

65 ANYS DE LLUM LÀSER

LA LLUM QUÀNTICA A LES SEVES APLICACIONS



Muriel Botey

Dynamics, Nonlinear Optics and Lasers (DONLL)

Departament de Física

Universitat Politècnica de Catalunya

muriel.botey@upc.edu



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



Sense làsers no hi hauria internet



PN2009



Charles K. Kao

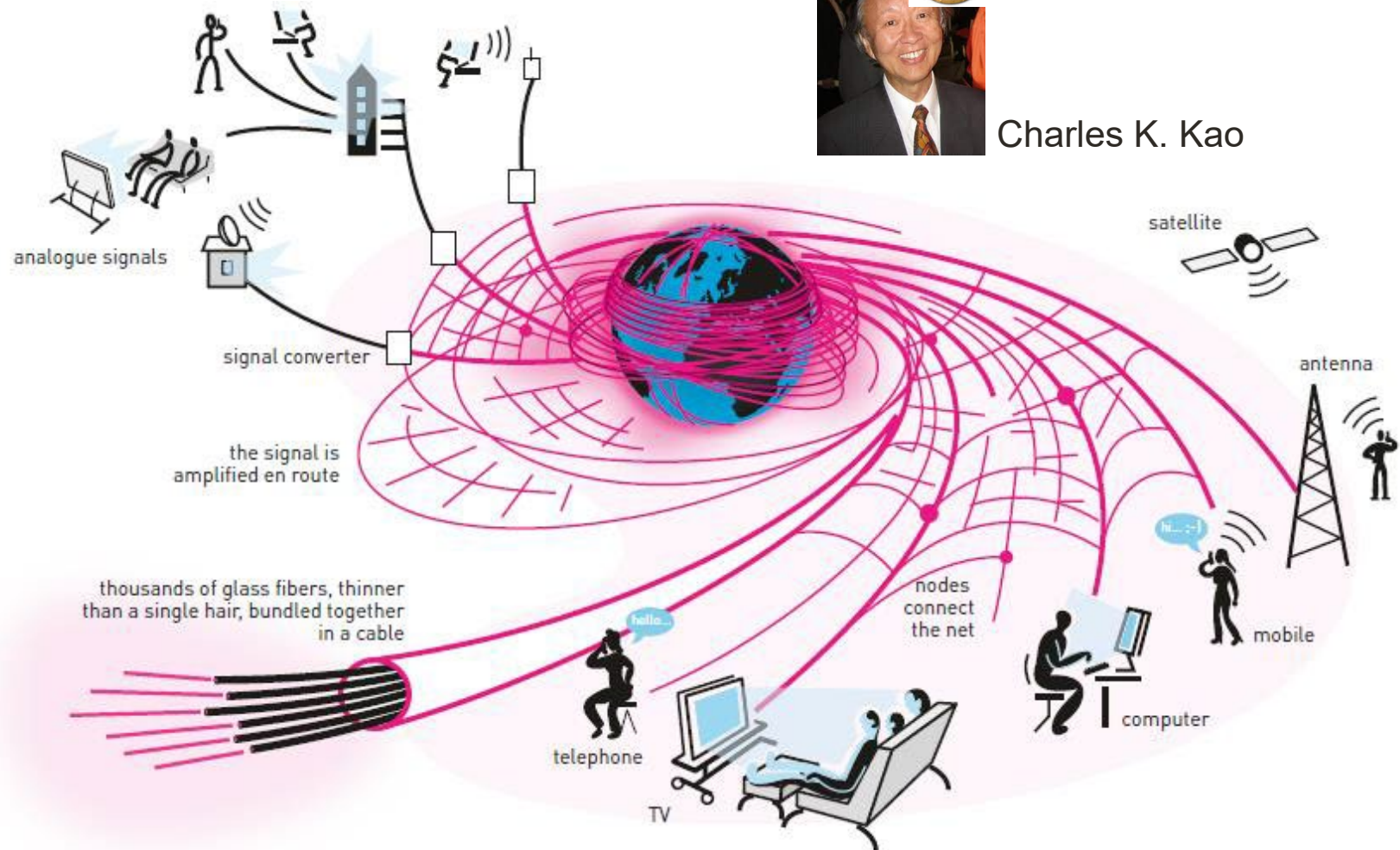


Figure 1. Optic fibers made of glass make up the circulatory system of our communication society. There is enough fiber to encircle the globe more than 25 000 times.

Sense làsers no tindríem mòbils

- solid-state laser
- IR diode laser
- CO₂ laser

Touchscreen

- cutting of extremely thin, hard cover glass /
- cutting of touchscreen foil /
- structuring of conducting layers - -

Screen

- generation of polycrystalline layers □
- encapsulation of laminated glasses /

Battery

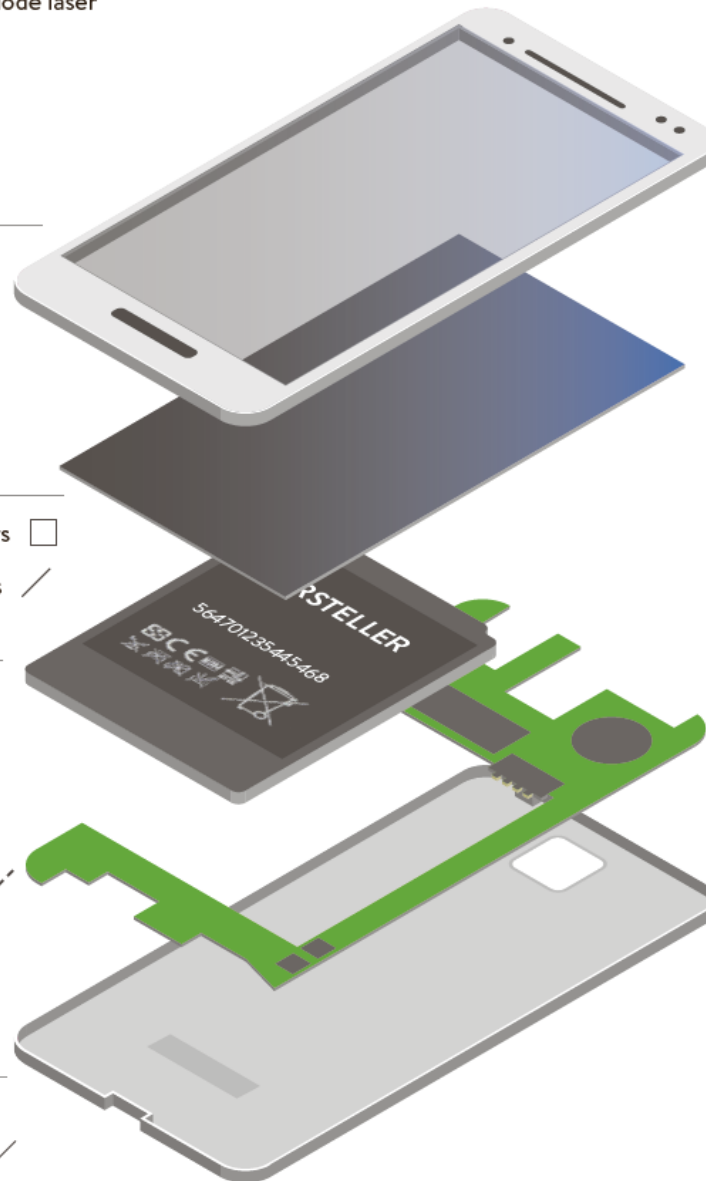
- welding of battery case /
- marking logo, data-matrix-code, and serial number □

Circuit board

- structuring of conductor tracks - -
- cutting of foil circuit boards /
- drilling of contact holes . .

Housing

- cutting of housing - -
- marking logo and serial number /



- fiber laser
- UV solid-state laser
- solid-state laser
- CO₂ laser
- ultrashort pulse laser
- UV excimer laser
- IR diode laser

- / edge
- area
- - pattern
- . . holes

65 anys de llum làser en 4 etapes

1. Història d'una idea que va canviar el món: de les espelmes d'oli als quanta de llum
2. Què és un LASER? Característiques i tipus de làsers
3. La llum làser en el nostre dia a dia
4. El làser és clau en les tecnologies del futur

Fonts de llum

Sol



Foc: Primera llum “artificial”

Fa 20000 anys ...

Primeres **llums d'oli** primitives; greixos animals, olis de peix, de balena...

Espelmes (originàries de Xina), torxes,...

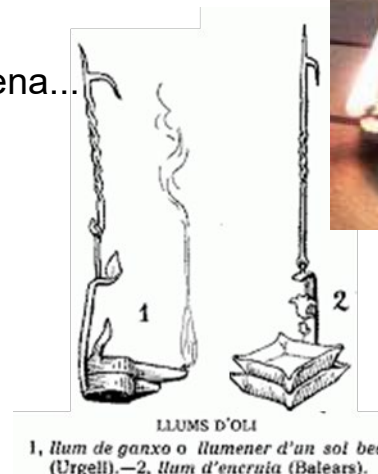
Fa 5000 anys ...

Ús sistemàtic de llums d'oli a Egipte, Grècia...després a Roma

S. XVIII llums d'oli als carrers

S. XIX Revolució industrial

- 1802, a Londres, Sir Humphrey Davy descobreix la **incandescència elèctrica** i demostra l'arc elèctric entre dos **elèctrodes de carboni** (il·luminació i cinema)
- **il·luminació de gas** és introduïda per a la il·luminació dels carrers.
- 1879 Thomas Edison en els Estats Units i Joseph Swan al Regne Unit presenten la primera **llum d'incandescència emprant un bri de carboni**.
- 1881 es patenten **les bombetes d'incandescència de llarga vida**...amb obsolescència programada a 1000h



S. XX

1901 Primera **làmpada de descàrrega de mercuri de baixa pressió**

1913 **bombetes incandescentes amb filaments de tungstè** 12lpw

1924 Descobriment de fòsfors per a convertir la llum UV en visible, **fluorescència**
(no fosforescència: radioactivitat que va causar la mort a Becquerel i Marie Curie)

1927 Primer **LED (Light emitting Diode)** desenvolupat, però molt poc eficient.

1932 Desenvolupament de la **làmpada de descàrrega de baixa pressió**.

1936 Llums **fluorescents**.

1961 Patent de la primera **llum halògena**

1960 **LASER de Ruby**

1965 Llum de sodi d'alta pressió.

1980 Introducció de les **llums fluorescents compactes**.

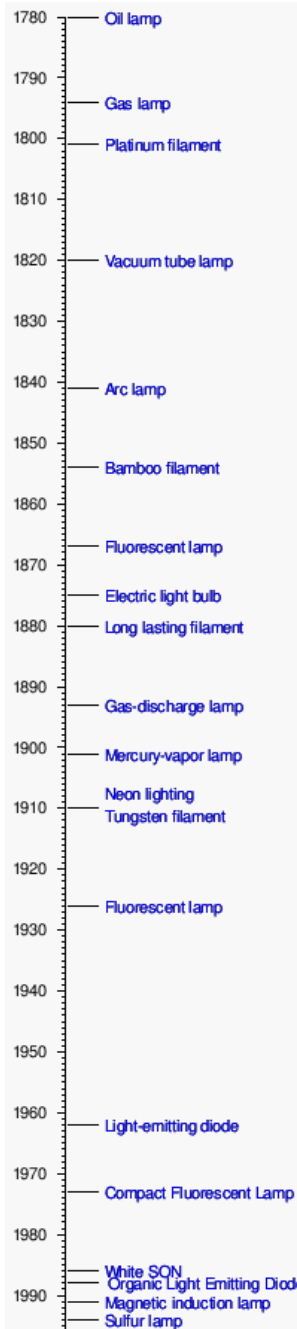
2000 LEDs comercials

2003 Primera apagada general a la costa Est dels Estats Units. Procés de reflexió sobre la xarxa de conducció elèctrica i sobre una il·luminació energèticament eficient

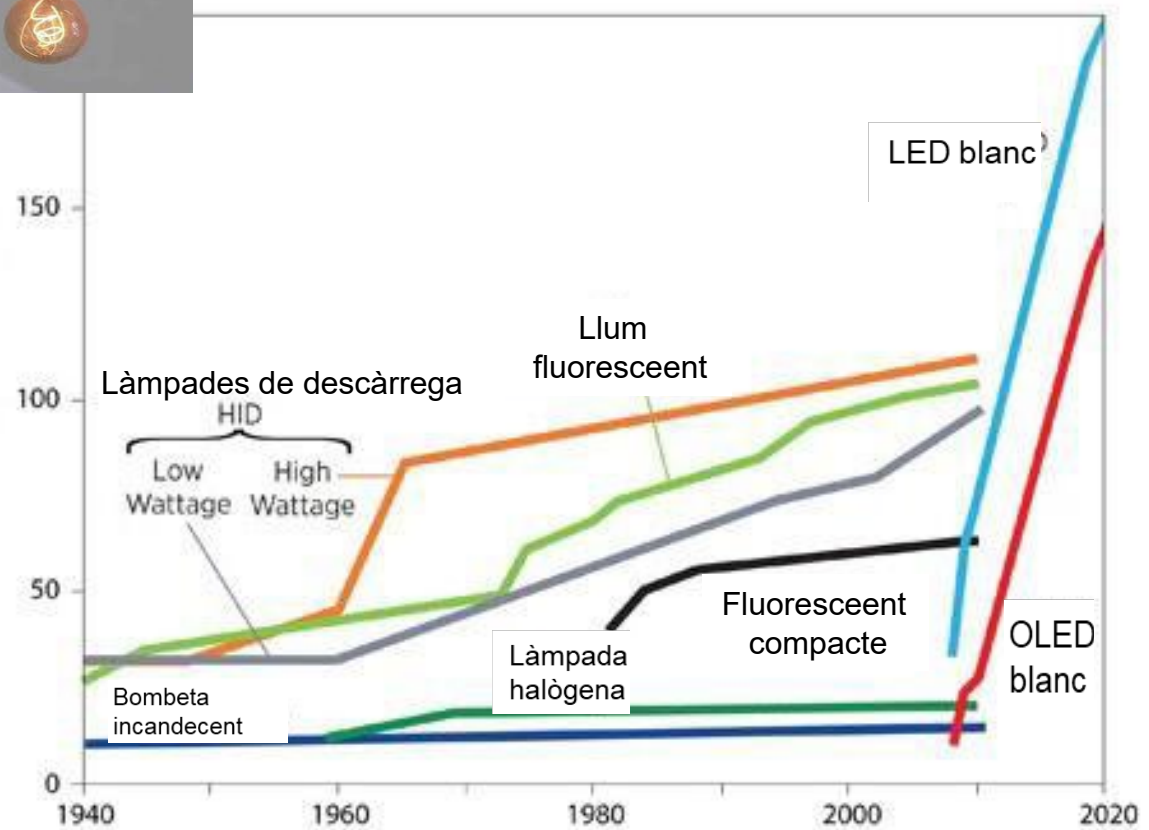
2009 Directiva europea [EU Ecodesign lighting](#) desaparició progressiva de llums halogens o incandescentes



1. Història d'una idea que va canviar el món

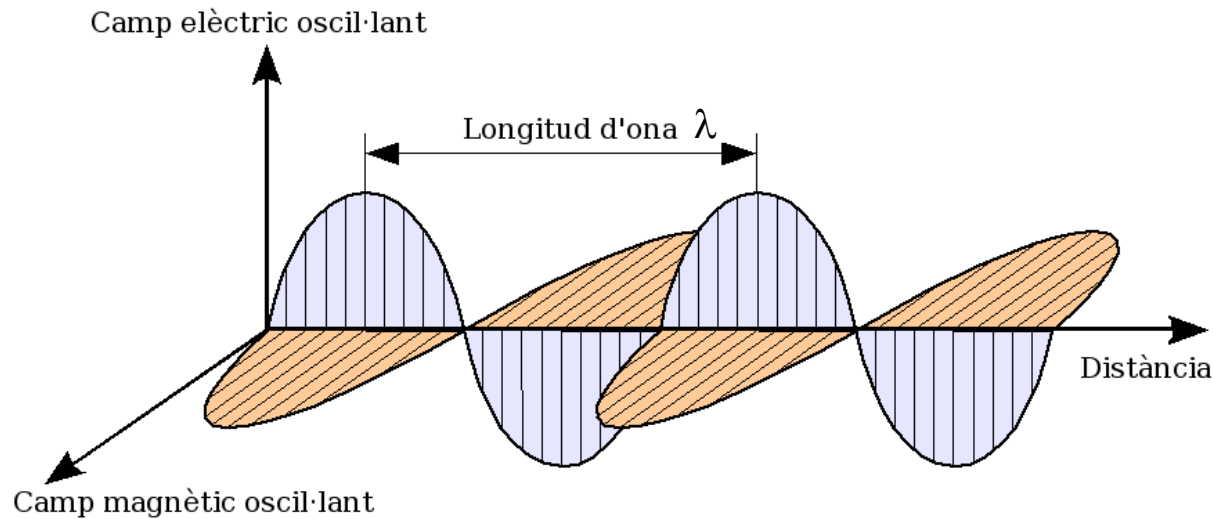


L Eficiència il·luminosa (lm/W)



Naturalesa de la llum

Ona electromagnètica

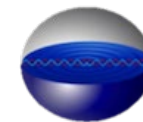


$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

Fotó

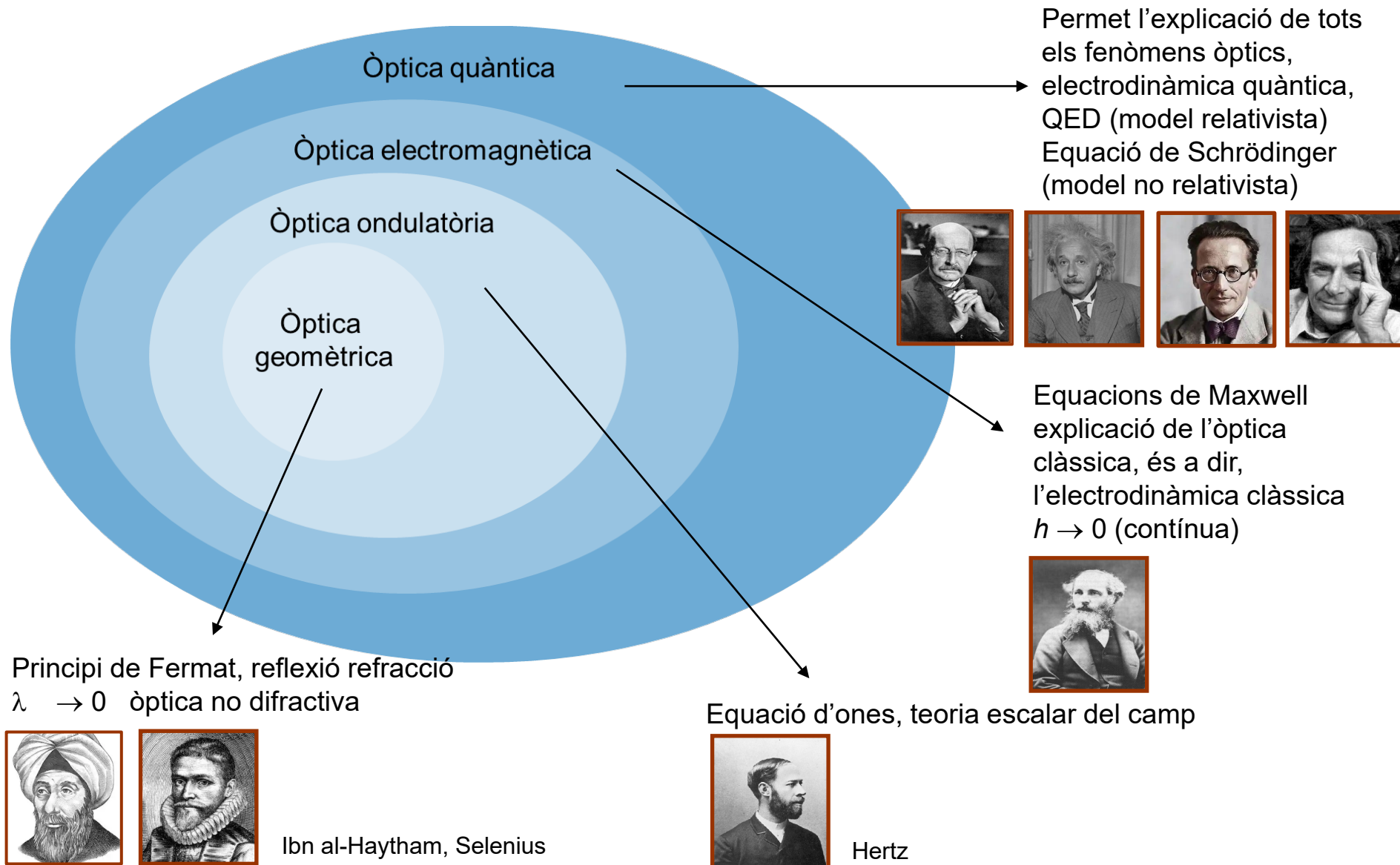


$$E = h\nu$$
$$p = \frac{E}{c}$$



$$E = mc^2 \quad \lambda = \frac{h}{mv}$$

Fa més de 2000 anys que ens demanem què és la llum?



Què és la llum?

 Perocupació dels grecs pel
mecanisme de la visió

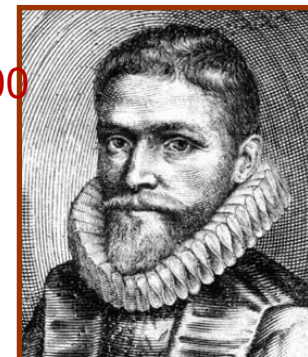
BC 1900	Antic Egipte	Miralls.
424	Aristophanes	Vidres per cremar (teatre)
300	Euclid	Propagació rectilínia. Reflexió
AD 60	Seneca	Refracció
70	Pliny	Angles de reflexió i refracció
130	Ptolemy	Pare de l'òptica a l'Islam
1000	Alhazen	Lents per millorar la visió
1215–1294	Bacon	Camera oscura
1452–1519	Leonardo da Vinci	Telescopi de refracció
1535–1615	Della Porta	Joan Roget, fabricant d'ulleres, Girona
1564–1642	Galilei	Reflexió total. Lents
1587–1619	Lippershez	Microscopi
1571–1630	Kepler	Lleis de la refracció
1580–1656	Fontana	Ibn al-Haytham (Alhazen), 1000
1588–1632	Janssen(?)	Principi de Fermat
1591–1626	Snell	Difracció
1596–1650	Descartes	Front d'ona
1601–1665	Fermat	Colors en làmines primes
1618–1663	Grimaldi	
1629–1695	Huygens	
1635–1703	Hooke	



Euclides



Bacon



Snellius

1642–1727	Newton
1644–1710	Römer
1693–1762	Bradley
1698–1765	Klingenstjerna
1706–1761	Dollond
1707–1783	Euler
1773–1829	Young
1775–1812	Malus
1786–1853	Arago
1787–1826	Fraunhofer
1788–1827	Fresnel
1791–1867	Faraday
1801–1892	Airy
1819–1896	Fizeau
1819–1868	Foucault
1831–1879	Maxwell

Experiments, natura de la llum
Colors espectrals (**atomista**)

Velocitat finita de la llum
Astrònom copernicà

Lent acromàtica

Òptica ondulatòria

Polarització

Línies d'absorció del sol

Difracció

Interferències, ones

Electromagnetisme

Difracció

Velocitat de la Llum

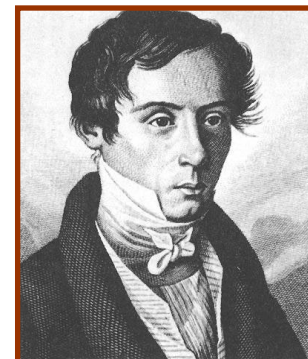
Lleis de Maxwell de
l'electromagnetisme



Newton

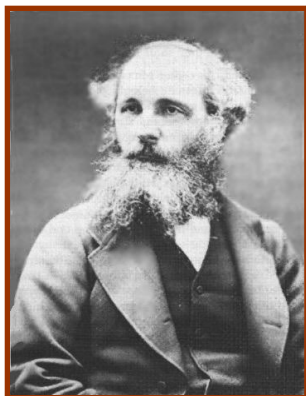


Fraunhofer

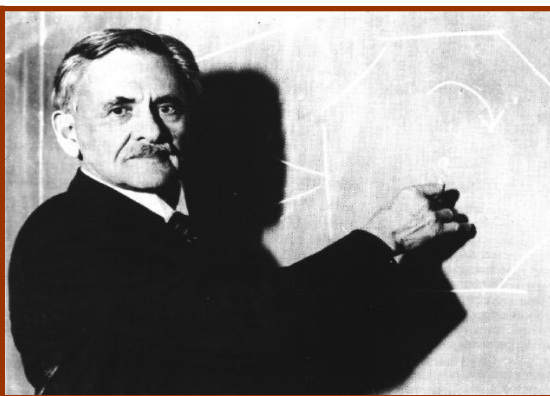


Fresnel

1838–1923	Morley	}	Velocitat de la llum
1852–1931	Michelson		
1853–1928	Lorentz	}	Oscil.lador de Lorentz
1854–1912	Poincaré		
1857–1894	Hertz	}	Ones electromagnètiques
1858–1947	Planck		
1879–1955	Einstein	}	Quanta de llum, catàstrofe UV del cos negre
1896	W. Wien		
1899	L. Rayleigh	}	Efecte fotoelèctric. Fotons . Relativitat
1913	N. Bohr		
1916	A. Einstein	}	Radiació del cos negre
1919	A. Eddington		
			Difracció. Blau del cel.
			Model atòmic. Espectroscòpia
			Emissió estimulada
			Curvatura de la llum per la Relativitat general



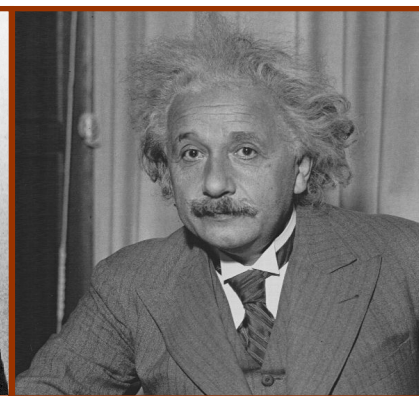
Maxwell



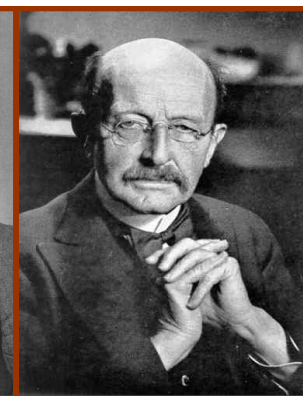
Michelson



Hertz

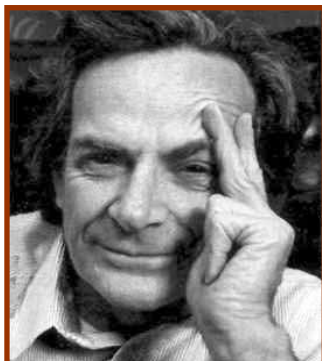


Einstein

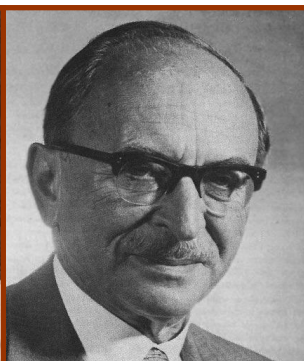


Planck

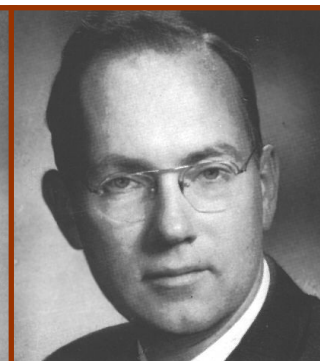
1924	L. de Broglie	P.N 1929	Dualitat ona-corpúscle
1932	E. H. Land		Polaritzadors de llum
1934	F. Zernicke	P.N. 1953	Microscopi de contrast de fase
1941	W. C. Anderson		Velocitat de la llum
1946-1951		P.N. 1965	R. Feynman Electrodinàmica quàntica (QED)
1948	D. Gabor	P.N. 1971	Holografia
1954	C. Townes	P.N. 1964	Màser
1956	N. Bloembergen		Màser. Òptica no lineal
1960	T. H. Maiman		Làser de Rubí
1962	R. Hall		Làser de semiconductor
1987			Primer cable de fibra òptica transatlàntic
1997	C. Cohen-Tannoudji	P.N1997	Refredament d'àtoms amb Làser
2000		P.N. 2000	Comunicacions òptiques (optoelectrònica)



Feynman



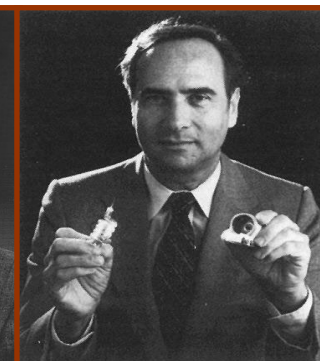
Gabor



Townes



Bloembergen



Maiman



Cohen-Tannoudji

2005 P.N.	L. Hall, T. W. Hänsch	Espectroscòpia
2009 P.N.	Charles K. Kao	Fibres òptiques
2009 P.N.	George E. Smith, Willard S. Boyle	Sensor CCD
2014 P.N.	H. Amano, S. Nakamura, Isamu Akasaki	LED blau
2017 P.N.	C. Barish, Kip Thorne, R. Weiss	LIGO ones gravitacionals
2018 P.N.	Gérard Mourou, Donna Strickland	Polsos ultra-curts
2018 P.N.	Arthur Ashkin	Pinces òptiques
2022 P.N.	Anton Zeilinger	Fotons entrellaçats
2023 P.N.	P. Agostini, F. Krausz, Anne L'Huillier	Física d'atosegons

Premis Nobel en òptica: https://www.optica.org/history/optica_nobel_laureates/

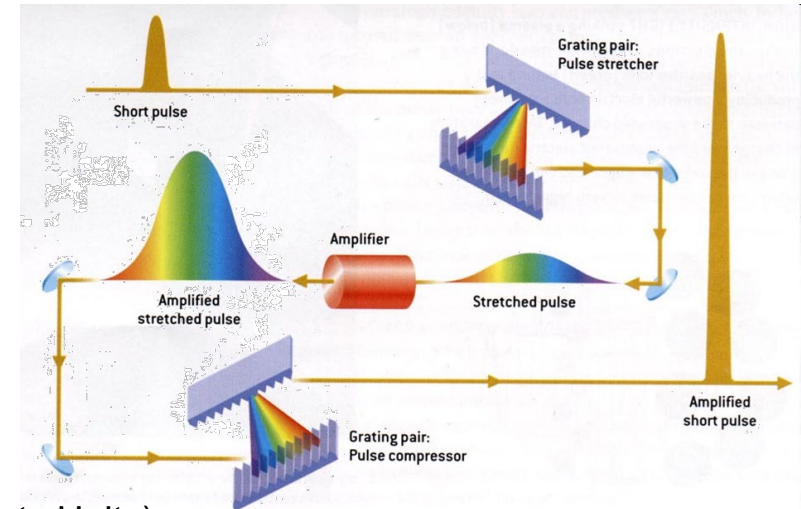


Chirped pulse amplification (fs, i fins a PW)



NP2018

Donna Strickland
Gérard Mourou
Arthur Ashkin



Potències de pic > 1 PW

(més de 1000 vegades potència generada als Estats Units)

Intensitats en el màxim $> 10^{21}$ W/cm²

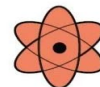
(intensitat del sol a la Terra: 0,1 W/cm²)

Mètodes experimentals que generen polsos de llum d'atosegons per a l'estudi de la dinàmica electrònica en la matèria



NP2023

Anne l'Huillier
Pierre Agostini
Ferenc Krausz



ATTOSECOND
1/1,000,000,000,000,000,000
SECOND



HEARTBEAT
1 SECOND



AGE OF THE UNIVERSE
1,000,000,000,000,000,000
SECONDS

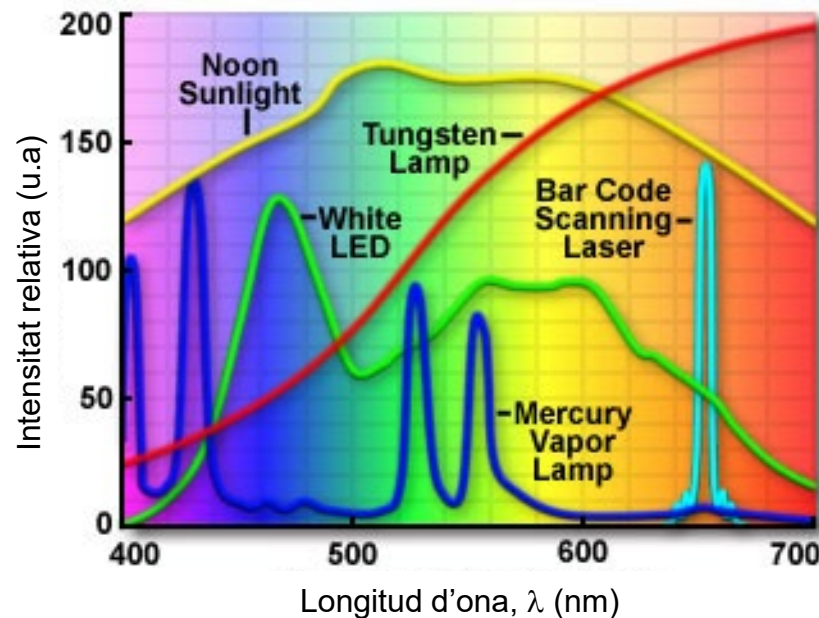
10^{-18} s

Tipus d'emissors de radiació electromagnètica

- Fonts tèrmiques → Teoria clàssica de la radiació. Espectre contínuu.
Font: carregues accelerades (principalment electrons)
- Fonts quàntiques → Teoria quàntica. Espectre discret
Font: Transicions entre estats o bandes energètiques

Espectres d'emissors de radiació electromagnètica

Espectres molt diferents segons la font i el procés d'emissió de radiació



Cos negre. Emissors tèrmics

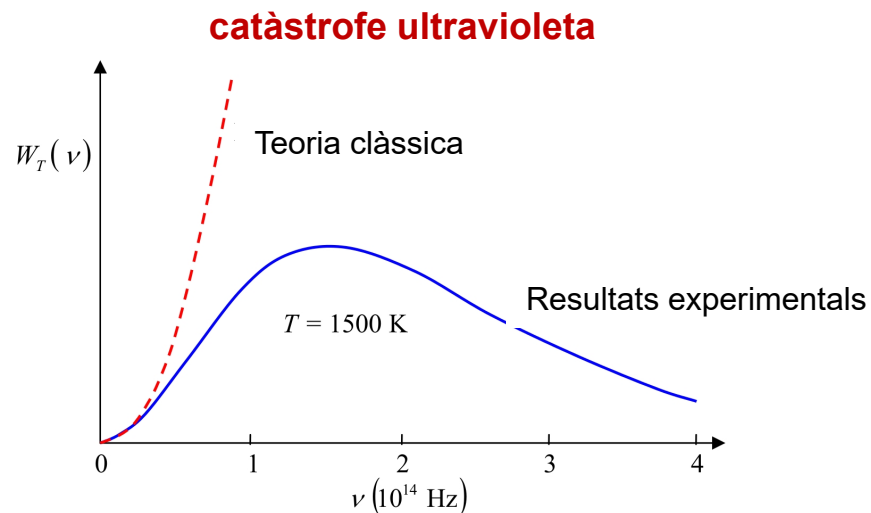
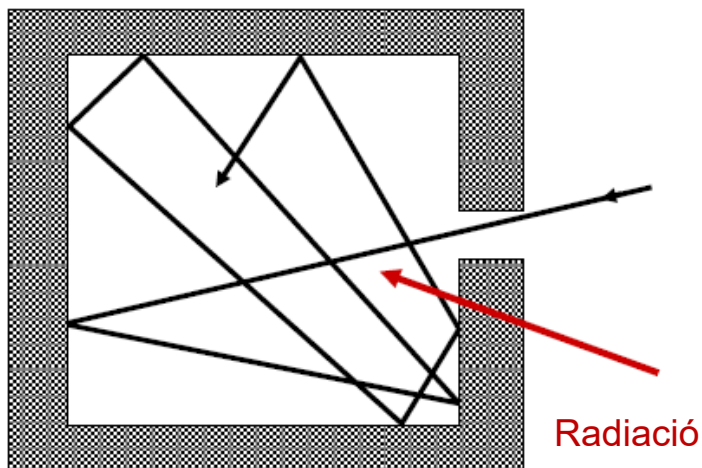
Explicació clàssica

Agitació tèrmica → Diferents velocitat i acceleracions dels electrons → Emissió amb diferents freqüències → Espectre ample d'emissió

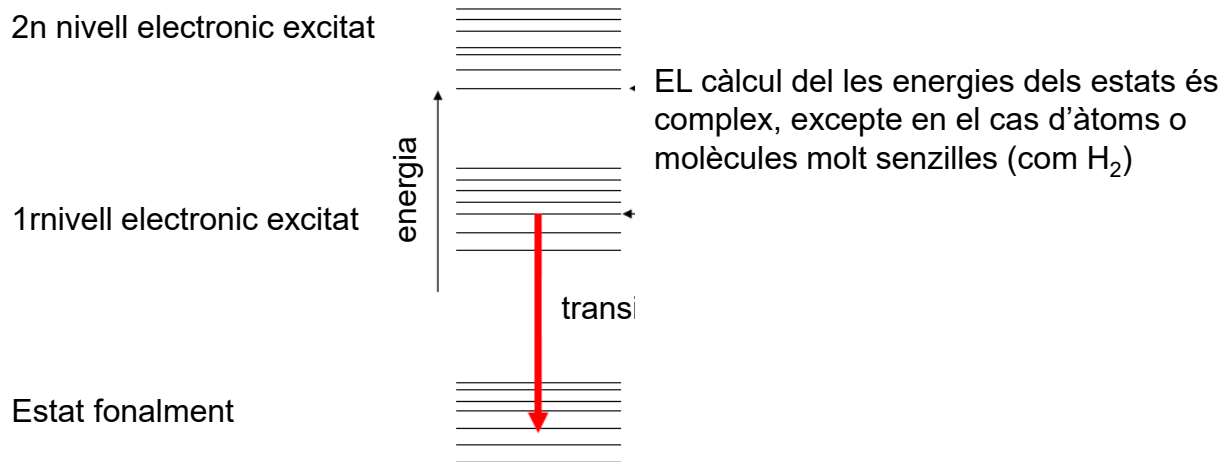
La teoria clàssica reproduïx resultats experimentals de forma qualitativa, no quantitativa ni per cossos molt calents
catàstrofe ultravioleta

→ Punt inicial de la teoria quàntica amb Planck finals del S. XIX

cos negre: cos ideal, aïllat, en equilibri termodinàmic, tal que la radiació electromagnètica emesa és igual a l'absorbida. Emissió i absorció per part d'àtoms o molècules que formen del cos que es troba en equilibri tèrmic amb un petit forat, la radiació depen de la temperatura T

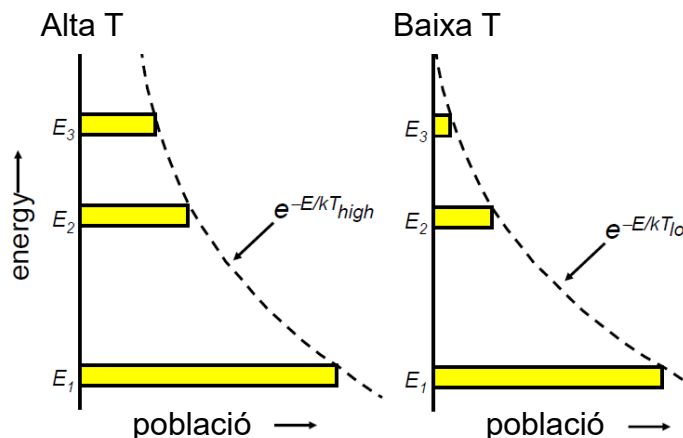


Energia dels nivells moleculars del cos



Distribució clàssica d'energia de Boltzmann

La distribució d'energia de Boltzmann és contínua, no discreta (no coneixia la mecànica quàntica), però funciona. Augmentant la temperatura, les col·lisions poden promoure molècules a estats d'alta energia.



Ludwig Boltzmann
(1844 - 1906)

Constant de Boltzmann k_B $1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

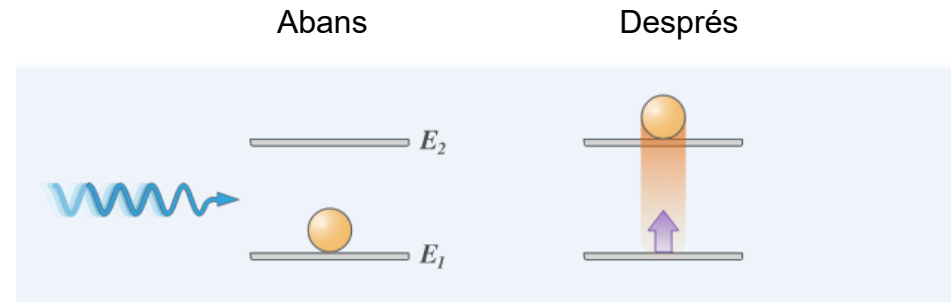
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\exp[-E_2 / k_B T]}{\exp[-E_1 / k_B T]} = \exp[-\Delta E / k_B T]$$

Processos d'interacció llum-matèria

Einstein, A., Phys. Z.. 18, 121 (1917)

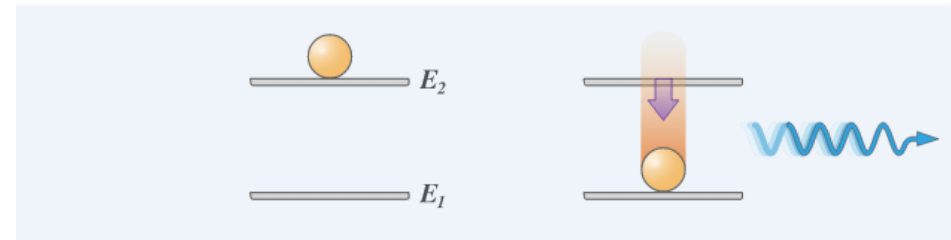
Absorció

L'àtom absorbeix l'energia del fotó, passant a un estat excitat (més energètic)



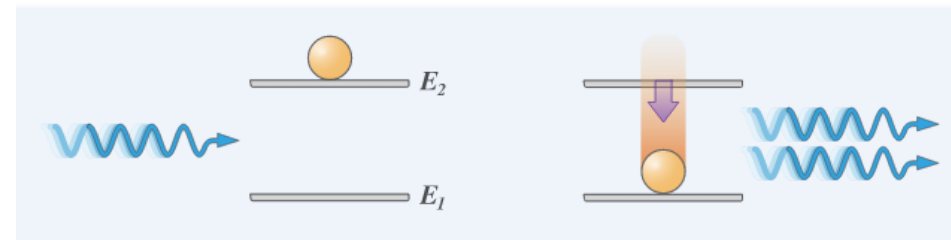
Emissió espontània

L'àtom passa de l'estat excitat a l'estat fonamental emetent un fotó. Els estats excitats no són estables (temps de vida mitja diferent per cada nivell). La direcció d'emissió no està definida.



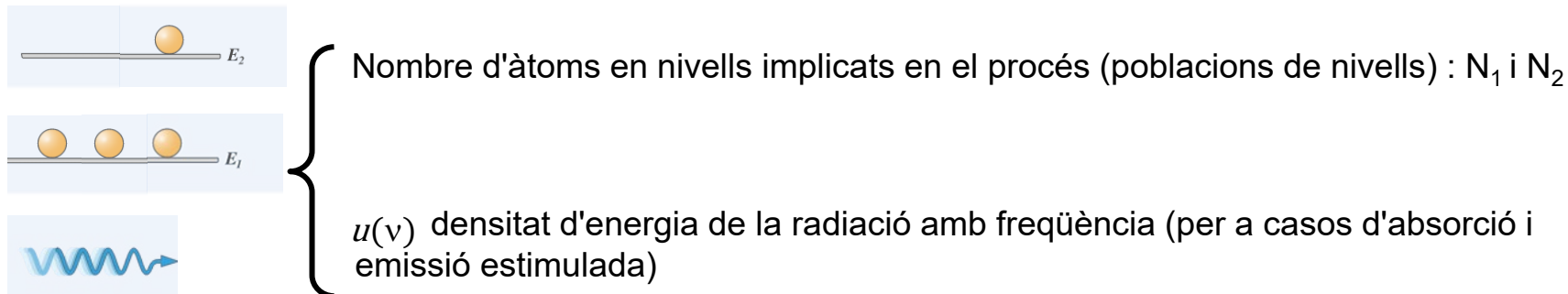
Emissió estimulada

Un fotó estimula l'emissió d'un segon fotó. L'àtom passa a l'estat fonamental (menys energètic). Procés invers a l'absorció. La direcció i fase del fotó emès queden determinades pel fotó incident.



Equacions de probabilitat de transició.

Sistema senzill de dos nivells. Les equacions de probabilitat per a l'absorció de fotons i l'emissió depenen de:



• Taxa d'absorció:

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{\text{absor}} = -B_{12}N_1u(\nu)$$

• Taxa d'emissió espontània:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{spont}} = -A_{21}N_2$$

• Taxa d'emissió estimulada:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{stim}} = -B_{21}N_2u(\nu)$$

on A_{21} , B_{12} i B_{21} són els coeficients d'Einstein. $B_{12} = B_{21}$

Cos negre en equilibri tèrmic

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{\text{absor}} = \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{spont}} + \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{stim}}$$

Coeficients d'Einstein A, B

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{A + B \cdot u(\nu)}{B \cdot u(\nu)}$$

Cos negre d'Einstein-Planck

Planck va postular $E_2 - E_1 = h\nu$ $h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Distribució de Boltzman

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{(E_2 - E_1)/kT}$$

$$u(\nu) = \frac{A/B}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

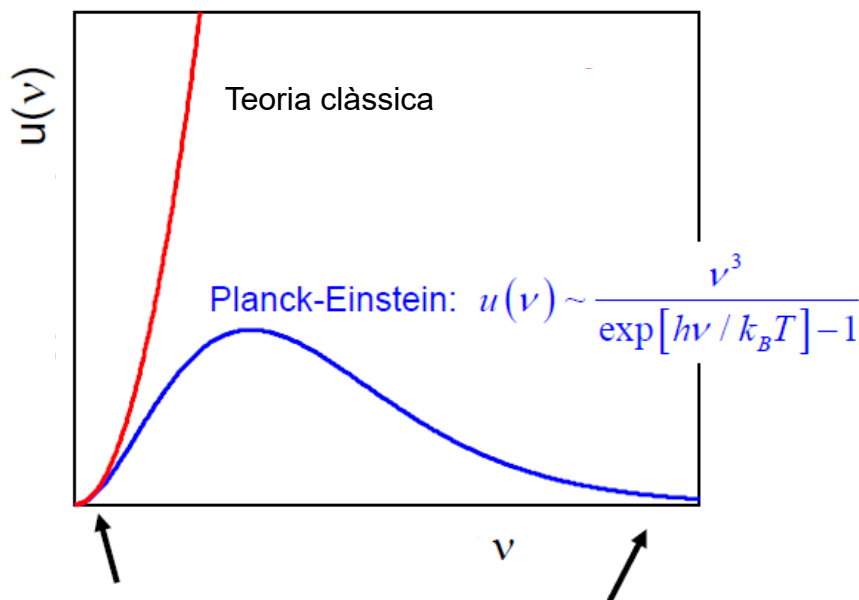
Constant de Planck

Es resol la catàstrofe ultravioleta

Segons la teoria clàssica, la densitat d'energia emesa pel cos negre augmenta amb la freqüència i la seva integral (energia total emesa) divergeix!!

Postulat de Planck: els àtoms poden absorbir i irradiar energia només en quantitats finites proporcionals, proporcionals a la freqüència emesa ν : $\Delta E = h\nu$

La distribució espectral de la radiació del cos negre segueix la llei de Planck-Einstein



A baixes freqüències els resultats són equivalents

A altes freqüències la densitat d'emissió baixa a zero i la integral de $u(\nu)$ no divergeix



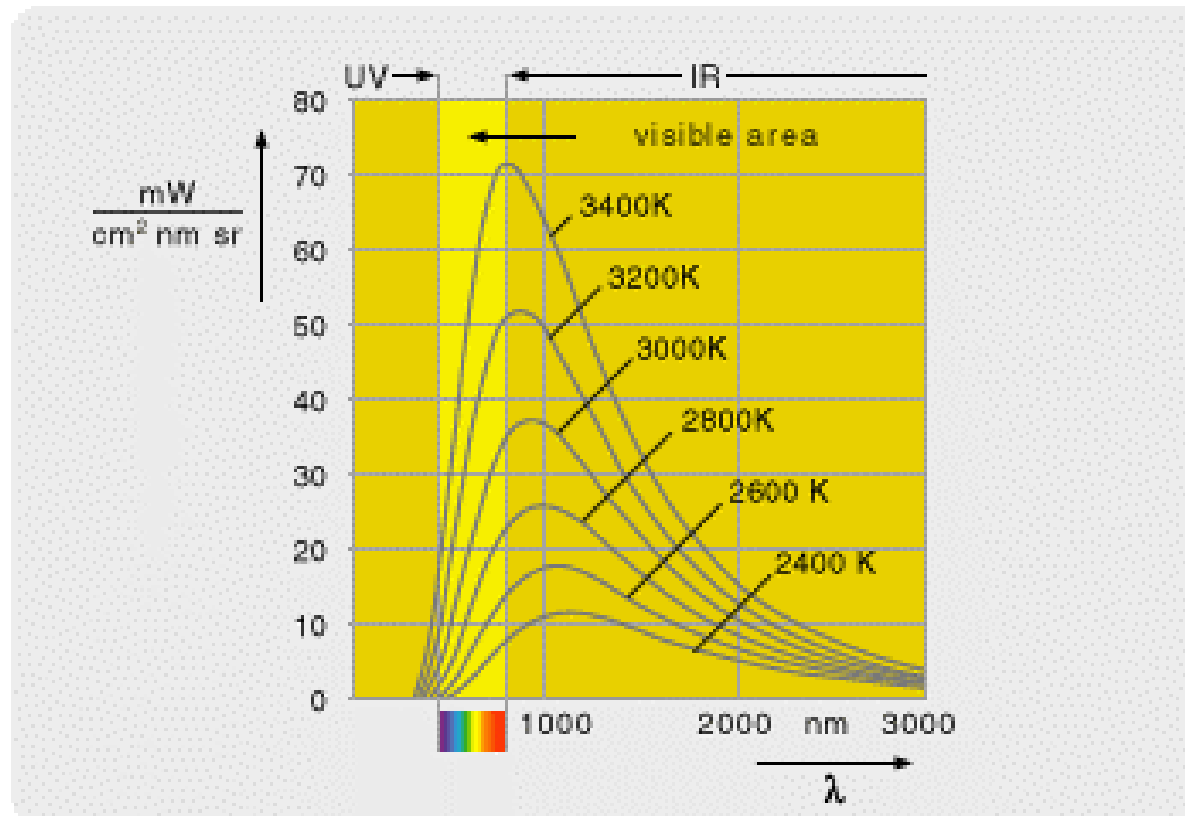
Max Planck
1858-1947



Albert Einstein
1879-1955

Cos negre. Emissors tèrmics

La intensitat, I , de radiació d'un cos negre a temperatura T en funció de la longitud d'ona λ



Màxim de la distribució espectral: Llei de desplaçament de Wien $\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$

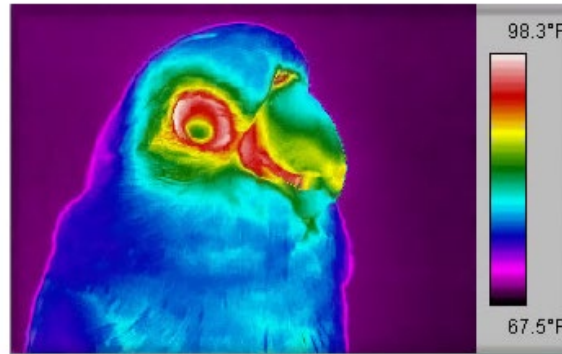
Color de la llum emesa: <http://www.mhhe.com/physsci/astronomy/applets/Blackbody/frame.html>

Cos negre. Emissors tèrmics

Tot objecte a una determinada temperatura radia segons l'emissió del cos negre

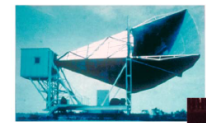
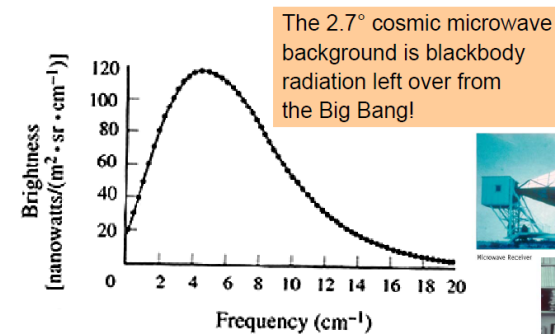
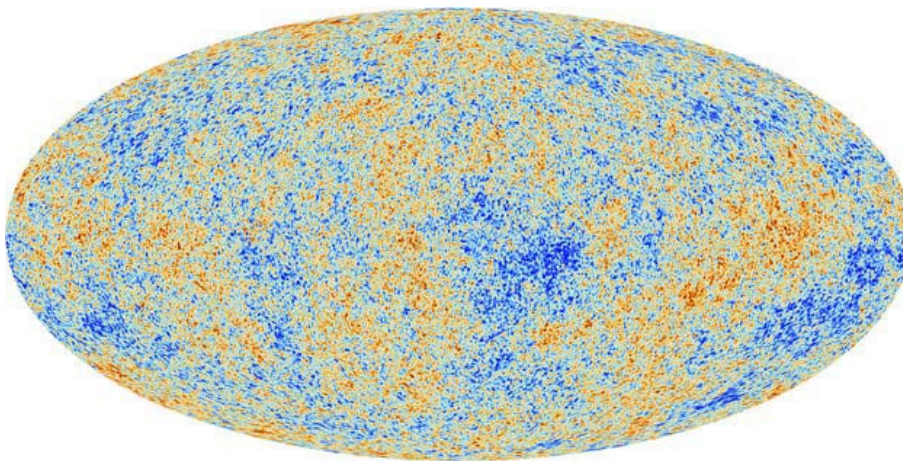


Cossos molt calents emeten en l'espectre visible



Cossos més freds emeten en l'espectre infraïngcalents emeten en l'espectre visible

Això és cert fins i tot per l'univers

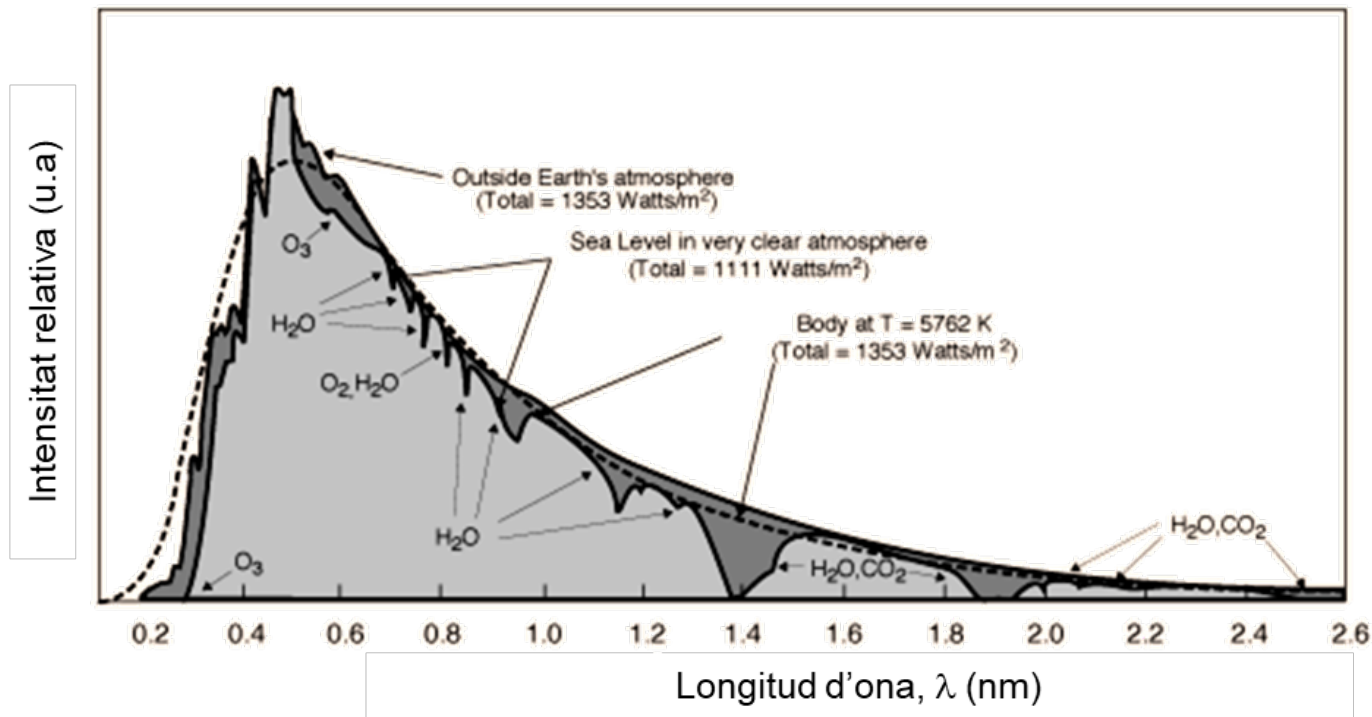


Arno Penzias and Bob Wilson
Nobel prize, 1978

La radiació de fons de microones de l'univers és una prova del Big Bang, 2.7°

Emissió solar

$$T \approx 5800 \text{ K}, \quad \lambda_{\text{max}} \approx 500 \text{ nm}$$



Què és un LASER?

Procés d'emissió en cascada de fotons

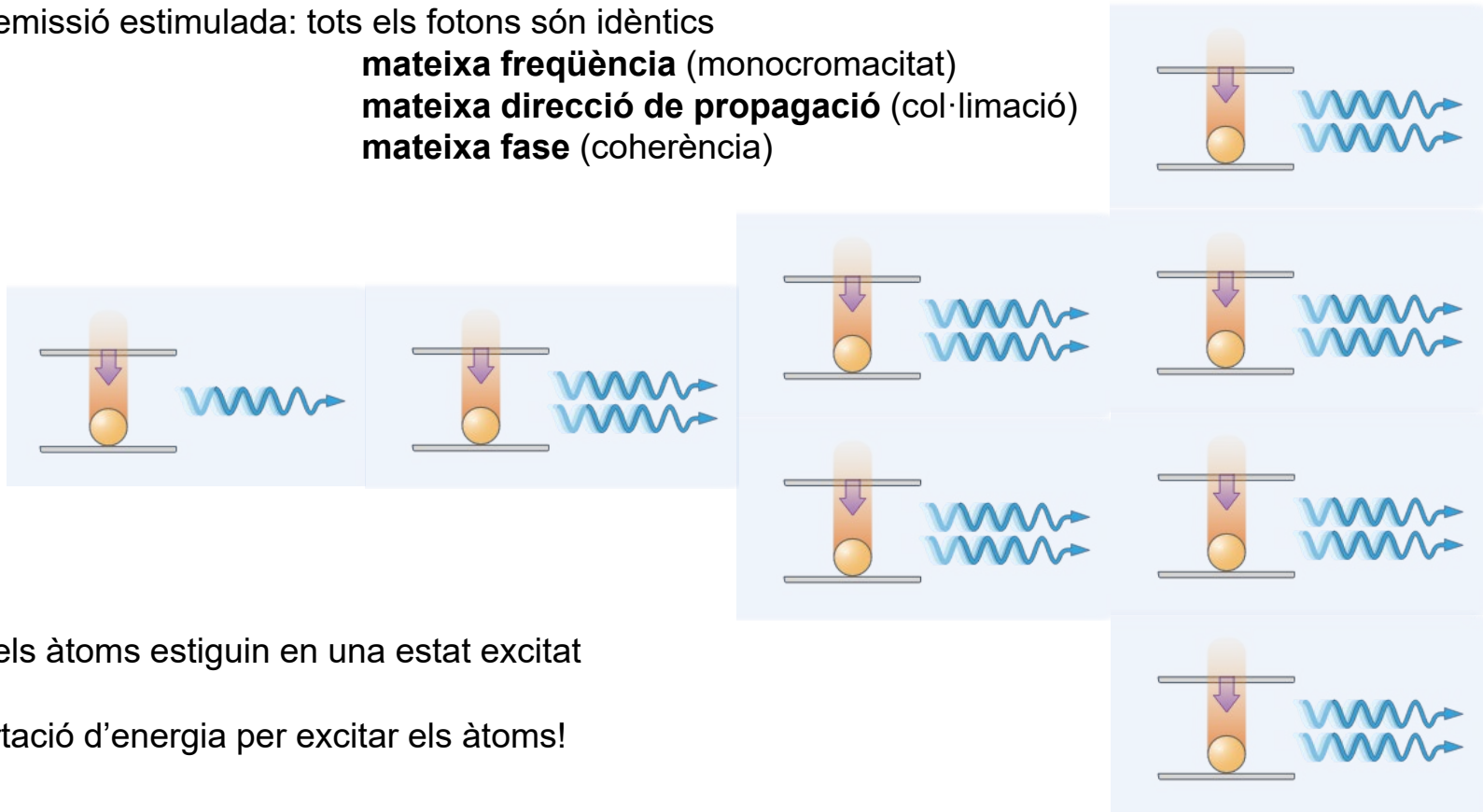
Primer, emissió espontània: fase aleatòria, direcció aleatòria

Després, emissió estimulada: tots els fotons són idèntics

mateixa freqüència (monocromaticitat)

mateixa direcció de propagació (col·limació)

mateixa fase (coherència)

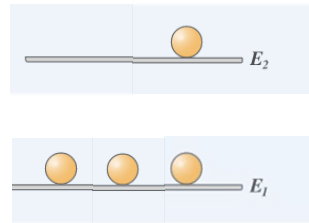


Cal que els àtoms estiguin en una estat excitat

Cal aportació d'energia per excitar els àtoms!

Què és un LASER?

Sistema senzill de dos nivells.



Distribució de Boltzman

$$N_2 = N_1 e^{-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}}$$

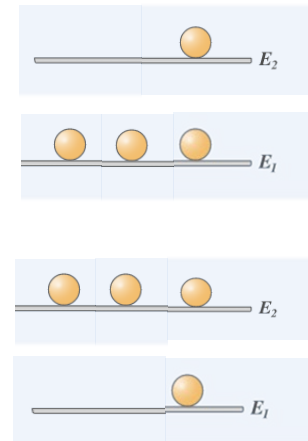
k_B : constant de Boltzmann
 T : temperatura

N_2 creix augmentant la temperatura però mai arriba a N_1 **sempre** $N_1 > N_2$

Ignorant l'emissió espontània

$N_1 > N_2$ $\rightarrow$ Absorció > Emissió estimulada
disminució de la radiació

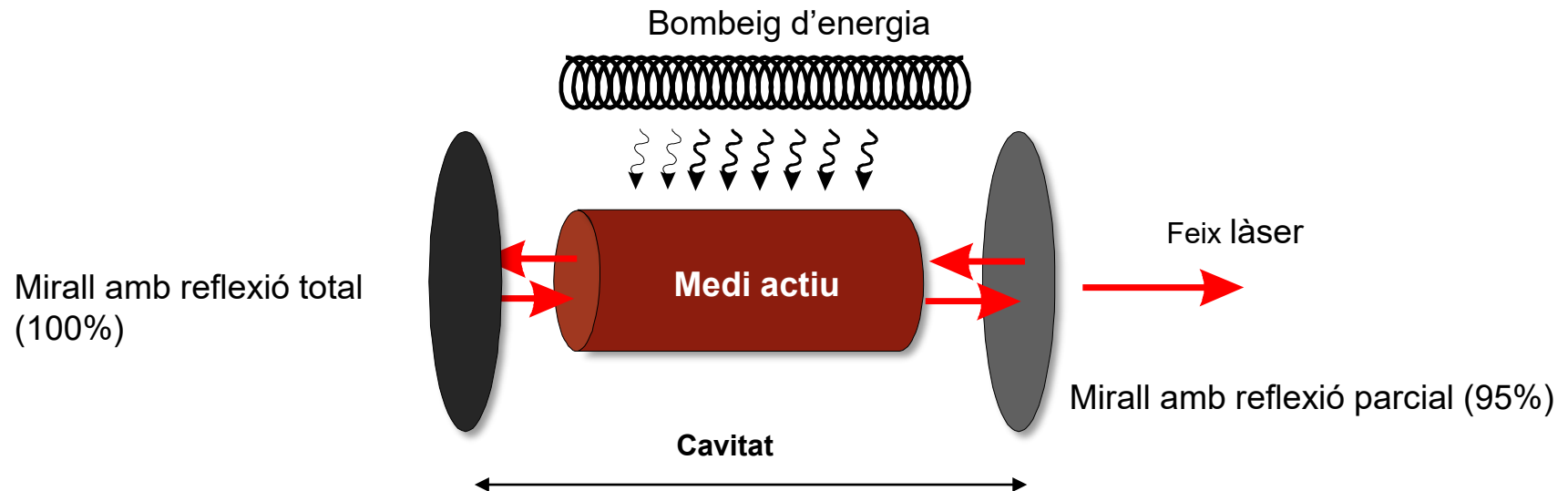
$N_2 > N_1$ $\rightarrow$ Emissió estimulada > Absorció
Amplificació de la radiació



Cal $N_2 > N_1$ Inversió de població

LASER

Light Amplification by Spontaneous Emission Radiation



Bombeig òptic, elèctric, químic, elèctric (semiconductors)...

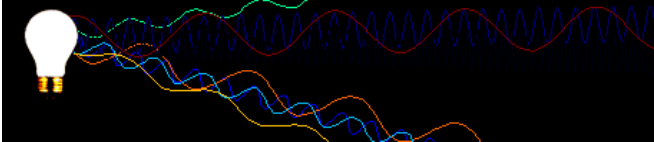
Medi actiu transforma part de l'energia bombejada en llum. Amplifica la llum per emissió estimulada; sòlid, líquid, gas, semiconductor,...

Cavitat determina una direcció privilegiada. Reinjecta la llum al medi actiu. En la cavitat es produeix una ona estacionària. Determina les freqüències d'emissió possibles (freqüències de ressonància)

Una petita part de l'energia emmagatzemada surt en forma del feix làser per un dels miralls

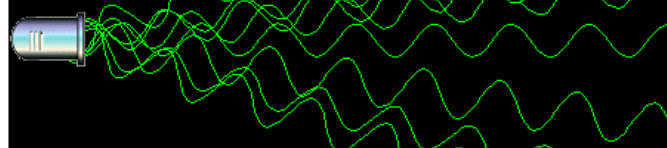
Propietats del LÀSER

Llum blanca



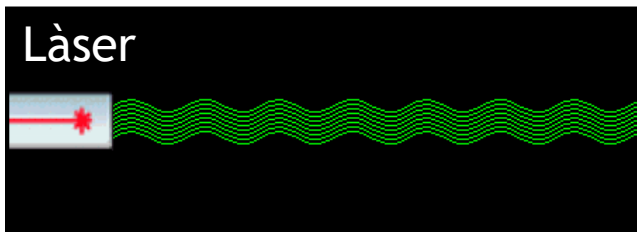
Moltes freqüències (espectre d'emissió molt gran)
Emissió en totes direccions

Làmpada monocromàtica



Una freqüència (espectre d'emissió bastant estret)
Fases no correlacionades
Direccions de sortida diferents

Làser

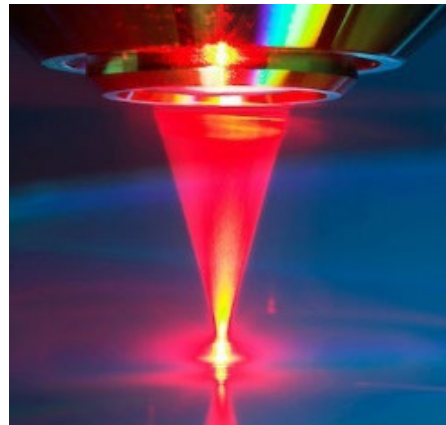


Freqüència ben determinada (llum monocromàtica)
Mateixa direcció (col·limació)
Igual fase (coherència)

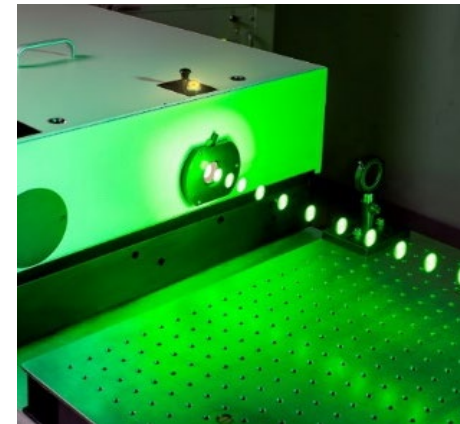
Propietats del LÀSER



Coherent
Col·limada
Monocromàtica



Permet concentració
espaial



Permet control temporal
Llum polsada
(durada dels pulsos ns, ps, fs...)

Apollo 11 retorna 1 de cada 10^{17} fotons fa 50 anys!!!



El primer làser en funcionament: 1960

El **1960** (43 anys després que Einstein predigués l'emissió estimulada el 1917) Theodore Maiman va demostrar el primer làser de treball anomenat MASER, per a "Amplificació de microones per emissió estimulada de radiació"



MAI

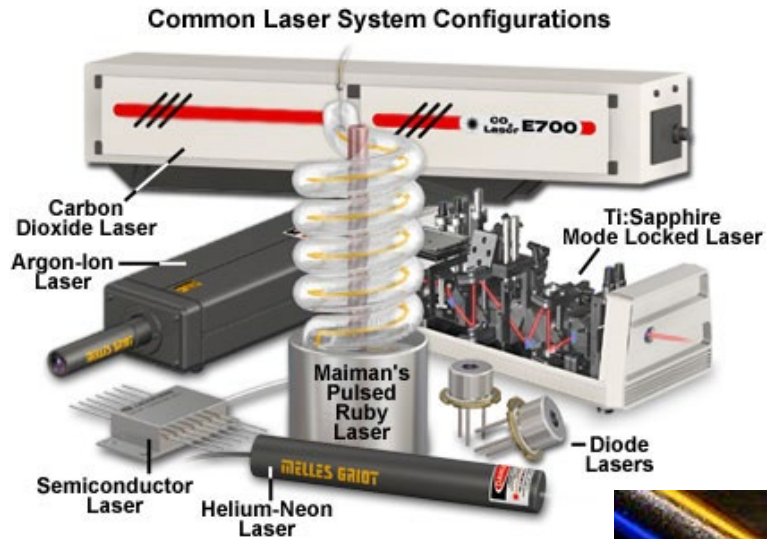
El **1957** Charles Townes havia inventat el MASER  P.N. 1964

El **1959** Charles Gordon, estudiant de doctorat a Columbia, va publicar per primera vegada l'acrònim "LASER" en un article d'una conferència on havia estat discutint amb Townes

A Mainman li van rebutiar l'article i la patent va ser atorgada a Townes i Shawlow  P.N 1981 (espectroscòpia)



Tipus de làsers LÀSER



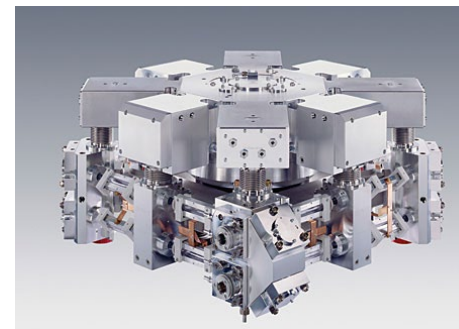
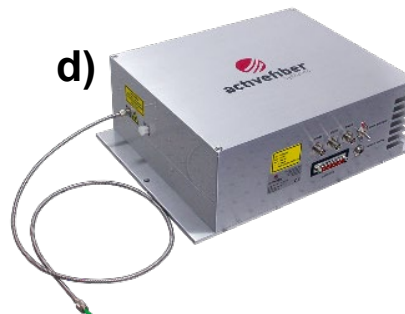
Laser de semiconductor



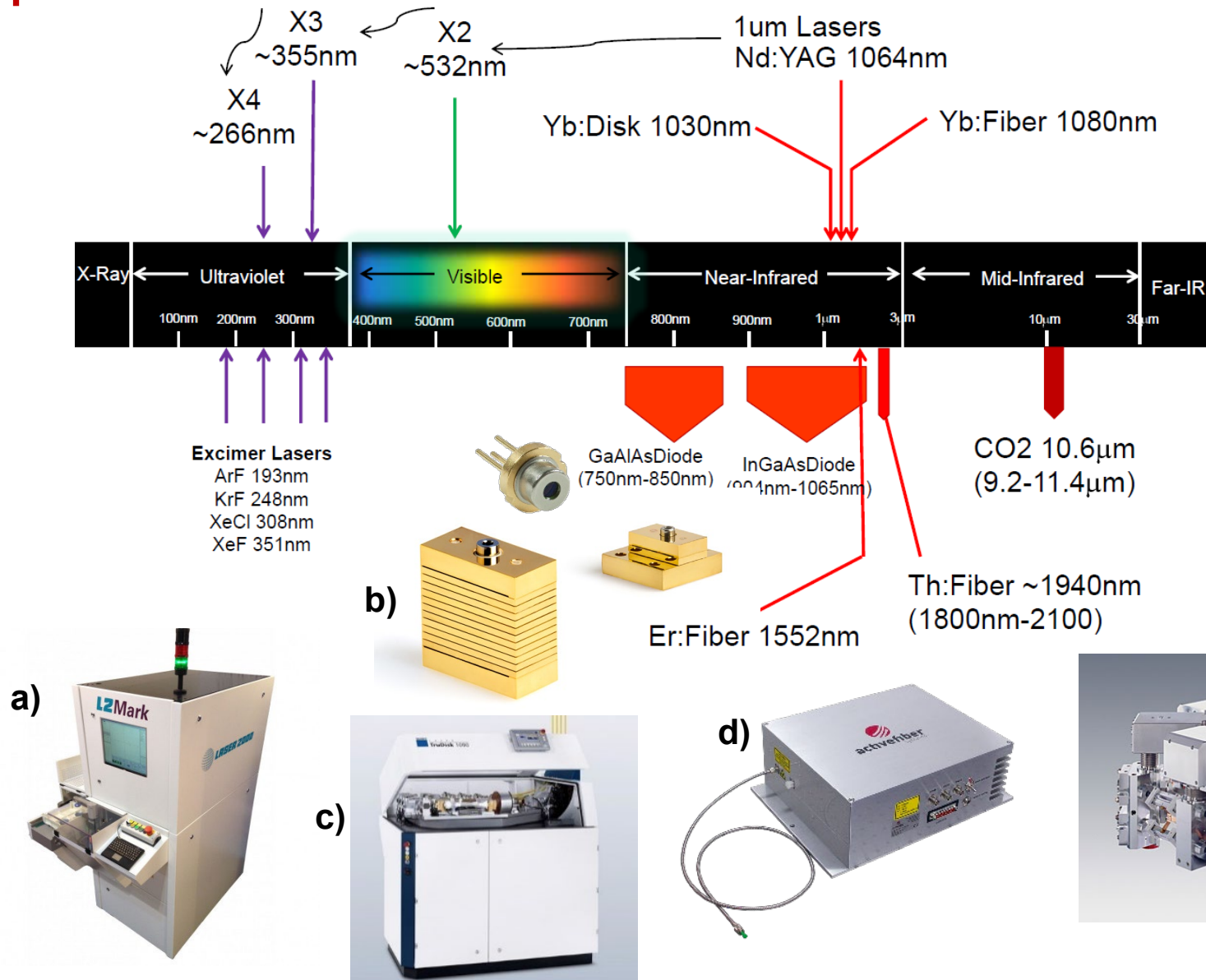
Laser de neodimi
Fusió Nuclear

Tipus de làsers LÀSER

Reconeixeu aquests làsers?



Tipus de làsers LÀSER



Comunicacions (datacom i telecom)

Defensa

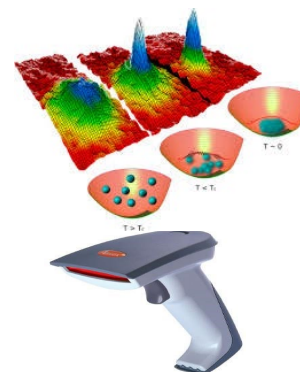
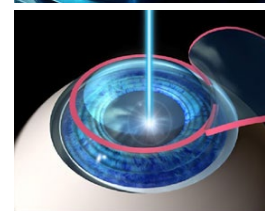
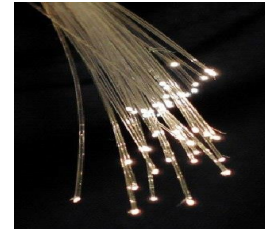
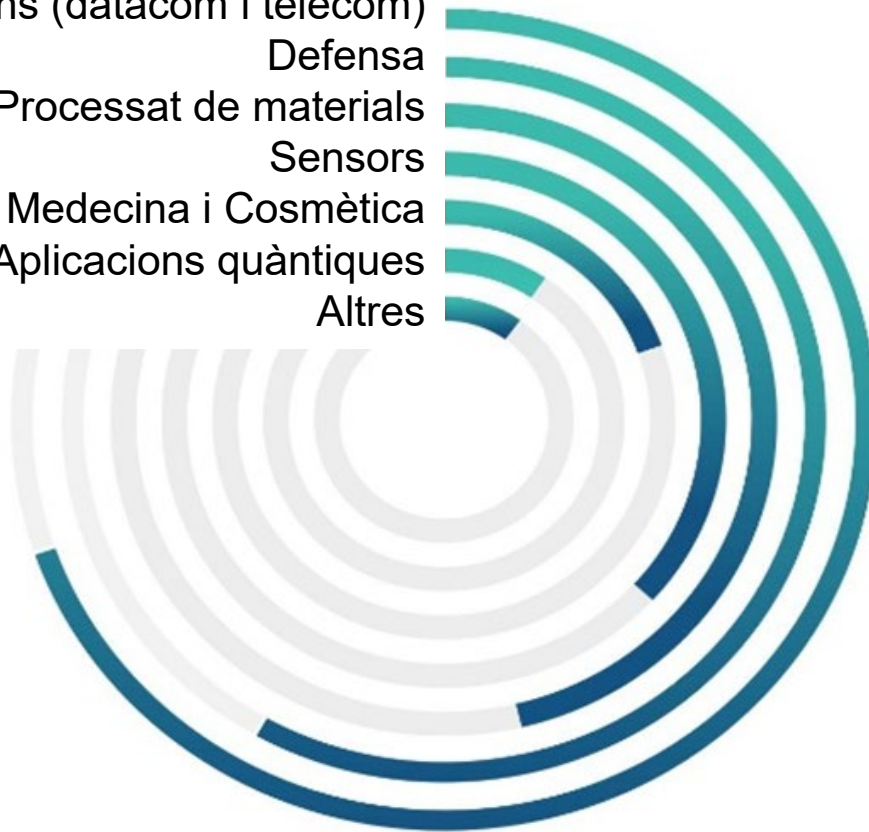
Processat de materials

Sensors

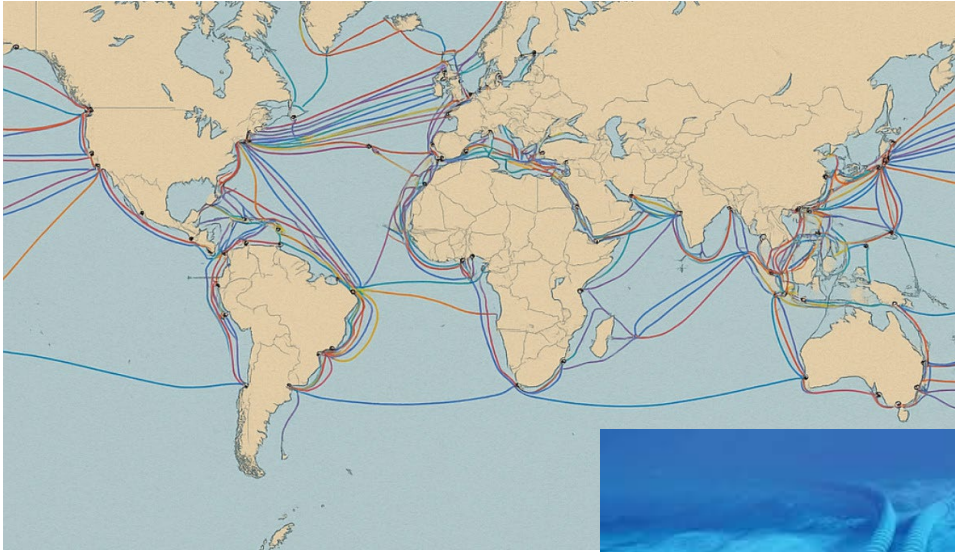
Medecina i Cosmètica

Aplicacions quàntiques

Altres



Aplicacions en comunicacions



fibres òptiques submarines
99% del tràfic



comunicació entre satèl·lits

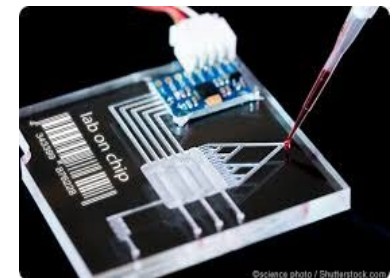
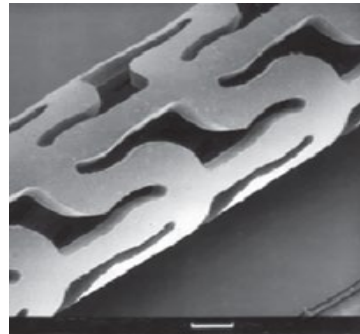
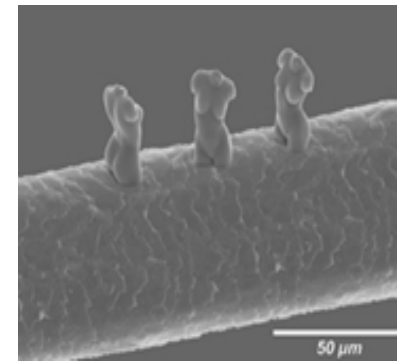


connexions laser en centres de dades
per augmentar la velocitat



cap als sistemes fotònics integrats

Aplicacions en processat de materials



soldadura

tall

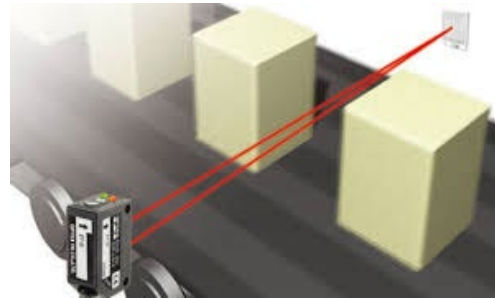
marcatge

fabricació 3D / microfluidica

Aplicacions en Sensors i LIDAR



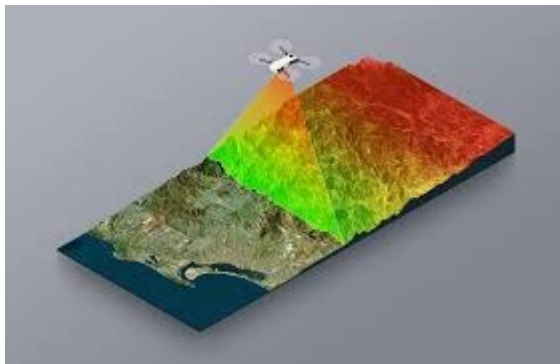
detecció objectes petits per trinagulació



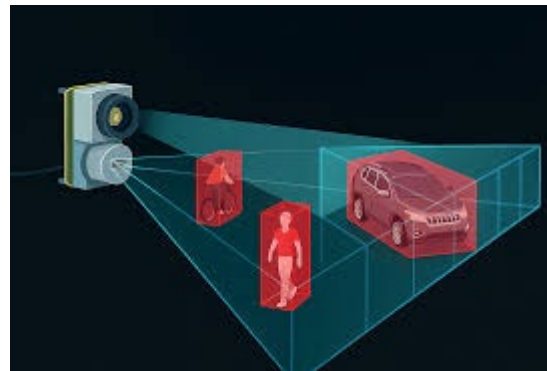
fotodectetor
(control qualitat o porta d'ascensor)



detecció esquerdes
(central nuclear, ponts,

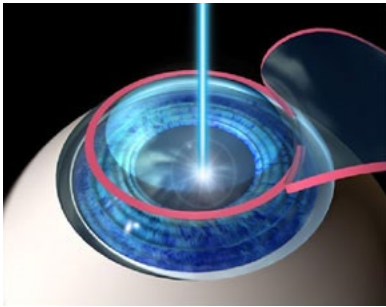


LIDAR (Light Detection And Ranging)

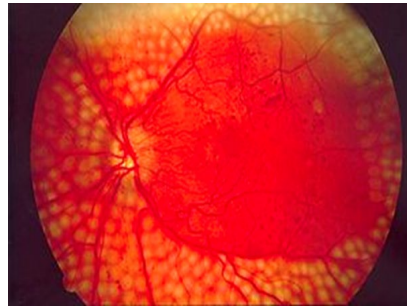


conducció autònoma

Aplicacions en medecina i cosmètica



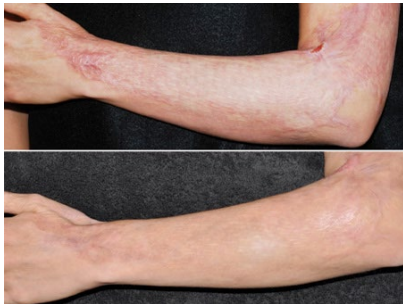
cirurgia refractiva



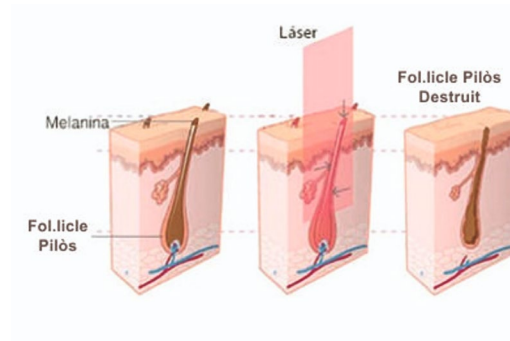
fotocoagulació



cirurgia urològica



regeneració pell



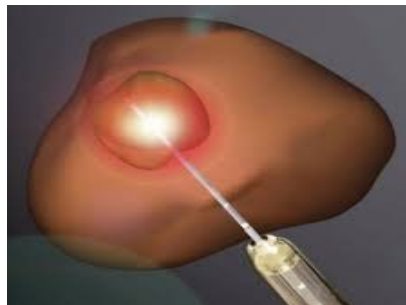
depilació làser



cirurgia cerebral



eliminació tatuatges



ablació de tumors

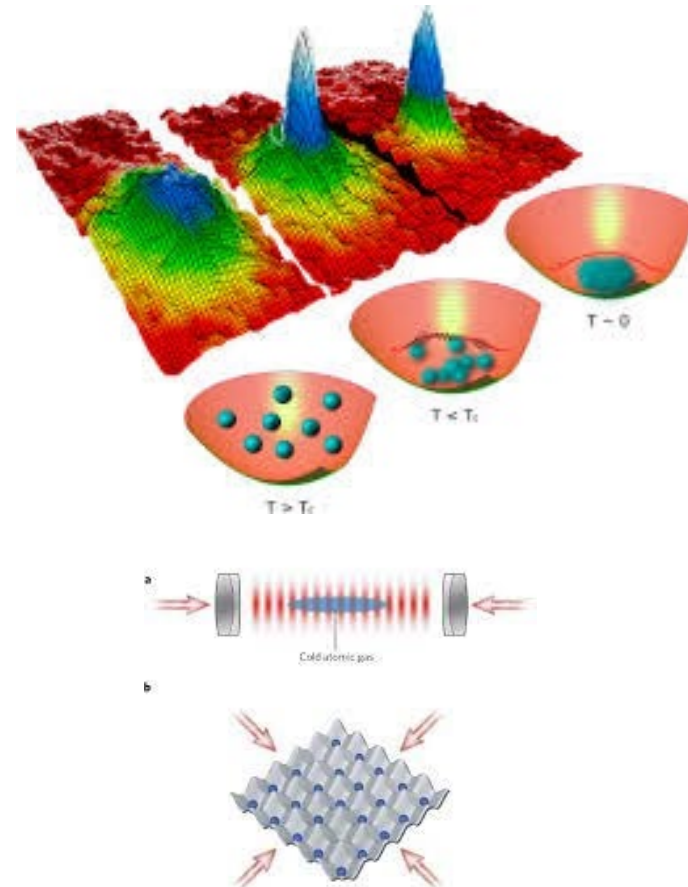
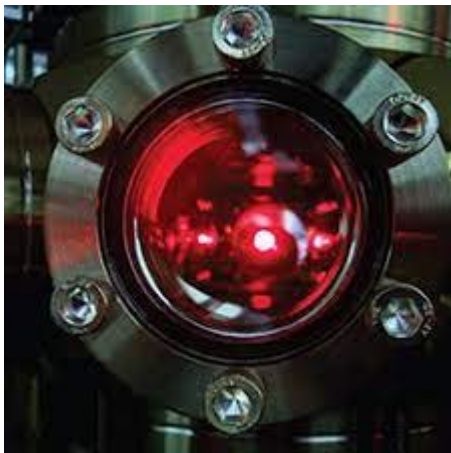


ptogenètica, control neuronal

“Refredar” i atrapar àtoms

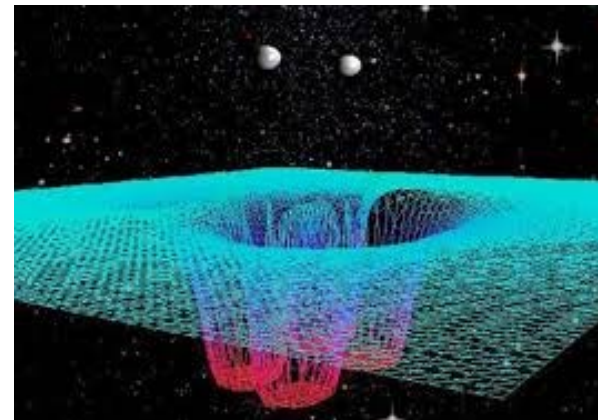
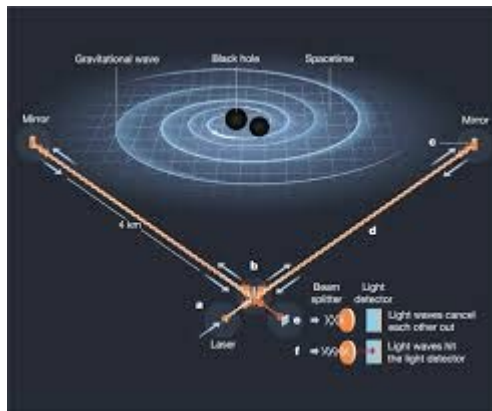
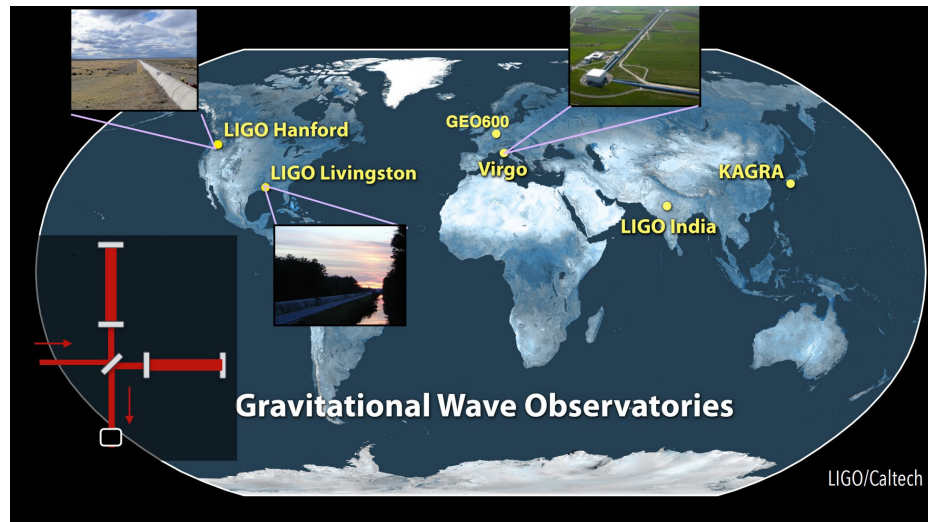
Els làsers poden refredar els àtoms i atrapar-los al seu lloc.

Aquests àtoms freds es poden manipular, entrellçar i llegir amb làsers i tècniques d'imatge més avançades, creant qubits d'alta qualitat en ordinadors quàntics

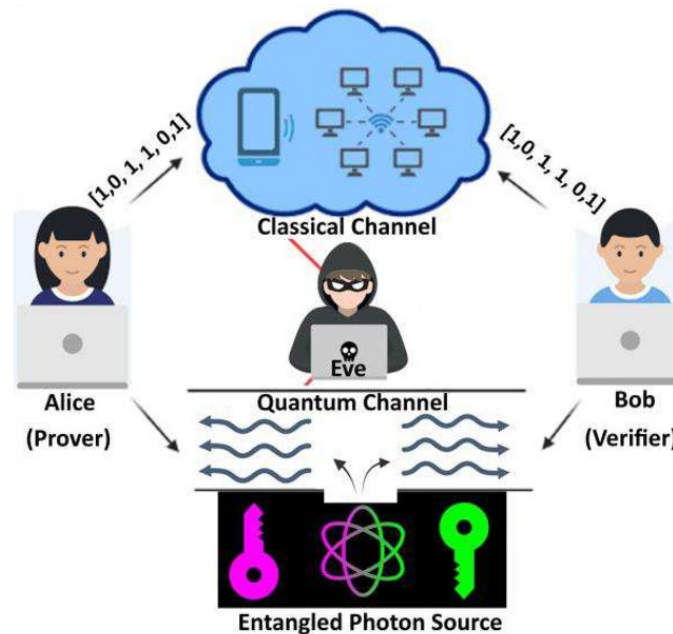
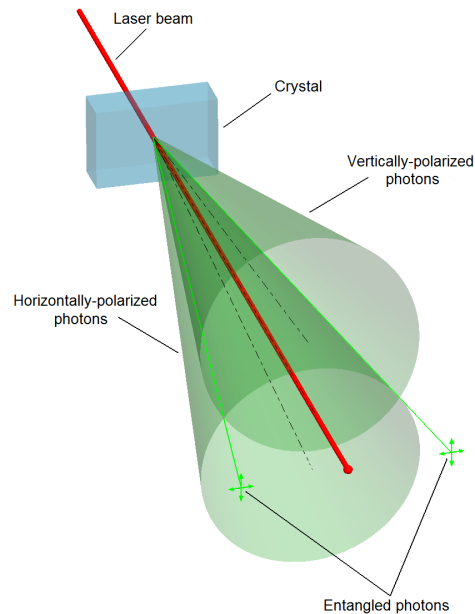


Làsers per mesurar l'espai-temps. Detecció d'ones gravitacionals

La primera observació directa de les ones gravitacionals es va fer el 14 de setembre de 2015 i va ser anunciada per les col·laboracions LIGO i Virgo l'11 de febrer de 2016.



Criptografia quàntica (QKD)



Europa i Xina hi estan invertint mentre Estats Units busca altres sistemes anomenats Post-Quantum Cryptography

GRÀCIES PER LA VOSTRA ATENCIÓ!

