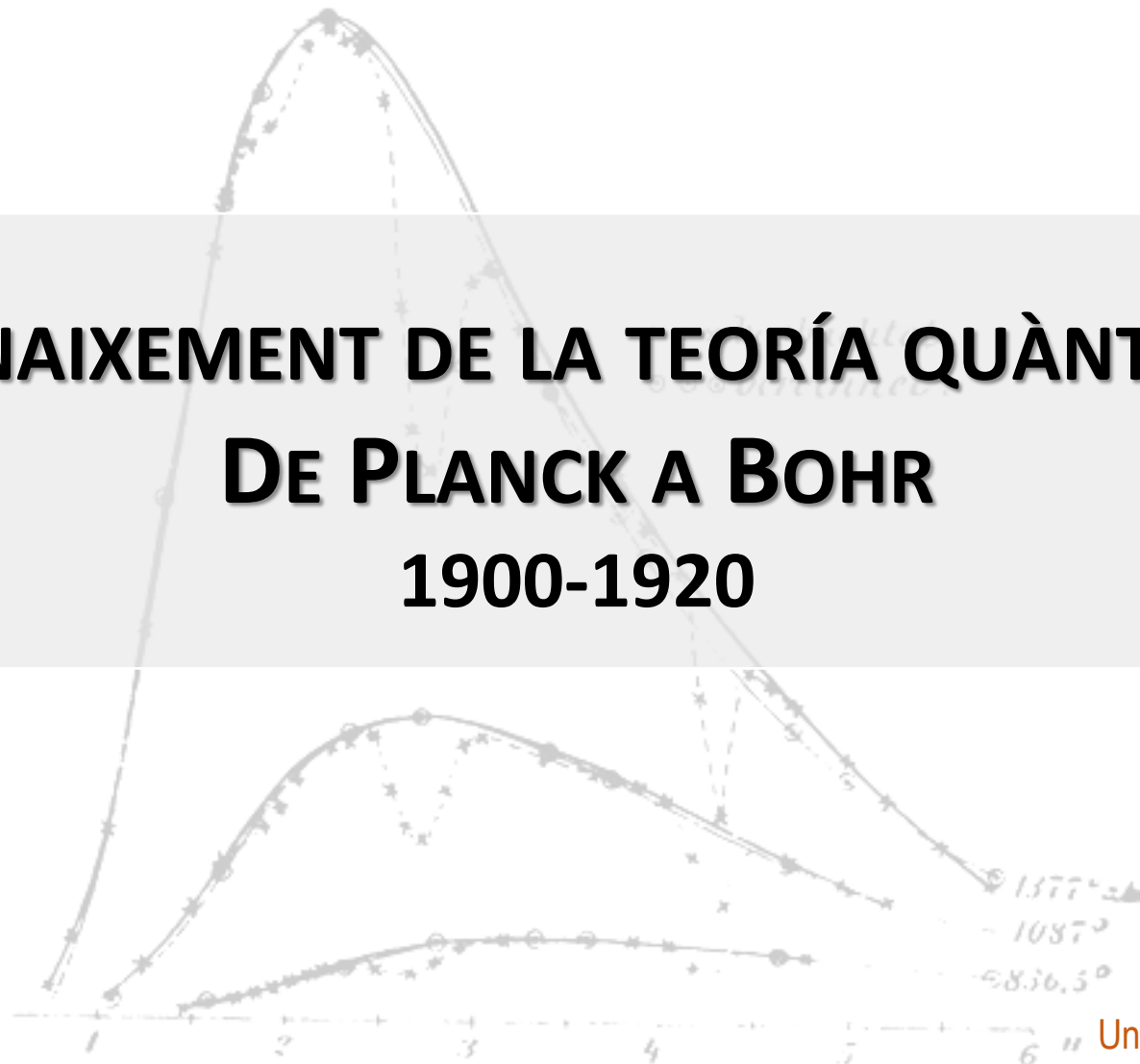


EL NAIXEMENT DE LA TEORÍA QUÀNTICA: DE PLANCK A BOHR 1900-1920



Enric Pérez Canals
Facultat de Física
Universitat de Barcelona

UCE 2025 Curs Ciència i Tecnologia 20-23 d'agost 2025

Coord. Núria Ferrer



Dia 20

9:00 Enric Pérez - “El naixement de la teoria quàntica: de Planck a Bohr”

10:30 Jordi Mur - Part 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)”

Dia 21

9:00 Jordi Mur - Part 2 – “Grans paradoxes de la quàntica”

10:30 Muriel Botey - “65 anys de llum làser. Aplicacions quotidianes i científiques de la llum làser”

Dia 22

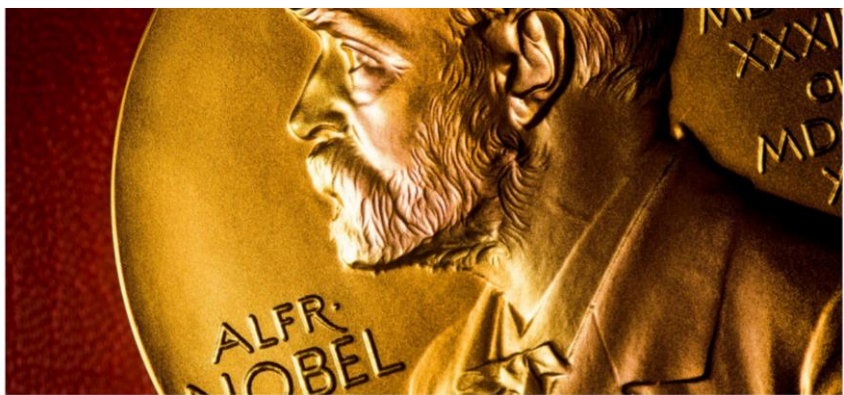
9:00 Jordi Mur - “La segona revolució quàntica”

10:30 Jordi Mur - “Les noves tecnologies quàntiques: computació, simulació, sensors, i comunicacions”

Dia 23

9:00 Josep M^a Trigo - “Programes d'estudi d'asteroides, cometes y meteorits als Països Catalans”

10:30 Josep M^a Trigo - “Estudiant meteorits per conèixer les propietats físico-químiques d'asteroides, cometes i planetes”



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

The Nobel Prize in Physics 2022

Alain Aspect

“for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science”



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

John F. Clauser

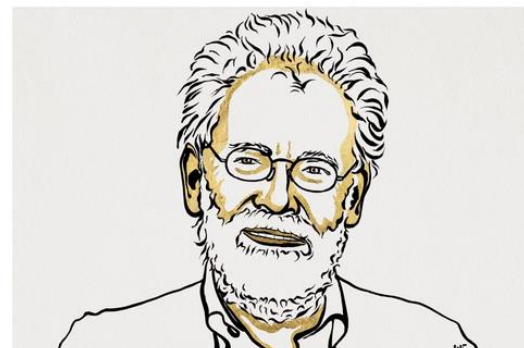
“for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science”



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Anton Zeilinger

“for experiments with entangled photons,
establishing the violation of Bell inequalities
and pioneering quantum information science”



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

“What quantum mechanics really means”

6.- Entrellaçament, acció a distància (no localitat)

5.- Causalitat, determinisme, superposició

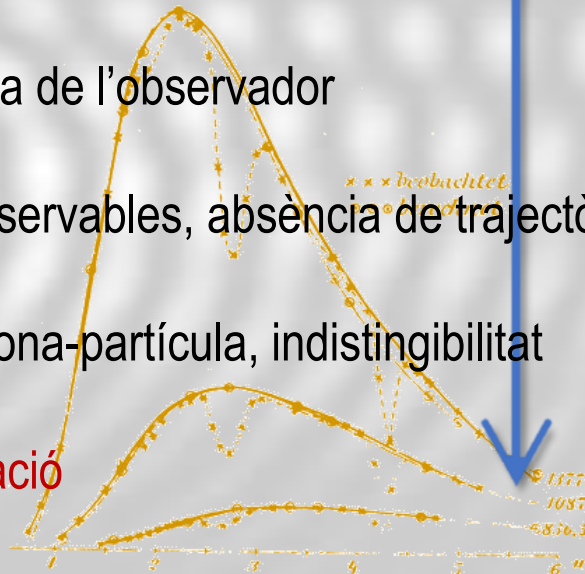
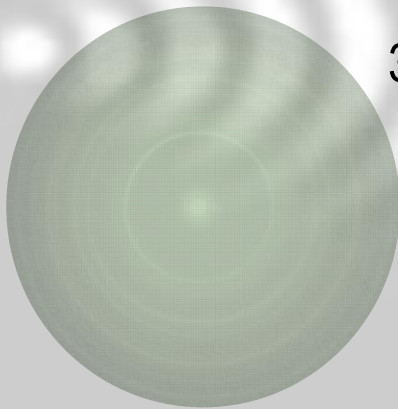
4.- Principi d'incertesa, influència de l'observador

3.- Només observables, absència de trajectòries

2.- Dualitat ona-partícula, indistingibilitat

1.- Quantització

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2\pi}$$



La construcció de la física moderna

s. XIX-XX

Relativitat general 1915

Relativitat especial 1900's

Teoria de Maxwell 1870's

Electricitat i magnetisme

Òptica 1820's

Mecànica Quàntica, 1925

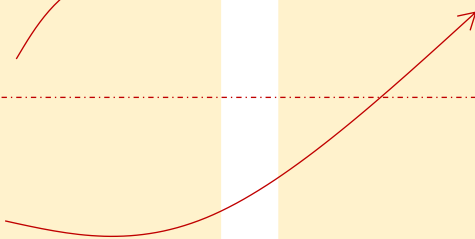
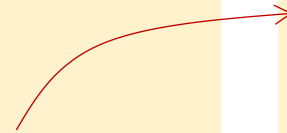
Model atòmic de Bohr, 1913

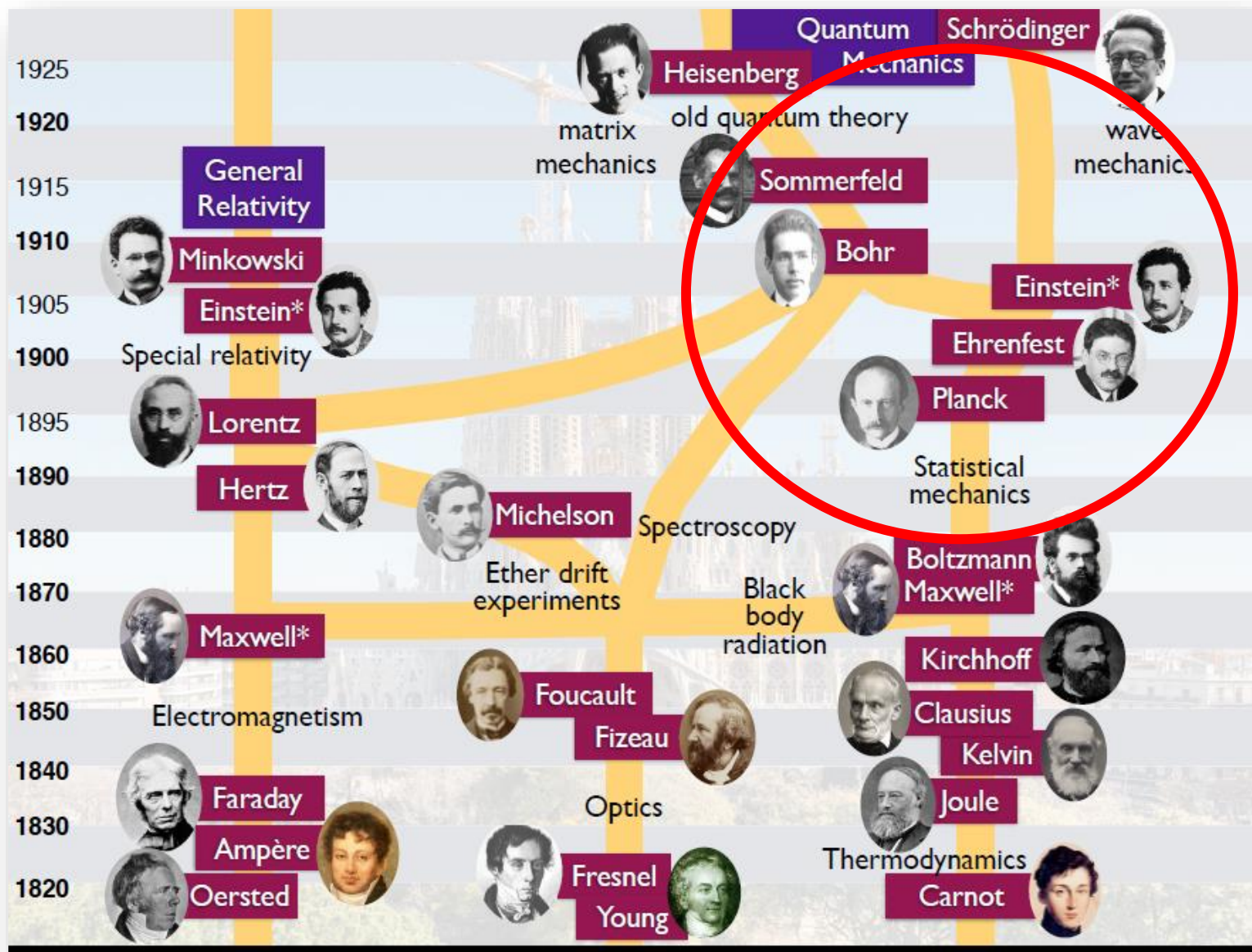
Teoria quàntica 1900's

Física estadística, 1900's

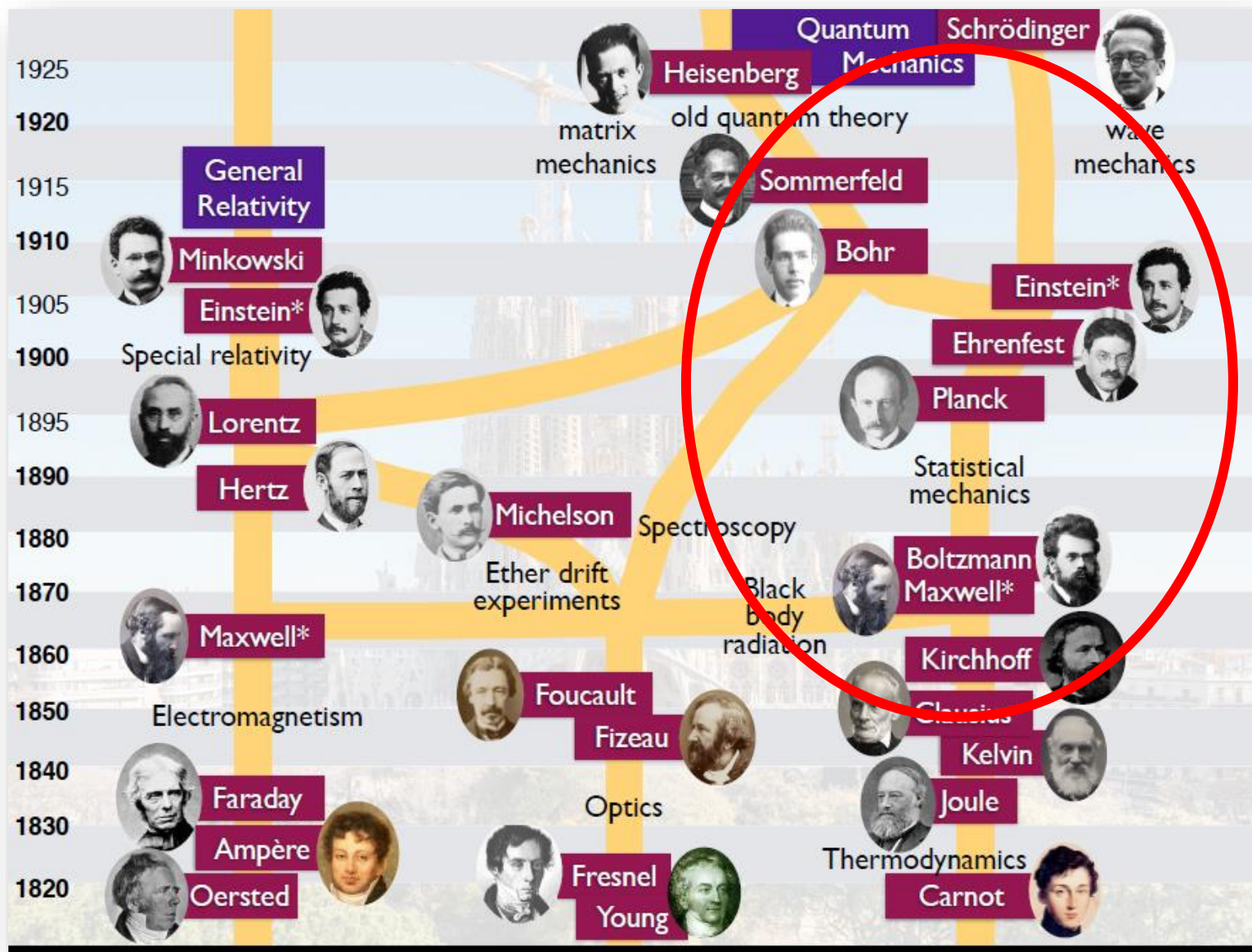
Teoria cinètica 1860's

Termodinàmica, 1850's





The unfinished cathedral of modern physics, Michel Janssen, UM



The unfinished cathedral of modern physics, Michel Janssen, UM

PODIEN ELS GRECS HAVER DESCOBERT LA FÍSICA QUÀNTICA?

FÍSICA MODERNA

Electromagnetisme: cal endollar els experiments

⇒ *RADIACIONS*

Models: no es veu directament allò que es mesura

⇒ *ATOMISME*

1. Introducció

2. Antecedents. Atomisme. Probabilitat i estadística (s. XIX)

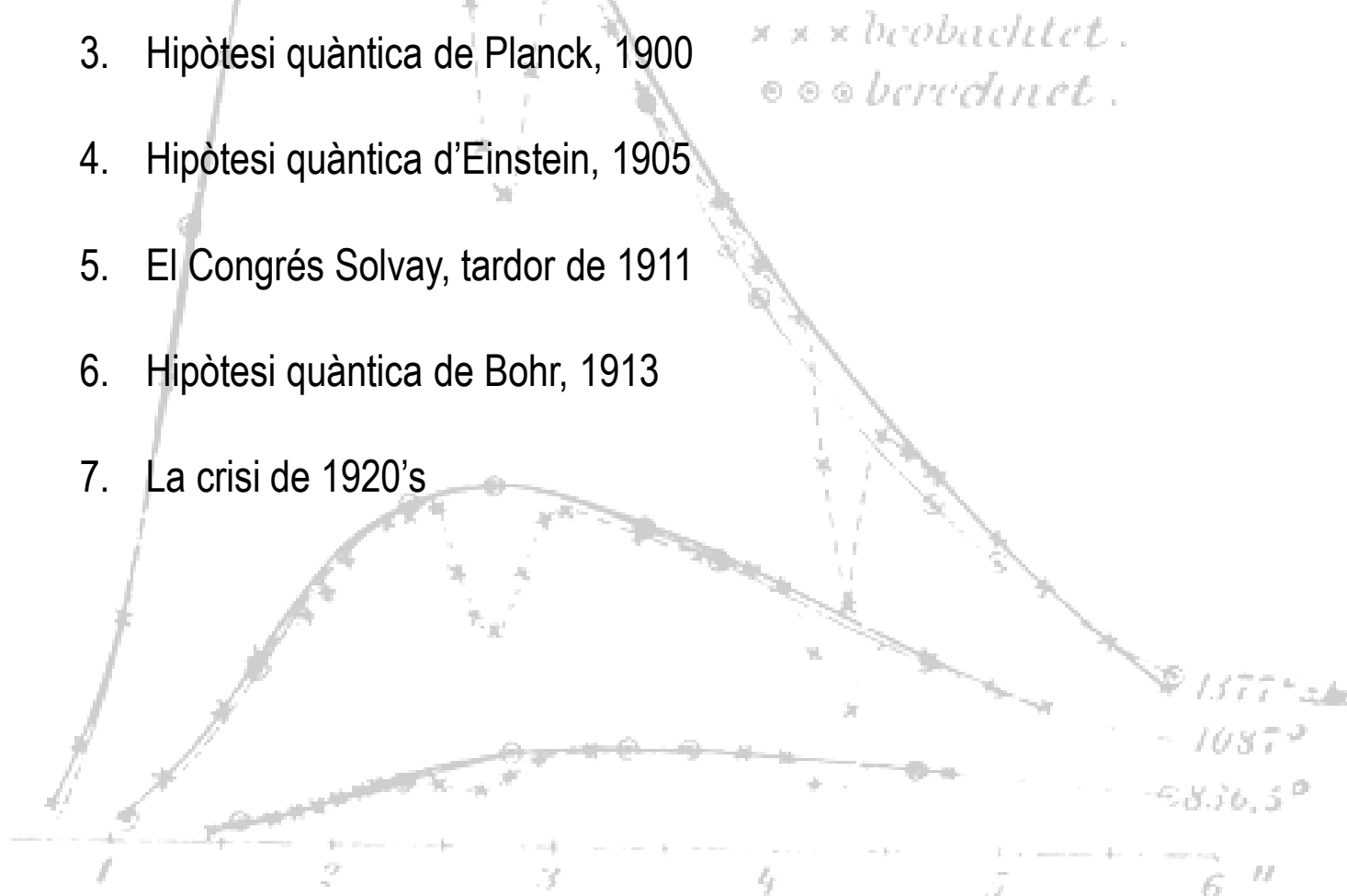
3. Hipòtesi quàntica de Planck, 1900

4. Hipòtesi quàntica d'Einstein, 1905

5. El Congrés Solvay, tardor de 1911

6. Hipòtesi quàntica de Bohr, 1913

7. La crisi de 1920's



H.....1			Ti50	Zr.... 90	?180
Be.... 9.4	Mg ...24		V.....51	Nb... 94	Ta ...182
B.....11	Al.....27.4		Cr52	Mo .. 96	W....186
C.....12	Si.....28		Mn.....55	Rh...104.4	Pt....197.4
N.....14	P.....31		Fe56	Ru ..104.4	Ir....198
O.....16	S.....32		Ni, Co..59	Pd...106.6	Os...199
F.....19	Cl....35.5		Cu.....63.4	Ag...108	Hg.. 200
Na....23	K.....39		Zn.....65.2	Cd...112	
	Ca....40		?68	Ur...116	Au ..197
	?45		?70	Sn ...118	
	? Er ..56		As.....75	Sb...122	Bi....210
	? Y .. 60		Se79.4	Te....128?	
	? In...75.6		Br.....80	I.....127	
			Rb.....85.4	Cs...133	Tl....204
			Sr.....87.6	Ba.. .137	Pb...207
			Ce92		
			La94		
			Di.....95		
			Th....118		

Primera taula publicada per Mendeleiev, el 1869

“Über die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente”

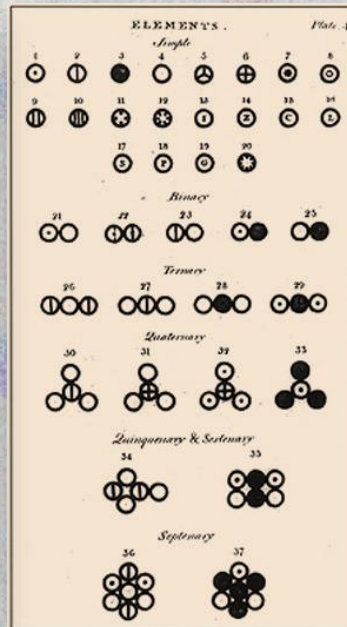
Zeitschrift für Chemie, 405-406

Pesos atomics (atomisme químic)

John Dalton, 1766-1844

Llei de proporcions constants/múltiples

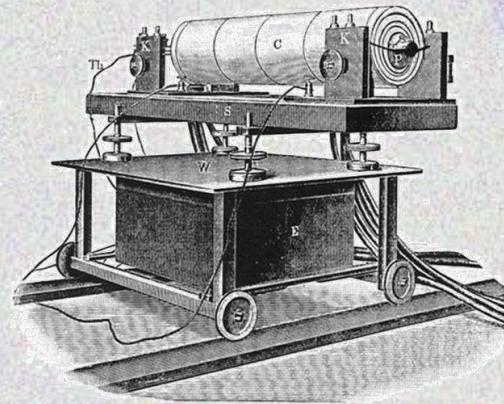
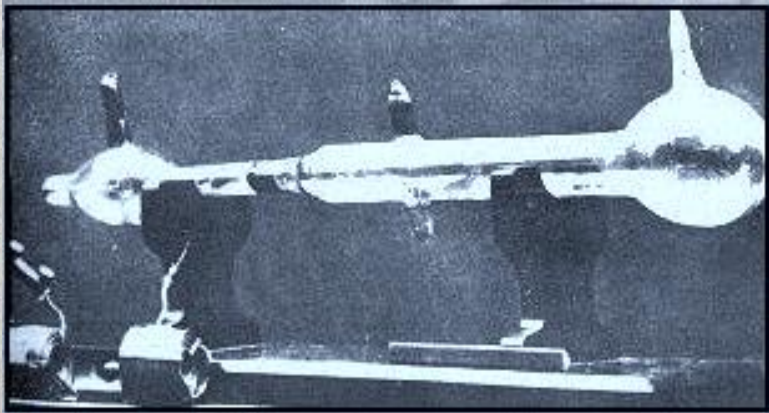
ELEMENTS			
	Hydrogen		Strontian
	Azote		Barytes
	Carbon		Iron
	Oxygen		Zinc
	Phosphorus		Copper
	Sulphur		Lead
	Magnesia		Silver
	Lime		Gold
	Soda		Platina
	Potash		Mercury



A new system of chemical philosophy, 1808

PES ATÒMIC

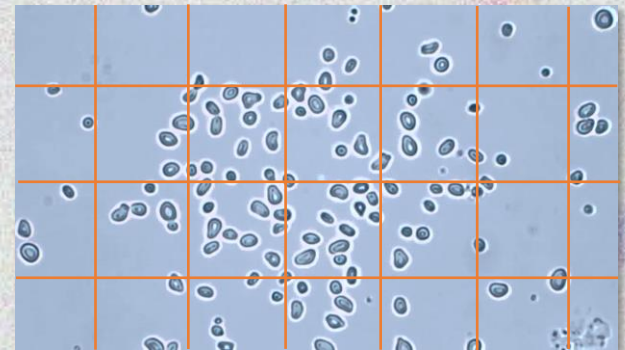
Raigs catòdics, 1897



Radiació de cos negre, 1900



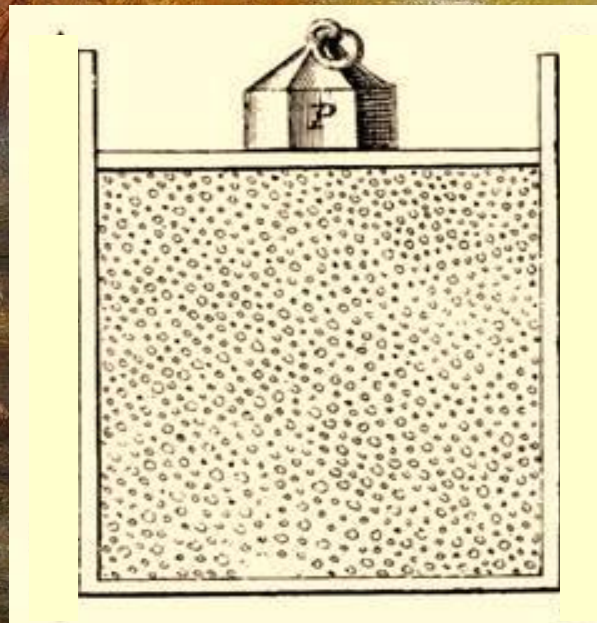
Deflexió de partícules alfa, 1908-1909



Moviment brownià, 1905-1911

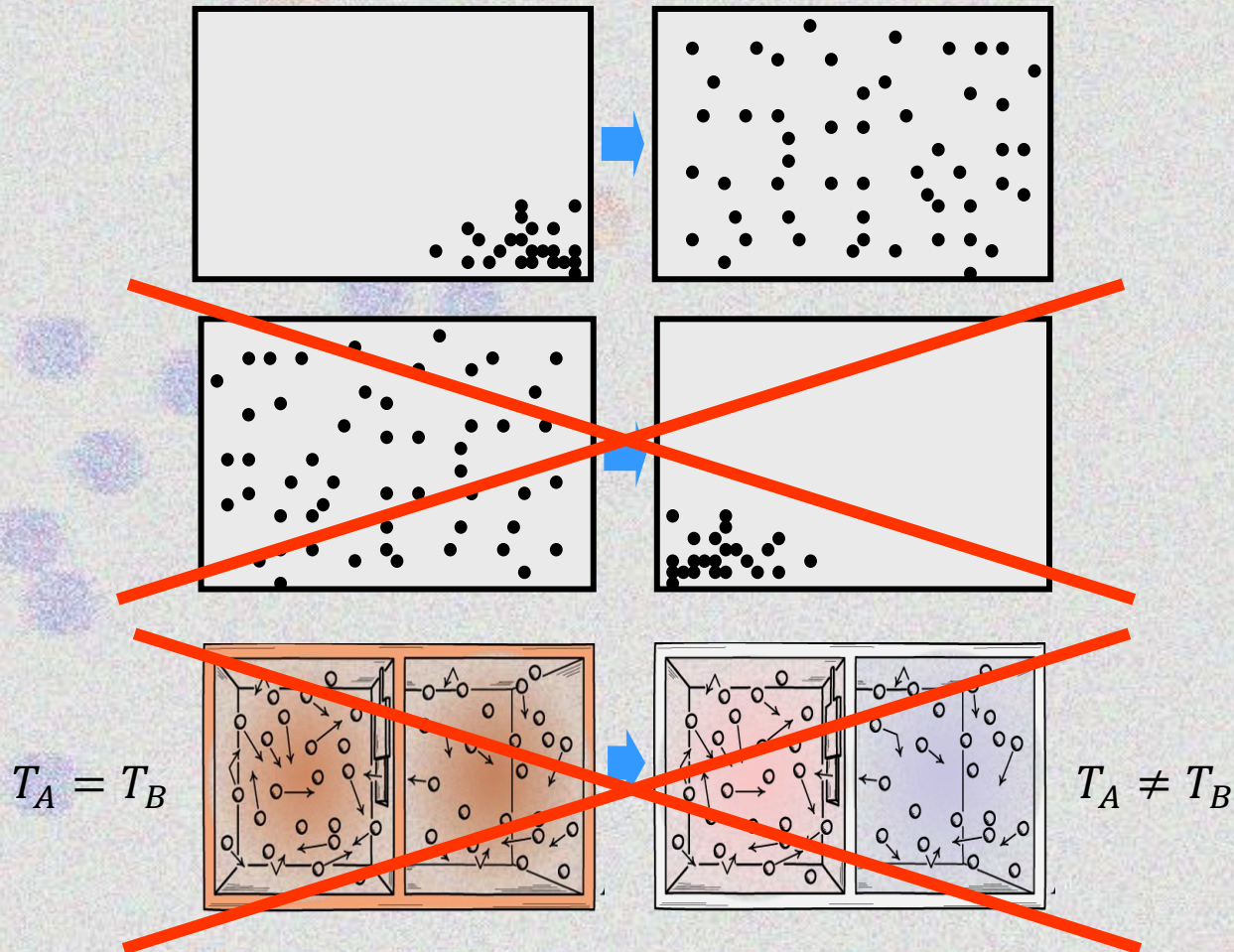
EL NAIXEMENT DE LA MECÀNICA ESTADÍSTICA (1860-1905)

W. Turner, 1840 "Slavers Throwing overboard the Dead and Dying — Typhoon coming on"



Validesa de la segona llei de la termodinàmica:

Concepte d'equilibri termodinàmic



Ludwig Boltzmann (1844-1906)

$$S = k \ln W$$



Entropia i probabilitat. *Objecció de la reversibilitat*

“Sobre la relació entre la segona llei de la teoria mecànica de la calor i el càlcul de probabilitats, en relació a les lleis de l'equilibri tèrmic”, 1877

- Admet violacions del segon principi
- L'entropia d'un estat és la mesura de la seva probabilitat
- Els sistemes evolucionen d'estats menys probables a estats més probables

N molècules

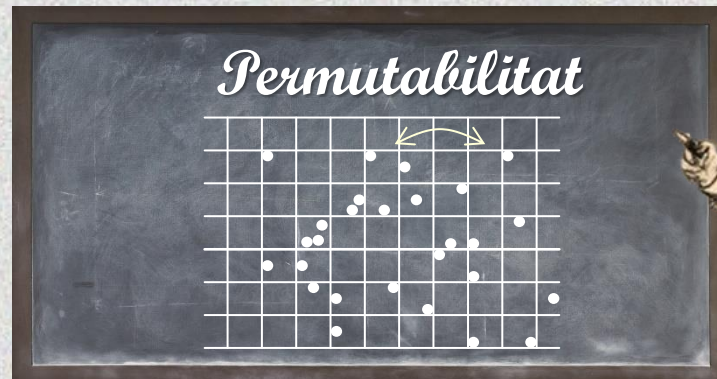
E energia total

$\{\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p\}$

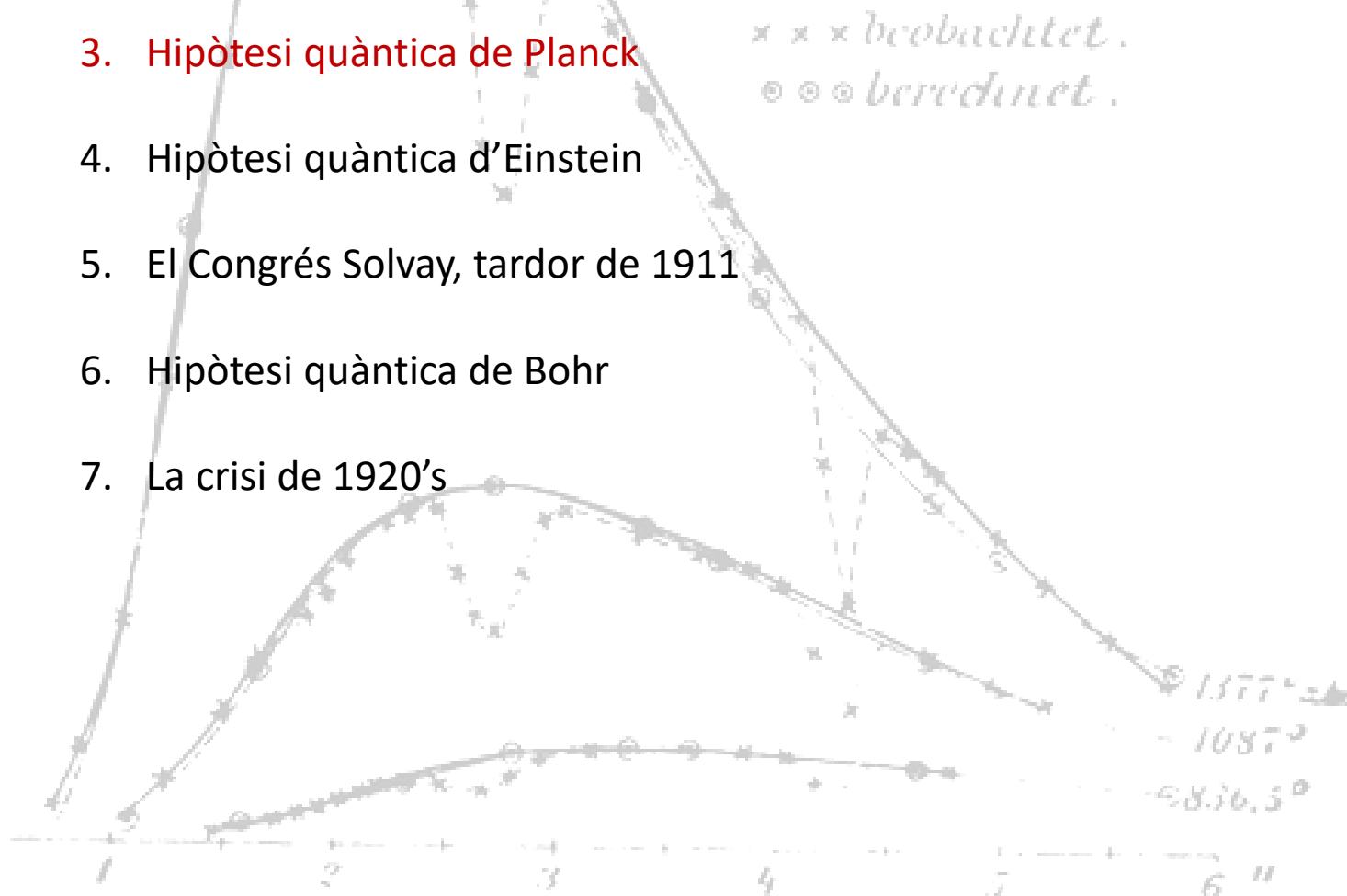
número de partícules a la cel·la p

$$W = \frac{N!}{\omega_0! \omega_1! \dots \omega_p!}$$

$$S = k \ln W$$



1. Introducció
2. Antecedents. Atomisme. Probabilitat i estadística
3. Hipòtesi quàntica de Planck
4. Hipòtesi quàntica d'Einstein
5. El Congrés Solvay, tardor de 1911
6. Hipòtesi quàntica de Bohr
7. La crisi de 1920's



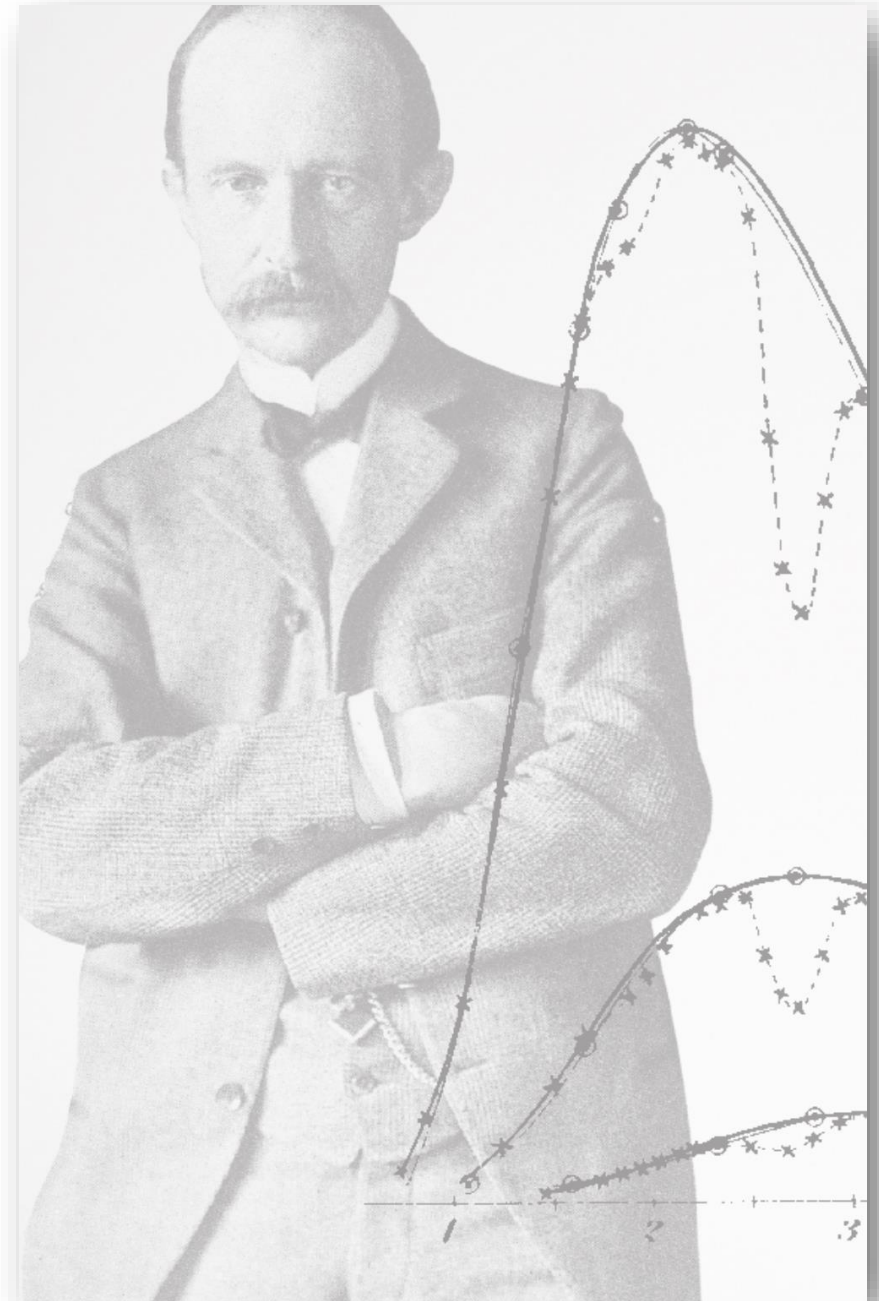
Radiació tèrmica

La hipòtesi quàntica de Planck

Max Planck (Kiel, 1858 - Göttingen, 1947)

Irreversibilitat:

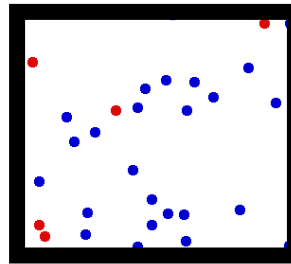
- Boltzmann:
Mecànica $\Rightarrow$ Termodinàmica
- Planck:
Electrodinàmica $\Rightarrow$ Termodinàmica



Radiació tèrmica

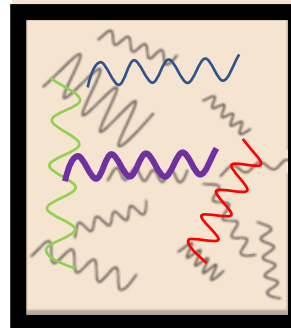
Què és la temperatura?

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi\kappa T} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2\kappa T}}$$



*Gas en equilibri tèrmic:
Distribució de Maxwell-Boltzmann*

$$f(\lambda) = ?$$



1860's G. Kirchhoff i R. Bunsen. Espectres



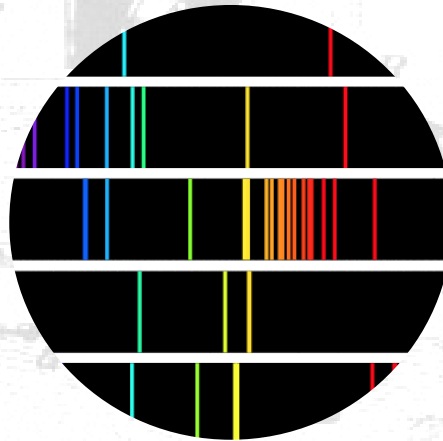
Gustav Kirchhoff (1824-1887)



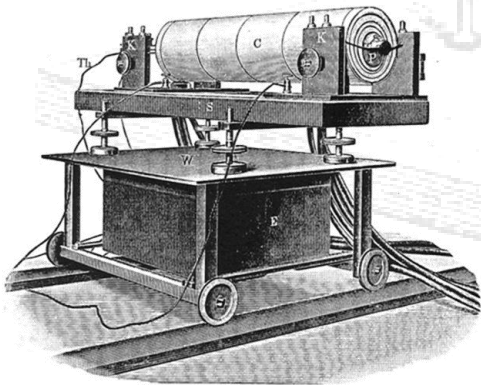
Robert Bunsen (1811-1899)



Johann Seebeck (1770-1833)

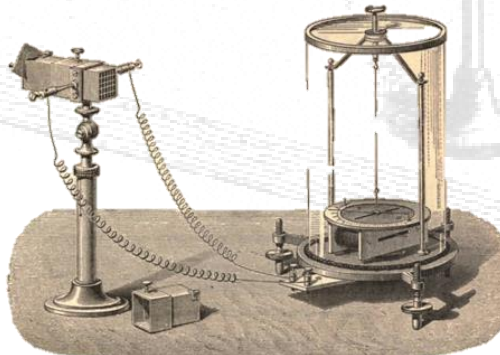


Cos negre



O. Lummer i F. Kurlbaum, 1898

Termopiles



1879 Llei de Stefan

1884 Boltzmann la dedueix de la termodinàmica i l'electrodinàmica

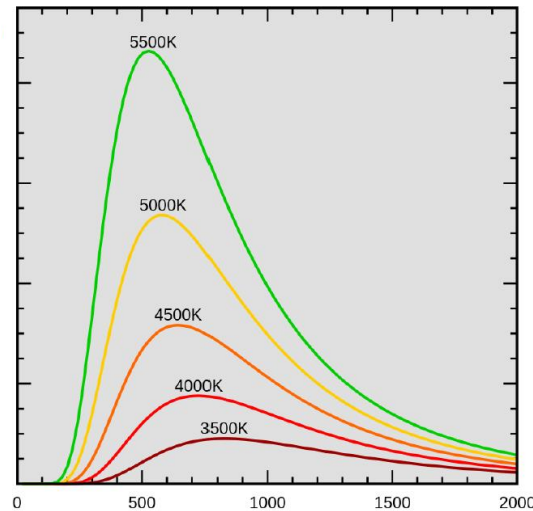
$$E = \sigma T^4$$



Josef Stefan (1835-1893)

1896 Llei del desplaçament
(termodinàmica i electrodinàmica)

$$\lambda_{\text{màx}} \cdot T = 2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}$$



Wilhelm Wien (1864-1928)

1896 Llei de radiació de Wien

$$\rho(\nu, T) = c_1 \nu^3 e^{-c_2 \frac{\nu}{T}}$$

Maxwell-Boltzmann $f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$

Max Planck (1855-1947)

1895 Congrés de Lubeck

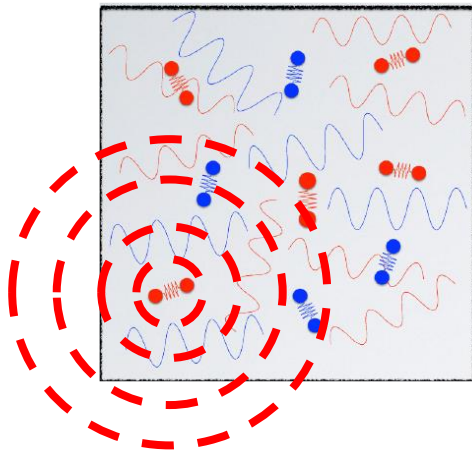
1896-1900 Treballs en radiació tèrmica

1897-1899 “Sobre fenòmens de radiació irreversibles”
[5 articles]

Ressonadors de
freqüència ν

1899 Deducció de la llei de Wien

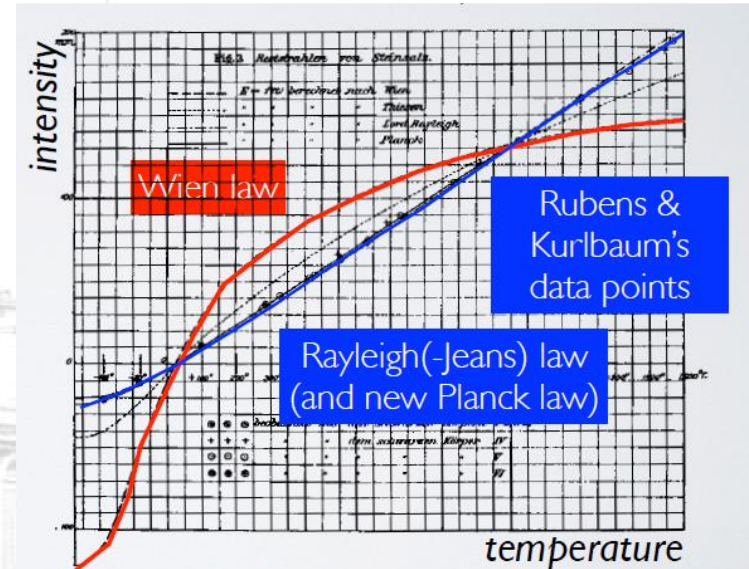
$$\rho(\nu, T) = c_1 \nu^3 e^{-c_2 \frac{\nu}{T}}$$



**Objectiu: explicar la irreversibilitat termodinàmica
amb l'electromagnetisme.**



Octobre 1900: Mesures de Rubens



Llei de Rayleigh(-Jeans) $\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \kappa T$ $\frac{h\nu}{\kappa T} \ll 1$

Llei de Wien $\rho(\nu, T) = AT\nu^3 e^{-\frac{\nu}{T}}$ $\frac{h\nu}{\kappa T} \gg 1$

Octubre, 1900

- F. Kurlbaum. Desviacions de la llei de radiació de Wien
- M. Planck. Presenta una nova llei de radiació

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



Ferdinand Kurlbaum
(1857-1917)

Berlin
Deutsche Physikalische Gesellschaft
[Societat alemanya de física]



$$E_T = E_{\nu_1} + E_{\nu_2} + E_{\nu_3} + \dots$$

$$S_T = \sum S_\nu$$

$$W_T = \prod W_\nu$$

$$\mathcal{E} = \phi(\lambda).$$

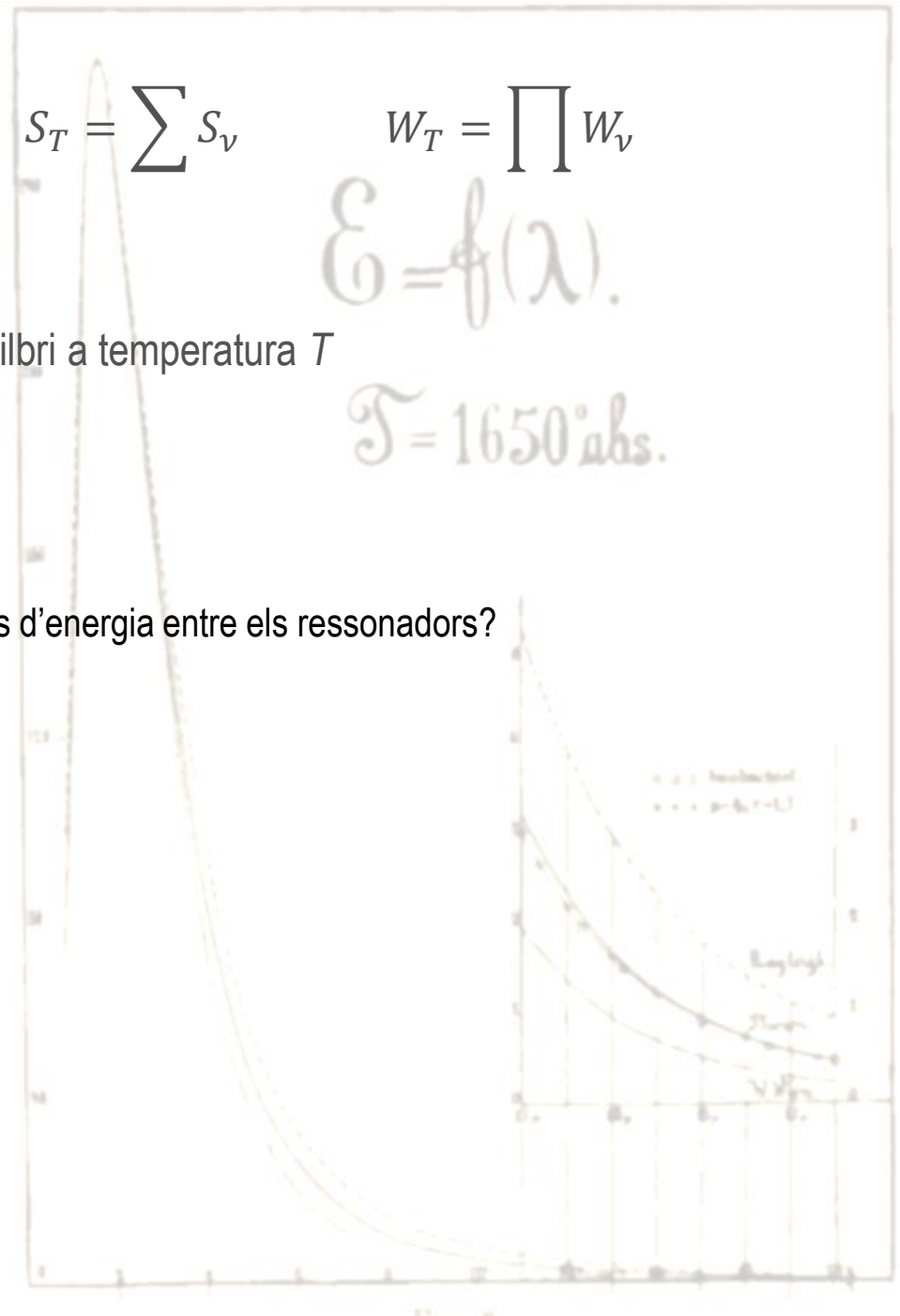
$$T = 1650^\circ \text{abs.}$$

N ressonadors monocromàtics en equilibri a temperatura T

P paquets d'energia

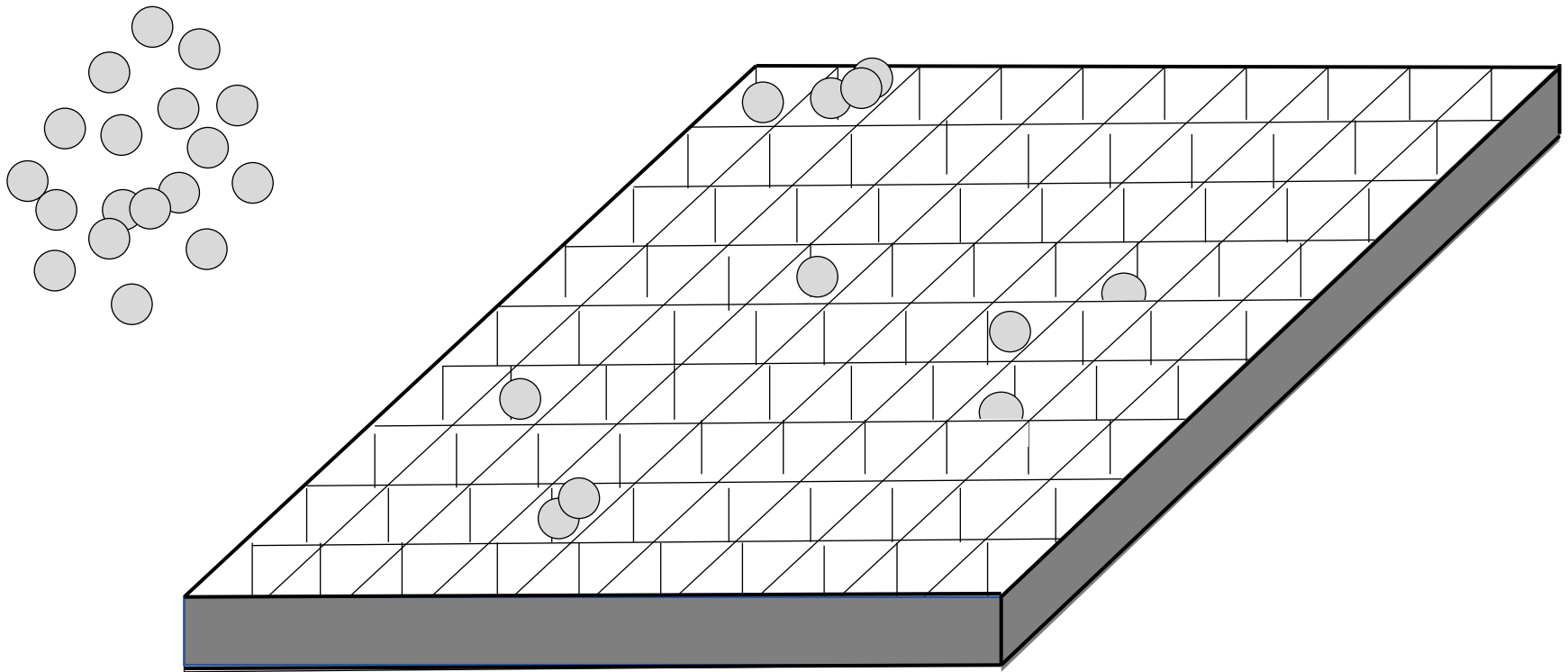
$$E = P\varepsilon$$

De quantes formes podem repartir els paquets d'energia entre els ressonadors?



P paquets

N résonateurs



$$E_T = E_{\nu_1} + E_{\nu_2} + E_{\nu_3} + \dots$$

$$S_T = \sum S_\nu$$

$$W_T = \prod W_\nu$$

N ressonadors monocromàtics en equilibri a temperatura T

P paquets d'energia

$$E = P\varepsilon \quad (= Nu(\nu, T))$$

$$\varepsilon = h\nu$$

$$T = 1650^\circ \text{abs.}$$

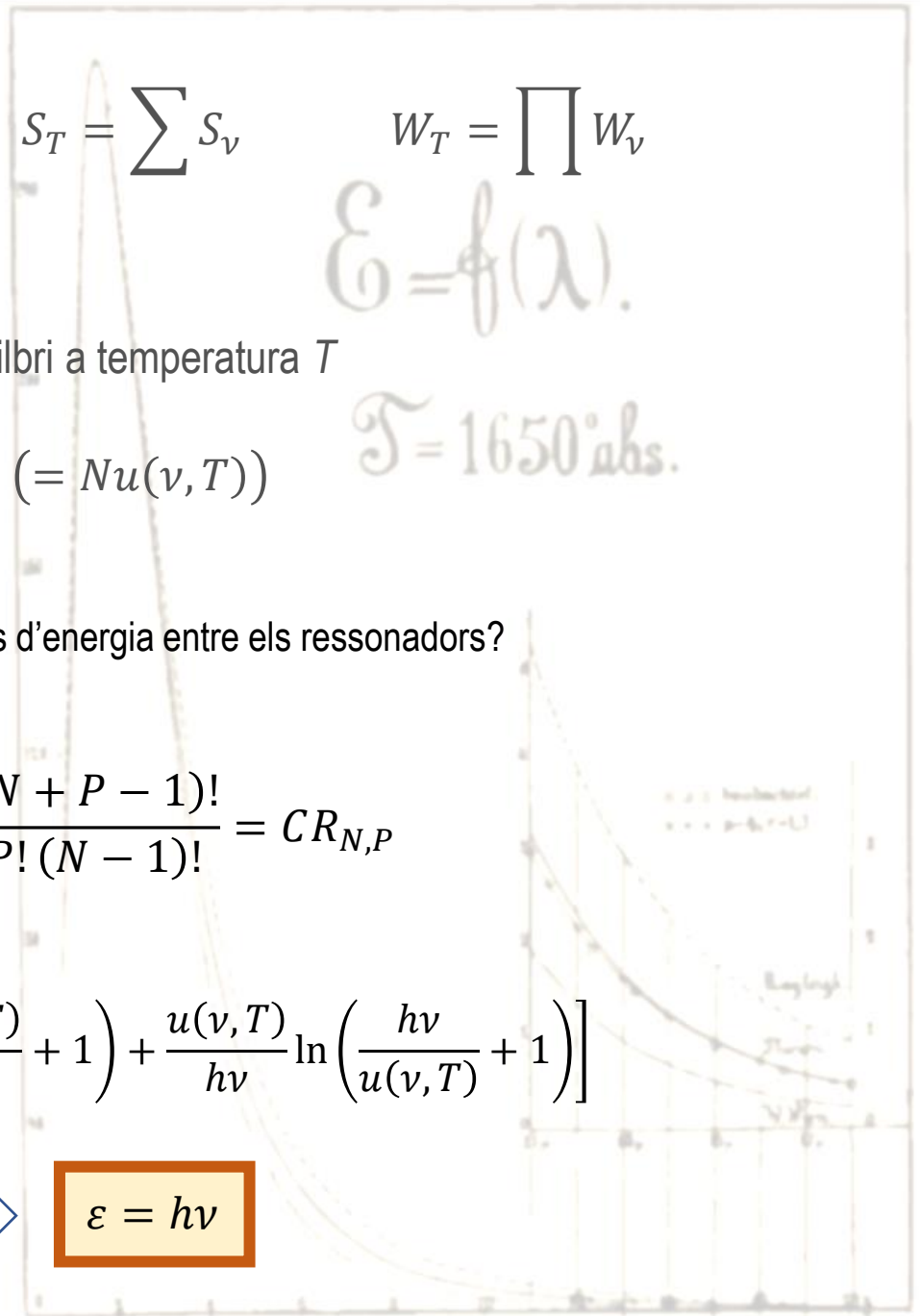
De quantes formes podem repartir els paquets d'energia entre els ressonadors?

$$W = \frac{(N + P - 1)!}{P! (N - 1)!} = CR_{N,P}$$

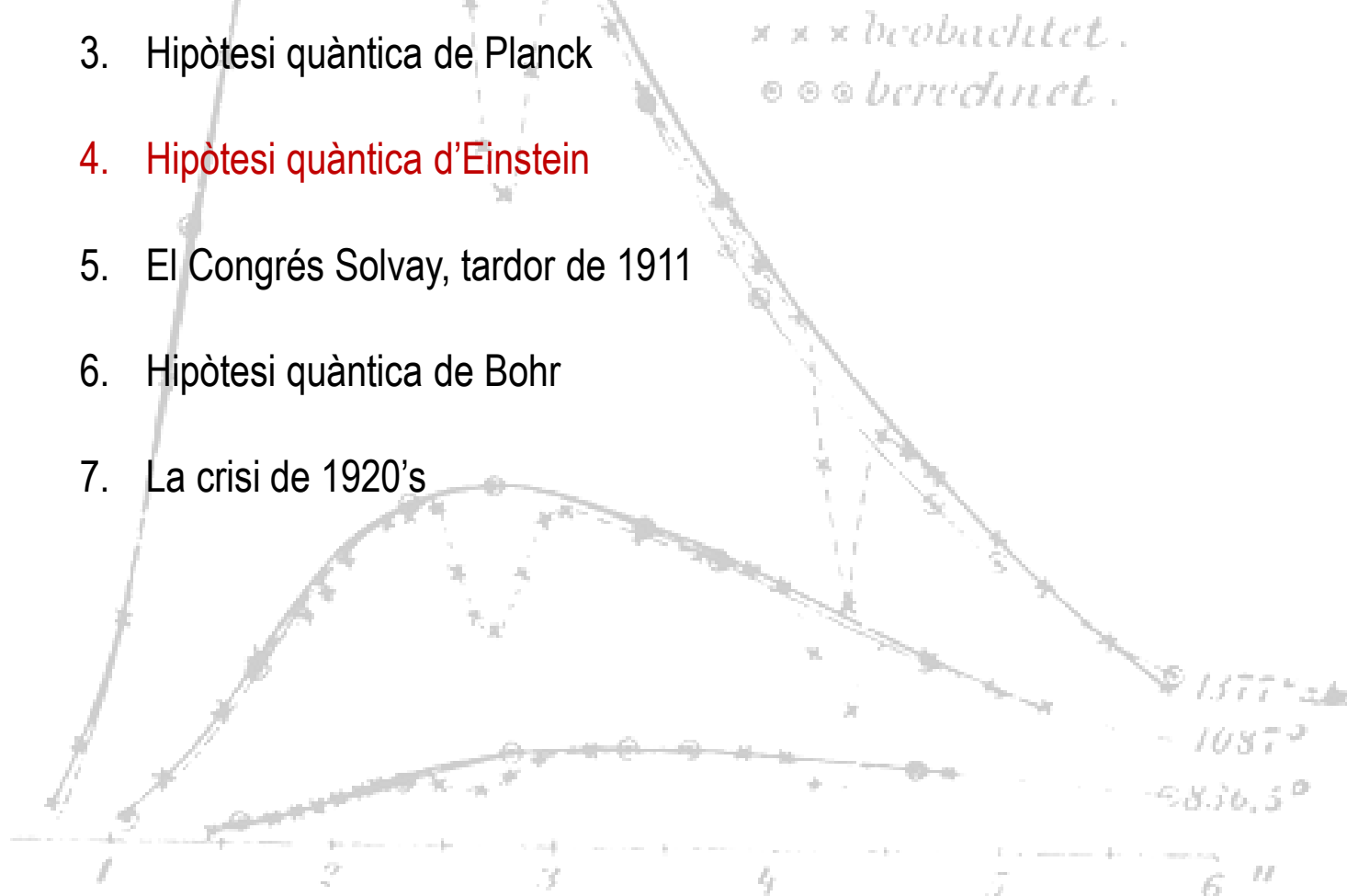
$$S_\nu = \kappa \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \left[\ln \left(\frac{u(\nu, T)}{h\nu} + 1 \right) + \frac{u(\nu, T)}{h\nu} \ln \left(\frac{h\nu}{u(\nu, T)} + 1 \right) \right]$$



$$\varepsilon = h\nu$$

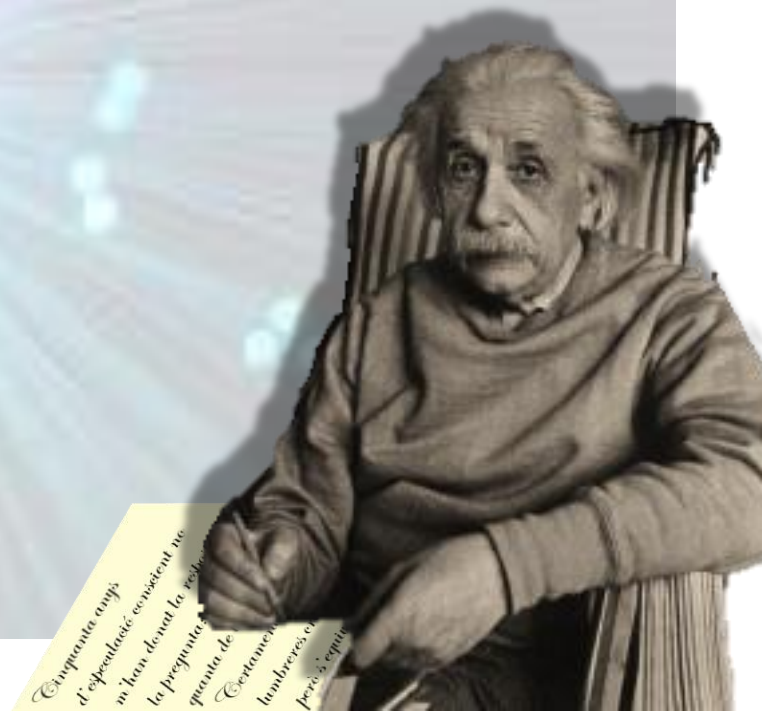


1. Introducció
2. Antecedents. Atomisme. Probabilitat i estadística
3. Hipòtesi quàntica de Planck
4. Hipòtesi quàntica d'Einstein
5. El Congrés Solvay, tardor de 1911
6. Hipòtesi quàntica de Bohr
7. La crisi de 1920's



Cinquanta anys d'especulació conscient no m'han donat la resposta a la pregunta: què són els quanta de llum? Certament avui qualsevol lumbreres creu saber-ho, però s'equivoca.

Einstein a M. Besso, desembre 1951



Cinquanta anys
d'especulació conscient no
m'han donat la resposta
la pregunta: què són els
quanta de llum? Certament
avui qualsevol lumbreres
creu saber-ho, però s'equivoca.

Annus mirabilis, 1905

[Publ.]

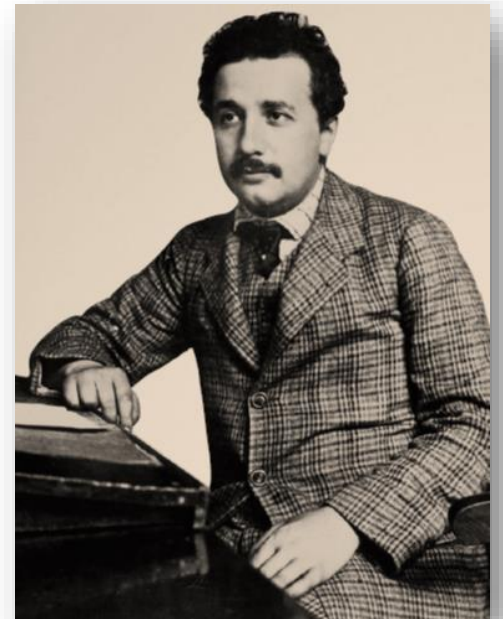
Març	<i>Quanta de llum</i>
Maig	<i>Moviment brownià</i>
Juny	<i>Relativitat</i>

“Sobre un punt de vista heurístic relatiu als processos d'emissió i transformació de la llum”

“Sobre el moviment de partícules petites suspeses en un líquid estacionari, exigít per la teoria cinètico-molecular de la calor”

“Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment”

Annalen der Physik 17 (1905), 132-148, 549-560, 891-921



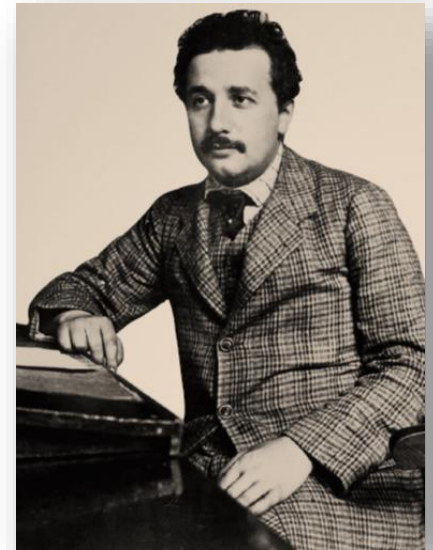
La hipòtesi quàntica d'Einstein

132

[1] *6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

[2] Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das



“Sobre un punt de vista heurístic relatiu als processos d'emissió i transformació de la llum”

Annalen der Physik 17 (1905), 132-148

DESCOBRIMENT DE L'EFFECTE FOTOELÈCTRIC:

Els experiments de H. Hertz

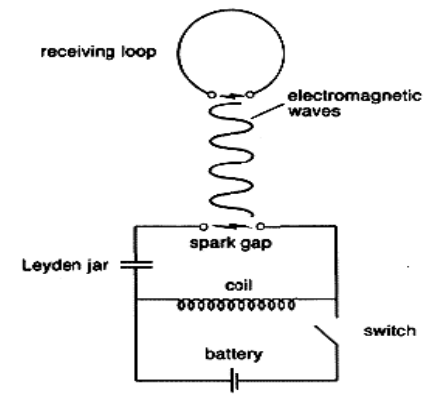
Descobreix l'efecte fotoelèctric en els experiments per crear i detectar ones electromagnètiques (1887).

Posteriorment es van identificar els electrons, i Lennard va fer experiments específics sobre aquest efecte.



Heinrich Hertz (1857-1894)

*Peculiaritat: el paràmetre que determina si es produeix l'efecte no és la **intensitat**, sinó la **frequència***



Argument d'Einstein amb l'entropia, 1905

Radiació

$$S - S_o = \frac{E_\nu}{\beta \nu} \ln \frac{V}{V_o}$$

Matèria
[Gas ideal]

$$S - S_o = \frac{R}{N_A} N \ln \frac{V}{V_o}$$

*“La **radiació monocromàtica** de baixa densitat (dins l'àmbit de validesa de la fórmula de radiació de Wien) es comporta termodinàmicament com si estés formada per quàntums d'energia independents els uns dels altres i que valen $R\beta\nu/N$ [hν]”*



Argument d'Einstein, 1905

Processos d'emissió i transformació de la llum
[aplicació de la hipòtesi heurística]

1. Regla de Stokes (fluorescència)
2. Efecte fotoelèctric $\Pi e = h\nu - P$
3. Ionització de gasos mitjançant llum ultraviolada

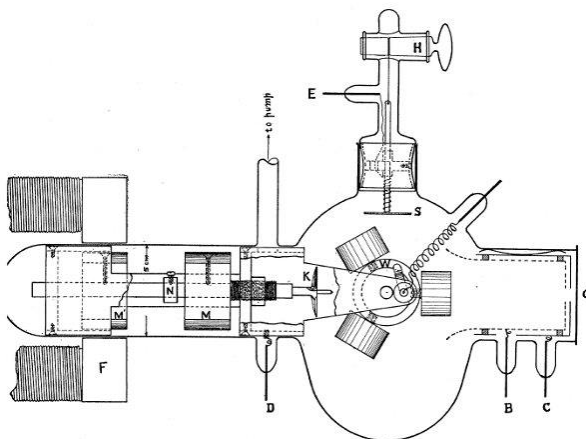
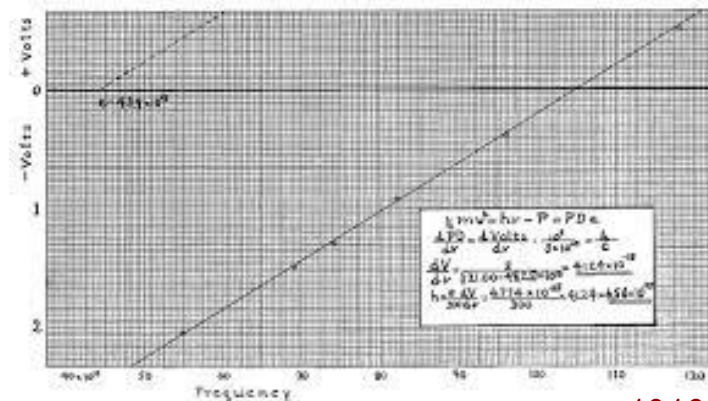


Fig. 2.



1916



Robert A. Millikan
(1868-1953)

A DIRECT PHOTOELECTRIC DETERMINATION OF
PLANCK'S "h."¹

BY R. A. MILLIKAN.

I. INTRODUCTORY.

QUANTUM theory was not originally developed for the sake of interpreting photoelectric phenomena. It was solely a theory as to the mechanism of absorption and emission of electromagnetic waves by resonators of atomic or subatomic dimensions. It had nothing whatever to say about the energy of an escaping electron or about the conditions under which such an electron could make its escape, and up to this day the form of the theory developed by its author has not been able to account satisfactorily for the photoelectric facts presented herewith. We are confronted, however, by the astonishing situation that

This hypothesis may well be called reckless first because an electromagnetic disturbance which remains localized in space seems a violation of the very conception of an electromagnetic disturbance, and second because it flies in the face of the thoroughly established facts of interference.

The hypothesis was apparently made solely because it furnished a ready explanation of one of the most remarkable facts brought to light by recent investigations, viz., that the energy with which an electron is thrown out of a metal by ultra-violet light or X-rays is independent of the intensity of the light while it depends on its frequency. This fact alone seems to demand some modification of classical theory or, at any rate, it has not yet been interpreted satisfactorily in terms of classical theory.

While this was the main if not the only basis of Einstein's assumption, this assumption enabled him at once to predict that the maximum energy

¹ An abstract of this paper was presented before the Am. Phys. Soc. in April, 1914. (PHYS. REV., IV., 73, '14.) The data on lithium were however first reported at the meeting of the Am. Phys. Soc. in April, 1915. (PHYS. REV., VI., 55, '15.)

² Ann. d. Phys. (4), 17, 132, 1905, and (4), 20, 199, 1906.

EINSTEIN'S PHOTOELECTRIC EQUATION AND CONTACT
ELECTROMOTIVE FORCE.

BY R. A. MILLIKAN.

§ I. INTRODUCTORY.

EINSTEIN'S photoelectric equation for the maximum energy of emission of a negative electron under the influence of ultra-violet light, namely,

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ve = h\nu - \phi \quad (1)$$

the behavior, as to both photoelectric and contact E.M.F. relations, of all the substances with which I have worked. The precision which I have been able to attain in these tests has been due to the following precautions.

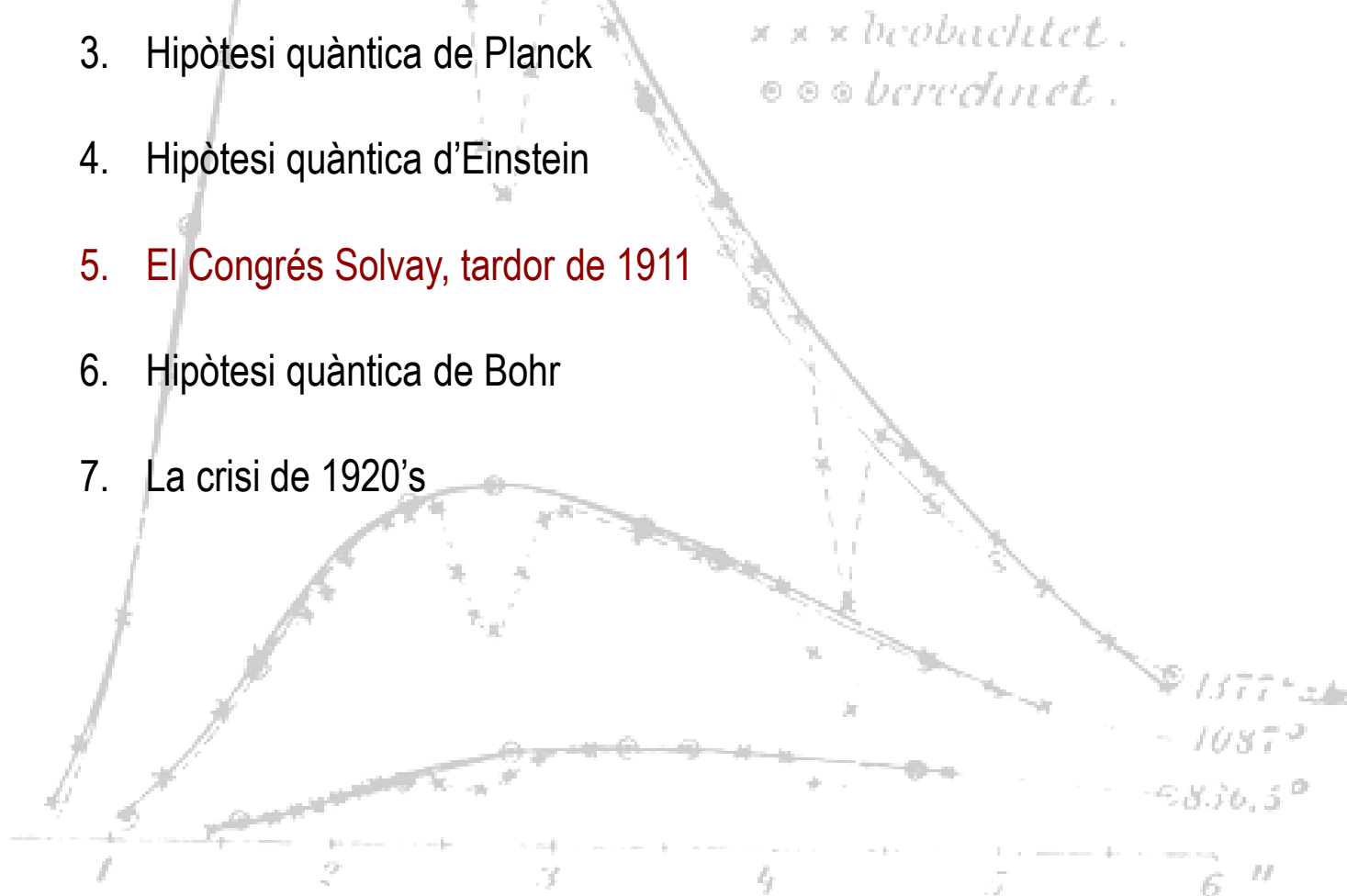
1. I have made simultaneous measurements in extreme vacua of photo-currents and contact E.M.F.'s and have thus been able to eliminate the considerable influence which these latter have on photo-potentials.

2. I have worked with surfaces newly formed in extreme vacua and with very large photo-currents of saturation value of the order 20,000 scale divisions in 30 secs. so that I have thus been able to locate the intercept of the photo-current curve on the *PD* axis with much precision.

3. I have used substances which are photo-sensitive practically throughout the whole length of the visible spectrum and have thus been able to use a large range of wave-lengths all of which were above the long wave-length limit of the receiving Faraday cylinder—a matter of no little importance.

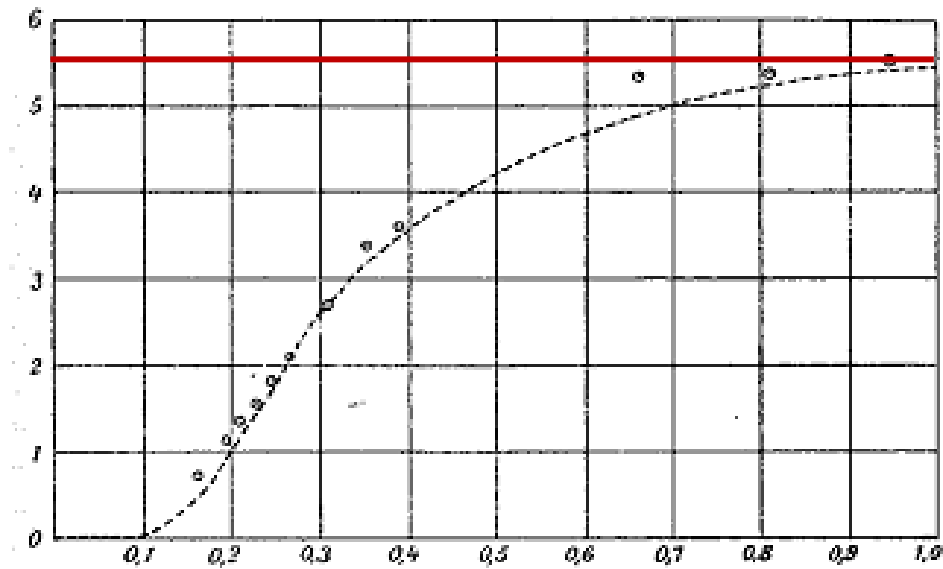
4. I have, with the aid of filters, carefully chosen for the principal lines of the mercury spectrum, eliminated from the photo-current-

1. Introducció
2. Antecedents. Atomisme. Probabilitat i estadística
3. Hipòtesi quàntica de Planck
4. Hipòtesi quàntica d'Einstein
5. El Congrés Solvay, tardor de 1911
6. Hipòtesi quàntica de Bohr
7. La crisi de 1920's

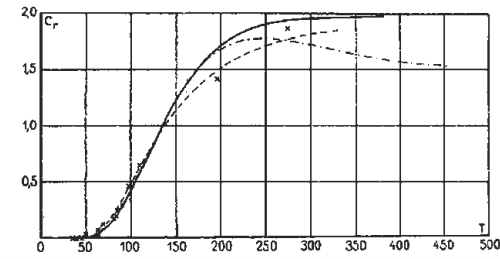


- **1907** Calors específiques dels sòlids. Model d'Einstein

[Problema de les calors específiques]



$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



Primer Congrés Solvay
La teoria de la radiació i els quanta



Brusel·les, tardor de 1911

Segon Congrés Solvay: *L'estructura de la matèria*



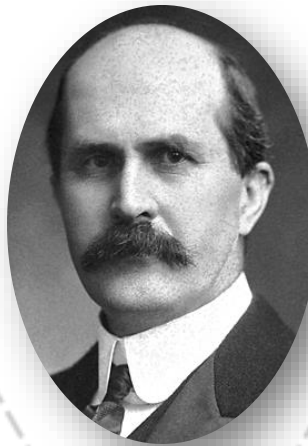
Brusel·les, tardor de 1913

1911 DIFRACCIÓ DE RAIGS X

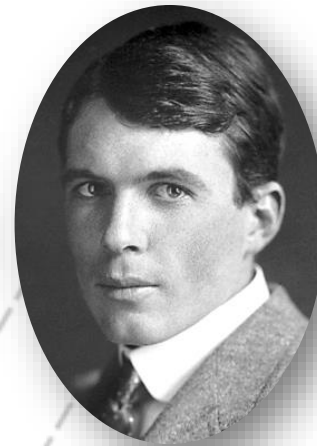
- *Constitució ondulatoria dels RX*
- *Estructura cristal·lina*



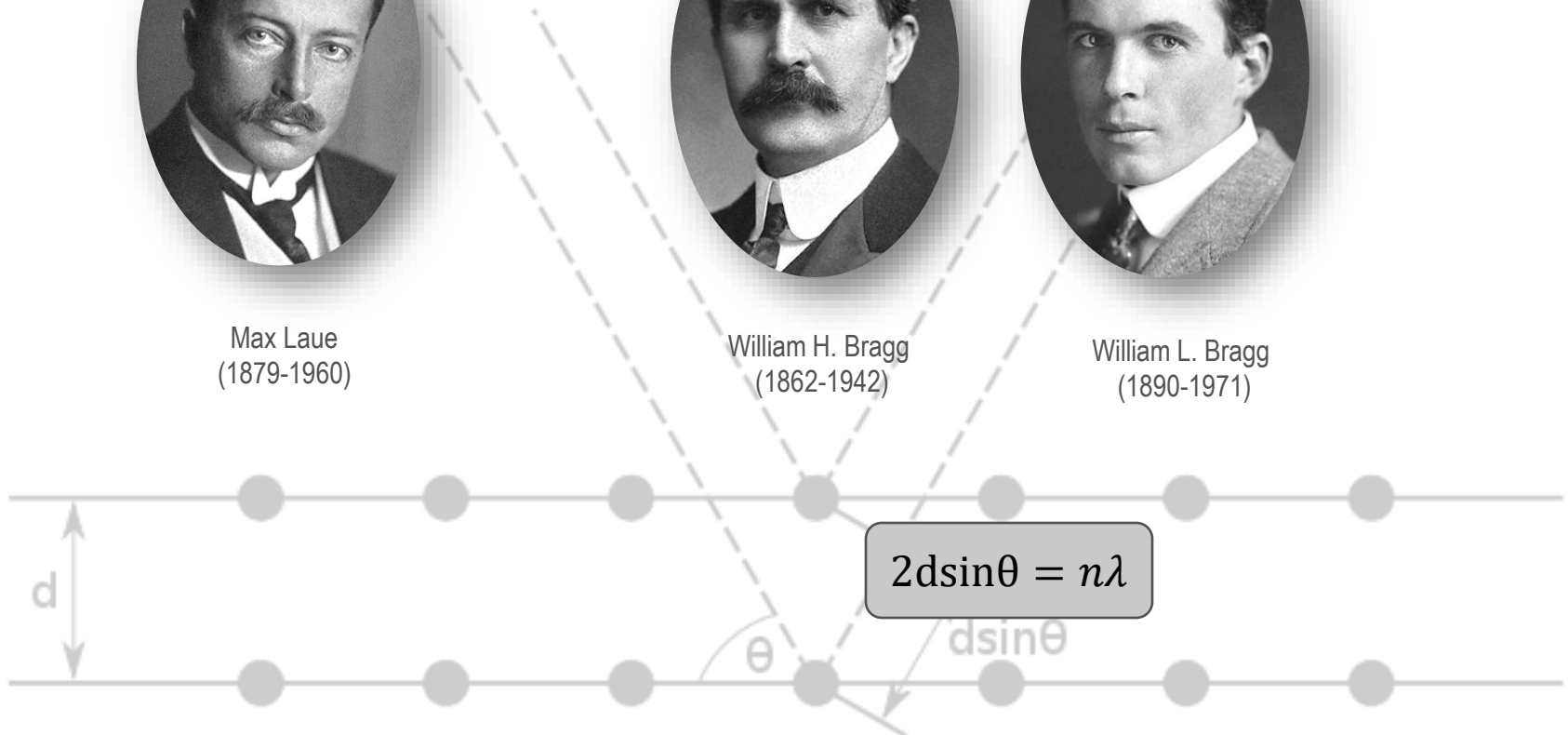
Max Laue
(1879-1960)



William H. Bragg
(1862-1942)

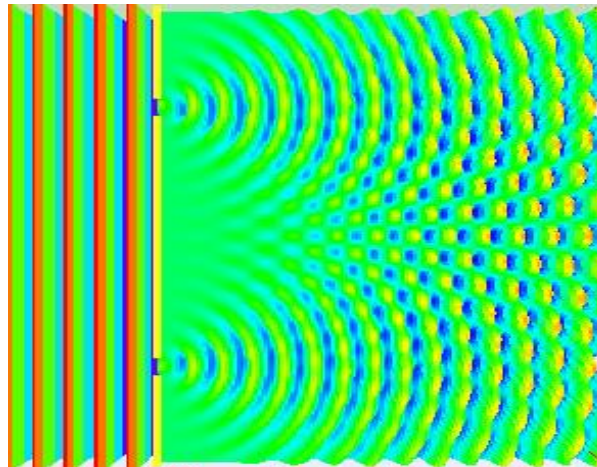
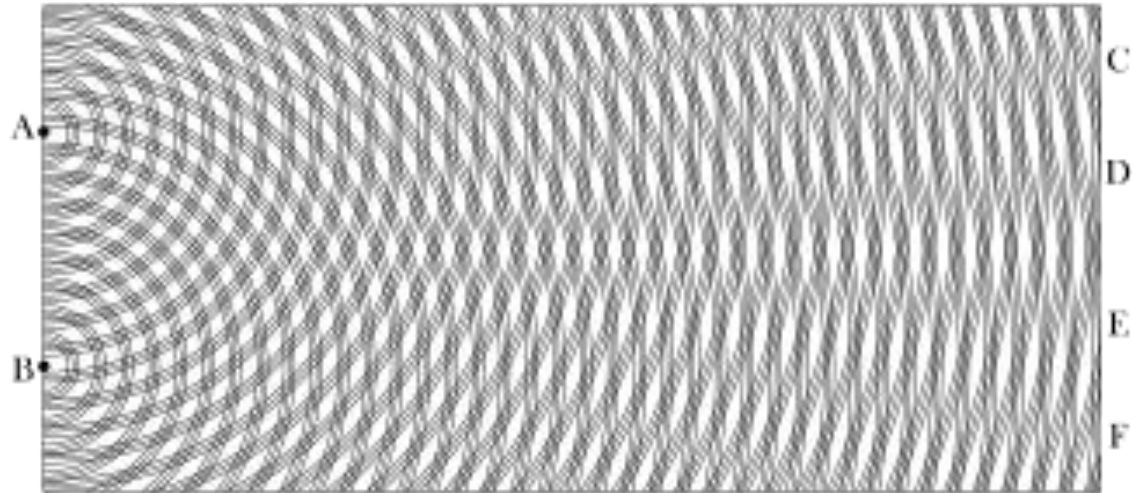


William L. Bragg
(1890-1971)

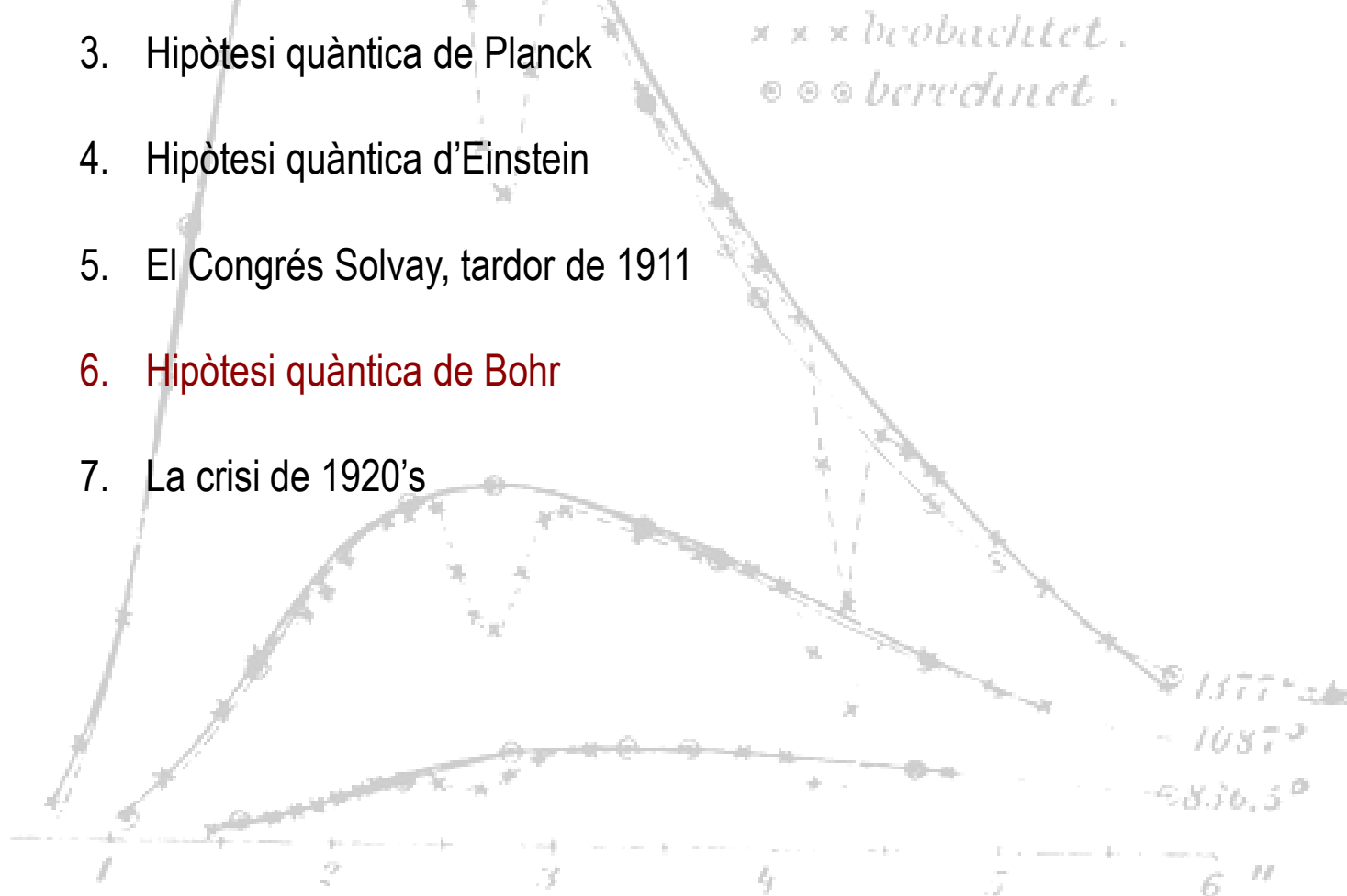


1911 DIFRACCIÓ DE RAIGS X

- *Constitució ondulatoria dels RX*
- *Estructura cristal·lina*



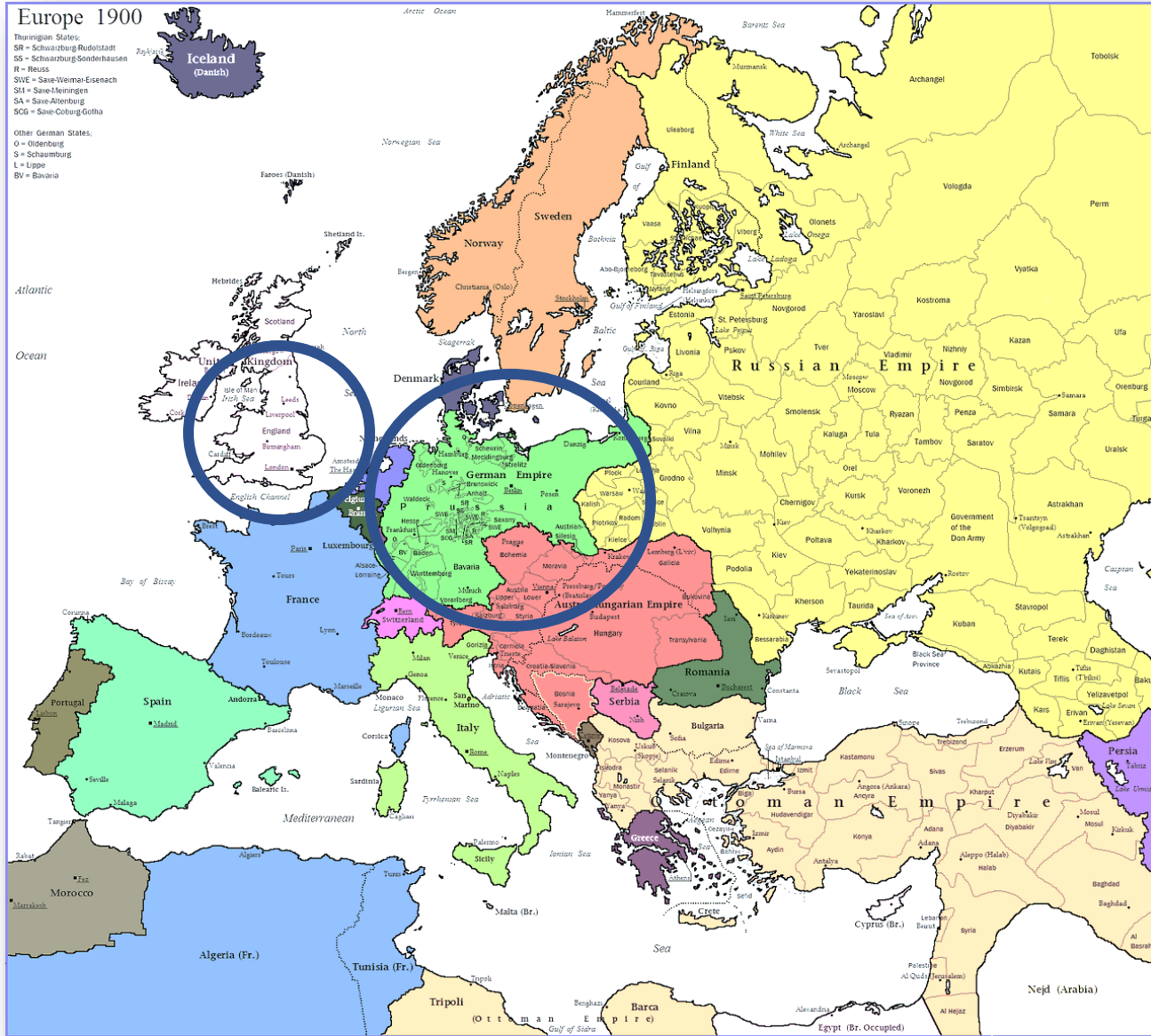
1. Introducció
2. Antecedents. Atomisme. Probabilitat i estadística
3. Hipòtesi quàntica de Planck
4. Hipòtesi quàntica d'Einstein
5. El Congrés Solvay, tardor de 1911
6. Hipòtesi quàntica de Bohr
7. La crisi de 1920's

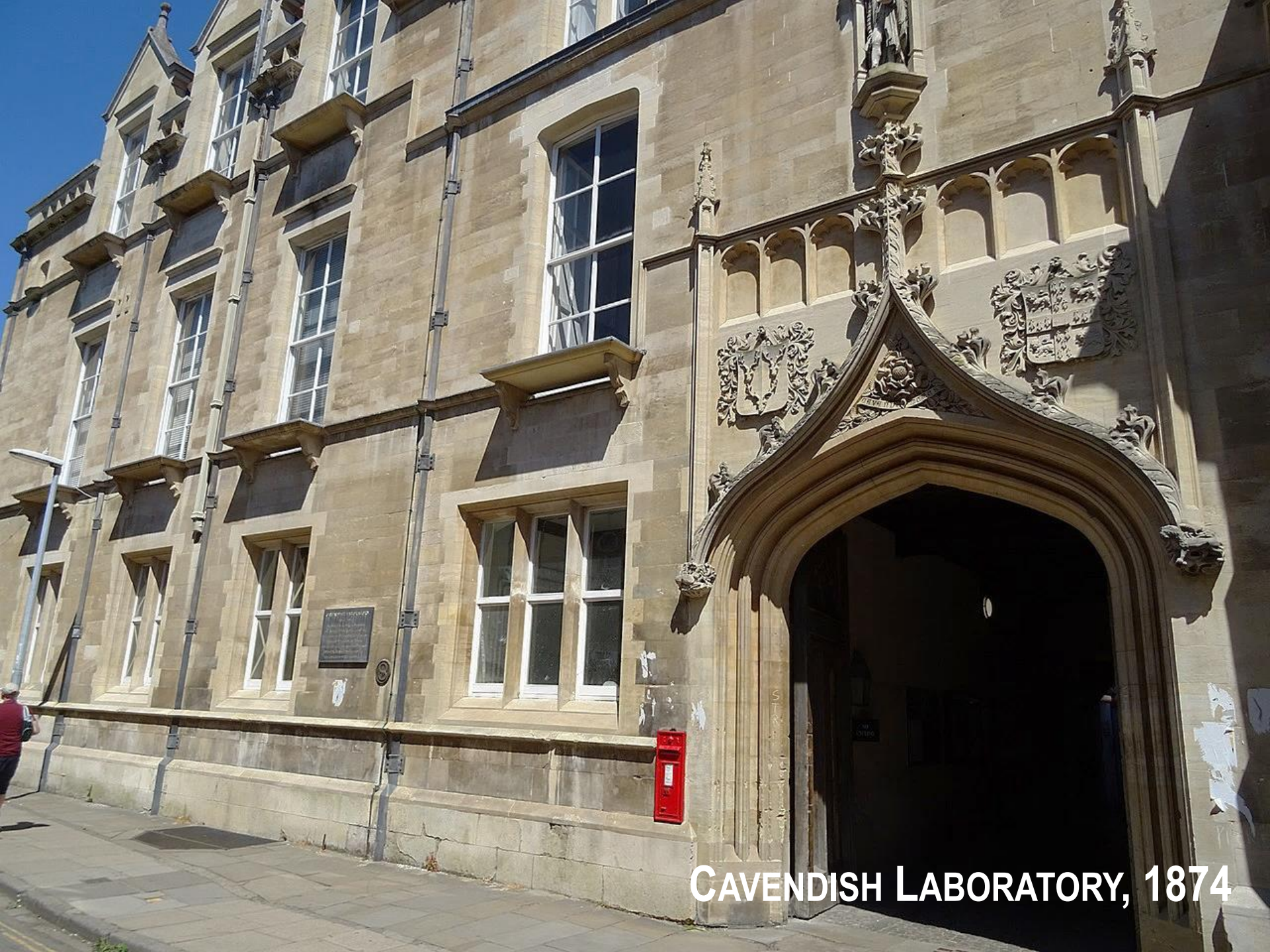


Europe 1900

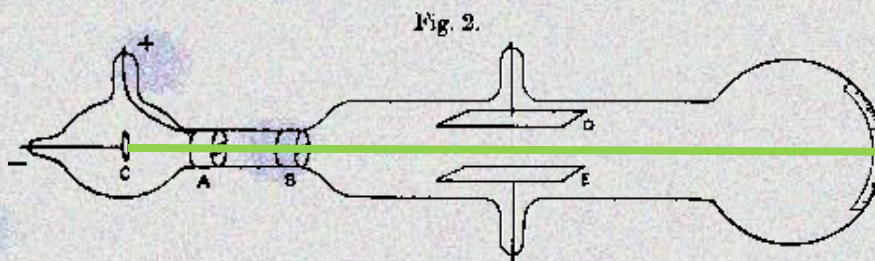
Thuringian States:
 SR = Schwarzburg-Rudolstadt
 SS = Schwarzburg-Sondershausen
 R = Reuss
 SUE = Saxe-Weimar-Eisenach
 SH = Saxe-Meiningen
 SA = Saxe-Altenburg
 SCG = Saxe-Coburg-Gotha

Other German States:
 O = Oldenburg
 S = Schaumburg
 L = Lippe
 BV = Bavaria





CAVENDISH LABORATORY, 1874



J.J. Thomson (1856-1940)

Investigacions en *raigs catòdics*

Model de Thomson



Experiments de dispersió

Thomson, 1906

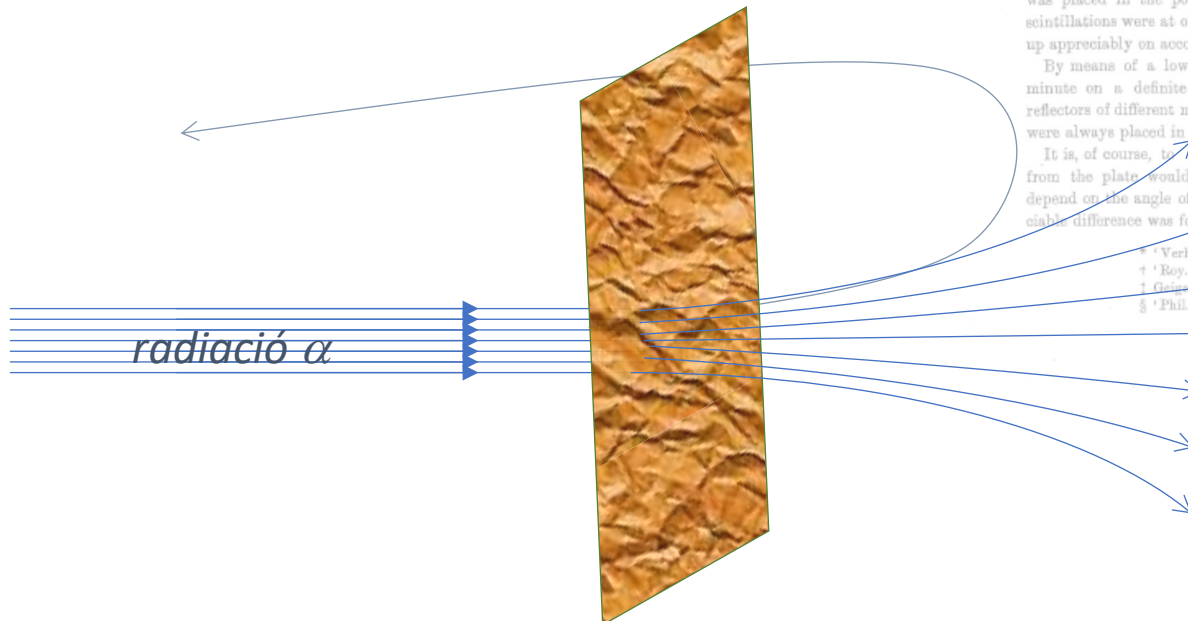


$$n_{el} \approx A$$

Rutherford, Geiger, Marsden, 1908



Nucli (Z)



For the observation of the reflected particles the scintillation method was used in all experiments. With regard to the details of the method we refer to the papers of Regener* and of Rutherford and Geiger.†

On account of the fact that the amount of reflection is very small, it was necessary to use a very intense source of α -rays. A tube was employed similar to that which has been proved to be a suitable source in the scattering experiments of one of us.‡ This source consisted of a glass tube AB (fig. 1), drawn down conically and filled with radium emanation, the end B of the tube being closed airtight by means of a mica window. The thickness of the mica was equivalent to about 1 cm. of air, so that the α -particles could easily pass through it.

Since it is of importance that the gas pressure inside this tube should be as low as possible, the emanation was purified according to the methods developed by Prof. Rutherford.§ The tube contained an amount of emanation equivalent to about 20 milligrammes RaBr_2 at a pressure of a few centimetres. The number of α -particles expelled per second through the

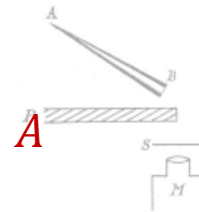


FIG. 1.

window was, therefore, very great, and, on account of the small pressure inside the tube, the different ranges of the α -particles from the three products (i.e. emanation, RaA , and RaC) were sharply defined.

The zinc sulphide screen S (fig. 1) was fixed behind the lead plate P, in such a position that no α -particles could strike it directly. When a reflector was placed in the position RR at about 1 cm. from the end of the tube, scintillations were at once observed. At the same time the screen brightened up appreciably on account of the reflected β -particles.

By means of a low power microscope, the number of scintillations per minute on a definite square millimetre of the screen was counted for reflectors of different materials. Care was taken that the different reflectors were always placed in exactly the same position.

It is, of course, to be expected that the number of α -particles reflected from the plate would be different in different directions, and would also depend on the angle of incidence. In our arrangement, however, no appreciable difference was found for different angles. This is due to the fact that,

* 'Verh. d. D. Phys. Ges.', vol. 10, p. 78, 1908.

† 'Roy. Soc. Proc.' A, vol. 81, p. 141, 1908.

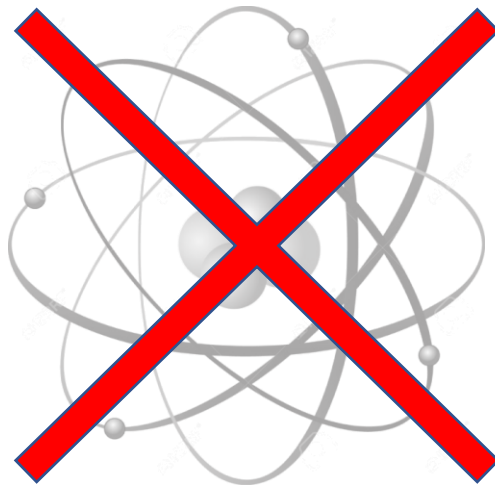
‡ 'Geiger, Roy. Soc. Proc.' A, vol. 81, p. 174, 1908.

§ 'Phil. Mag.' August, p. 300, 1908.

[La matèria està concentrada en nuclis]

1911 Rutherford proposa una
distribució d massa, no un model
atòmic.

“The Scattering of α and β Particles by
Matter and the Structure of the Atom”
Philosophical Magazine 21
May 1911, p. 669-688



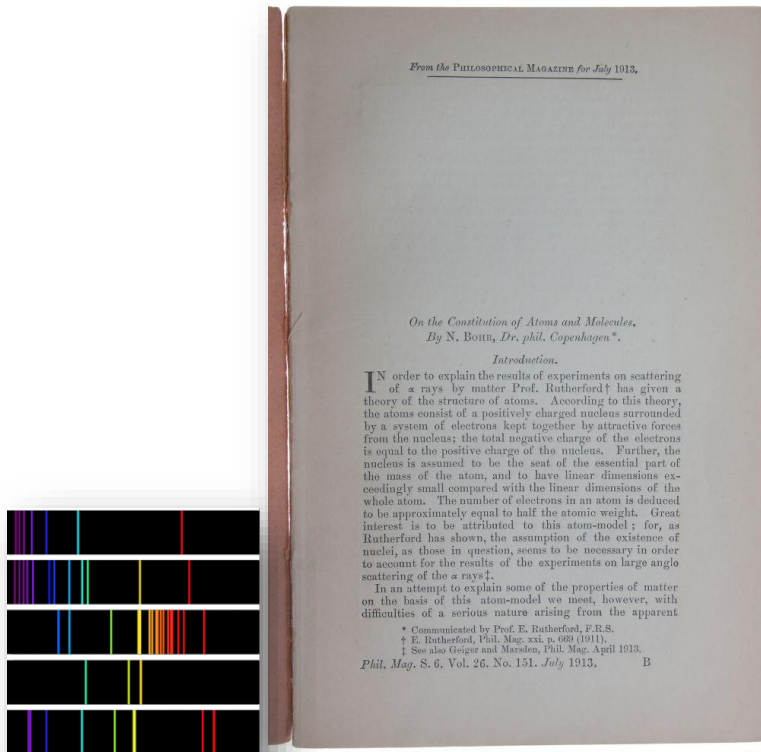
Scattering of α and β Particles by Matter.

Metal.	Atomic weight.	z .	$z/A^{3/2}$.
Lead	207	62	208
Gold	197	67	242
Platinum	195	63	232
Tin	119	34	226
Silver	108	27	241
Copper	64	14.5	225
Iron	56	10.2	250
Aluminium ...	27	3.4	243
Average			233

1913 MODEL ATÒMIC DE BOHR: EL PRIMER MODEL ATÒMIC

“On the constitution of atoms and molecules” *Philosophical Magazine* 26, 1-25, 476-502, 857-875

Niels Bohr, 1885-1962



MODEL ATÒMIC DE BOHR, 1913

Postulats: *[cal fer una nova física]*

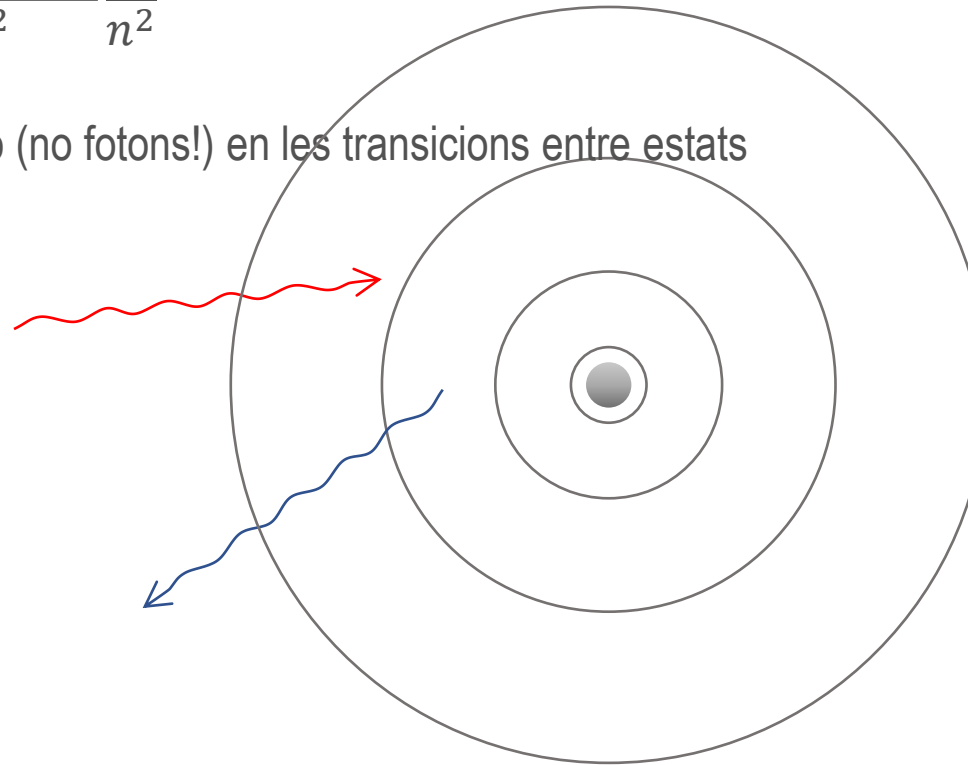
(I) Hi ha certs estats estacionaris on els electrons no radien ($L=n\hbar$)

$$E_n = \frac{2\pi^2 m e^4 E^2}{h^2} \frac{1}{n^2}$$

(II) Els àtoms emeten i absorbeixen radiació (no fotons!) en les transicions entre estats estacionaris

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

ν - freqüència d'emissió
 ω - freqüència de rotació



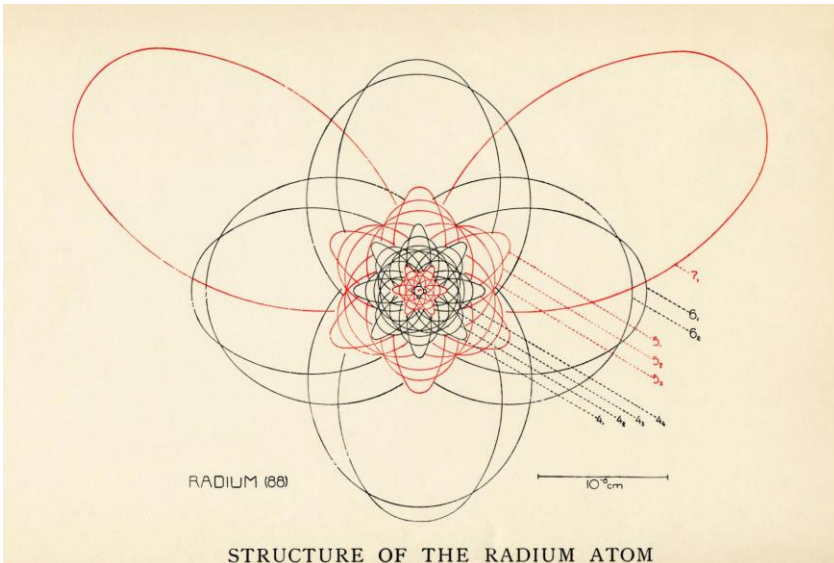
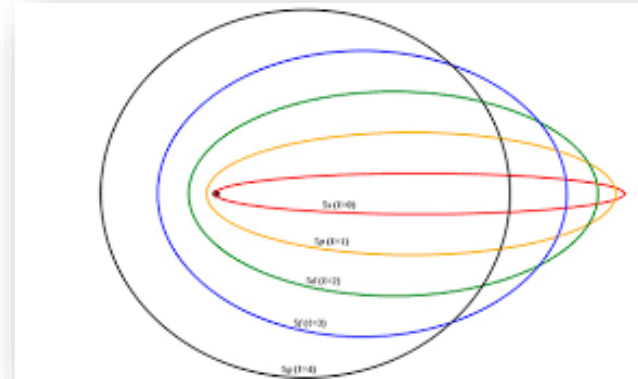
MODEL ATÒMIC DE BOHR





Arnold Sommerfeld (1868-1951)

Les regles de quantització, 1916



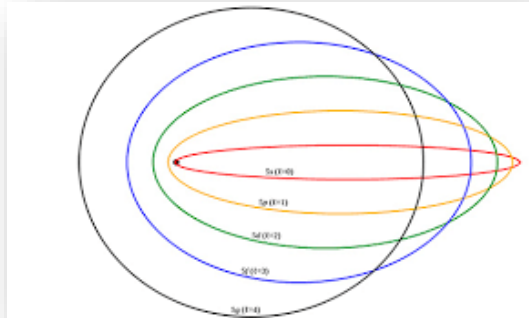
$$\oint dq_k p_k = n_k h$$

**MODEL ATÒMIC DE
BOHR-SOMMERFELD**

[Kragh & Nielsen, 2011]

MODEL ATÒMIC DE BOHR-SOMMERFELD

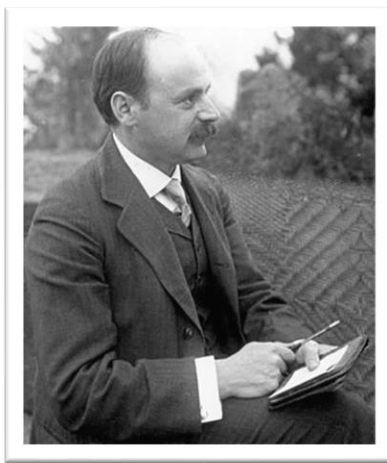
Les regles de quantització, 1916



$$\oint dq_k p_k = n_k h$$



Paul S. Epstein (1883-1966)



Karl Schwarzschild (1873-1916)

- H, He⁺ (Pickering), H₂⁺
- Llei Moseley
- Camps elèctrics
- Camps magnètics

MODEL ATÒMIC DE BOHR-SOMMERFELD TEORIA QUÀNTICA ANTIGA

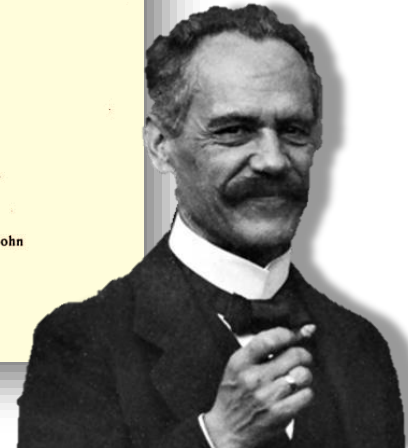
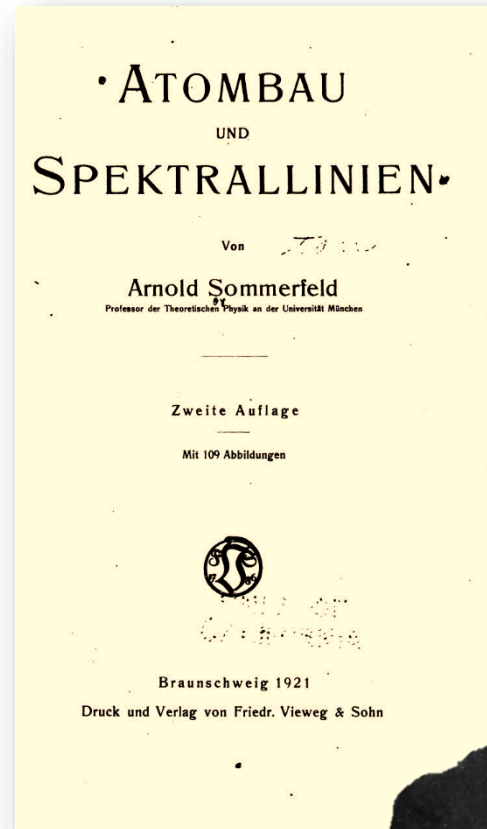
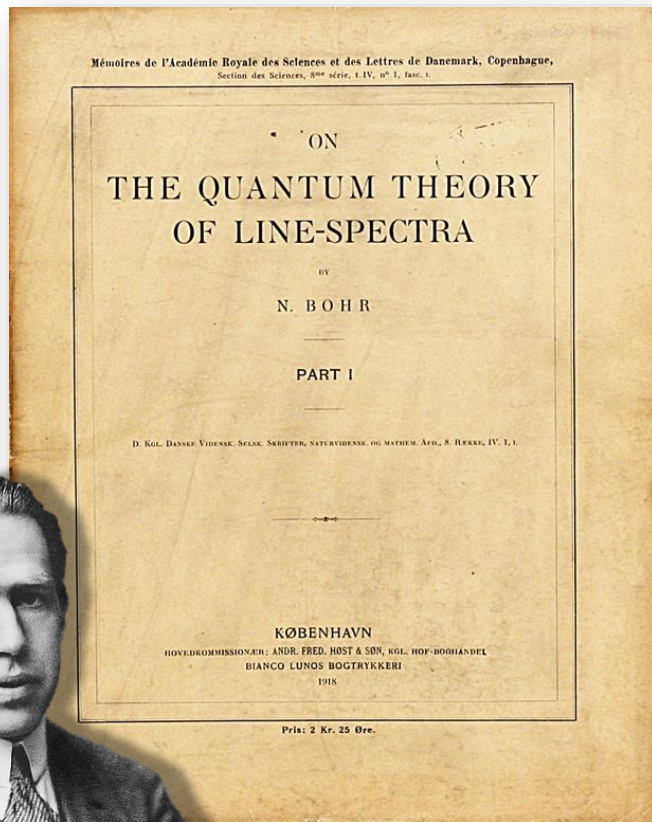
Nova teoria de Bohr:

On the quantum theory of line-spectra, 1918

Tractat de Sommerfeld

Atombau und Spektrallinien, 1919

[Mesures spectroscòpiques i estructura atòmica]

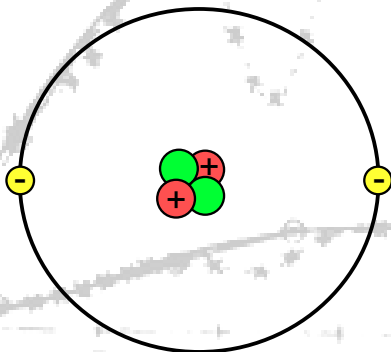


1. Introducció
2. Antecedents. Atomisme. Probabilitat i estadística
3. Hipòtesi quàntica de Planck
4. Hipòtesi quàntica d'Einstein
5. El Congrés Solvay, tardor de 1911
6. Hipòtesi quàntica de Bohr

7. La crisi de 1920's

Crisi!

- Efecte Zeeman
- Àtoms multieletrònics
- Camps creuats
- He (1922)



Naixement de la Mecànica Quàntica (1925-27)

Mecànica Matricial



Hendrik A. Kramers (1895-1952)



Werner Heisenberg (1901-1976)



Max Born (1901-1976)



Pascual Jordan (1902-1980)



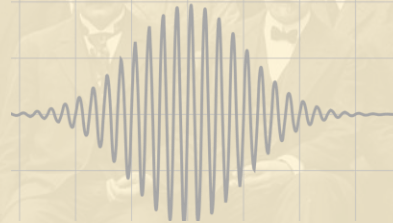
Wolfgang Pauli (1900-1958)



Louis De Broglie (1892-1987)



Erwin Schrödinger (1887-1961)



Paul A. M. Dirac (1902-1984)

Mecànica Ondulatòria