

La radiació de cos negre: de **Max Planck** a **Stephen Hawking**

Emili Elizalde

ICE/CSIC & IEEC, UAB

Jornada de la Llum AASCV, Casa Cultura S Cugat V, 14 Març 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*)

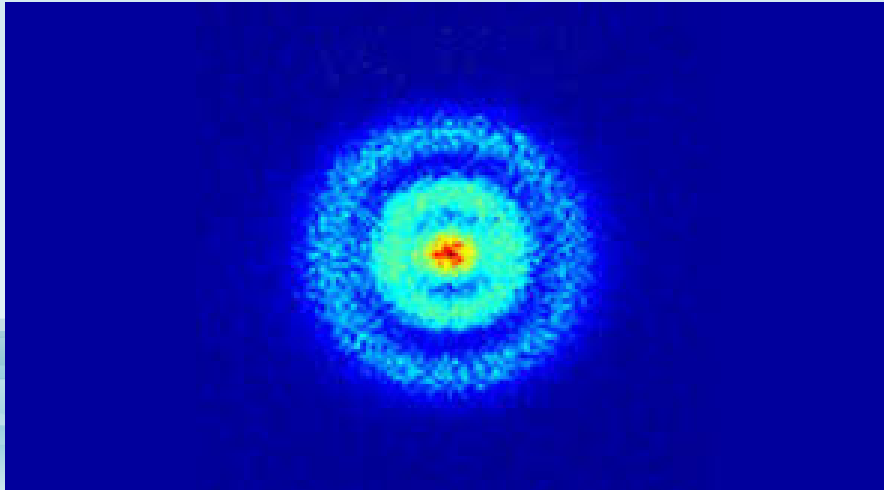
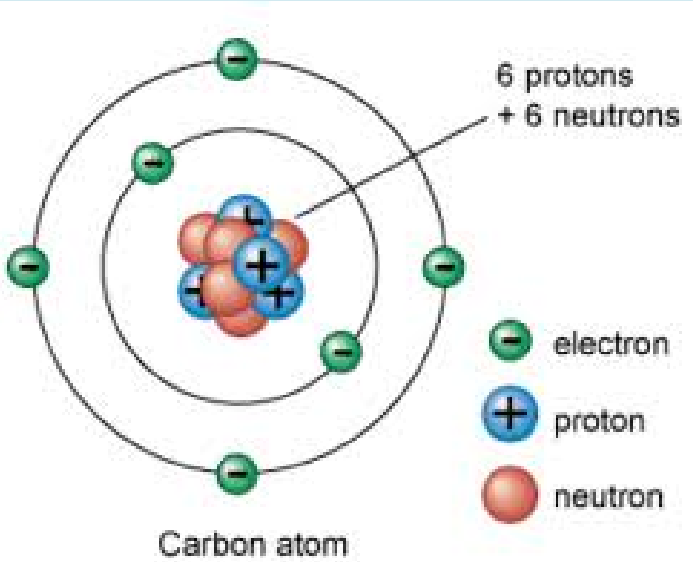
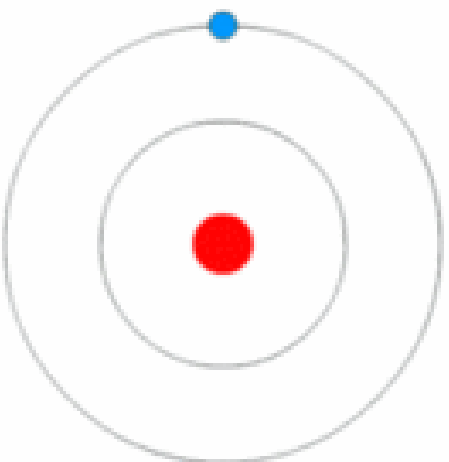
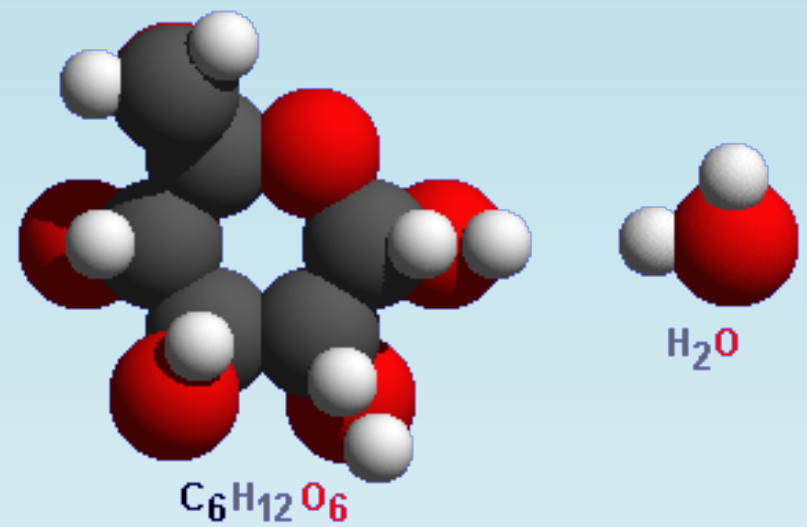
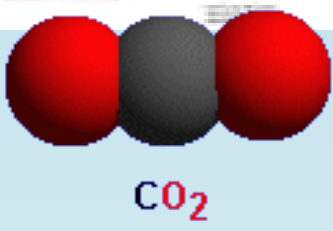
Física Quàntica

- Elements
- Molècules
- Àtoms

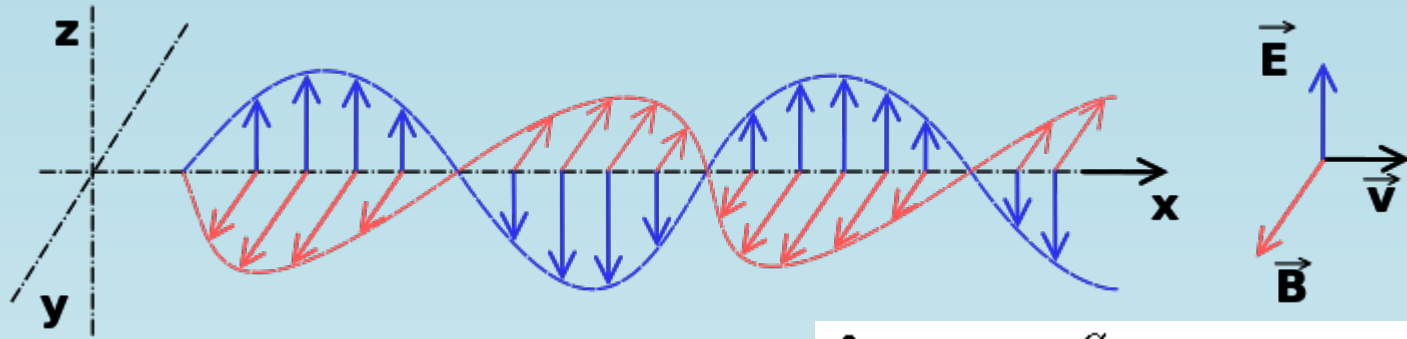
Periodic Table of the Elements

H	He																	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar								
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
Cs	Ba			Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
Fr	Ra			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fu	Uup	Lv	Uuq	Uuo							
Lanthanides		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu									
Actinides		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr									

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



Llum = ona



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

Equacions de Maxwell, 1861

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

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

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

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

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

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

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

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

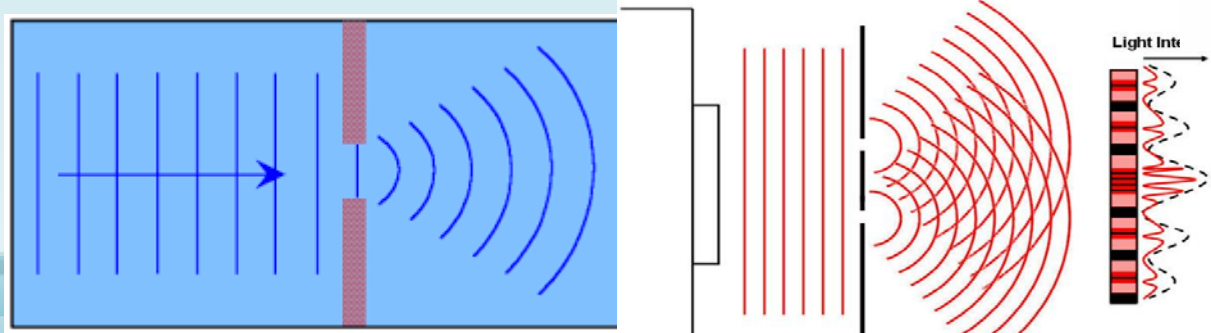


1831-79

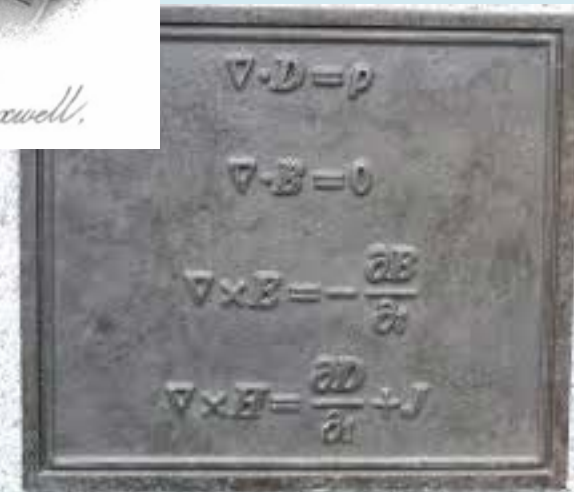
James Clerk Maxwell.

• Difracció

principi de Huygens



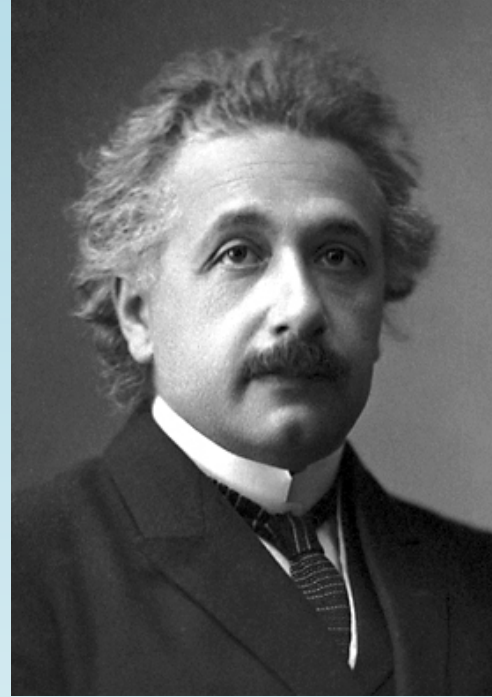
experiment de Young



Però ... Max Planck & Albert Einstein

$$E = h\nu$$

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

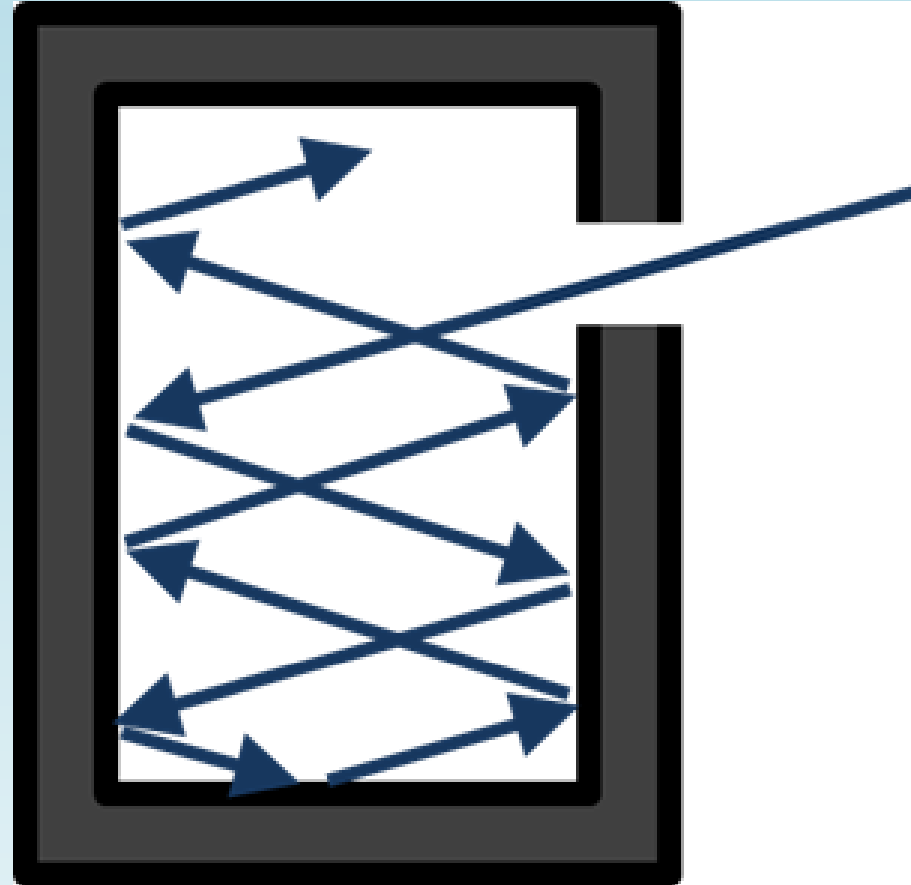


$$E = mc^2$$

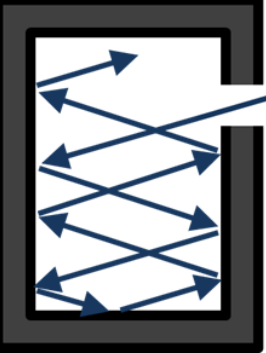
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- 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”*

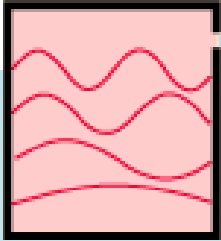
Cos negre



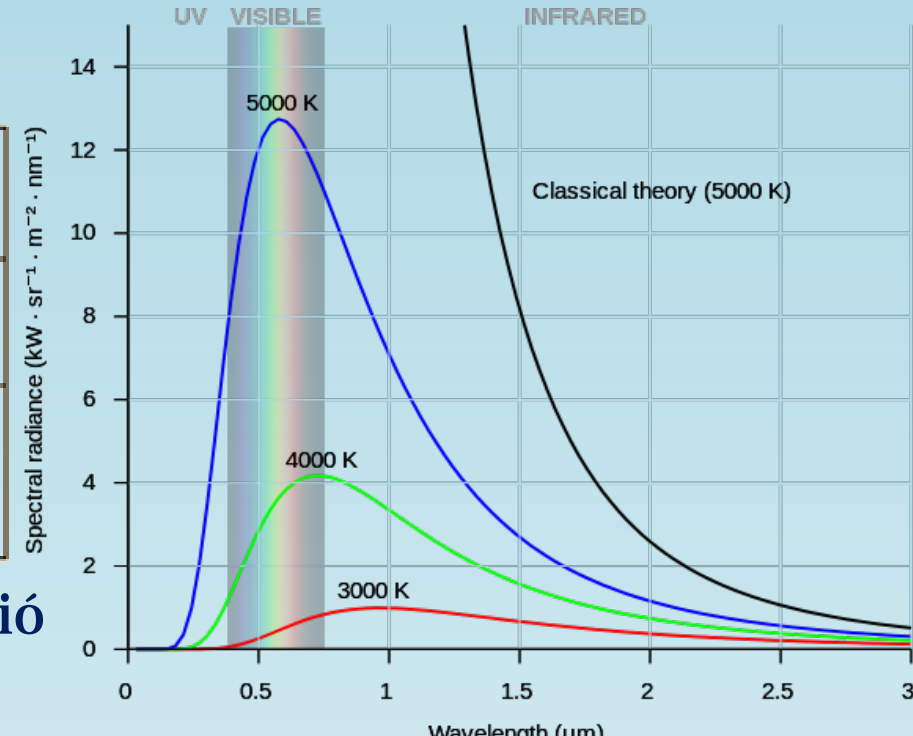
Radiació de cos negre



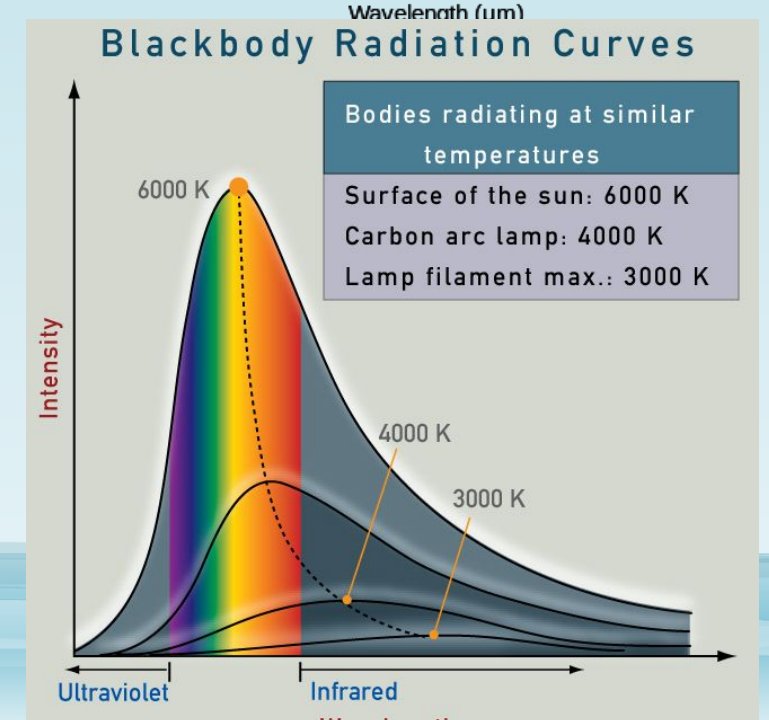
Radiation modes in a hot cavity provide a test of quantum theory



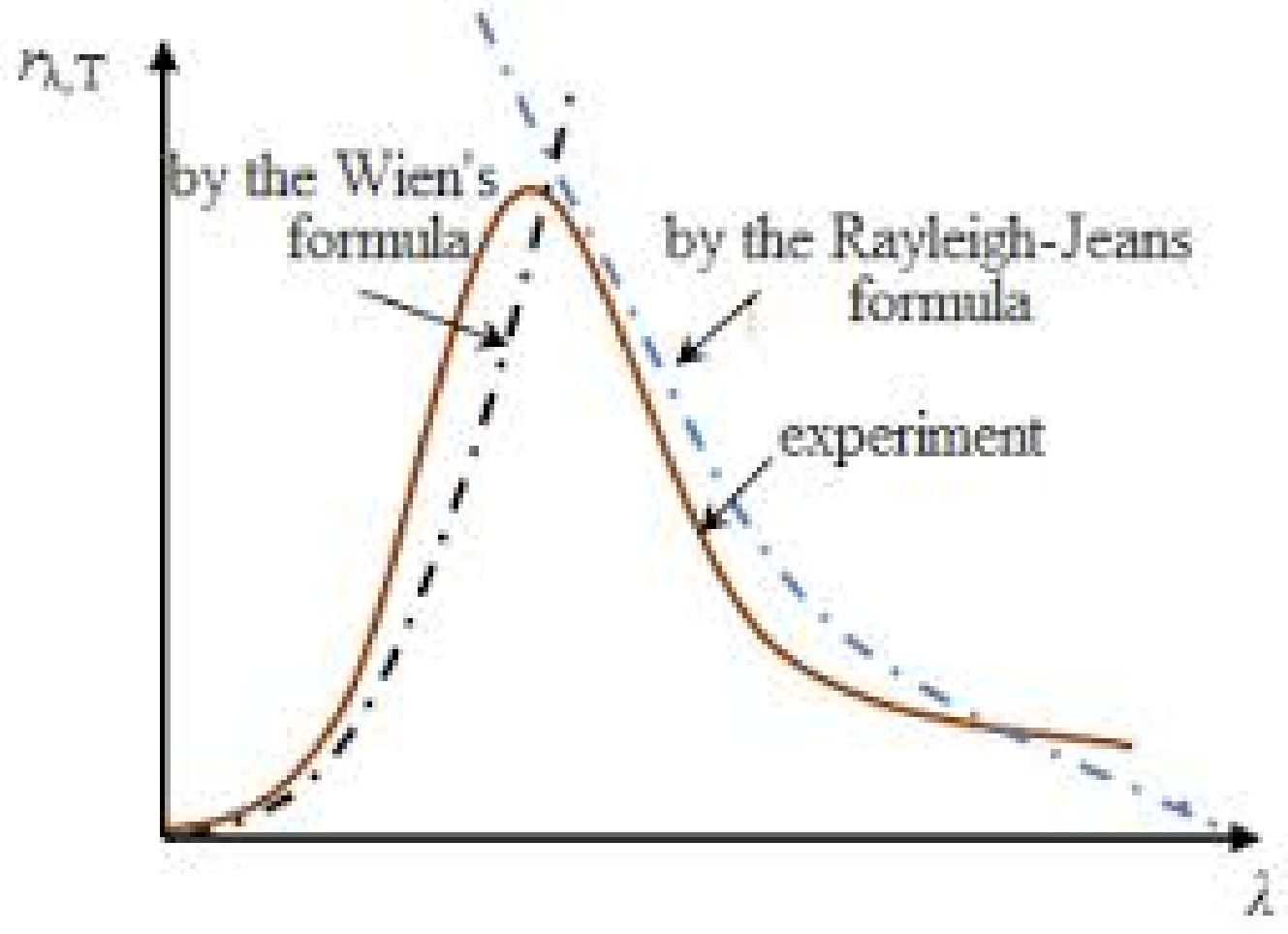
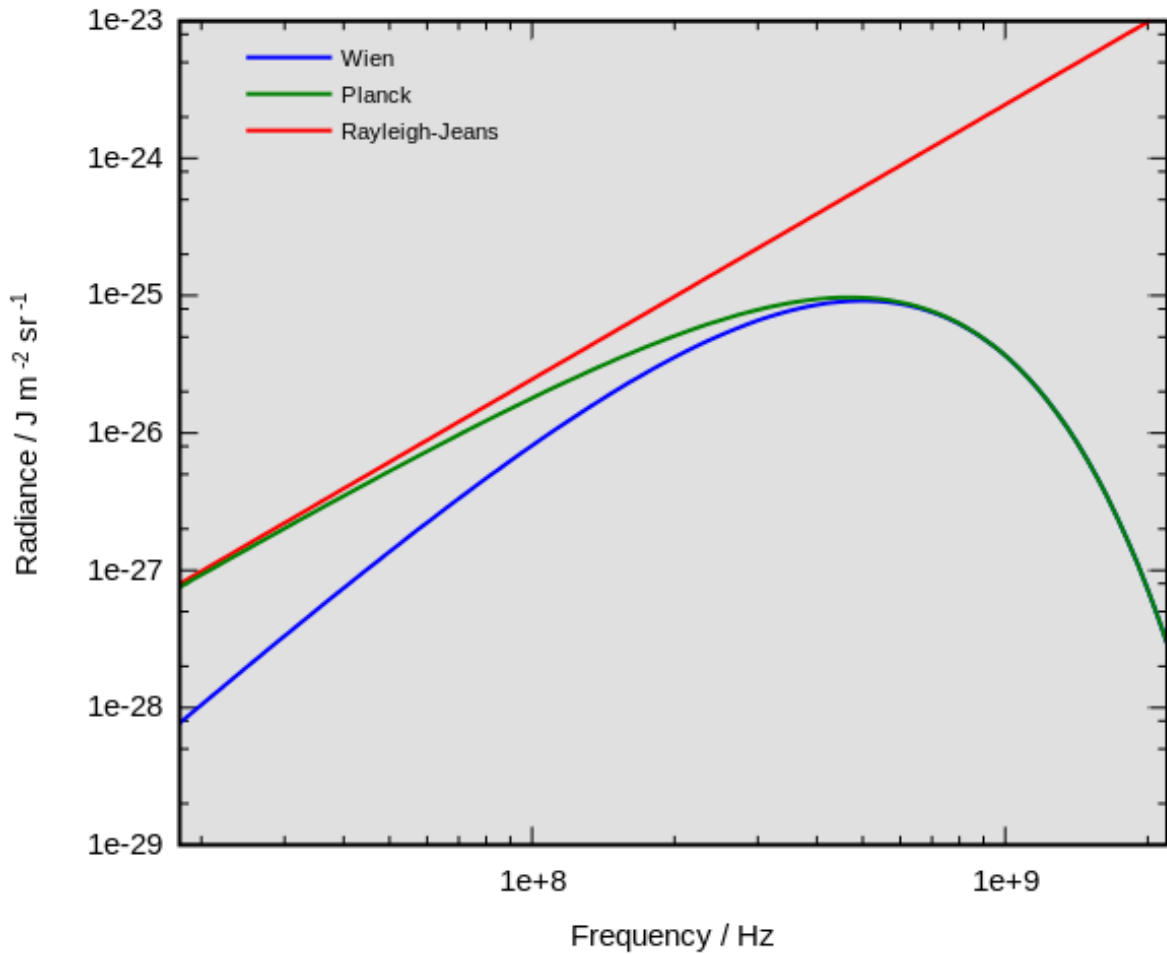
	#Modes per unit frequency per unit volume	Probability of occupying modes	Average energy per mode
CLASSICAL	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Equal for all modes	kT
QUANTUM	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Quantized modes: require $h\nu$ energy to excite upper modes, less probable	$\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$



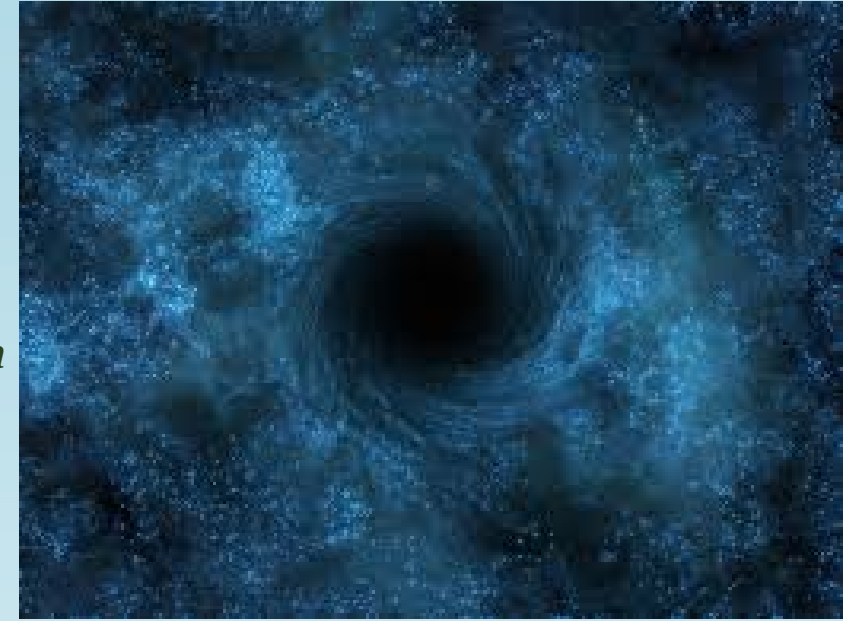
- Un **cos negre** és un cos (ideal) que absorbeix tota la radiació electromagnètica que li arriba
- Un cos negre en equilibri termodinàmic emet radiació electromagnètica *rdcn*
 - *Més que qualsevol altre cos a la mateixa temperatura*
 - *D'una manera isotròpica*
 - *L'espectre d'emissió (radiació en 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** (*cat ultravioleta*) i de **Wien** (*cat infraroja*) vs llei de **Planck**



Forats Negres BH



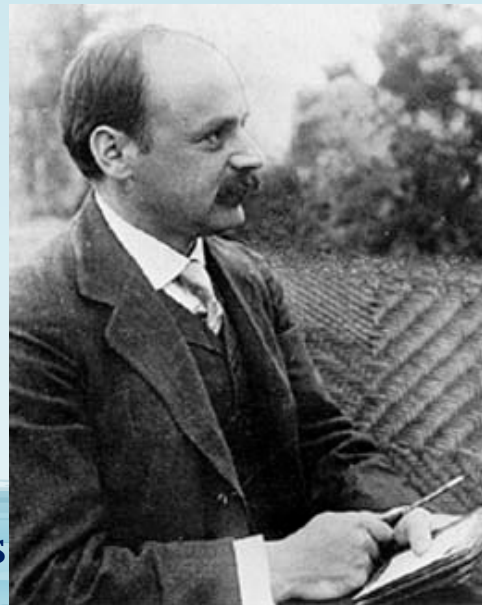
- John Michell, carta 1783 a Henry Cavendish de la Royal Society (estrella fosca o negra): *“Si una esfera de la mateixa densitat del Sol superés la seva mida en 500 vegades, un cos que caigués des d’una alçada infinita hauria adquirit a la seva superfície més velocitat que la llum; tota la llum emesa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

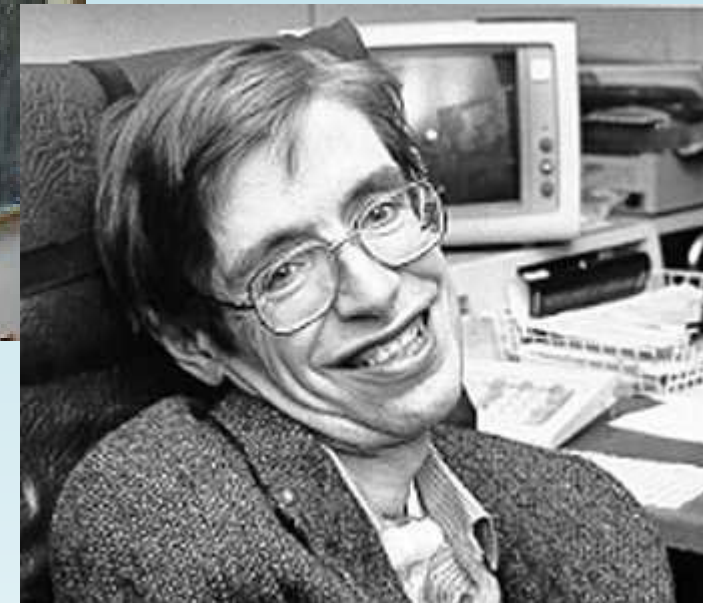
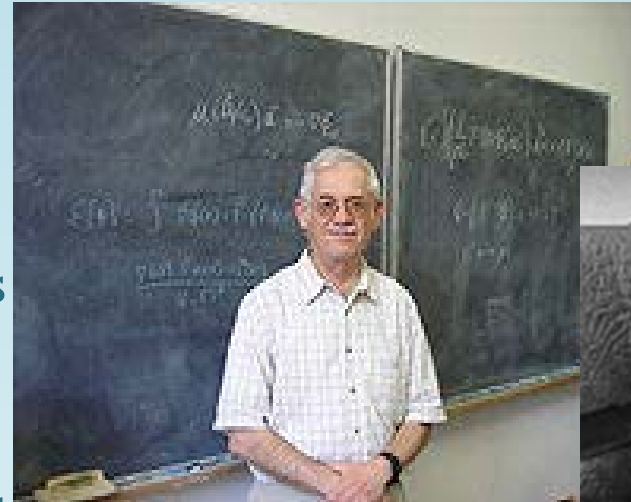
$$S_{\text{BH}} = \frac{kA}{4\ell_P^2}$$

- 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

Mercès