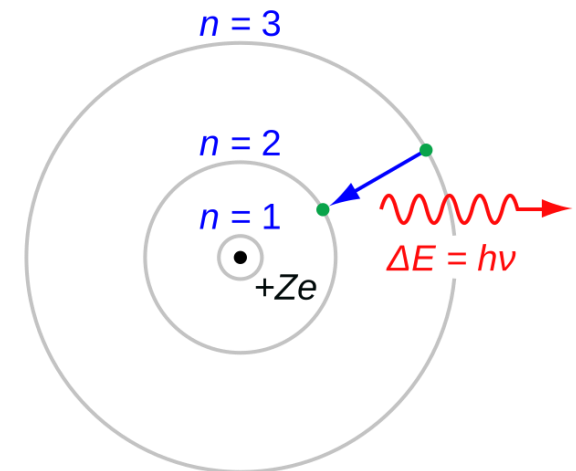
Einstein rebria el Premi Nobel per la seva innovadora explicació de l'efecte fotoelèctric l'any 1921.



Albert Einstein, 1904



Niels Bohr, 1922

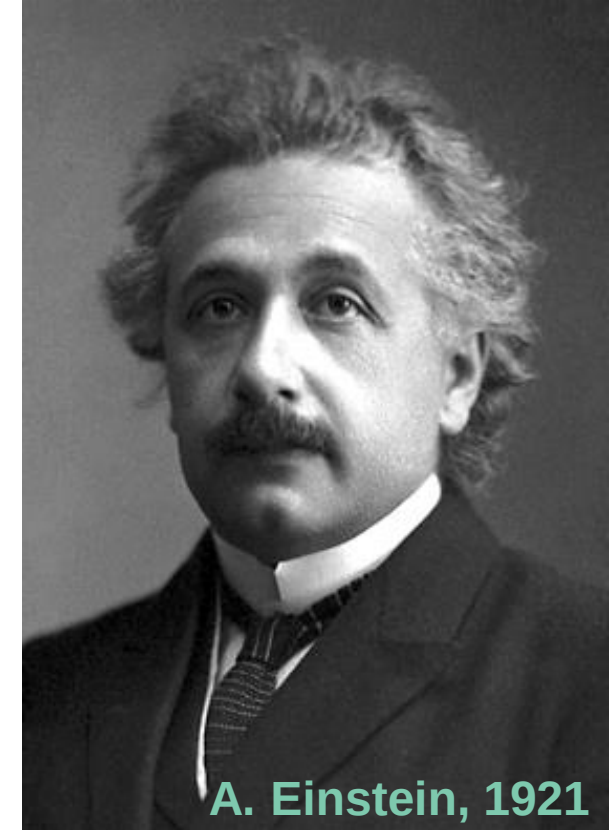


Model de l'àtom de Bohr
(Wikipedia: JabberWok)

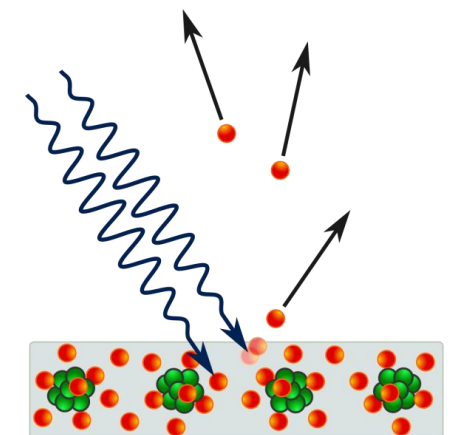
1900-1925 'Teoria quàntica antiga'

Dues escoles

Copenhagen (Bohr)		Einstein
- Nivell d'energia quantitzats - Principi de correspondència	Conceptes clau	- Dualitat ona-partícula - El fotó com a partícula
Observacions espectroscòpiques	Dóna gran importància a	Conservació de l'energia i moment
Model de Bohr	Contribucions	Efectes fotoelèctric i Compton



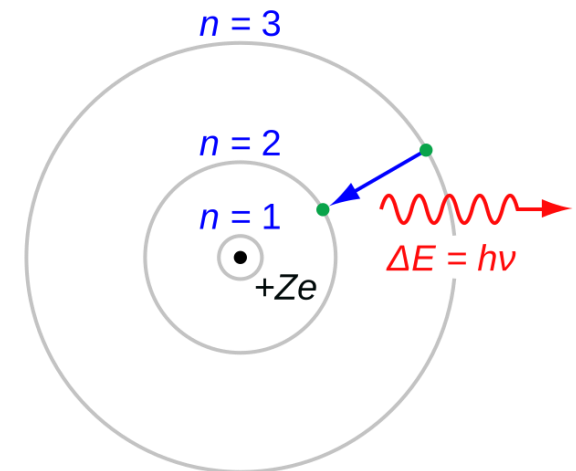
A. Einstein, 1921



Efecte fotoelèctric
(Wikipedia: Ponor)



Niels Bohr, 1922

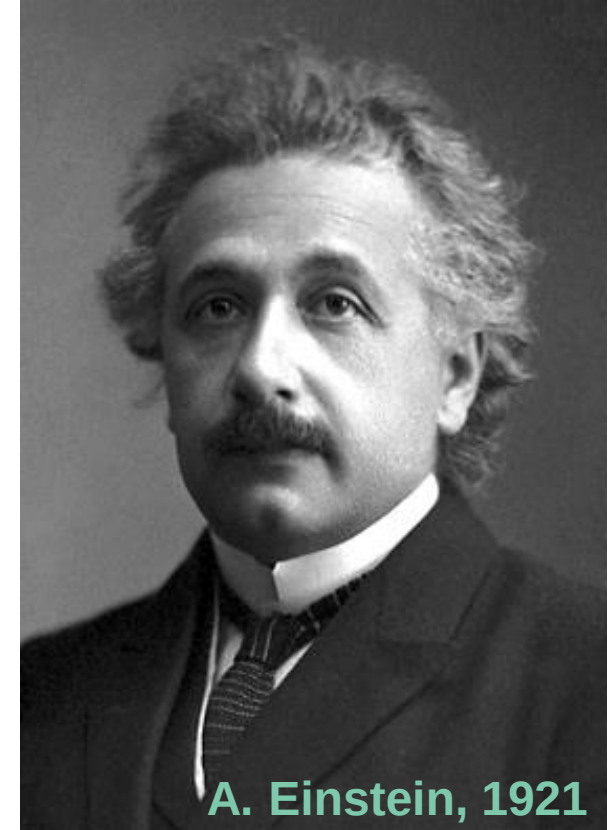


Model de l'àtom de Bohr
(Wikipedia: JabberWok)

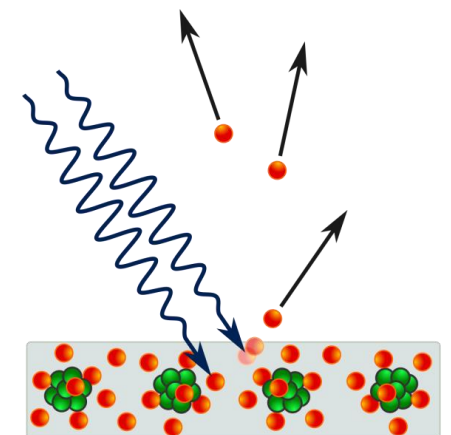
1900-1925 'Teoria quàntica antiga'

Dues escoles

Copenhagen (Bohr)		Einstein
- Nivell d'energia quantitzats - Principi de correspondència	Conceptes clau	- Dualitat ona-partícula - El fotó com a partícula
Observacions espectroscòpiques	Dóna gran importància a	Conservació de l'energia i moment
Model de Bohr	Contribucions	Efectes fotoelèctric i Compton
Fórmula de Kramers-Heisenberg (1924) per a transicions entre estats	Punt culminant	Hipòtesi de Louis de Broglie (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 λ 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:

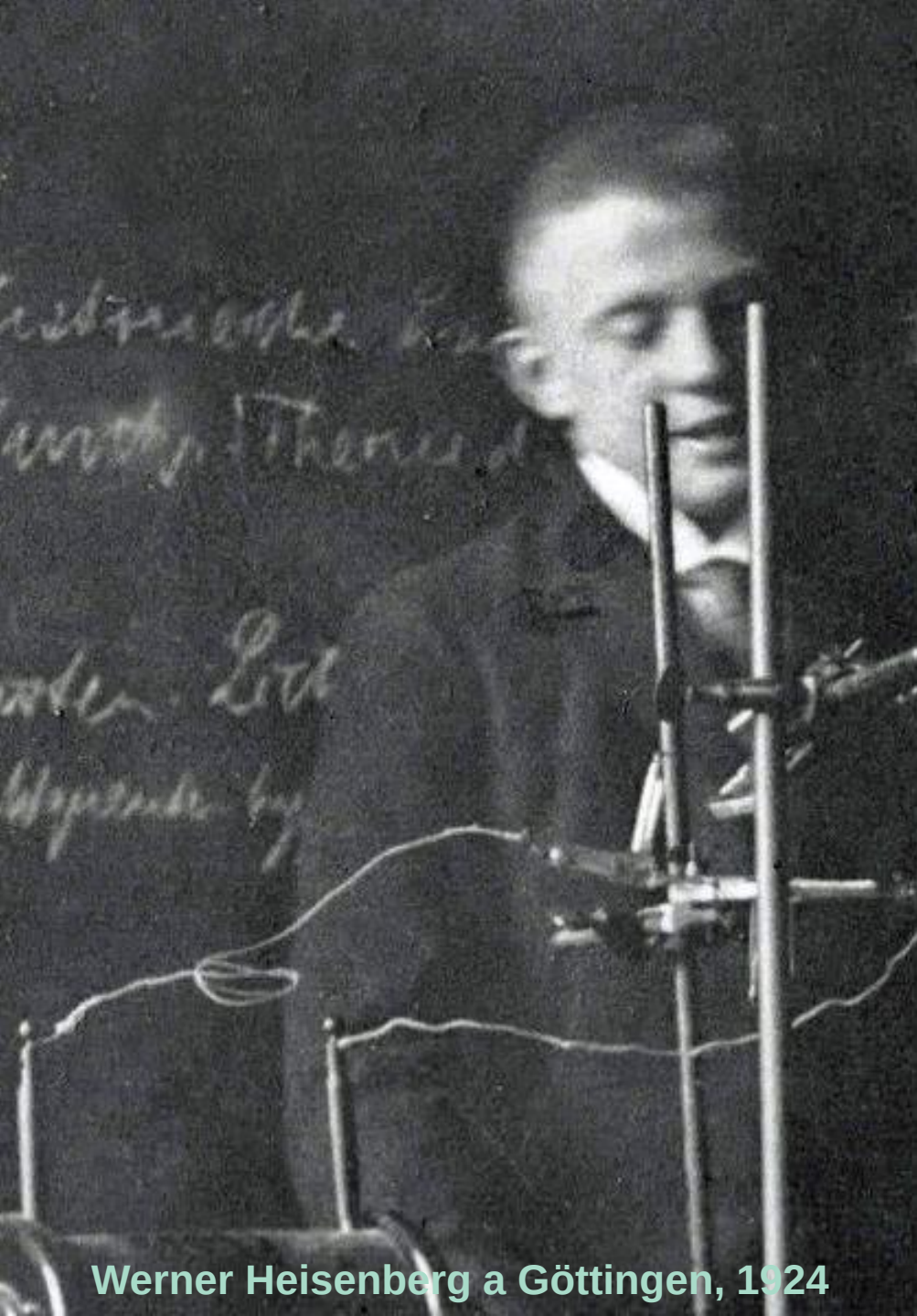
- **Nivells i energies quantitzats:** $|i\rangle$, $|n\rangle$, $|f\rangle$, E_i , E_n , E_f
- **Observacions espectroscòpiques:** “quants fotons veiem en quina direcció amb quina energia?”

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



1925 🎂

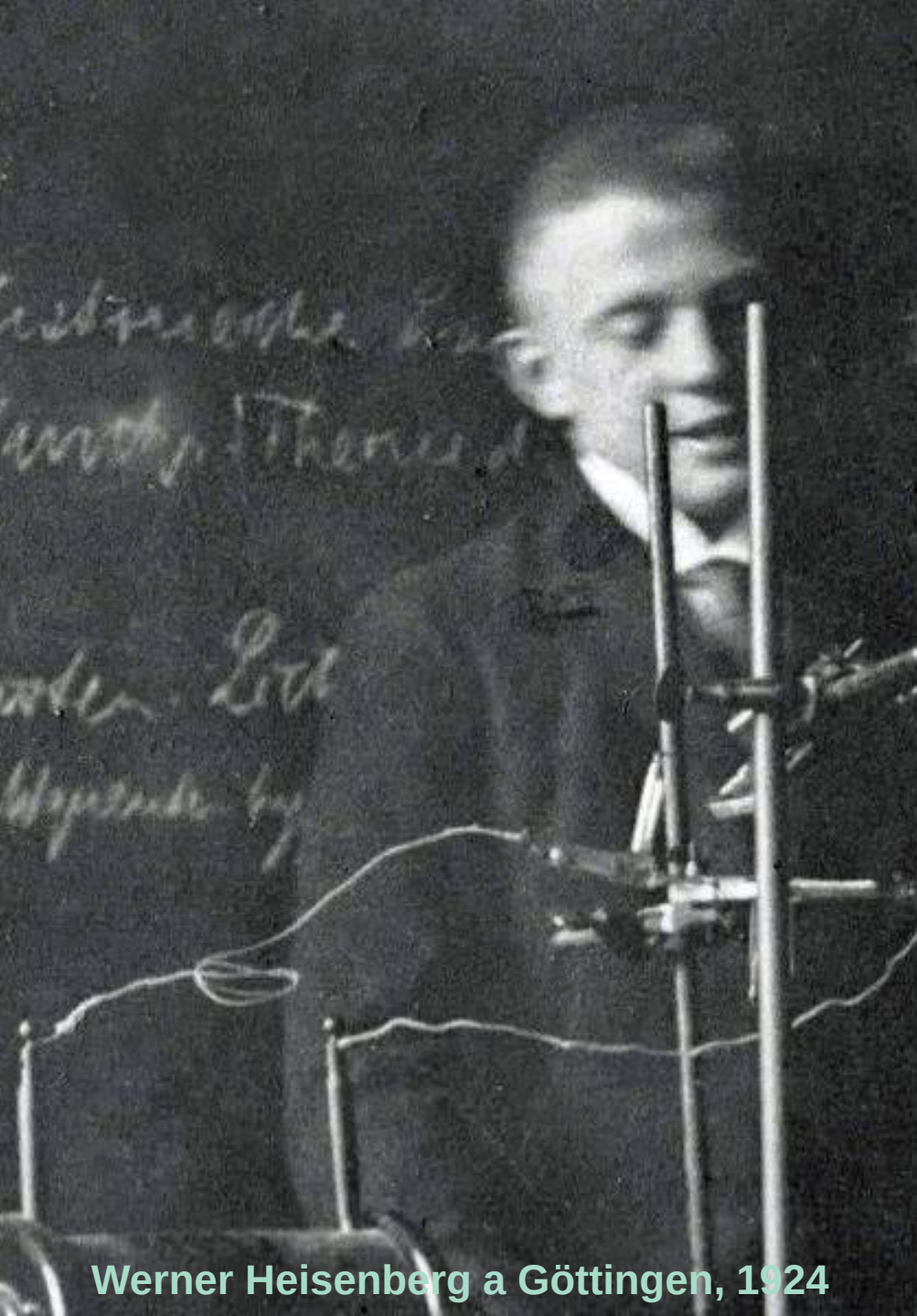




Werner Heisenberg a Göttingen, 1924

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



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 sinnvoll 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

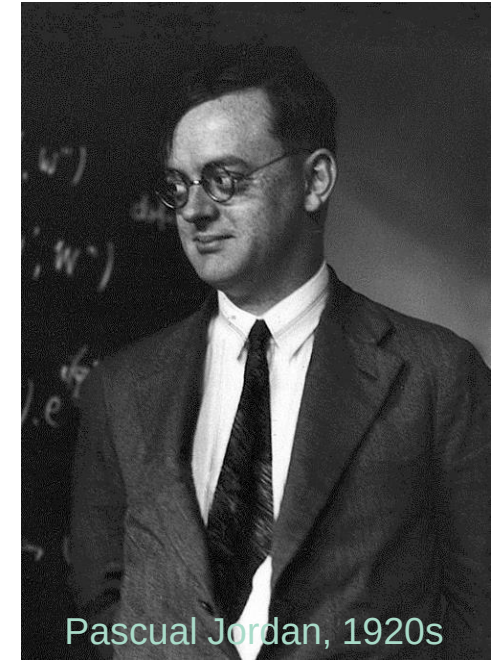
W. Heisenberg, "[Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen](#)", *Z. Phys.* 33, 879-893 (1925) (hi ha [traducció a l'anglès](#))

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 matrius 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. 1926)
 - ✓ 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
Conceptes clau	• Dualitat ona-partícula • El fotó com a partícula
Dona gran importància a	Conservació de l'energia i moment
Contribucions	Efectes fotoelèctric i Compton
Punt culminant	Hipòtesi de Louis de Broglie (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*

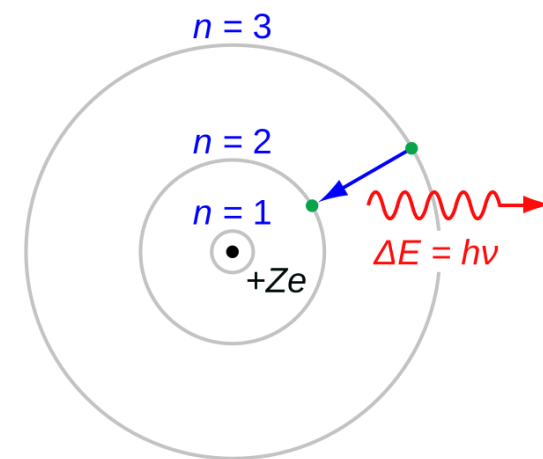
E. Schrödinger: "Quantisierung als Eigenwertproblem (I-IV)" *Ann. D. Phys.* [384, 361](#); [384, 489](#), [385, 437](#); [386, 109](#) (1926); "[An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules](#)", *Physical Review* [28](#), 1049–70 (1926)



Erwin Schrödinger, 1914



Niels Bohr, 1922

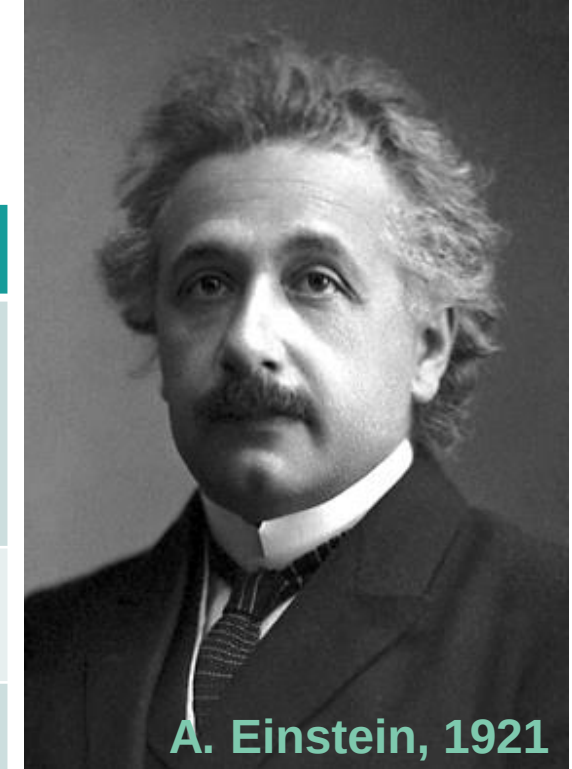


Model de l'àtom de Bohr
(Wikipedia: JabberWok)

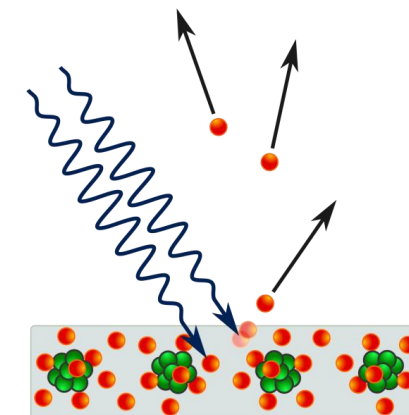
1925-1926

De 'Teoria quàntica' a 'Mecànica quàntica'

Copenhagen (Bohr)		Einstein
- Nivell d'energia quantitzats - Principi de correspondència	Conceptes clau	- Dualitat ona-partícula - El fotó com a partícula
Observacions espectroscòpiques	Dóna gran importància a	Conservació de l'energia i moment
Model de Bohr	Contribucions	Efectes fotoelèctric i Compton
Fórmula de Kramers-Heisenberg per a transicions entre estats (1924)	Punt culminant	Hipòtesi de Louis de Broglie (1924): tota partícula té associada una ona, $\lambda = h/p$
Mecànica de matrius de Heisenberg-Born-Pascual (1925)	Formulació matemàtica	Mecànica d'ones de Schrödinger (1925)



A. Einstein, 1921



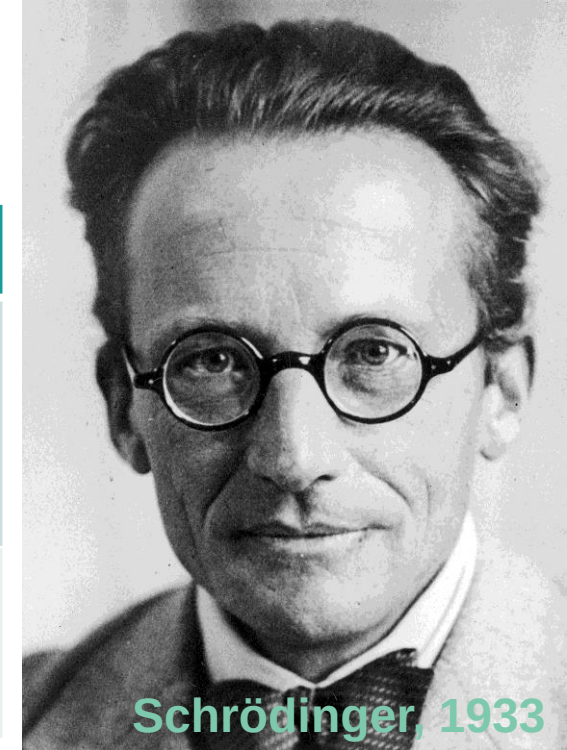
Efecte fotoelèctric
(Wikipedia: Ponor)



Heisenberg, 1933

1925-1926: Mecànica quàntica

Mecànica de matrius		Mecànica d'ones
- Nivell d'energia quantitzats - Principi de correspondència	Conceptes clau	- Dualitat ona-partícula - El fotó com a partícula
Mecànica de matrius de Heisenberg-Born-Pascual (1925)	Formulació matemàtica	Mecànica d'ones 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?

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

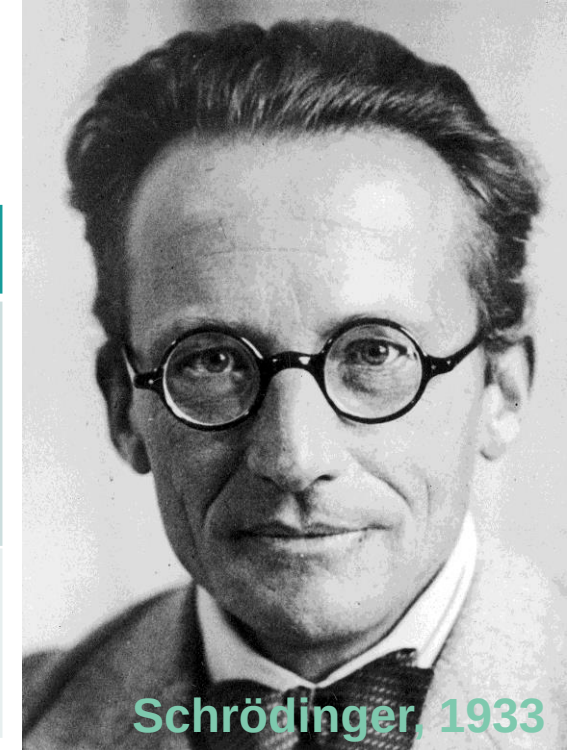
Equació de Schrödinger independent del temps



Heisenberg, 1933

1925-1926: Mecànica quàntica

Mecànica de matrius		Mecànica d'ones
- Nivell d'energia quantitzats - Principi de correspondència	Conceptes clau	- Dualitat ona-partícula - El fotó com a partícula
Mecànica de matrius de Heisenberg-Born-Pascual (1925)	Formulació matemàtica	Mecànica d'ones 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



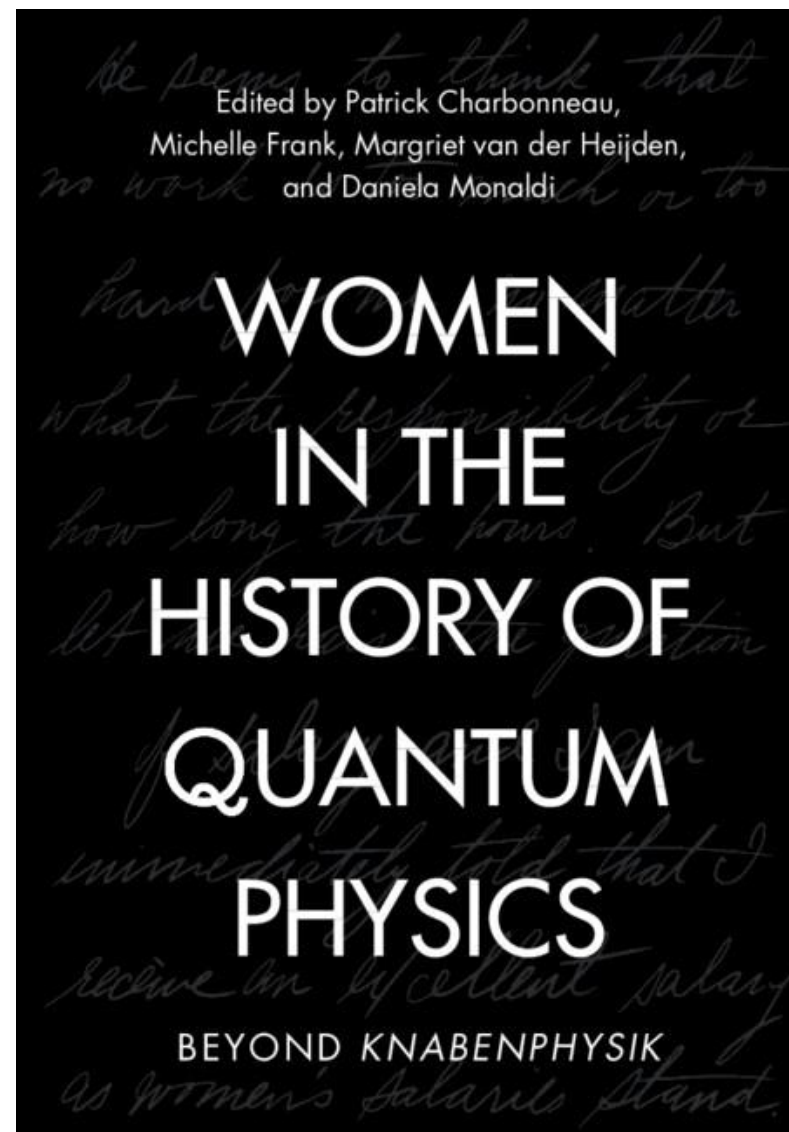
Hertha Sponer, 1913



Maria Lluïsa Canut
(Fons Canut-Amorós IME)



Satyendra Nath
Bose, 1925



Cambridge University Press (2025)