

La llum com ona i partícula: Albert Einstein & Max Planck

Emili Elizalde

ICE/CSIC & IEEC, UAB

*Conferencia de la Societat Catalana de Física
Sala Nicolau d'Olwer, Institut d'Estudis Catalans
Barcelona, 26 de gener de 2016*



Instituto de Ciencias del
Espacio (ICE/CSIC)

Institut d'Estudis
Espacials de
Catalunya (IEEC)



Guió

- Que és la llum? *La llum és una ona electromagnètica, com és ben sabut!*
- Doncs no: *la llum està formada per fotons* (petites partícules d'energia)
- Tampoc: *la llum és, a la vegada, ona i partícula sense massa*
- Però, és que resulta que les partícules amb massa i les molècules petites (i no tan petites!) *també tenen propietats ondulatòries*
- Radiació de cos negre (**Planck**) i efecte fotoelèctric (**Einstein**)
- Forats negres
- I els forats negres radien (**Hawking**) i la informació es perd: *quina catàstrofe!*

Teories històriques sobre la llum

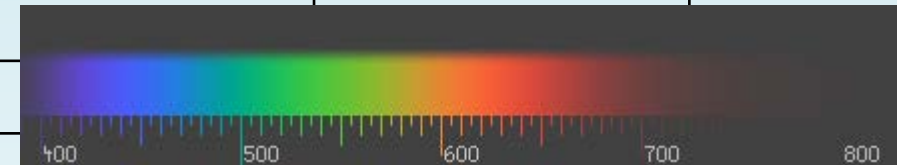
- 300 BC **Euclides** *Optica*: estudi matemàtic dels raigs rectilinis de llum
- 55 BC **Lucreci**: teoria corpuscular, heretada dels grecs
- Índia, escoles **Samkhya** i **Vaisheshika** (continu); **Vishnu Purana** llum “*els set raigs del Sol*”
- S II **Ptolomeu** *Optica*: sobre la refracció de la llum
- 1637 **Descartes**: llum ona, com so, analogia mecànica: inici de l'òptica moderna (refracció equivocada)
- 1660 **Gassendi**: atomista
- 1704 **Newton** *Opticks*: corpuscles materials emesos per una font en totes direccions (refracció equivoc.)
- 1665 **Hooke** *Micrographia*; 1690 **Huygens** *Treatise on light* ones en èter; 1800 **Young** interfer. d'ones
- S XIX **Euler, Ampère, Fresnel, Poisson, Foucault**: sempre ones
- 1847 **Faraday** vibració em d'alta freqüència; 1873 **Maxwell** eqs; **Hertz** detecció d'ones radio
- Tot quadrava! fins que ... 1887 **Michelson–Morley** exp

Que és la llum?: Una ona electromagnètica!

- La llum visible és radiació electromagnètica que l'ull humà és capaç de captar
- És la responsable de que tinguem el sentit de la vista
- La llum visible: longitud d'ona d'entre ≈ 350 i 780 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)
- O bé freqüència d'entre ≈ 380 i 790 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)

<u>Color</u>	Interval de longitud d'ona	Interval de freqüència		
<u>violat</u>	~ 380 a 430 nm	~ 790 a 700 THz		
<u>blau</u>	~ 430 a 500 nm	~ 700 a 600 THz		
<u>cian</u>	~ 500 a 520 nm	~ 600 a 580THz		
<u>verd</u>	~ 520 a 565 nm	~ 580 a 530 THz		
<u>groc</u>	~ 565 a 590 nm	~ 530 a 510 THz		
<u>taronja</u>	~ 590 a 625 nm	~ 510 a 480 THz		
<u>vermell</u>	~ 625 a 740 nm	~ 480 a 405 THz		

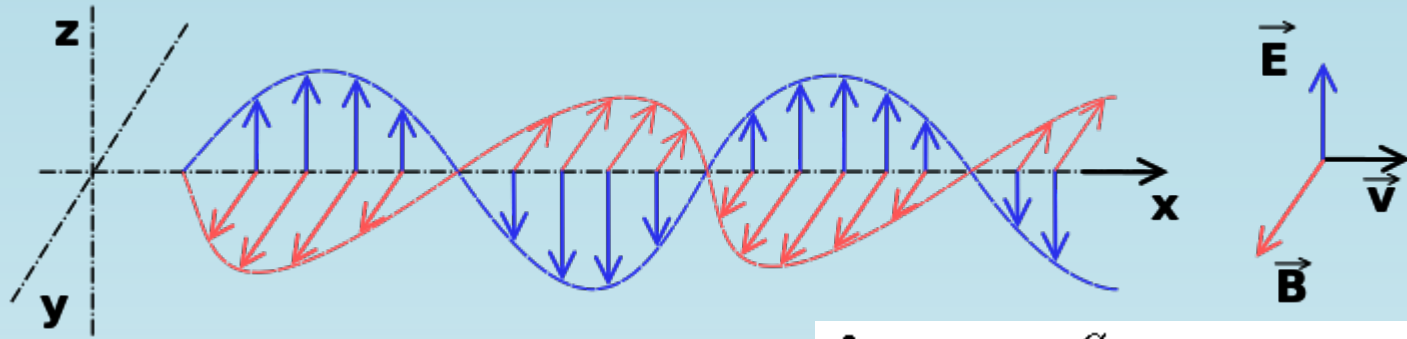
Es propaga en el buit



Espectre continu

L'espectre de la llum visible

Llum = ona



- Amplitud A
- Període T
- Freqüència ν
- Longitud d'ona λ
- Velocitat de propagació v

Equacions de Maxwell, 1861

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$$

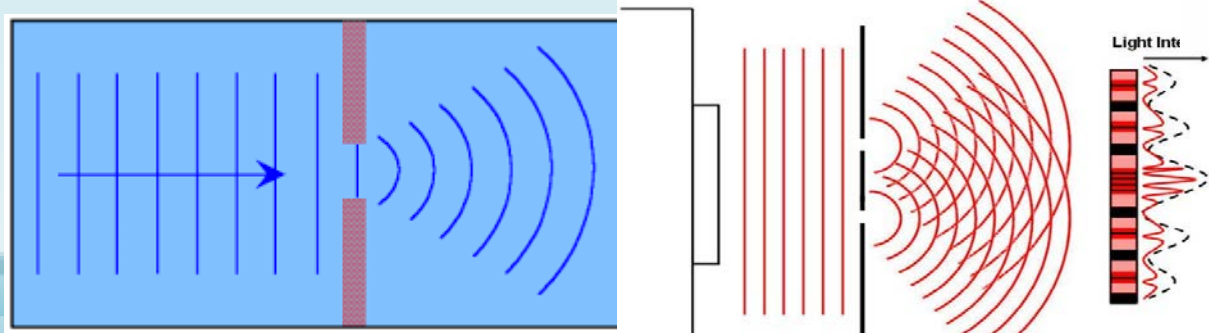


1831-79

James Clerk Maxwell.

• Difracció

principi de Huygens

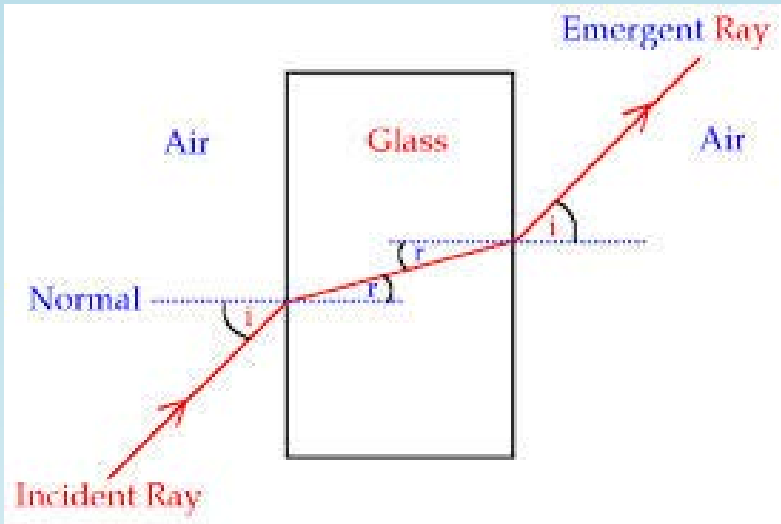


experiment de Young

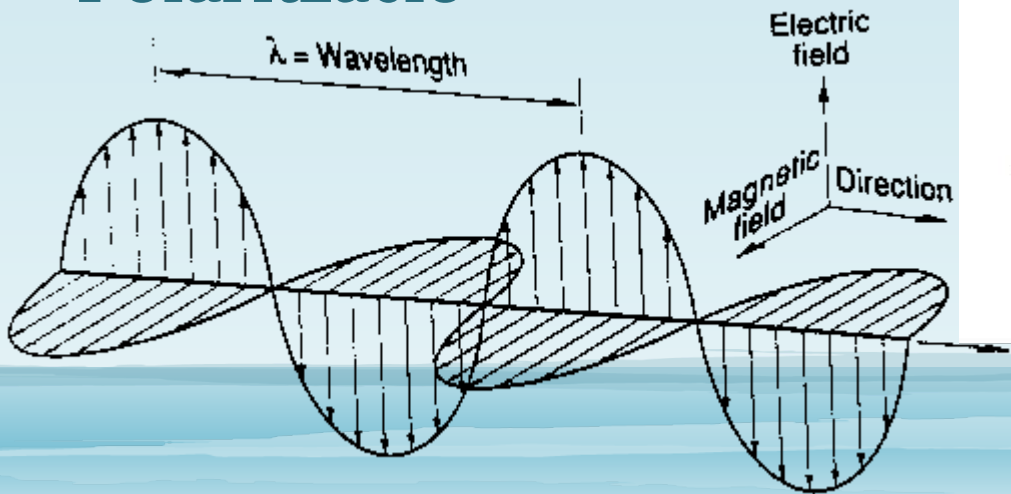


Llum = ona

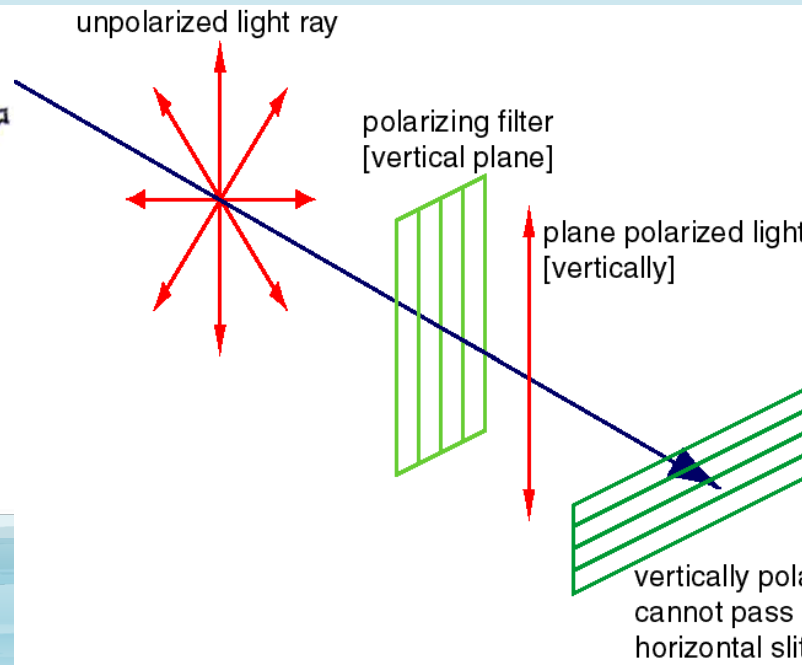
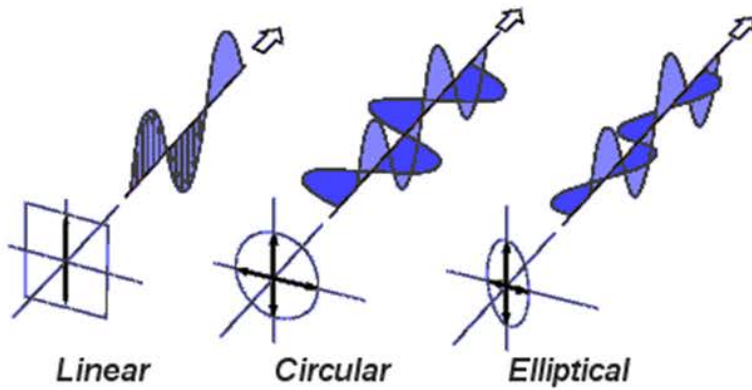
• Refracció



• Polarització



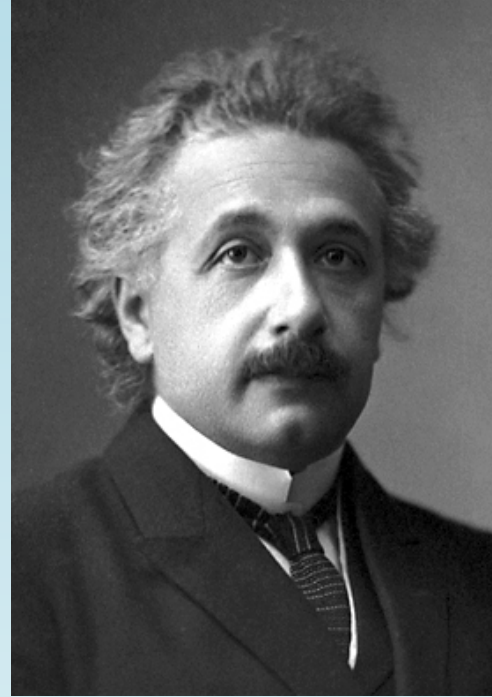
Polarization of electromagnetic waves



Però ... Max Planck & Albert Einstein

$$E = h\nu$$

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

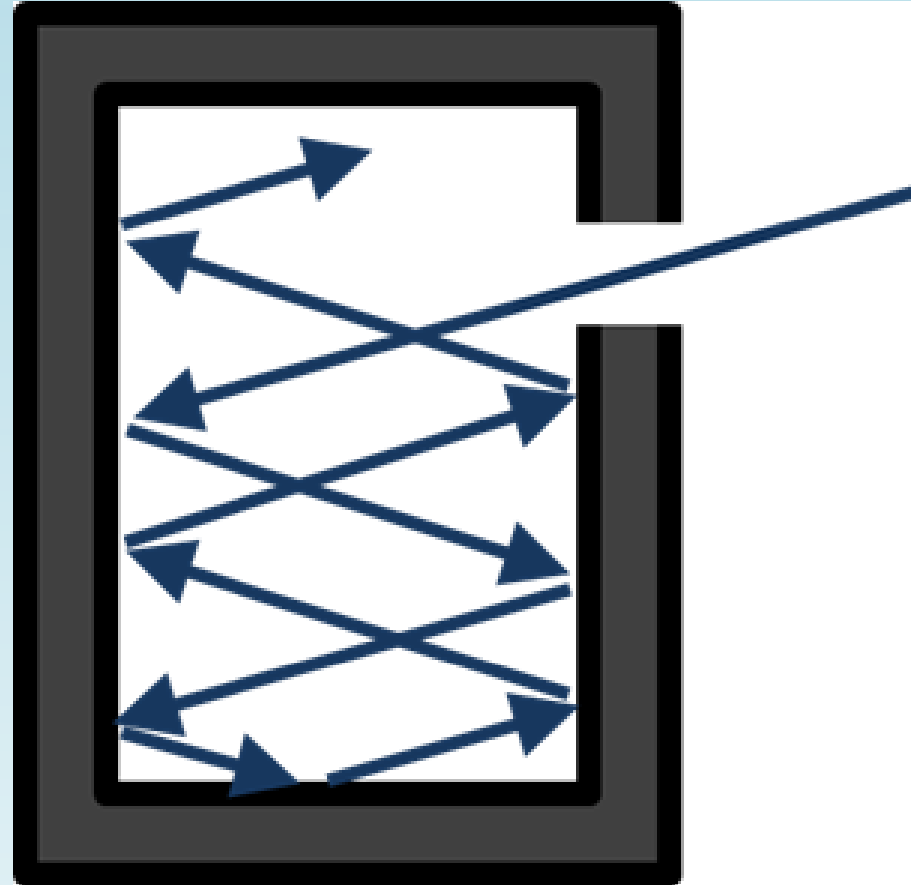


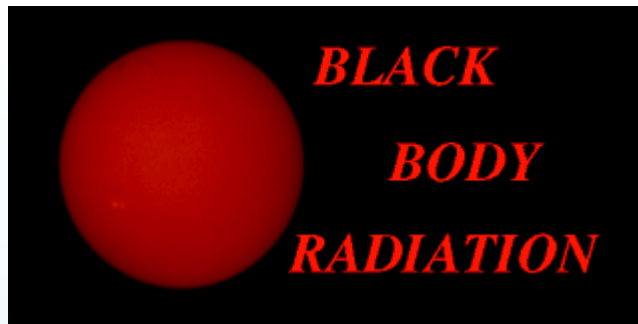
$$E = mc^2$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

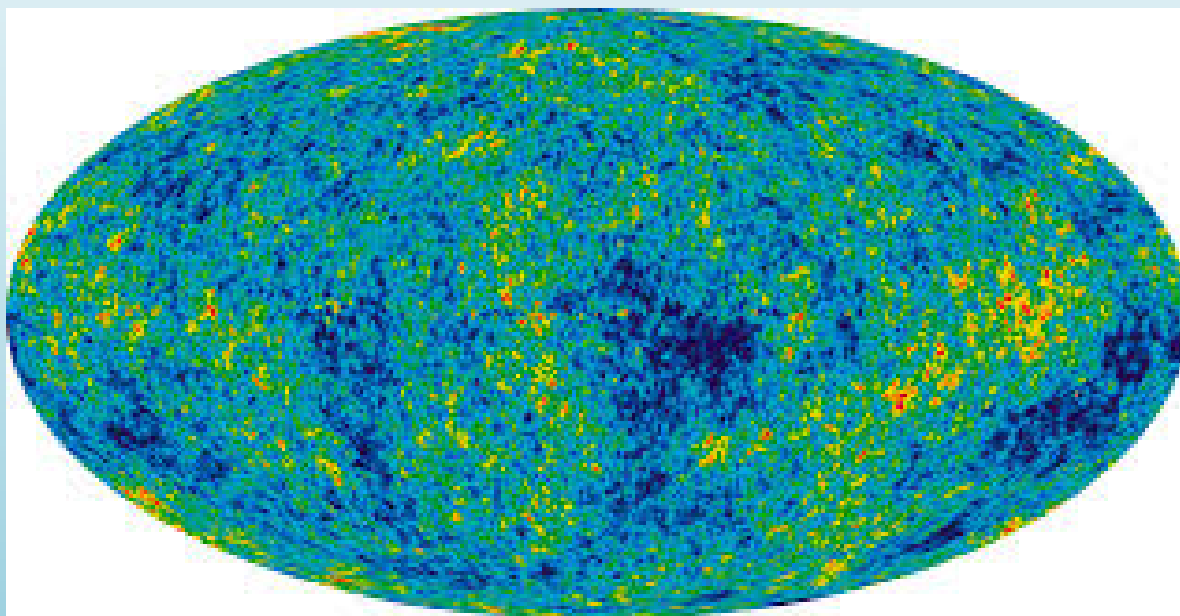
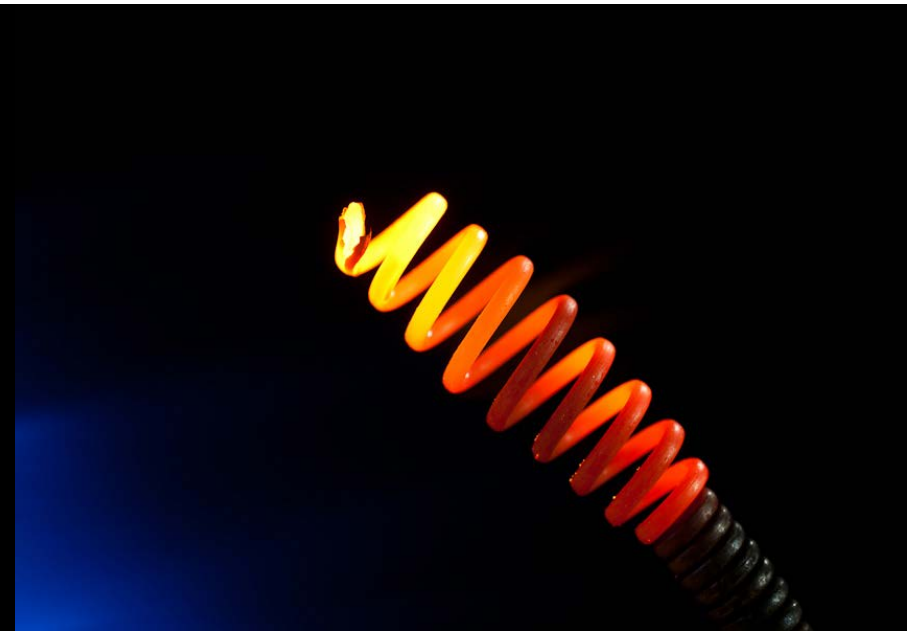
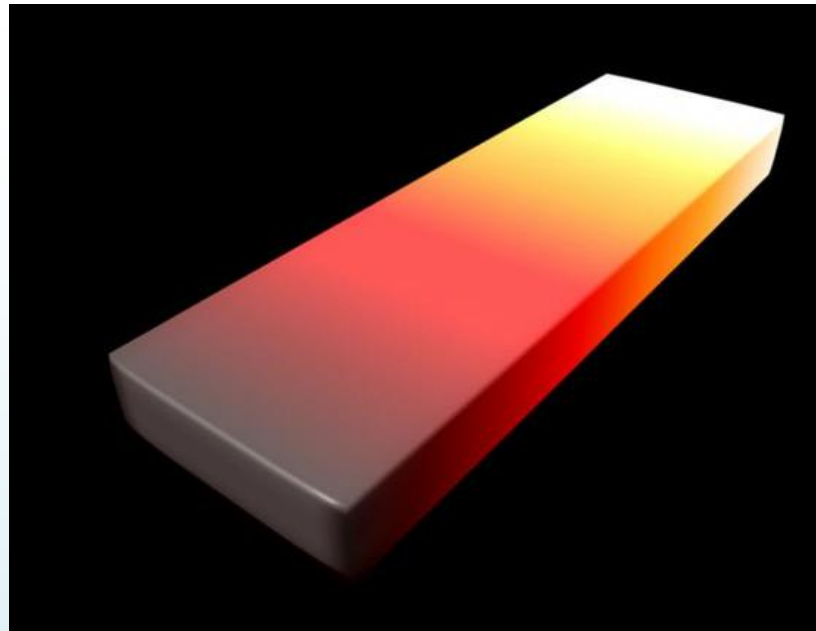
- Max Planck al seu fill: *“Crec que avui he fet un descobriment digne del propi Newton!”* PN de Física el 1918
- Albert Einstein va rebre el PN el 1921 *“... pel seu descobriment de la llei de l'efecte fotoelèctric”*

Cos negre

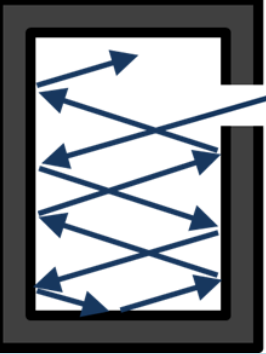




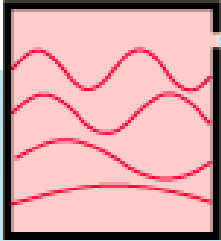
Radiació de cos negre



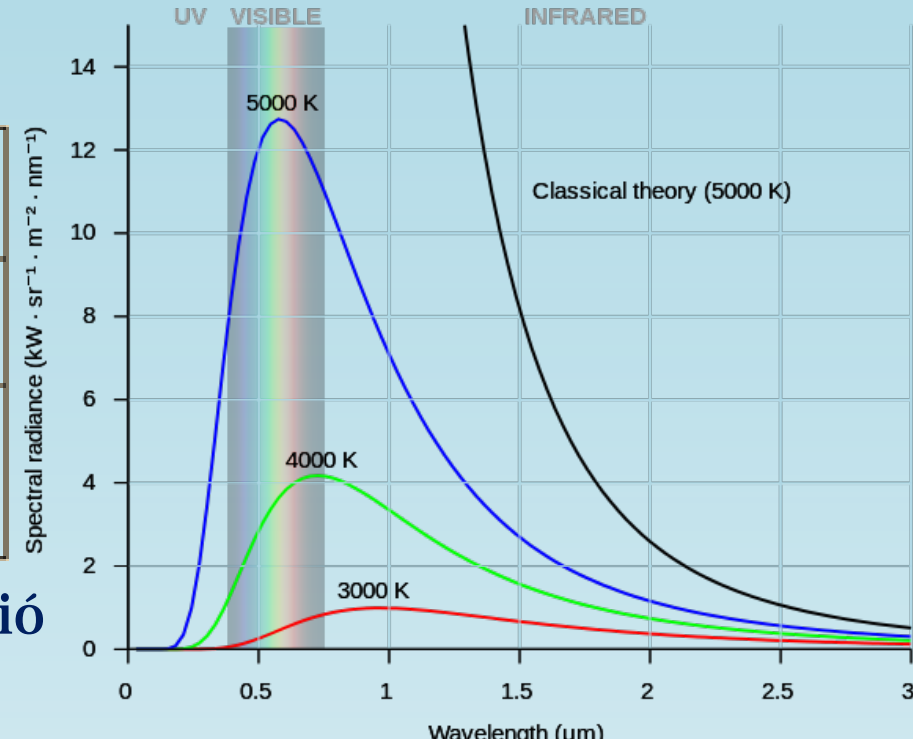
Radiació de cos negre



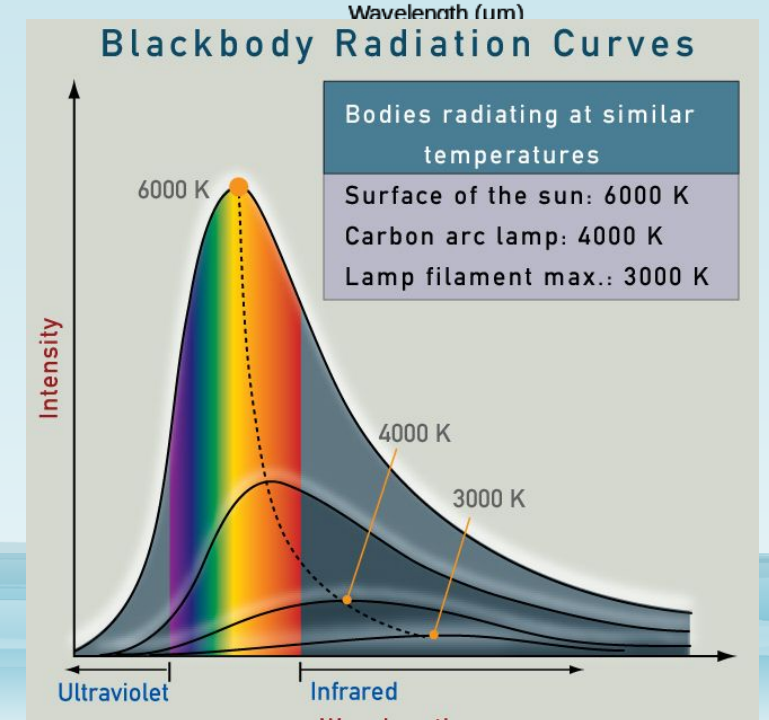
Radiation modes in a hot cavity provide a test of quantum theory



	#Modes per unit frequency per unit volume	Probability of occupying modes	Average energy per mode
CLASSICAL	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Equal for all modes	kT
QUANTUM	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Quantized modes: require $h\nu$ energy to excite upper modes, less probable	$\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$



- Un **cos negre** és un cos (ideal) que absorbeix tota la radiació electromagnètica que li arriba
- Un cos negre en equilibri termodinàmic emet radiació electromagnètica *rdcn*
 - *Més que qualsevol altre cos a la mateixa temperatura*
 - *D'una manera isotròpica*
 - *L'espectre d'emissió (radiació en cada longitud d'ona) només depèn de la temperatura del CN*
- Lleis de Rayleigh-Jeans (*cat ultravio*) i de Wien (*cat infraro*)
- Llei de Planck: “Hierzu ist es notwendig, U_N nicht als eine stetige, unbeschränkt teilbare, sondern als eine discrete, aus einer ganzen Zahl von endlichen gleichen Teilen zusammengesetzte Grösse aufzufassen“



Lleis de **Rayleigh-Jeans** (*catast ultravioleta*) i de **Wien** (*catast infraroja*) vs llei de **Planck**

Rayleigh-Jeans

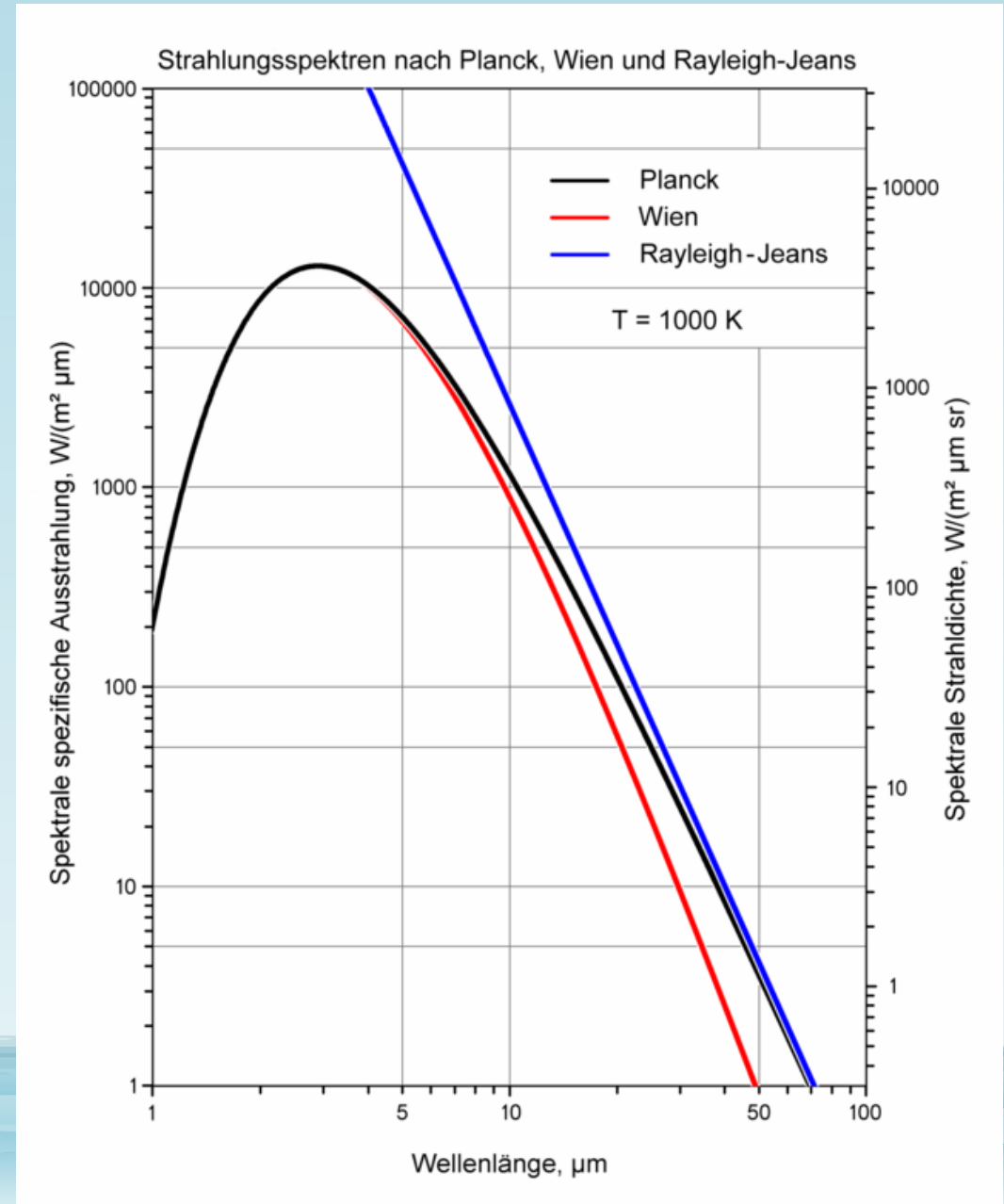
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ck_{\text{B}}T}{\lambda^4}$$

Wien

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda k_{\text{B}}T}}$$

Planck

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_{\text{B}}T}} - 1}$$



Probability of system at temperature T having energy E : **Boltzmann's formula** $e^{-E/kT}$

Also valid in quantum systems!

A classical simple harmonic oscillator at T will have a probability distribution proportional to

$$e^{-E/kT} = e^{-(mv^2 + m\omega^2 x^2)/2kT},$$

so the expectation value of the energy is

$$\bar{E} = \frac{\iint \left(\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2\right) e^{-(mv^2 + m\omega^2 x^2)/2kT} dv dx}{\iint e^{-(mv^2 + m\omega^2 x^2)/2kT} dv dx} = kT,$$

just the classical equipartition of energy.



Ludwig Boltzmann 1844-1906

Planck: "Un acte de desesperació..."

If the oscillator is quantized: the energies are now in steps hf apart: $0, hf, 2hf, 3hf, \dots$

The relative probabilities of these states will be in the ratios: $1 : e^{-hf/kT} : e^{-2hf/kT} : e^{-3hf/kT} : \dots$

To find the oscillator energy at this temperature, we use these probabilities weighted by the corresponding energy, and divide by a normalization factor to ensure that the probabilities add up to 1:

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{hfe^{-hf/kT} + 2hfe^{-2hf/kT} + 3hfe^{-3hf/kT} + \dots}{1 + e^{-hf/kT} + e^{-2hf/kT} + e^{-3hf/kT} + \dots} \\ &= \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} \end{aligned}$$

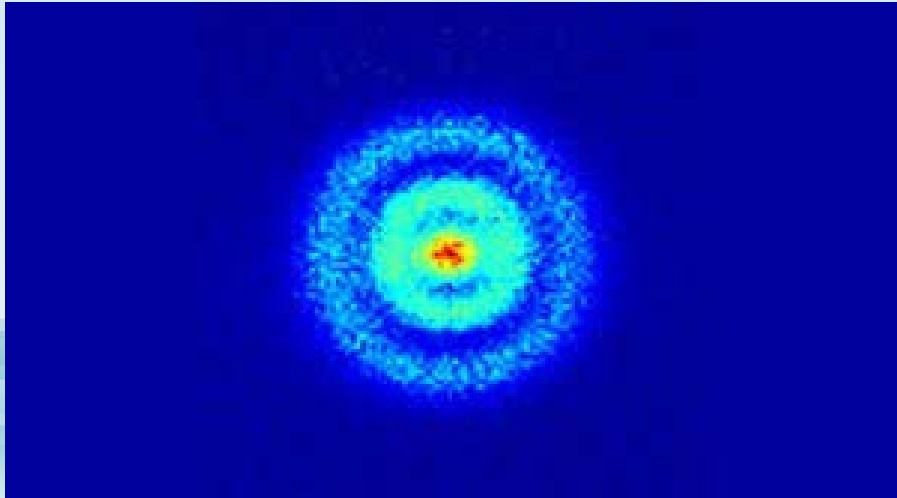
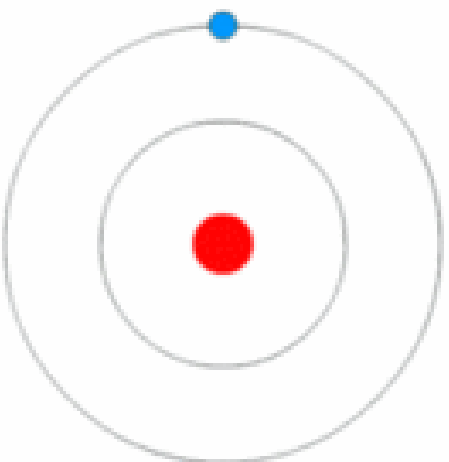
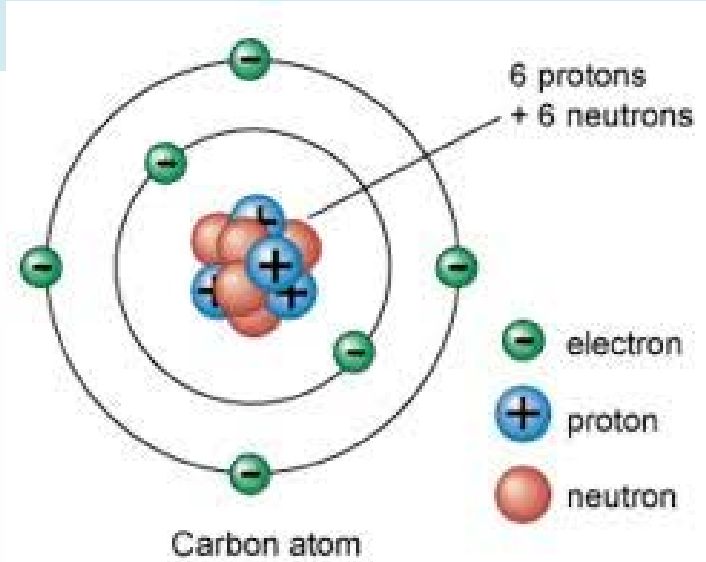
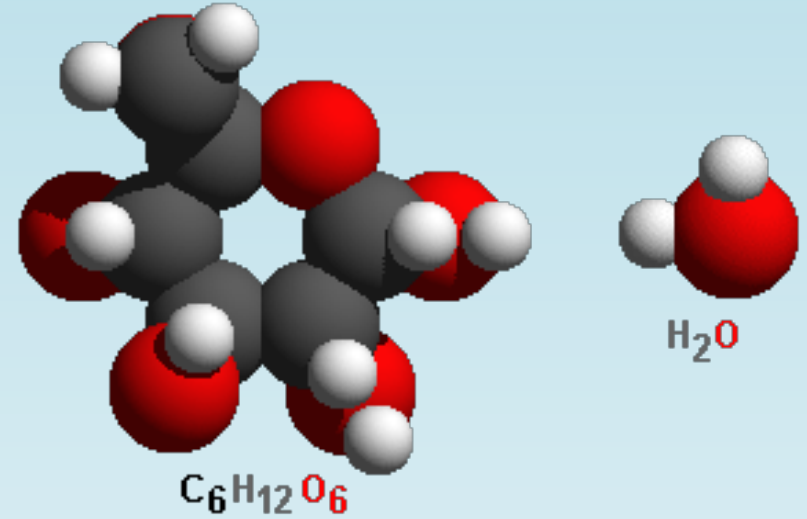
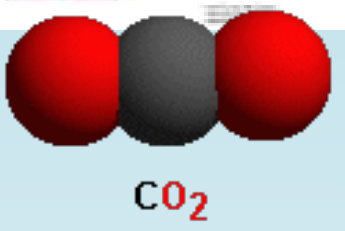
Planck's Formula from the Boltzmann's Distribution

Física Quàntica

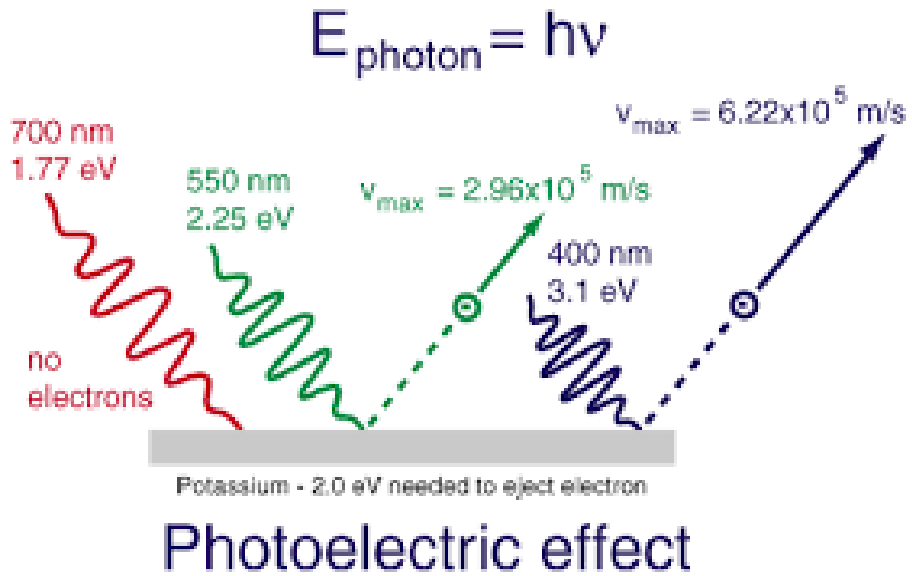
- Elements
- Molècules
- Àtoms

A standard periodic table of elements, color-coded by groups. It includes the main groups, transition metals, and the lanthanide and actinide series at the bottom.

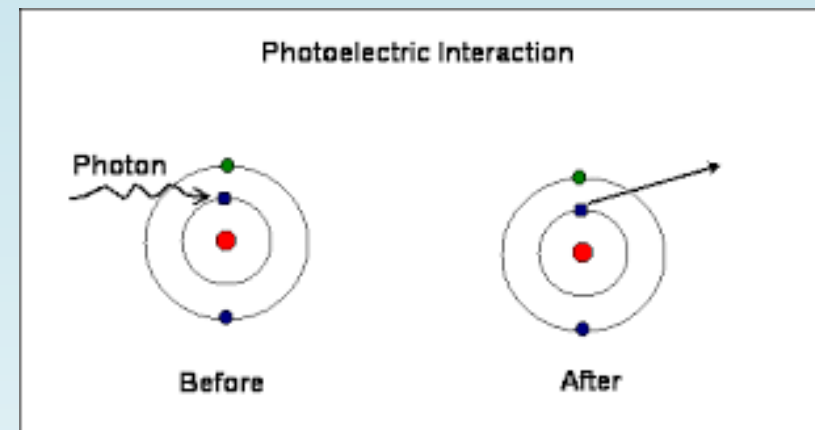
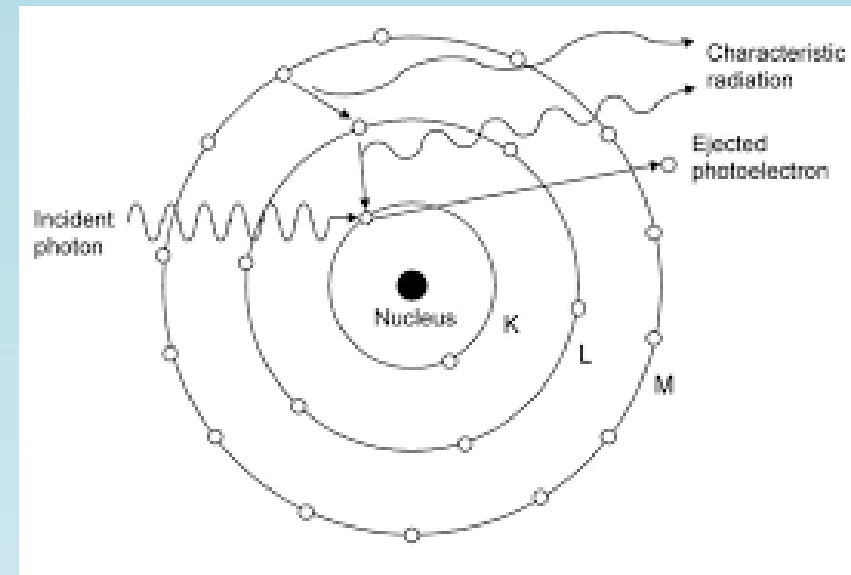
Dmitri Mendelèiev (1834-1907)
Lothar Meyer (1830-95)



Efecte fotoelèctric



- Molts metalls emeten electrons quan la llum incideix a sobre d'ells
- Transferència d'energia de la llum a l'electró
 - Hom pensava: -- *Més intensitat de radiació*
-- *Més temps d'exposició*
 - No era així: *necessitat d'una freqüència mínima (llindar), encara que la intensitat fos molt baixa*
- Einstein proposà: llum discreta $E = h\nu$
- Recolçà i donà ple sentit a la teoria de Planck

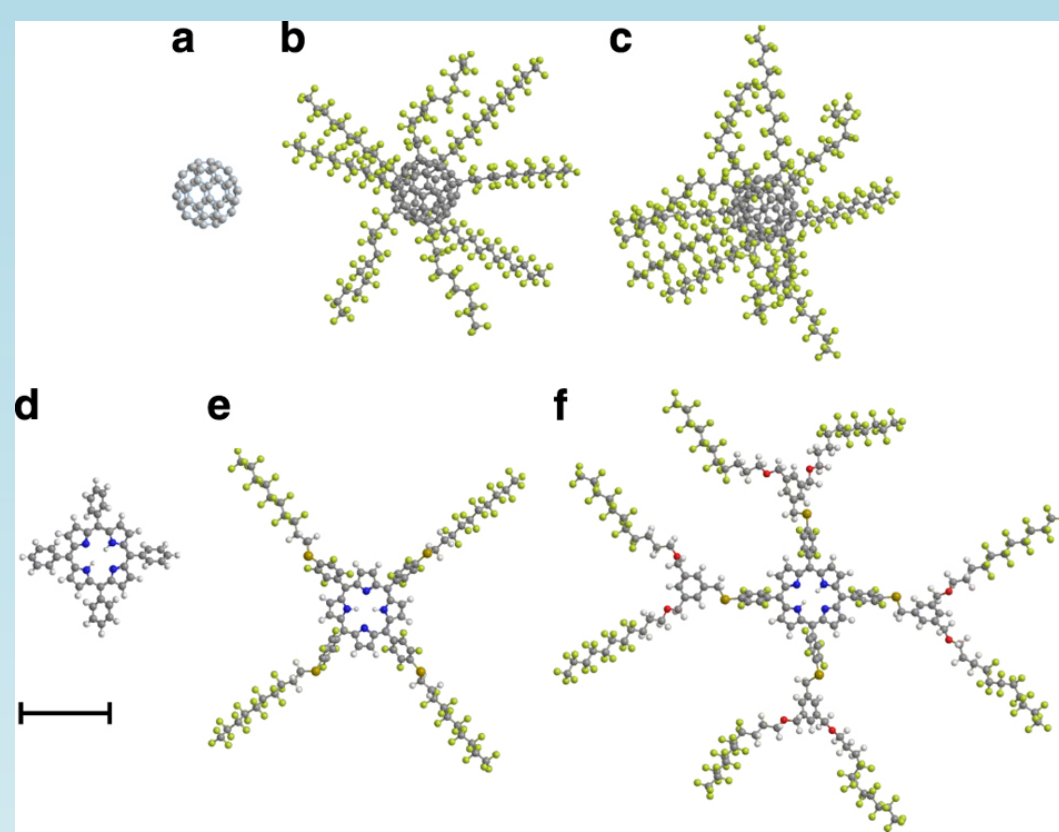


Efecte Compton --Thomson, Schwinger
1923, raigs X d'alta energia (17 keV):
scattering inelàstic d'un fotó i una partícula carregada (e generalment). Compton invers.

Interferència amb grans molècules



Prof. Dr. Markus Arndt
Quantum Nanophysics & Molecular
Quantum Optics
Faculty of Physics, University of Vienna
Boltzmannngasse 5, A-1090 Wien, Austria

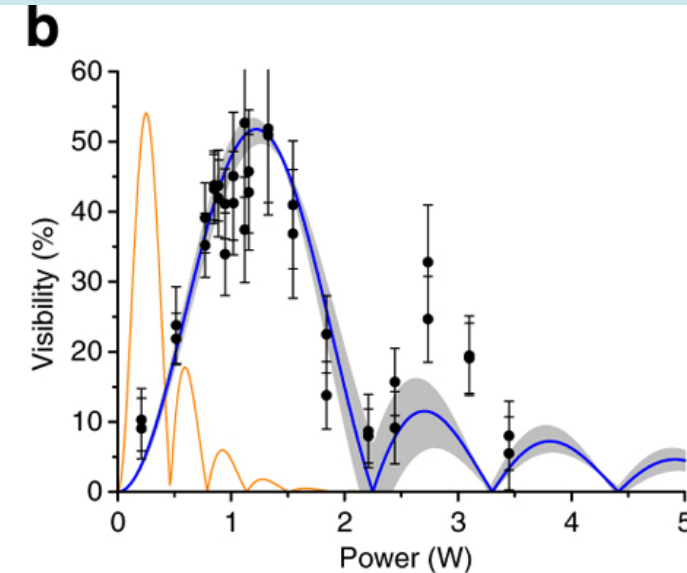
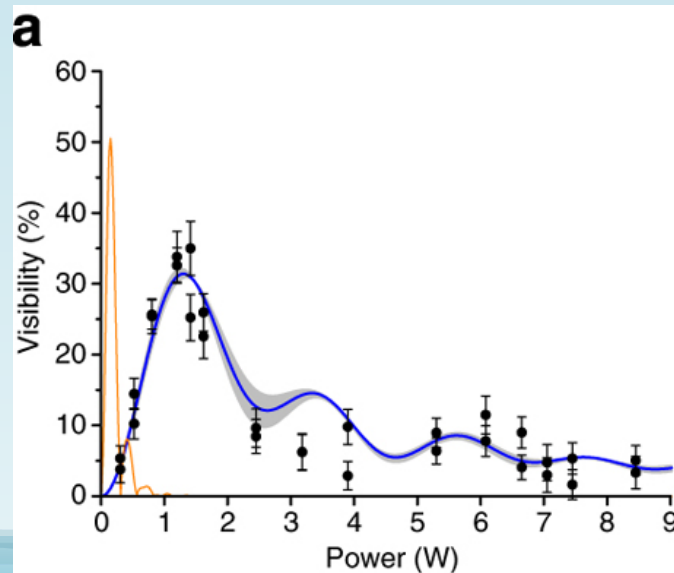


Interference of Fullerenes

Experiment is based on the world's smallest soccer balls, composed of 60 carbon atoms

Molecular complexes of up to 30 amino acids or nucleotides:

430 atoms, size 60 Å, mass 6,910 AMU



“Complex systems, with more than 1,000 internal degrees of freedom, can be prepared in quantum states that are sufficiently well isolated from their environment to avoid decoherence and to show almost perfect coherence”

Forats Negres BH



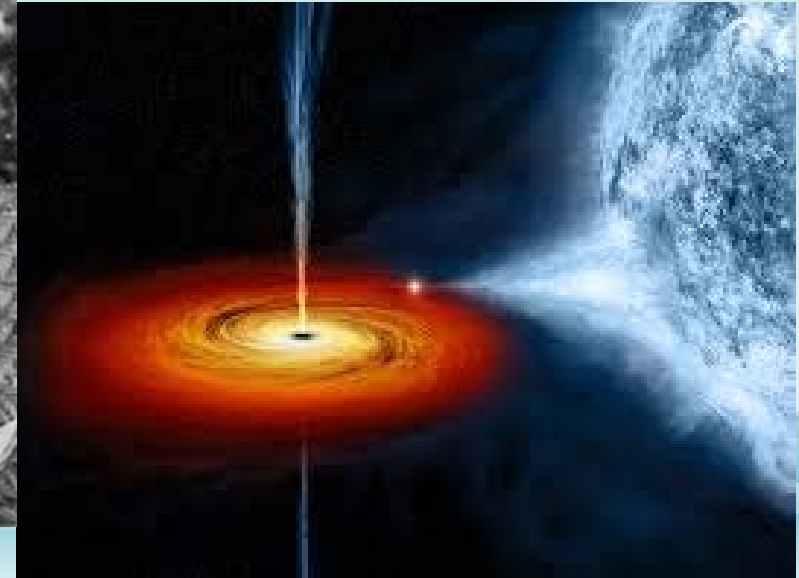
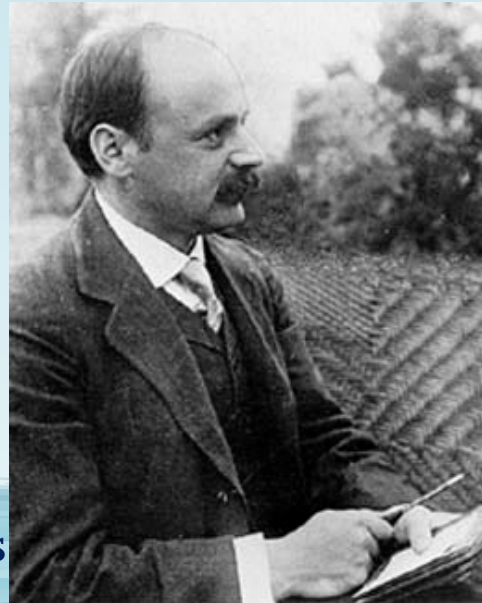
- John Michell, carta 1783 a Henry Cavendish de la Royal Society (estrella fosca o negra): *“Si una esfera de la mateixa densitat del Sol superés la seva mida en 500 vegades, un cos que caigués des d’una alçada infinita hauria adquirit a la seva superfície més velocitat que la llum; tota la llum emesa per un cos com aquest retornaria degut a la seva pròpia gravetat”*
- Pierre-Simon Laplace 1796 *Exposition du système du Monde*, Ed 1 i 2 (no en posteriors)

- Albert Einstein 1915 Teoria de la Relativitat General $ds^2 = \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) - c^2 \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right) dt^2$

- Karl Schwarzschild, Dec 1915, carta a Einstein
- David Finkelstein, 1958: interpretació com una regió de l’espai de la que res no es pot escapar
- John Wheeler, 1967: els anomenà Black Holes

- Difícil detectar-los directament, inferim la seva existència indirectament:

- . Acreten materia al seu voltant . Devoren estels propers
- . Emeten gama ray bursts . Més i més candidats



Evaporació dels forats negres: la radiació de Hawking

- Stephen Hawking 1974: “*Tot forat negre de Schwarzschild de massa M emet radiació electromagnètica com si fos un cos negre a temperatura*”

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M}$$

- Jacob Bekenstein: “*Tot forat negre té una temperatura i una entropia finites i no nul·les*”

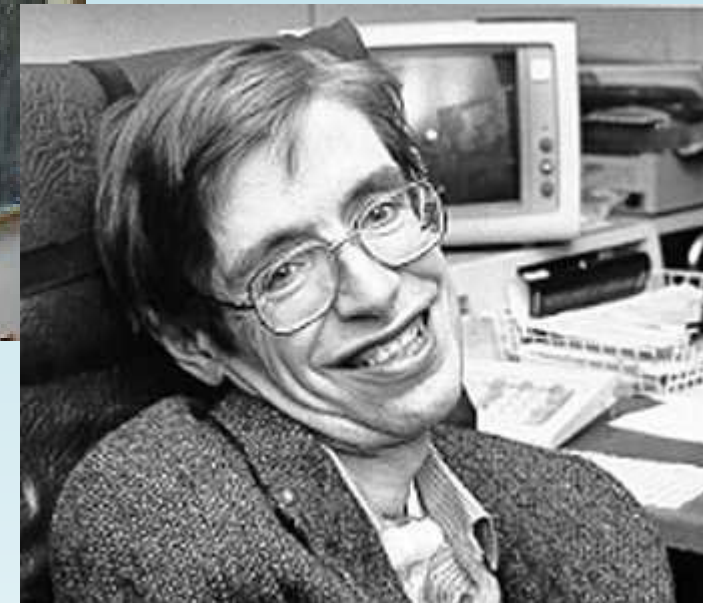
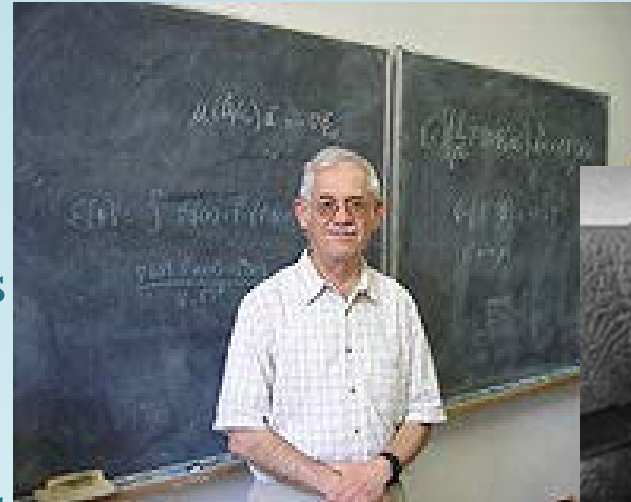
$$S_{\text{BH}} = \frac{kA}{4\ell_P^2}$$

- La radiació Hawking emesa per un forat negre seria l'emissió de cos negre més perfecta coneguda

- Els forats negres microscòpics emetrien molta més radiació i desapareixerien molt ràpidament

- Si les teories d'extra-dimensions son correctes, el LHC del CERN podria arribar a crear forats negres microscòpics

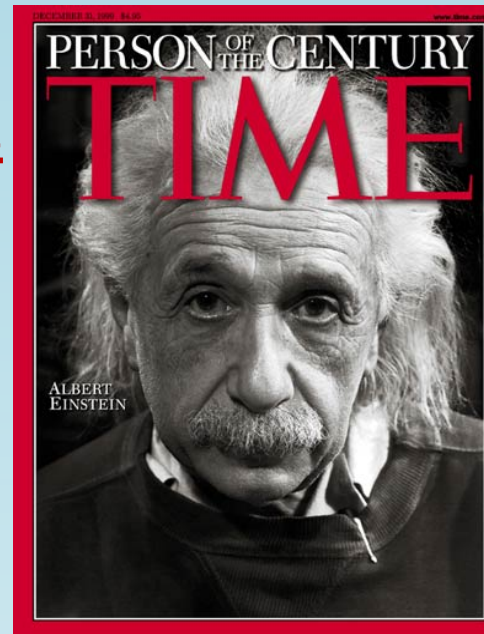
- S Hawking: “*My work followed a visit to Moscow in 1973 where the Soviet scientists Yakov Zeldovich and Alexei Starobinsky showed me that according to the quantum mechanical uncertainty principle, rotating black holes should create and emit particles*”
in *A Brief History of Time*, Bantam Books, 1988



Catàstrofe de la pèrdua d'informació

25 Nov 2015: 100 anys de Relat General

- TIME: Einstein fou declarat “Persona del Segle XX”
- W Isaacson, 1999: *“El Segle XX serà recordat, sobre tot, pels avenços en Ciència i en Tecnologia.”*
- GH Hardy, 1940: *“La matemàtica grega és permanent, més inclús que la literatura grega. Els idiomes moren, les idees matemàtiques viuen per sempre.”*
- Editorial de TIME, 1999: *“D’aquí a cent anys, d’aquí a cent vegades cent anys, per molts mil·lennis que passin, el nom que resultarà més perdurable de tota la nostra era —tan admirable, per cert, per tantes i tantes coses— serà el d’Albert Einstein.”*



Es ist die Kunst des Lebens, das
Schicksal geduldig hinzunehmen
und dabei die lebenspendende
Aktivität zu bewahren

A. Einstein 1930.

Es tot un art a la vida
encaixar els moments dolents
amb paciència
per tal de preservar, d'aquesta forma,
la nostra activitat quotidiana
(que se'ns l'emporta, la vida)

A. Einstein 1930

Secretary-General Ban Ki-moon

STATEMENT

Secretary-General's message for the Opening Ceremony of the International Year of Light

Paris, France, 19 January 2015

“ Let there be a Year of Light ”

The International Year of Light will commemorate the achievements of scientific figureheads, who paved the way ahead for humanity's understanding of light:

- 1015 – **Ibn Al-Haytham's** Book of Optics;
- 1815 – **Augustin-Jean Fresnel** and the wave nature of light;
- 1865 – **James Clerk Maxwell** and electromagnetic waves;
- 1915 – **Einstein's** theory of general relativity, exploring light through space and time;
- 1965 – **Arno Penzias** and **Robert Wilson's** discovery of cosmic microwave background, and **Charles Kao's** pioneering development of fiber optics, which enabled technologies such as broadband today.

La primera llum del Cosmos

En un Principi ... de sobte,
era el Buit l'hidrogen condensà
d'espai-temps en àtoms rodonets
quàntic. i primorosos.
I el Buit fluctuava... I el fotó, encara tremolant,
I una petita espurna, pogué obrir-se camí,
instantònica entre els transparents àtoms.
—pot ser à la Hawking-Turok— Fou així,
va endegar la inflació. que un clar torrent de llum,
Que generà de bellesa indescriptible
—d'acord amb la Teoria— i delicada,
la sopa primigènia: travessa l'Univers
plasma de gluons i quarks, que ja existia.
dens i energètic; I es feu la llum ...
tan obscur com la mort, de la primera albada
la soledat profunda: de la Història:
un cos negre perfecte la primera llum del Cosmos;
bategant a l'uníson. que contemplem,
L'expansió el refredà, extasiats, avui dia;
el dit quark-gluó plasma... que ens omple el cor
I tres-cents mil anys passaren de serenor
quan, infinita.

Emili Elizalde, 11/11/2015

Gràcies

*SUPLEMENT
LA TERRA
A L'UNIVERS*

ASTRONOMIA

Josep Lluís Ballester

José Bernabeu

David Bueno i Torrens

Francisco Javier Castander Serentill

Jordi Díaz Cusí

Emili Elizalde

Robert Estalella Boadella

David Galadí-Enríquez

Enrique García Melendo

Josep Miquel Girart Medina

Jordi Isern

Carme Jordi

Jordi Llorca i Piqué

Vicent J. Martínez

Eduard Masana

Aina Palau Puigvert

Ignasi Ribas

Pedro Ruiz-Castell

Sota la direcció científica de

Josep Maria Trigo i Rodríguez

ENCICLOPÈDIA CATALANA

Barcelona, 2012