

ona o partícula ?

Emili Elizalde, Prof. Dr. Prof. h.c.

ICE/CSIC & IEEC, UAB Campus

Dissabtes de la Física UAB 2014-15 --- 15^a edició --- 14 Febrer 2015

Els Quatre Elements

• Terra S

Babilònia: *Enûma Eliš* (S. VIII-VI aC)

• Aigua [Mar] L

Empèdocles: 4 “*arrels*” ριζώματα (490-430 aC)

• Aire [Vent] G

Demòcrit: “*àtom*” άτομο (460-370 aC)

• Foc P

Plató: “*elements*” στοιχεῖον (427-347 aC)

... i la Quintaessència

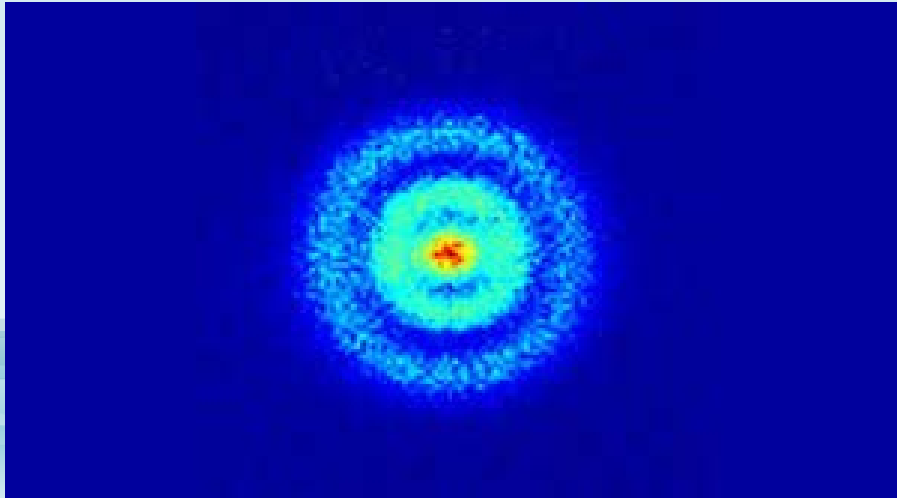
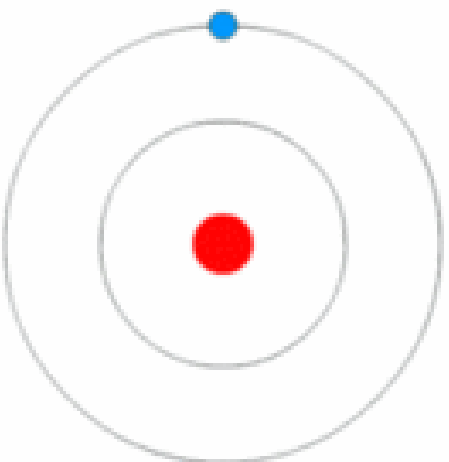
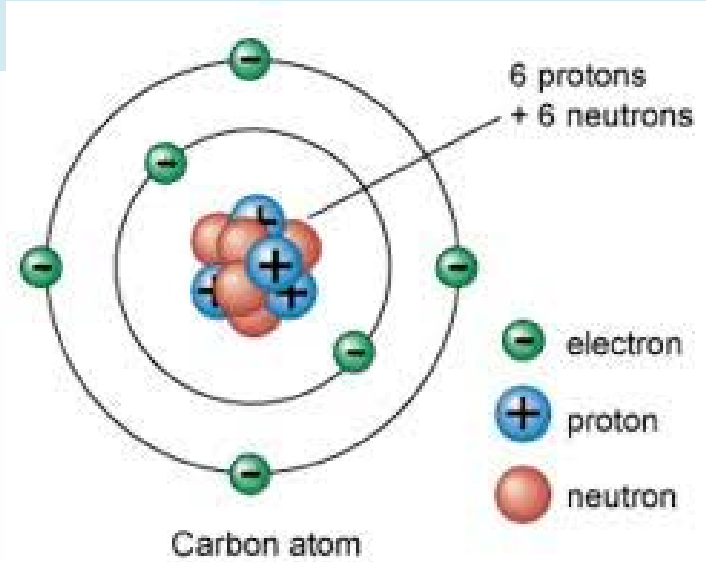
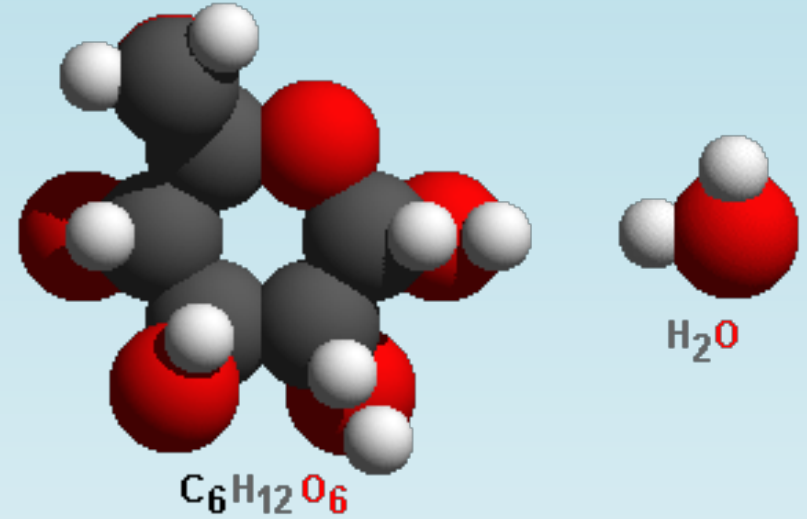
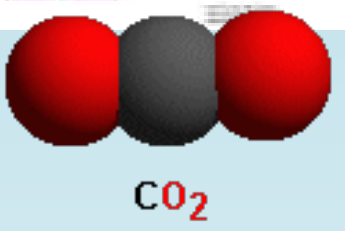
• Eter, Akasha, Espai [Cel] (*mes enllà de la matèria*)

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)



Continu vs Discret

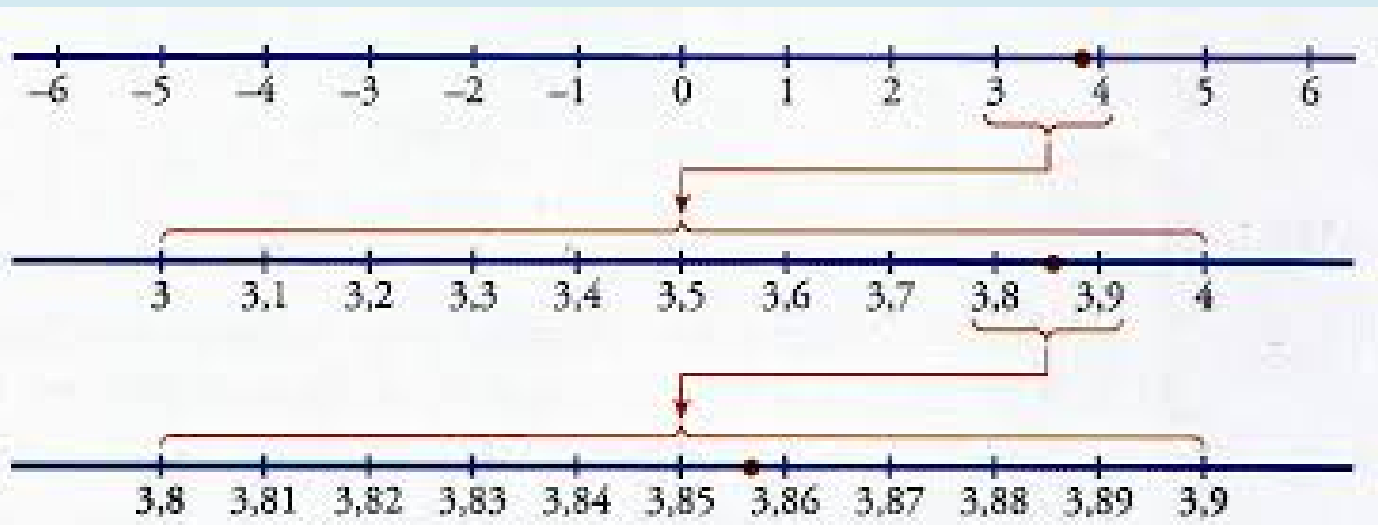
- **Magnitud discreta**

- Només pot prendre certs valors, no la podem dividir indefinidament
 - Nombre de persones en aquesta sala
 - Càrrega elèctrica: electró

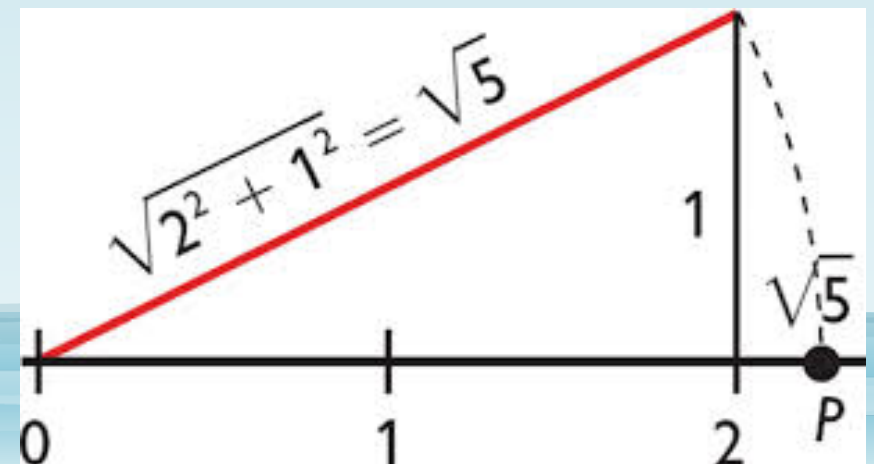
- **Magnitud continua**

- Pot prendre qualsevol valor, la podem dividir indefinidament
 - Alçada d'una persona
 - El temps

La recta real



Nombres irracionals



Guió

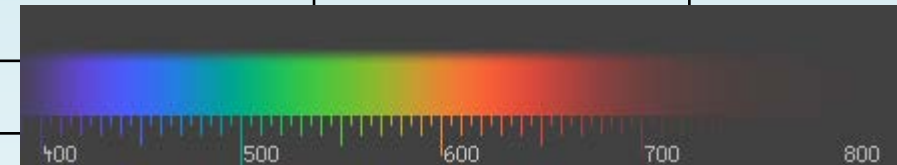
- Que és la llum? *La llum és una ona electromagnètica, com és ben sabut!*
- Doncs no: *la llum està formada per fotons* (petites partícules d'energia)
- Tampoc: *la llum és, a la vegada, ona i partícula sense massa*
- Però, és que resulta que les partícules amb massa i les molècules petites (i no tan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

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		

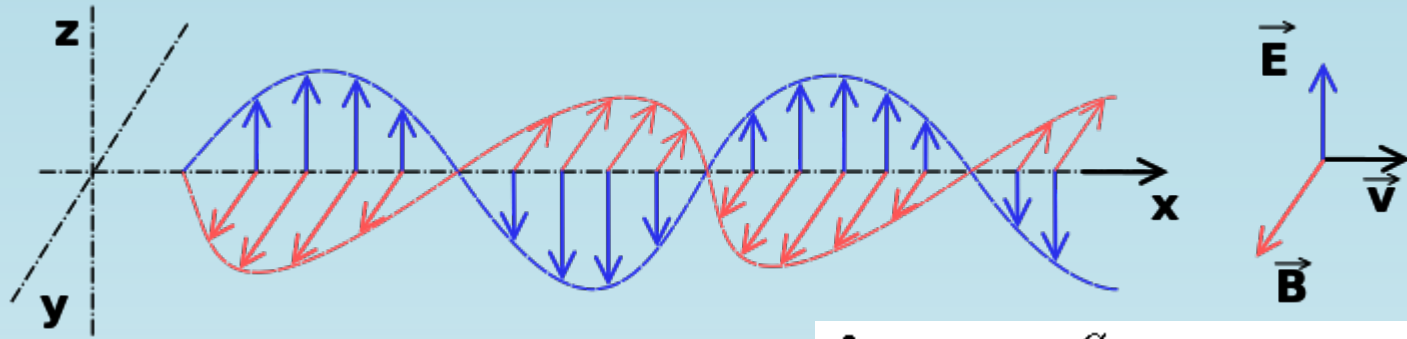
Es propaga en el buit



Espectre continu

L'espectre de la llum visible

Llum = ona



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

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

Equacions de Maxwell, 1861

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

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

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

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

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

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

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

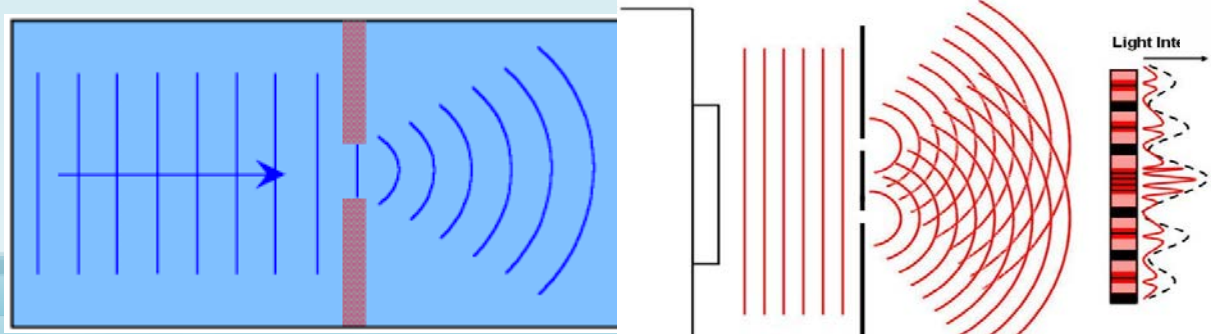


1831-79

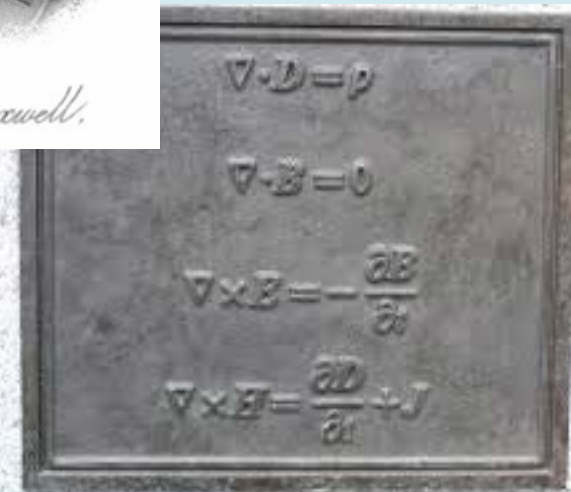
James Clerk Maxwell

• Difracció

principi de Huygens

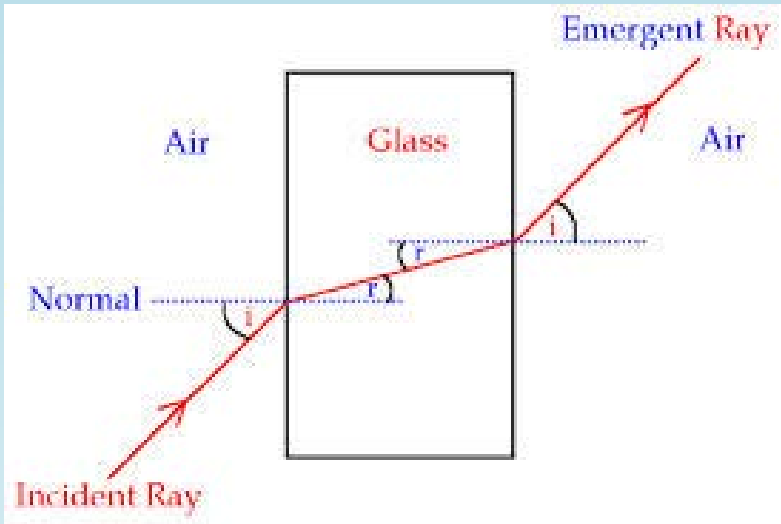


experiment de Young

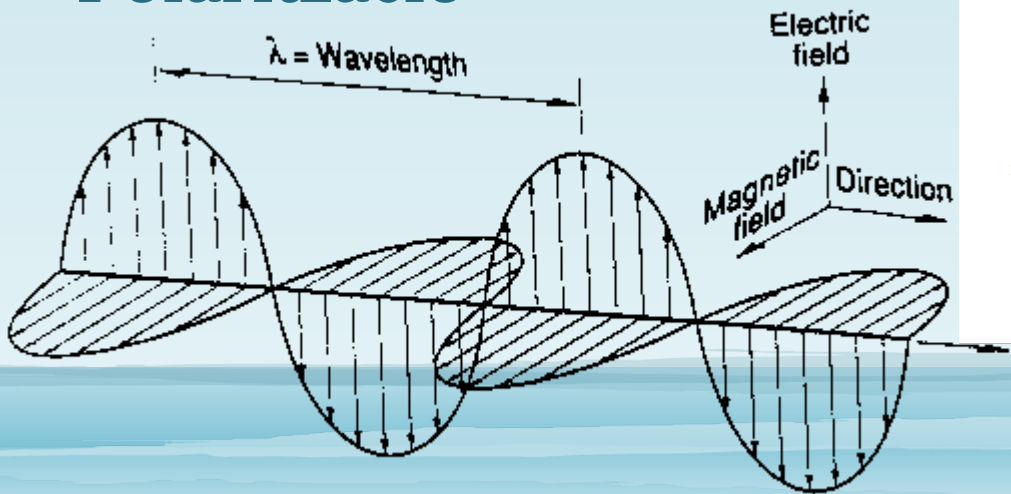


Llum = ona

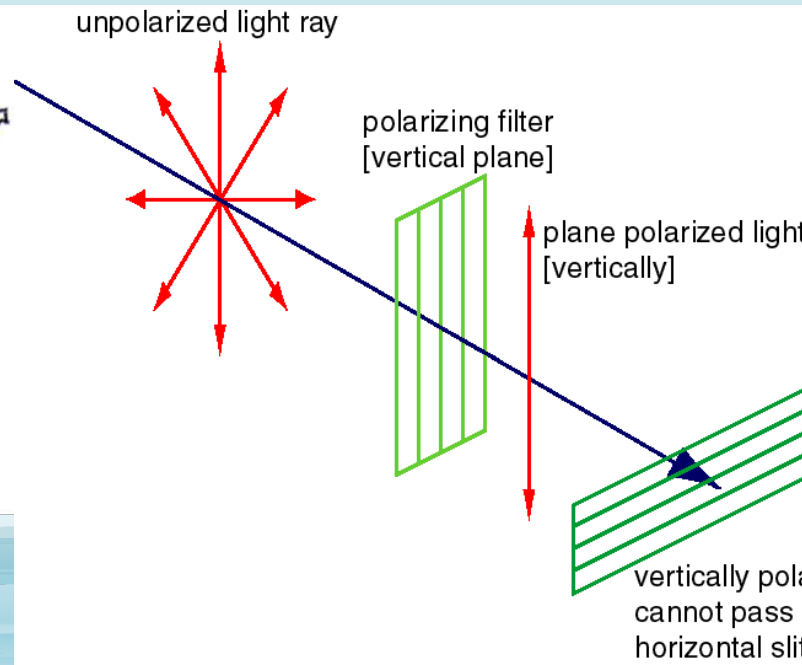
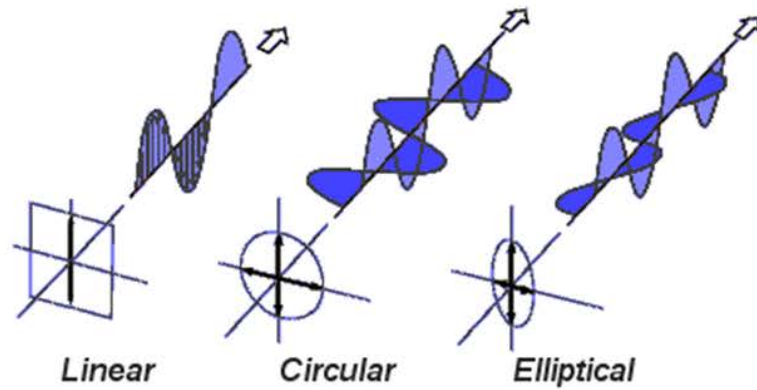
• Refracció



• Polarització



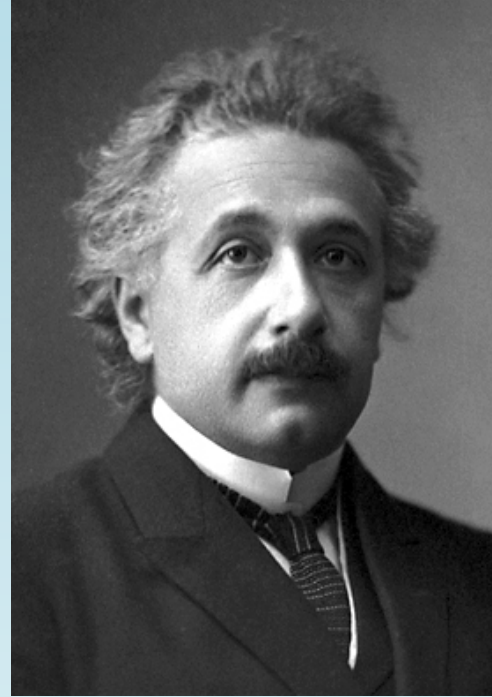
Polarization of electromagnetic waves



Però ... Max Planck & Albert Einstein

$$E = h\nu$$

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

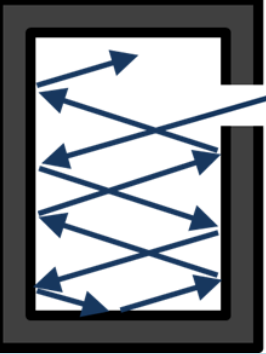


$$E = mc^2$$

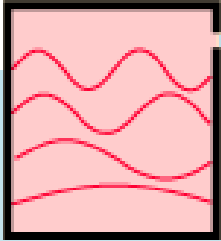
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- 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”*

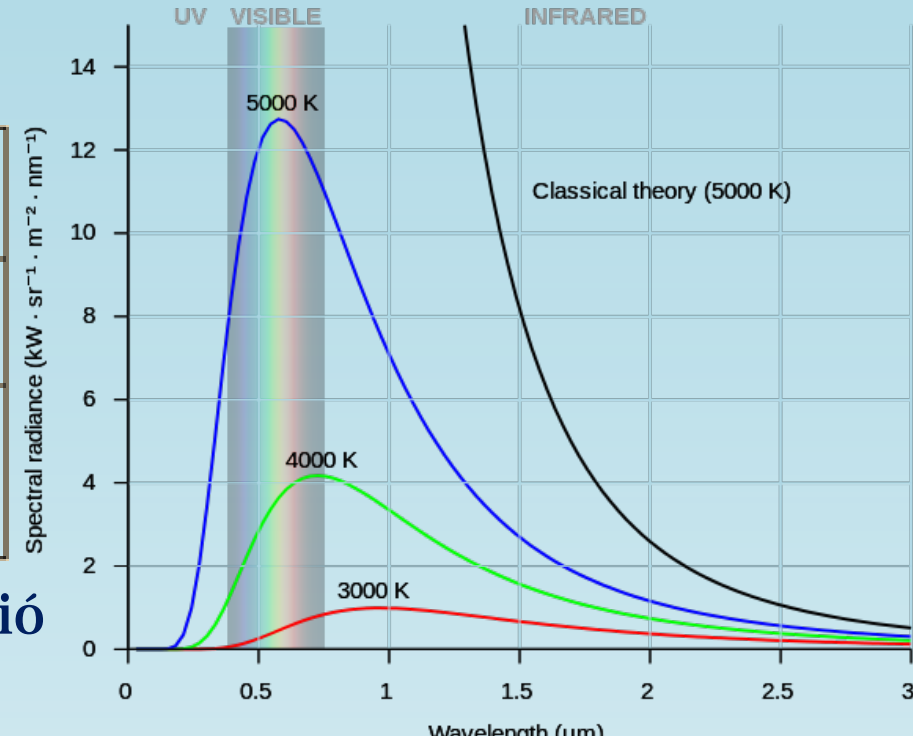
Radiació de cos negre



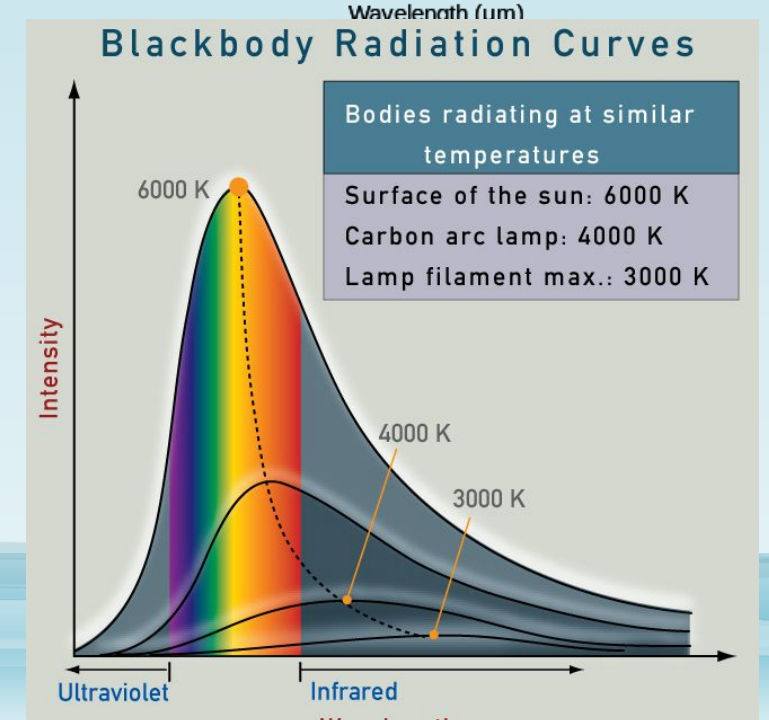
Radiation modes in a hot cavity provide a test of quantum theory



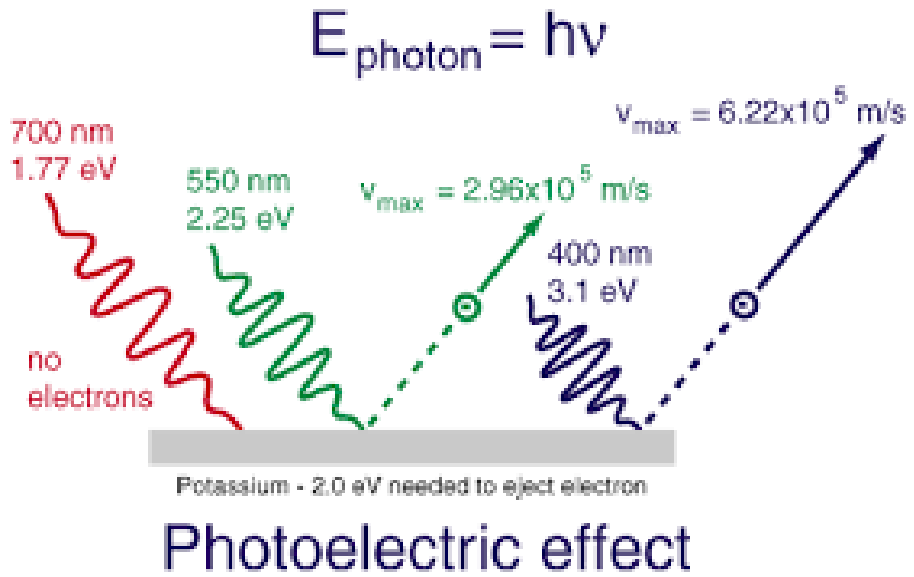
	#Modes per unit frequency per unit volume	Probability of occupying modes	Average energy per mode
CLASSICAL	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Equal for all modes	kT
QUANTUM	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Quantized modes: require $h\nu$ energy to excite upper modes, less probable	$\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$



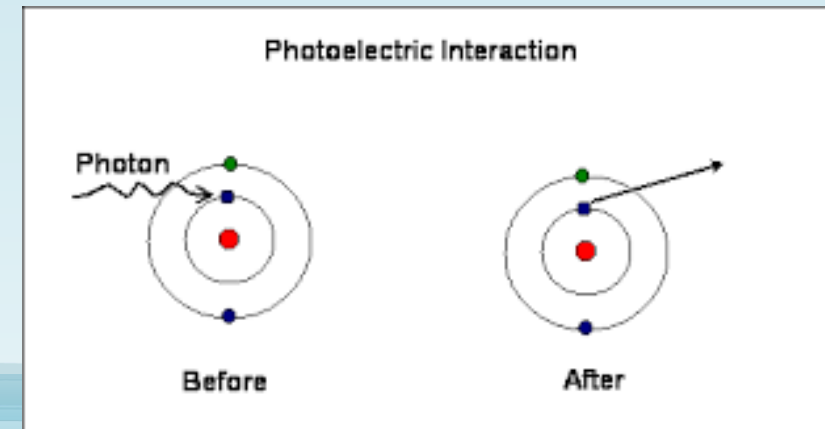
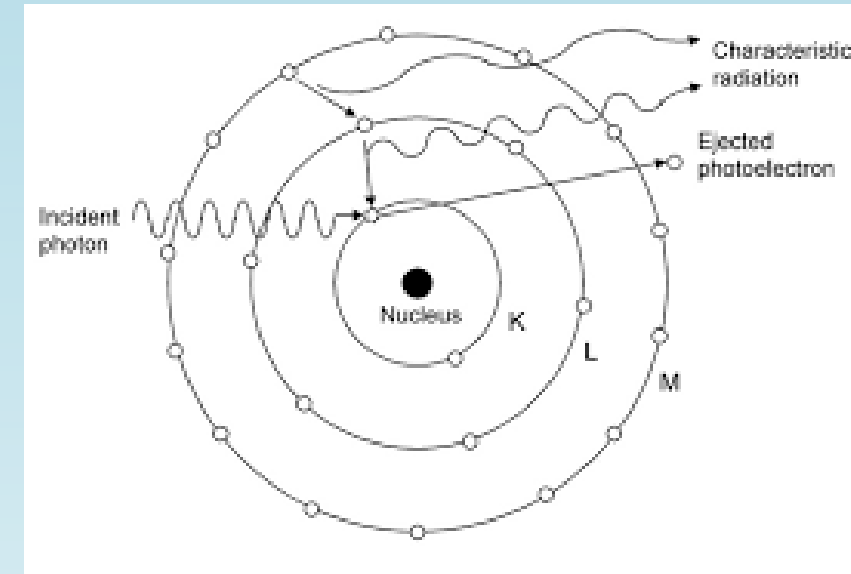
- Un **cos negre** és un cos (ideal) que absorbeix tota la radiació electromagnètica que li arriba
- Un cos negre en equilibri termodinàmic emet radiació electromagnètica *rdcn*
 - *Més que qualsevol altre cos a la mateixa temperatura*
 - *D'una manera isotròpica*
 - *L'espectre d'emissió (radiació en 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“



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



Forats Negres BH



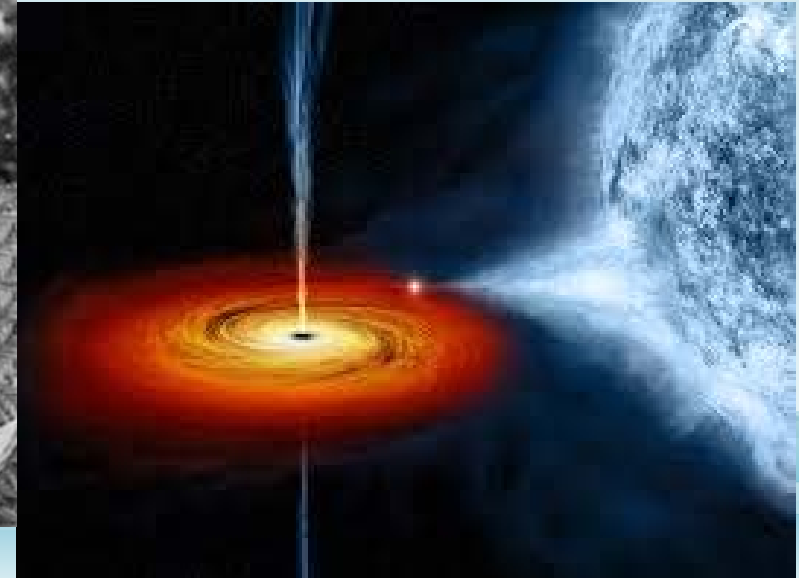
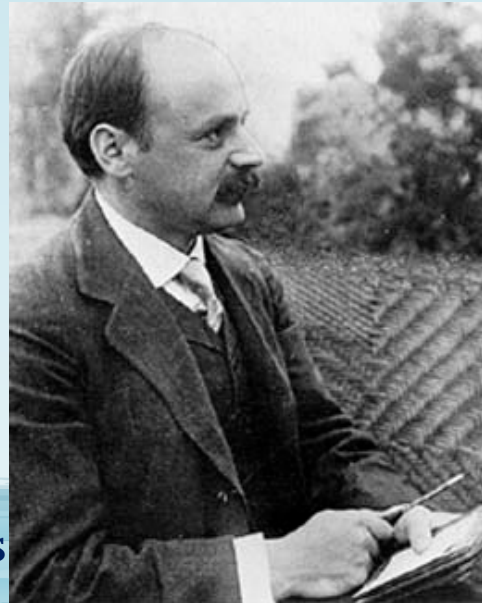
- John Michell, carta 1783 a Henry Cavendish de la Royal Society (estrella fosca o negra): *“Si una esfera de la mateixa densitat del Sol superés la seva mida en 500 vegades, un cos que caigués des d’una alçada infinita hauria adquirit a la seva superfície més velocitat que la llum; tota la llum emesa 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”*

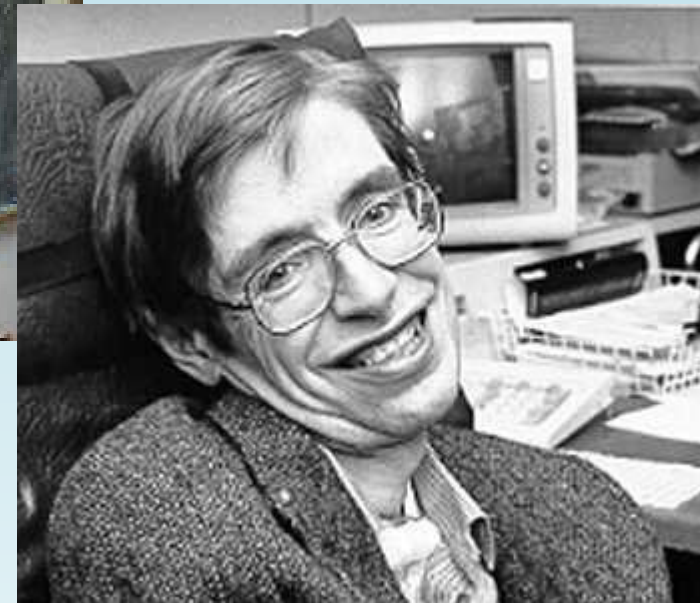
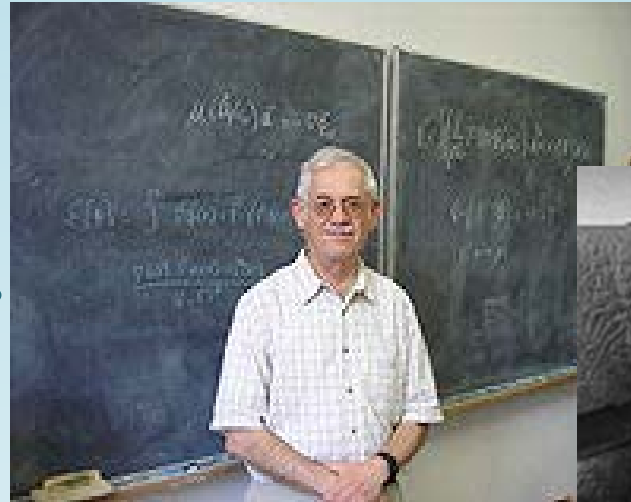
$$S_{\text{BH}} = \frac{kA}{4\ell_P^2}$$

- 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