

L'efecte fotoelèctric

Interpretació d'Einstein

Conseqüències

Lluís Ametller

Departament de Física
UPC

UCE Prada, 22 d'agost 2023

*“A l’Albert Einstein pels seus serveis a la Física Teòrica i
especialment per la seva descoberta de la llei de l’efecte
fotoelèctric”*

Premi Nobel 1921

(atorgat el 2022)

“...semblava violar tot el que sabíem sobre la interferència de la llum”

R.A. Millikan, 1948

Premi Nobel, 1923 (en part, per intentar demostrar experimentalment que la teoria d'Einstein era incorrecta!
... però finalment la va confirmar!)



Una visió històrica de la naturalesa de la llum

- ~1690 Huygens: La llum és una ona (Reflexió/Refracció)
- ~1690 Newton: Creia que la llum consisteix en corpuscles
- 1801 Young: Experiment de la doble escletxa
- 1873 Maxwell: la radiació e.m. (llum) són ones
- 1887 Hertz: Produeix ones e.m. amb circuits elèctrics
- ~1920 Einstein: La llum consisteix en partícules (fotons)
- La llum es manifesta de manera dual en funció del fenomen que estudiem



FOTÓ

primera partícula predita teòricament

Partícula

Objecte puntual: punt, cotxe, planeta,...

Llei de Newton: $F = m a$

Moviment, transport de matèria i energia

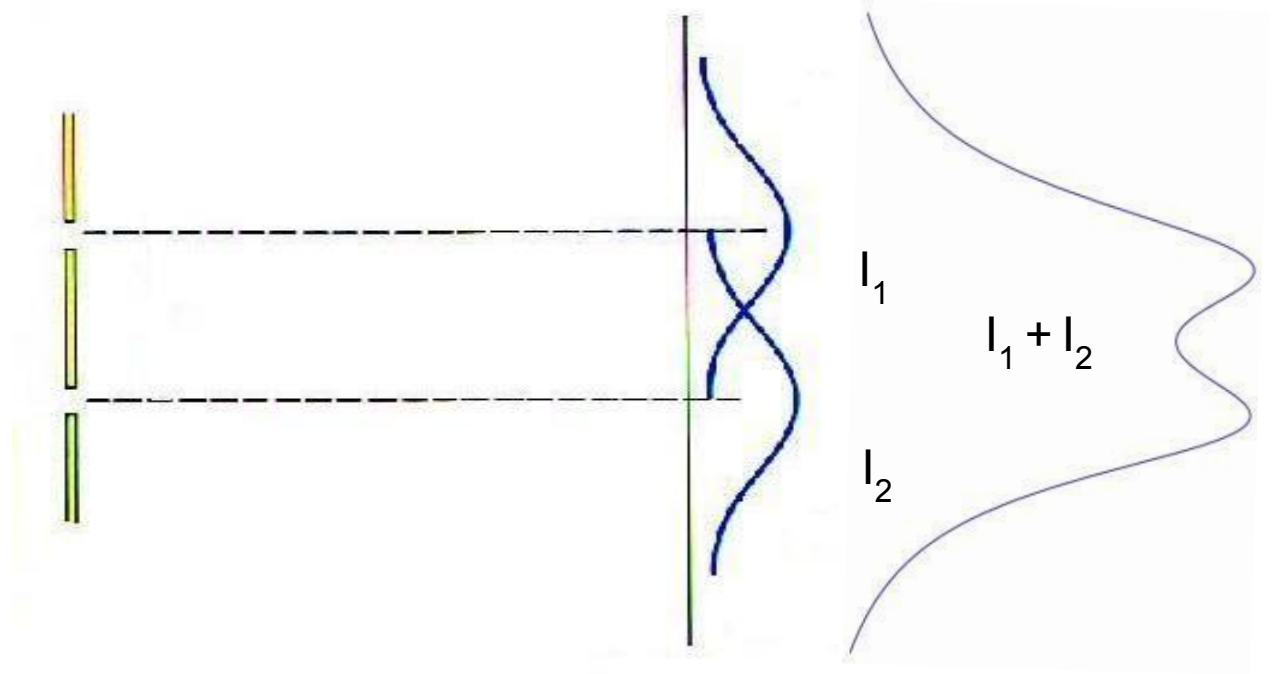
Ona

Pertorbació extensa

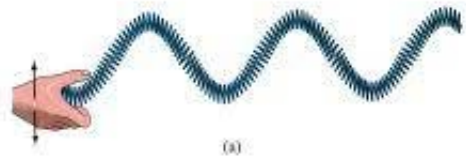
Equació d'ones

Transport d'energia, no de matèria

Partículas

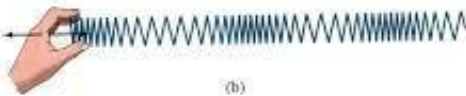


Ones mecàniques



(a)

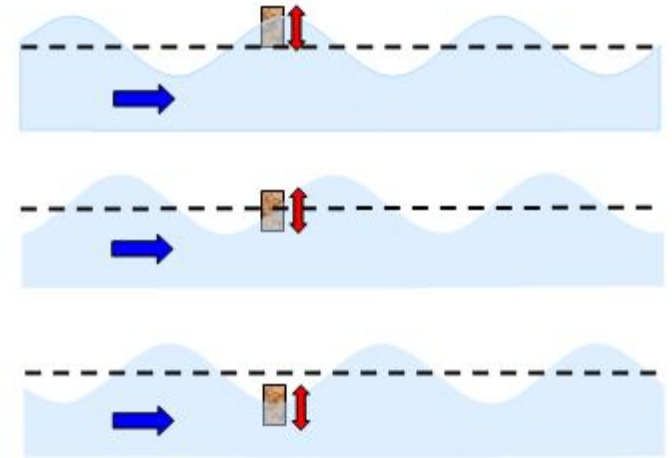
Transversals



(b)

Longitudinals

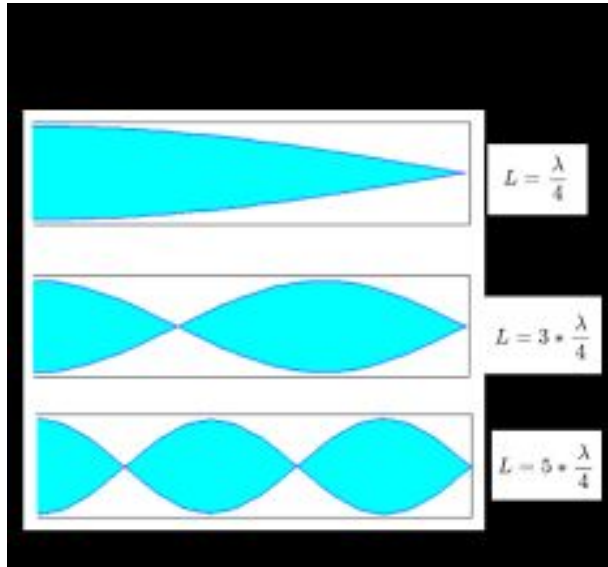
Transversals



És imprescindible que hi hagi un medi de propagació

La matèria no es transporta. L'energia, sí

Superposició d'ones



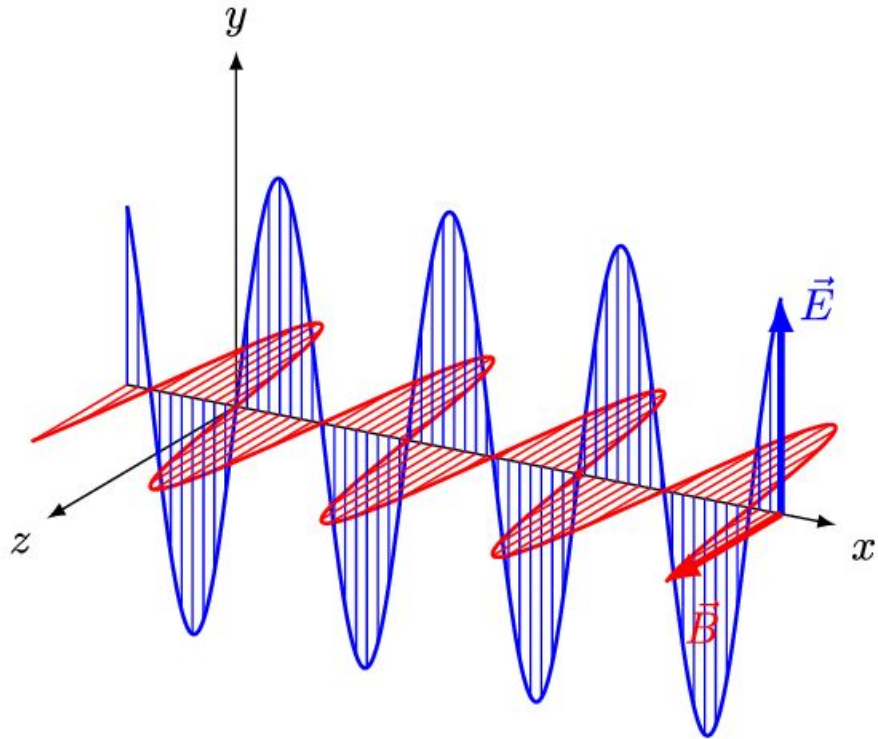
Tub acústic. Ones estacionàries.

Nodes: So + so = silenci

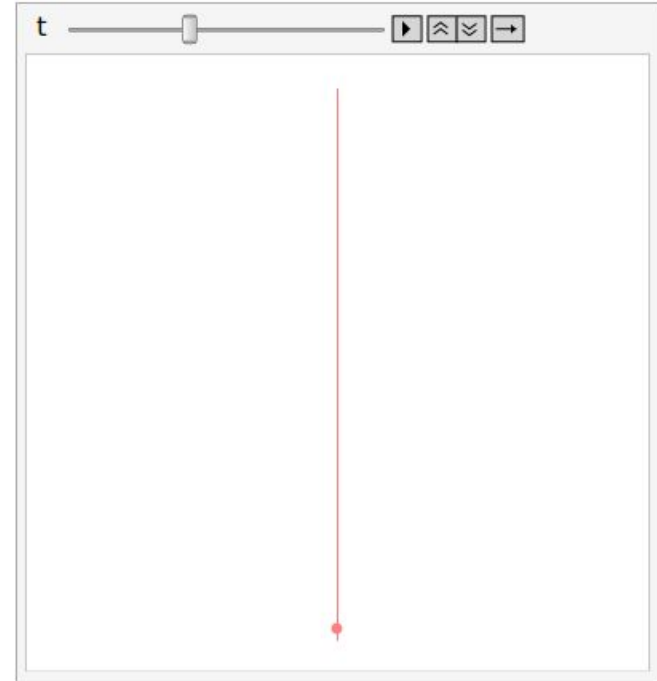
Superposició d'ones en la superfície de l'aigua



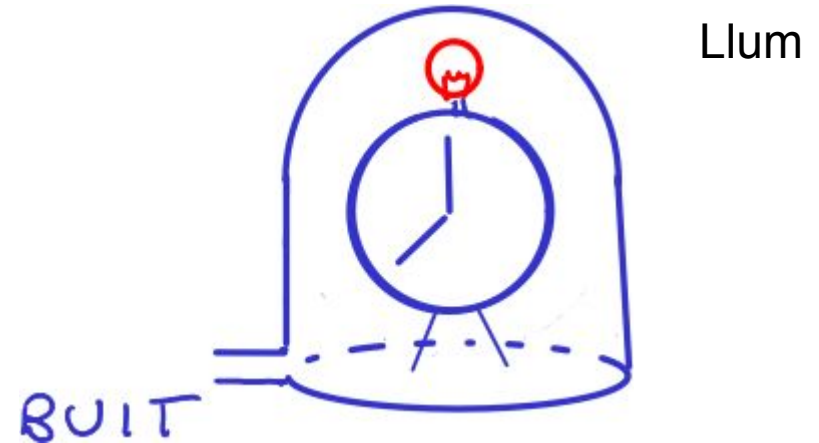
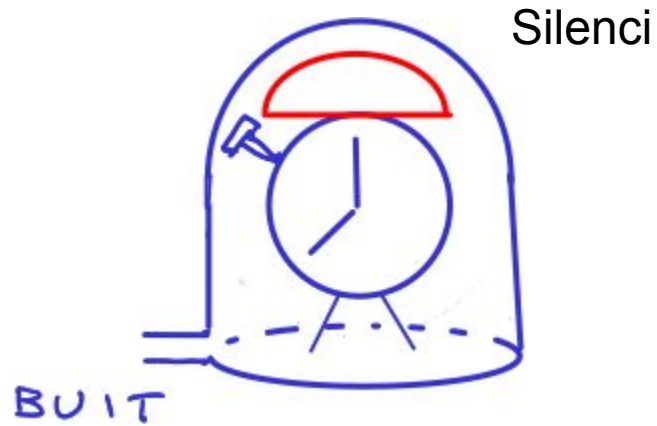
Ones electromagnètiques



No cal medi material: Buit

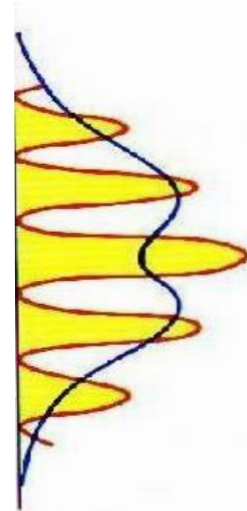
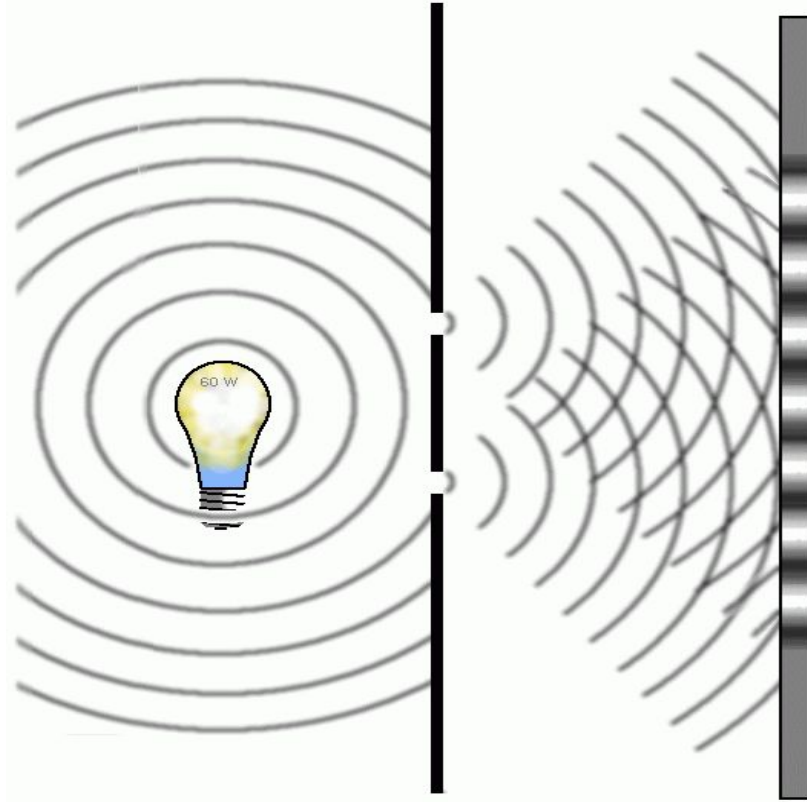


Medi: Ones mecàniques - sonores versus ones electromagnètiques - llum



Llum dels estels

Les ones interfereixen: Experiment de Young de la doble escletxa



Només per llum monocromàtica

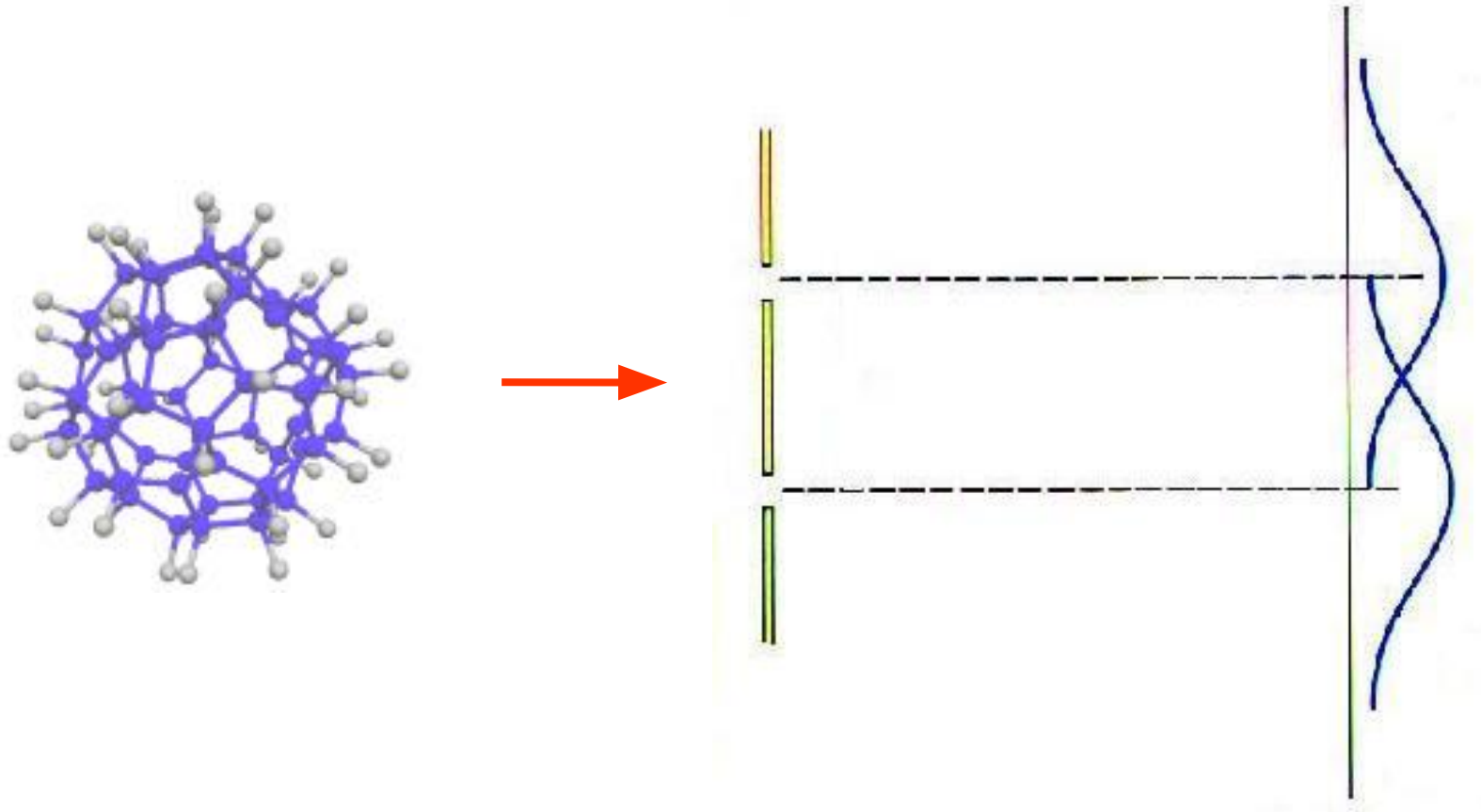
Només si $\lambda \sim d$

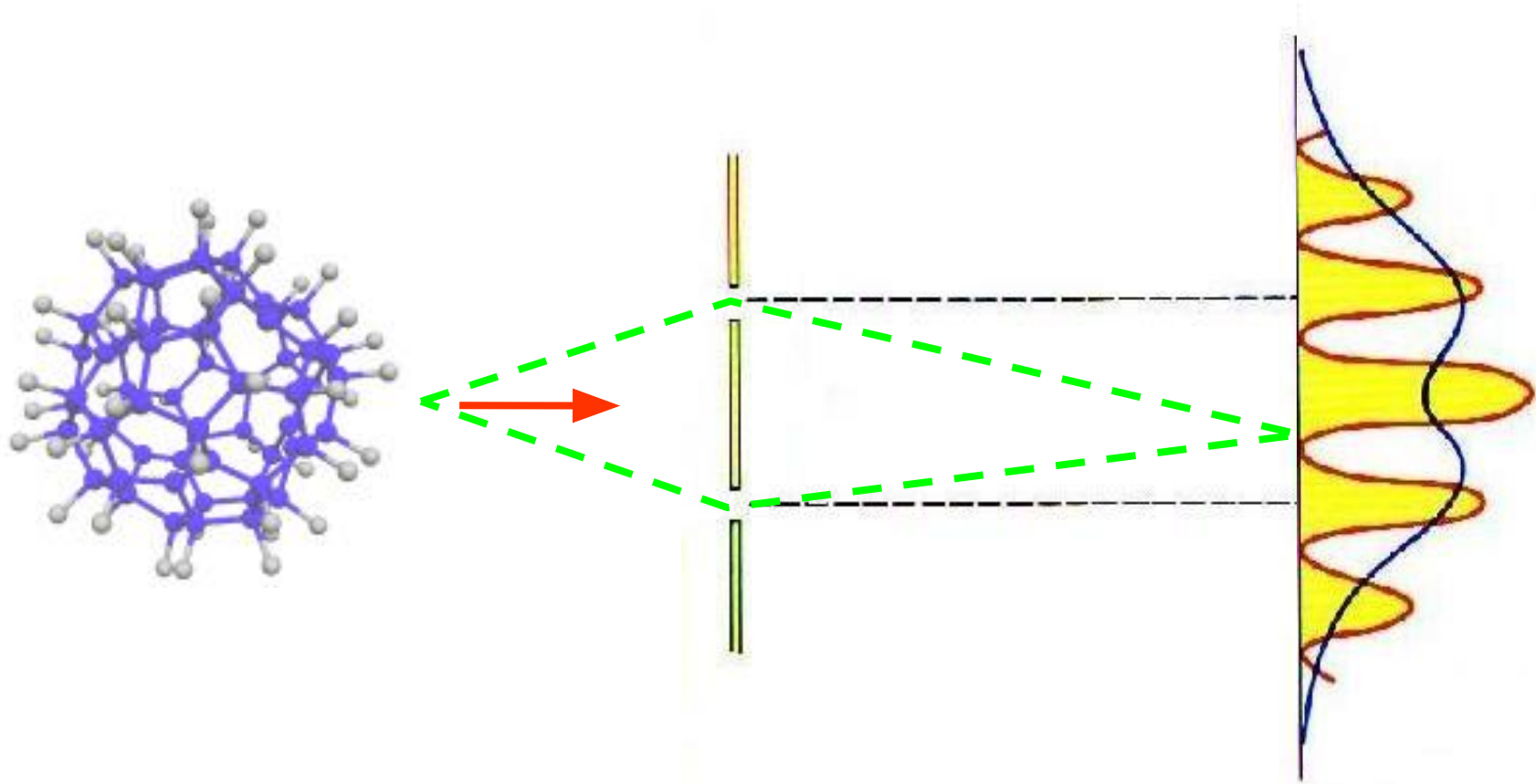
La intensitat $I = (A_1 + A_2)^2$ amb A_i positiu i o negatiu dona lloc
A INTERFERÈNCIES en la superposició.

Les interferències poden ser constructives o destructives

Què és A_i ? Amplitud de probabilitat, en el món microscòpic

Només les ones interfereixen?





Efecte fotoelèctric:

Descobert experimentalment per Heinrich Hertz (1857–94) l'any 1887, per accident!

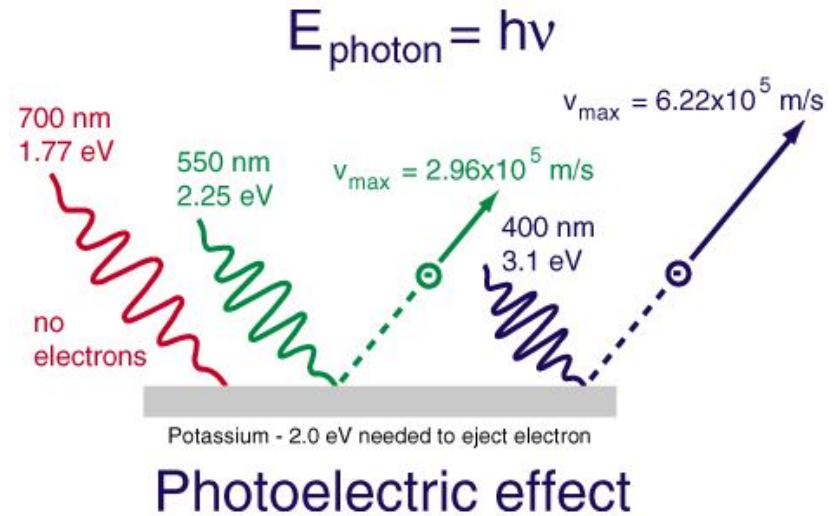
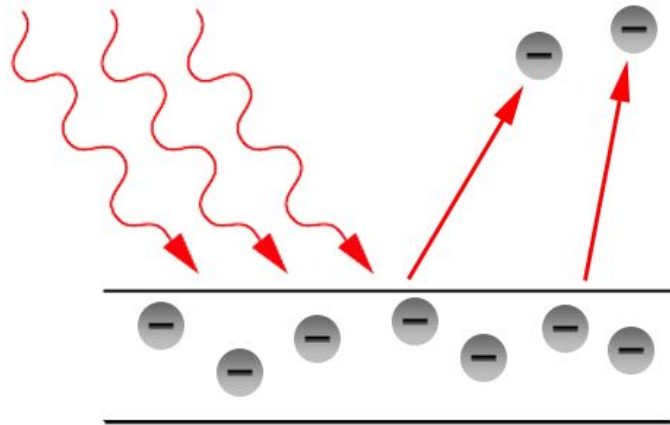
Interpretat teòricament per Albert Einstein l'any 1905

Tenia 26 anys!



Descripció de l'efecte fotoelèctric

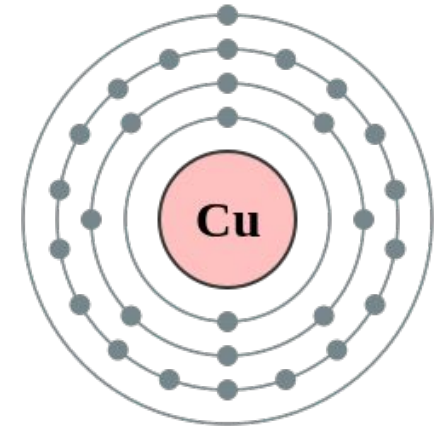
Quan es fa incidir llum sobre un metall:



- 1) Llum vermella, no produeix efecte
- 2) Si hi ha efecte, és instantani ($< 5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$)
- 3) L'energia cinètica màxima dels electrons és proporcional a la freqüència de la llum
- 4) A major intensitat de llum, més electrons extrets del metall

Metalls i els seus àtoms

Cu^{29} a tall d'exemple:



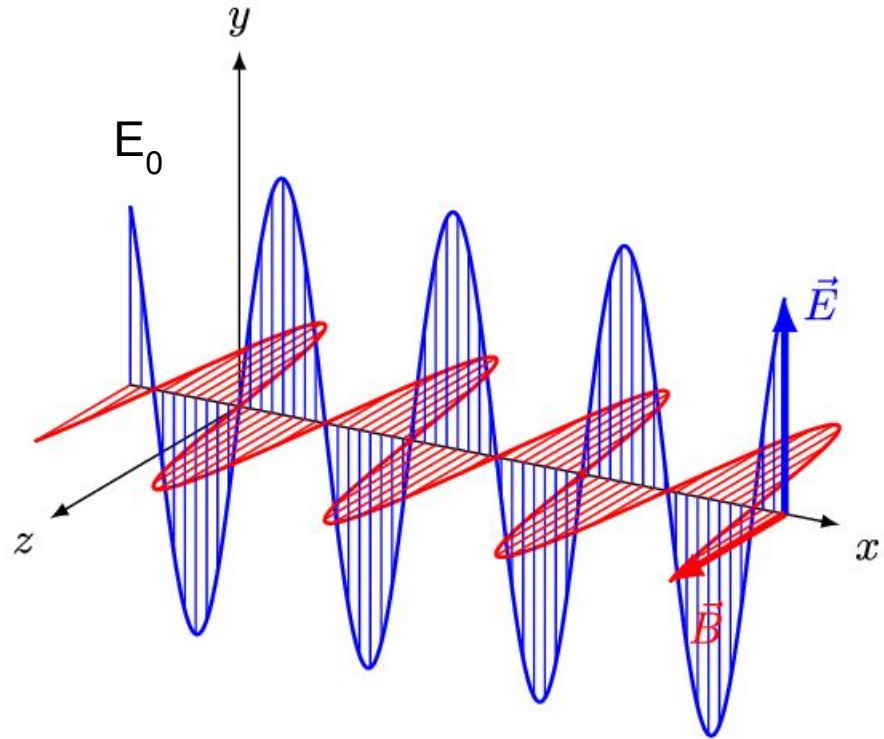
Per què no s'explicava?

Si la llum es comporta com a ona:

La intensitat és proporcional a E_0^2

L'efecte no és immediat

No depèn de la freqüència de la llum





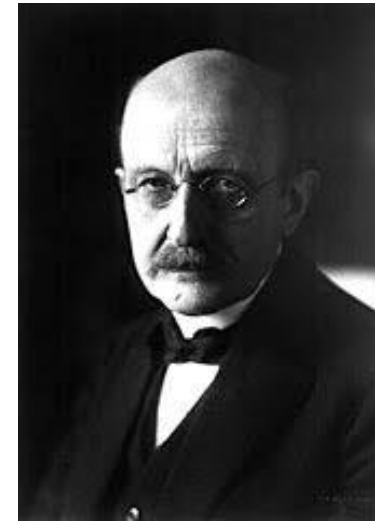
El fotó

Introduït com a quàntum de llum per Planck

Paquet mínim de llum: $E = h \nu$
 $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Descripció: corpuscle, partícula

Primera partícula predita teòricament ...



... amb el vent en contra

Explicació d'Einstein de l'Efecte fotoelèctric

Fotó: quàntum d'energia

$$E = h \nu$$

Enviem llum, fotons, contra un metall

Els electrons del metall estan lligats als seus àtoms,

$$\phi$$

Quan un fotó xoca contra un electró, aquest podrà escapar si:

$$h \nu > \phi$$

Això passarà només si:

$$\nu > \phi / h = \nu_L$$

ν_L : freqüència llindar

Així, si $\nu < \nu_L$ No hi haurà efecte fotoelèctric

En canvi, si $\nu > \nu_L$ hi haurà efecte fotoelèctric

L'energia cinètica màxima amb que sortiran els electrons, serà $E_c = h \nu - \phi$

Quan hi ha efecte, és instantani !



Aplicacions Efecte fotoelèctric

Detectors presència portes d'aparcaments

Fotomultiplicadors

Espectroscòpia fotoelèctrica

Ulleres, prismàtics de visió nocturna

Aeronaus

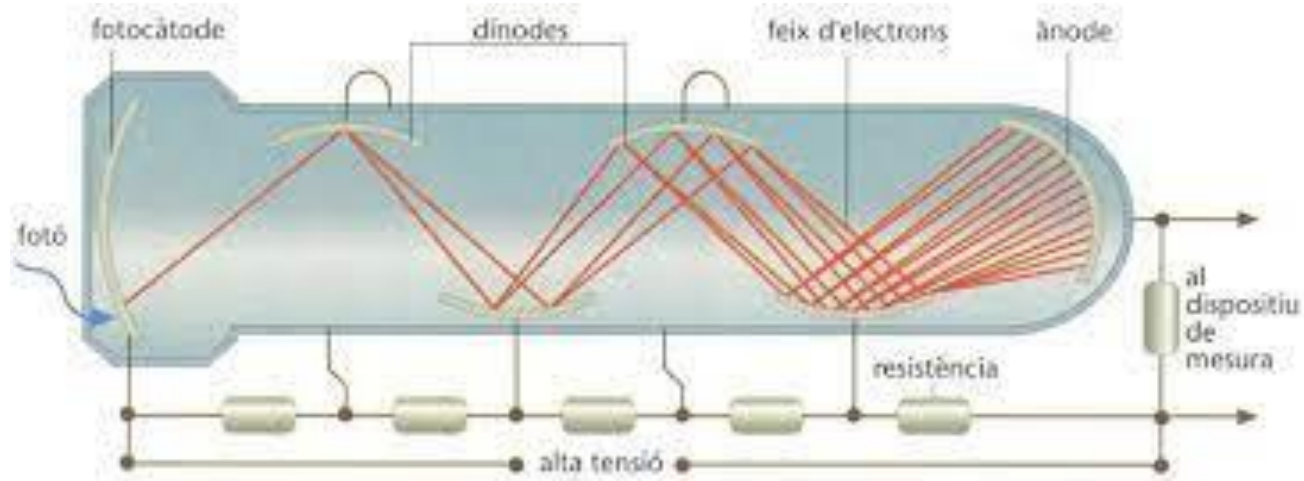
Pols lunar (atmosfera...)

Efecte fotovoltaic

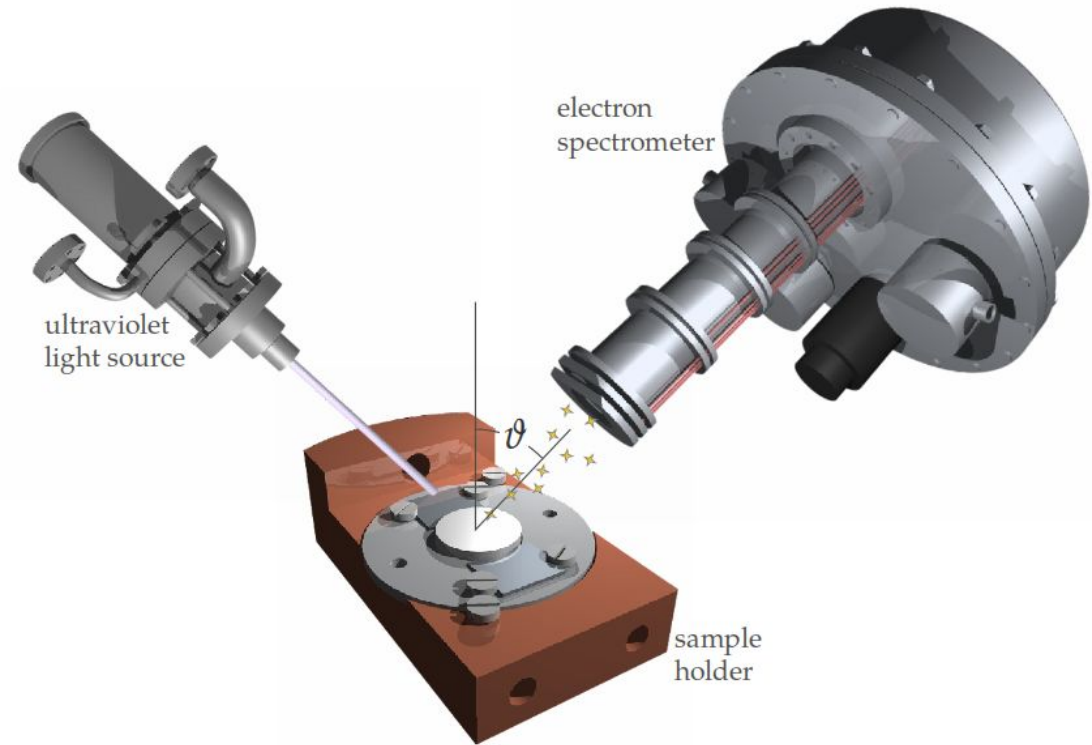
Plaques solars, energia solar



Fotomultiplicador



Espectroscòpia fotoelèctrica



Primàtics de visió nocturna



Aeronau espacial



Pols lunar

Els astronautes de l'Apollo varen trobar pols lunar, molt tòxica.

Partícules del sol lunar carregades electrostàticament, degut a la radiació solar, s'adherixen als vestits espacials i, si s'inhalen, causen irritació als ulls, nas i/o gola.

Plaques solars

Efecte fotovoltaic en semiconductors

Producció d'un corrent elèctric entre dues peces de diferent material que estan en contacte i exposades a la llum



Pregunta

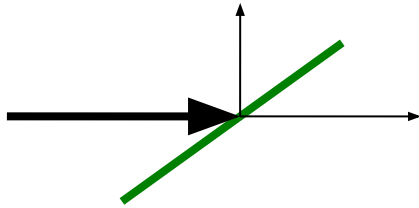
Quan un fenomen amb llum s'explica a través de fotons o a través d'ones ?

Veiem un exemple: Experiment Mach - Zehnder

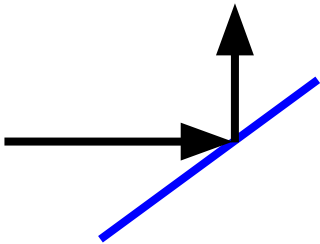
Experiment Mach-Zehnder amb fotons



Fotons

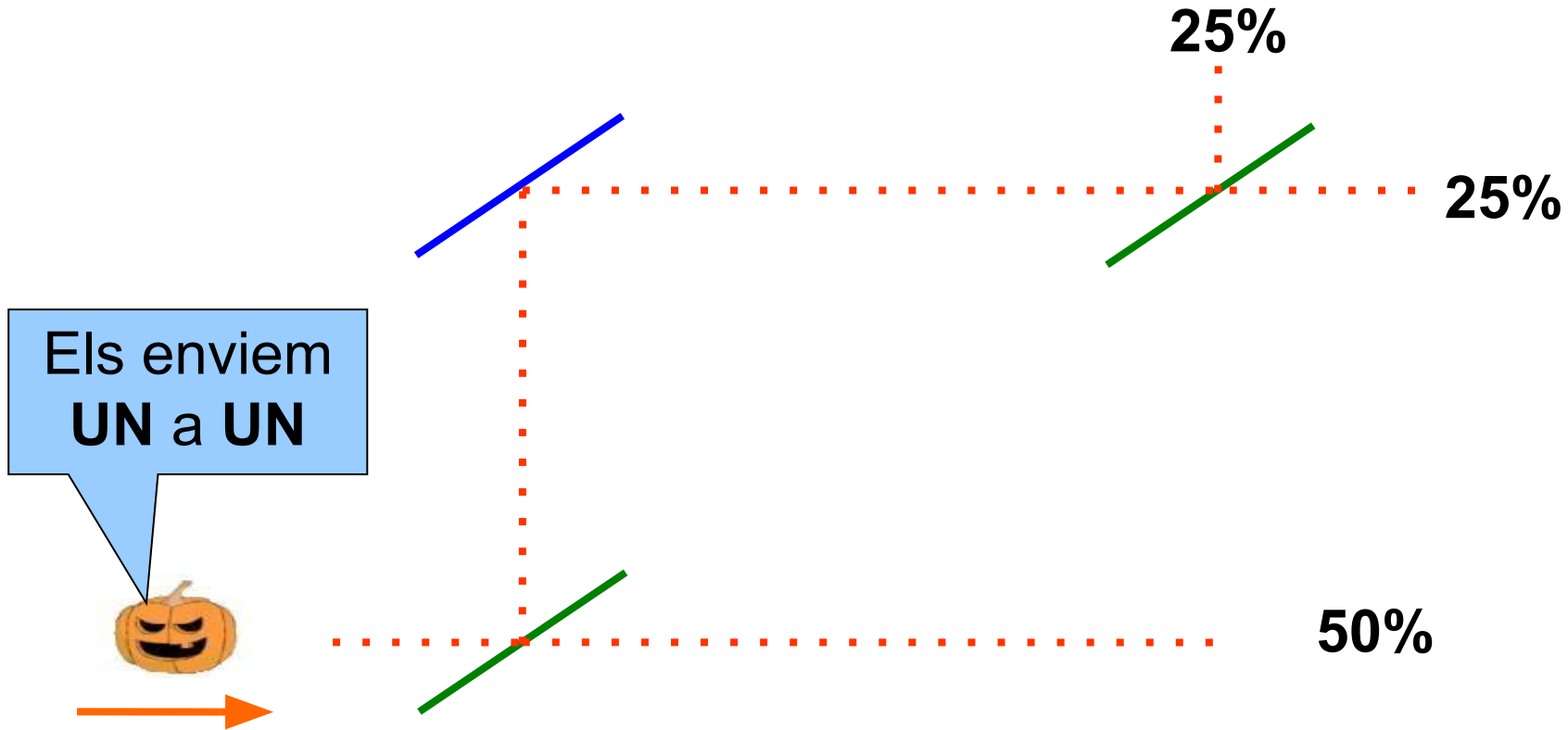


Vidres semitransparents

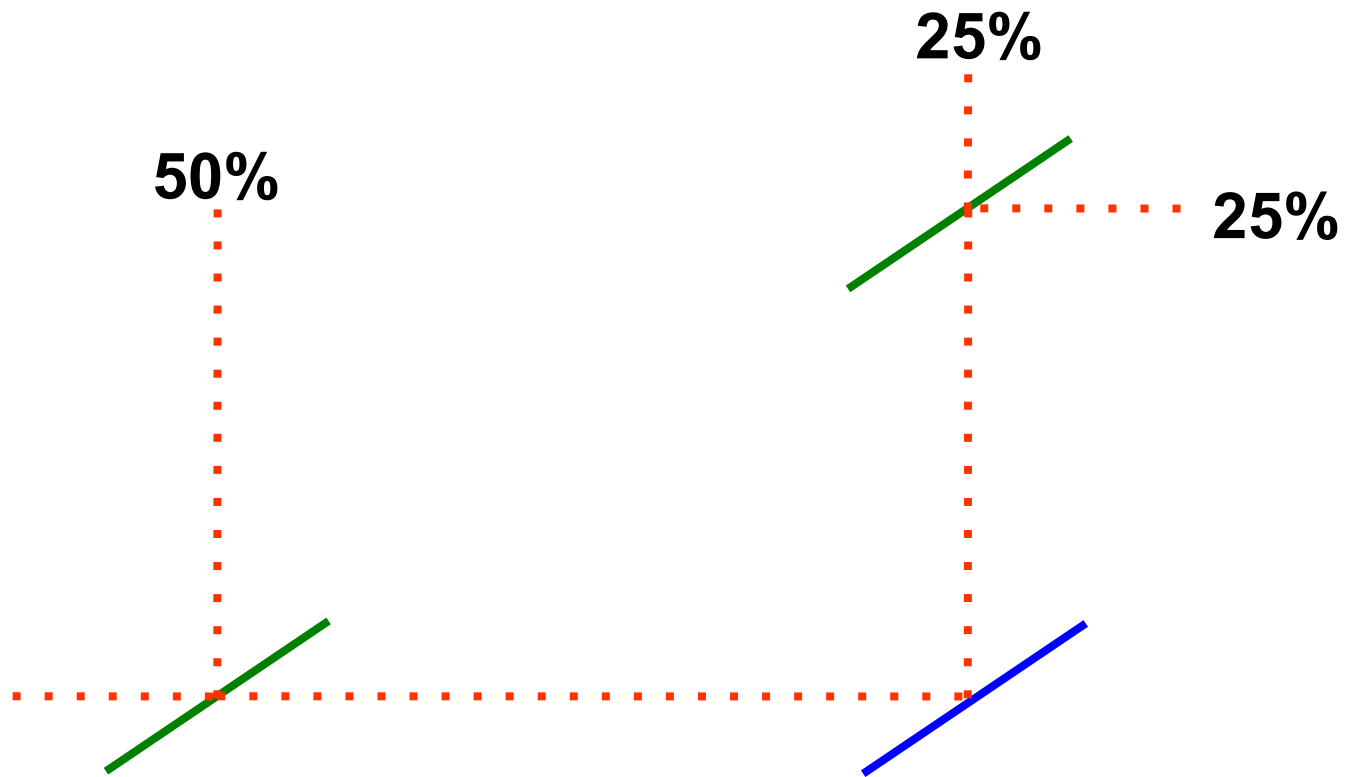


Miralls

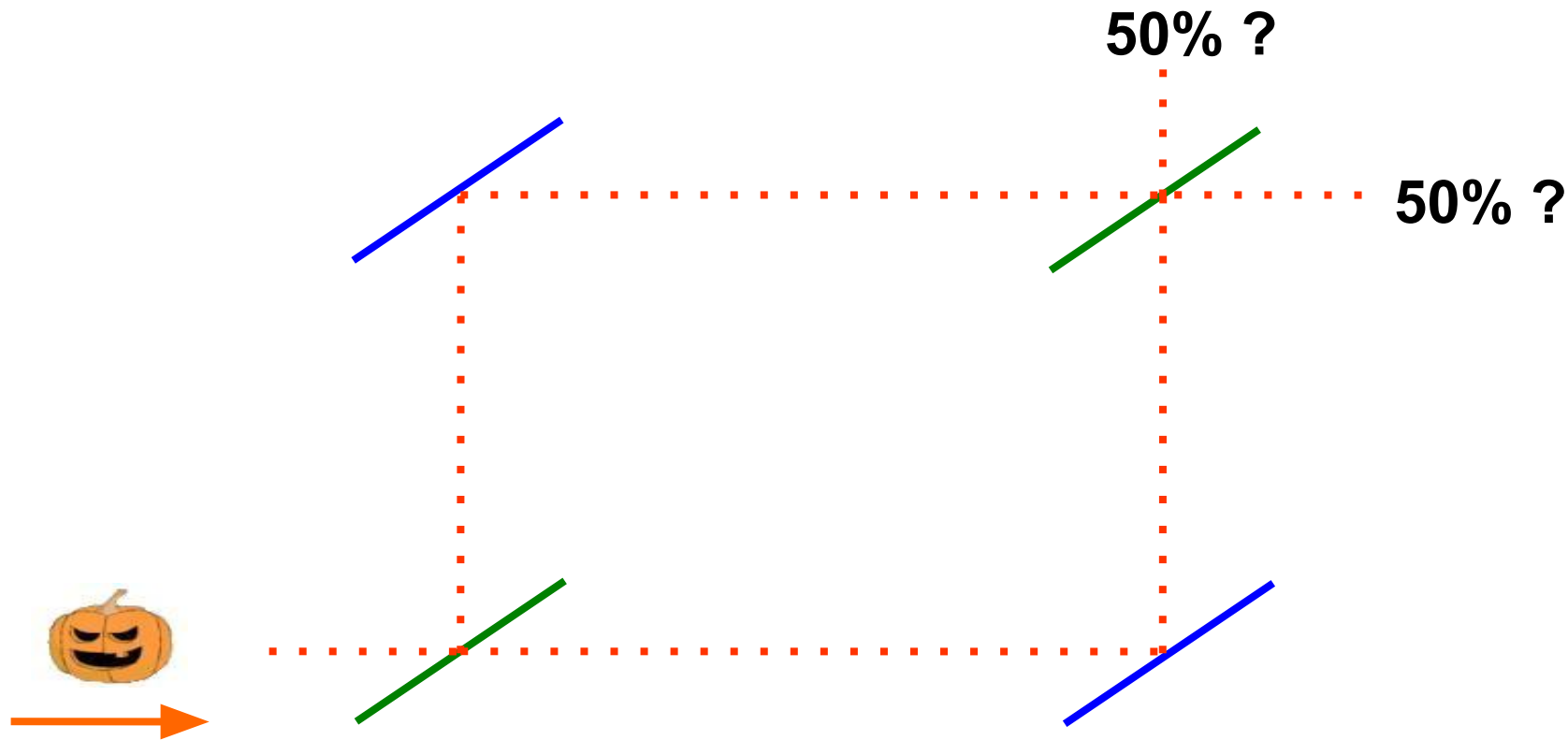
Semblen molt avorrits ...

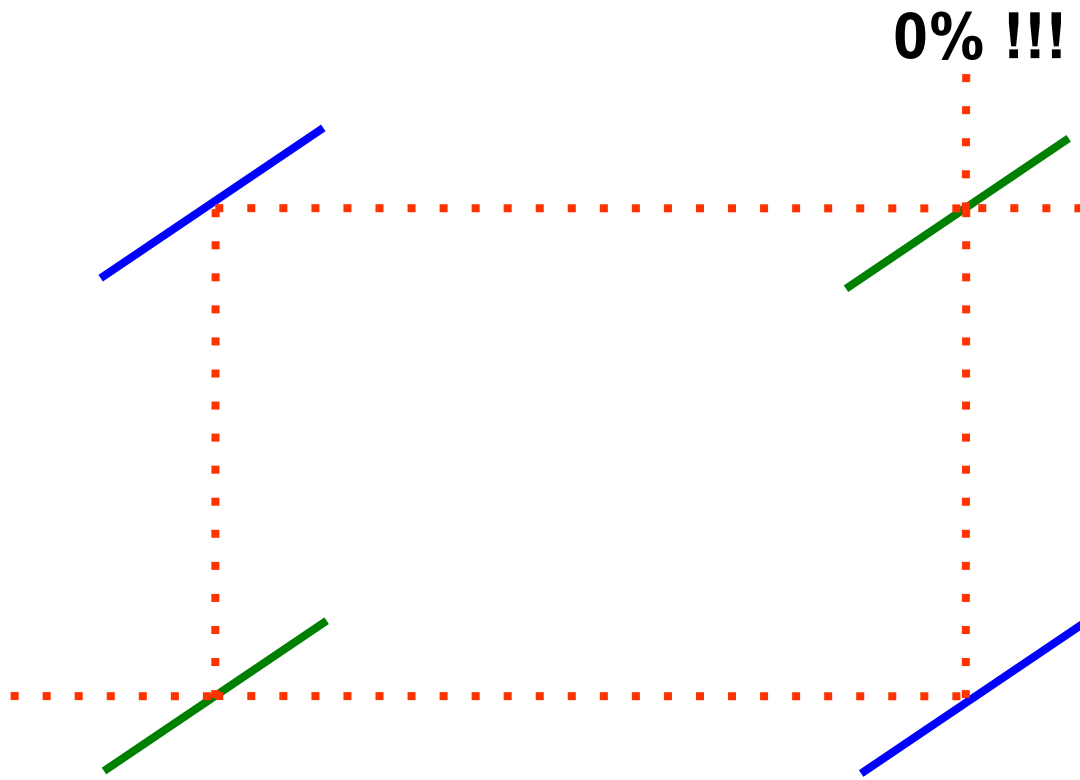


Res de nou ...



Interferòmetre Mach-Zehnder



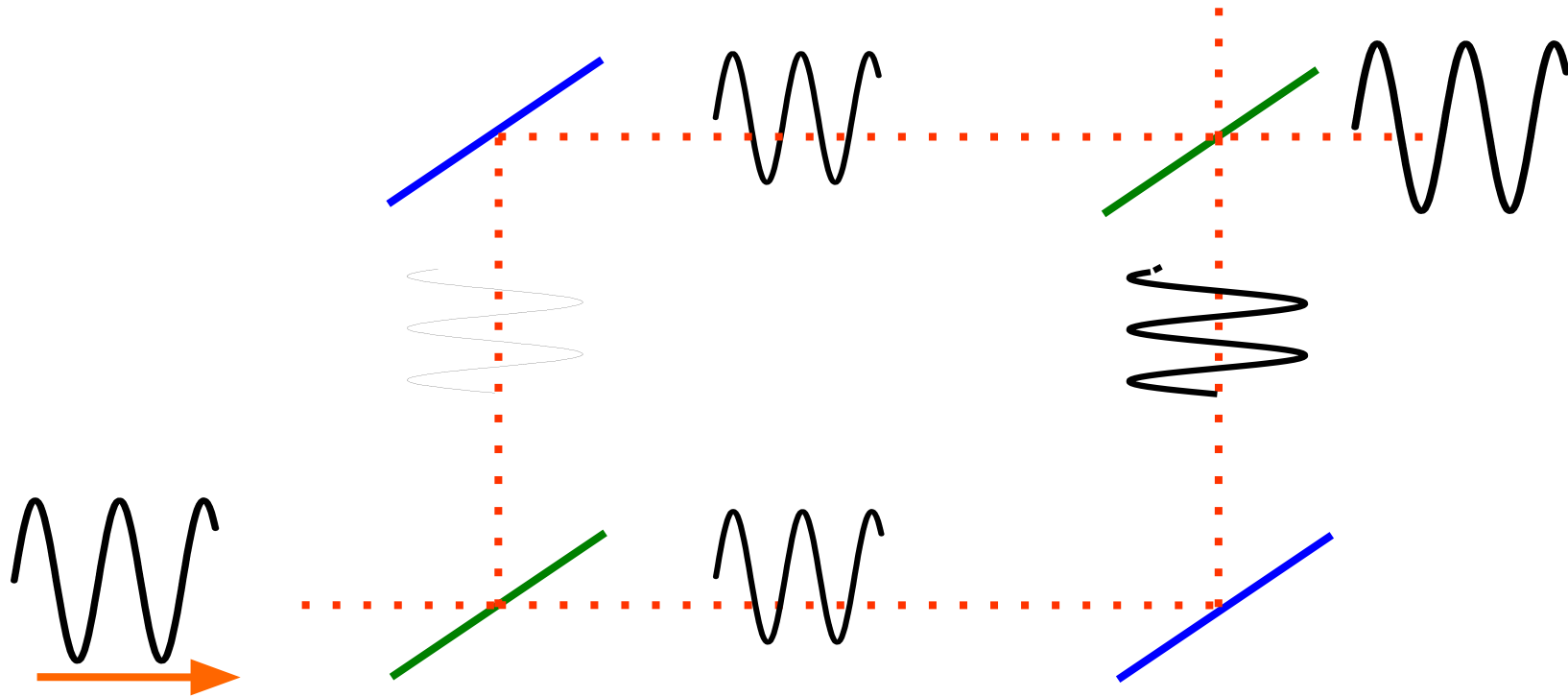


100% !!!

**Tot i que sembla
passar per un
sol camí...**

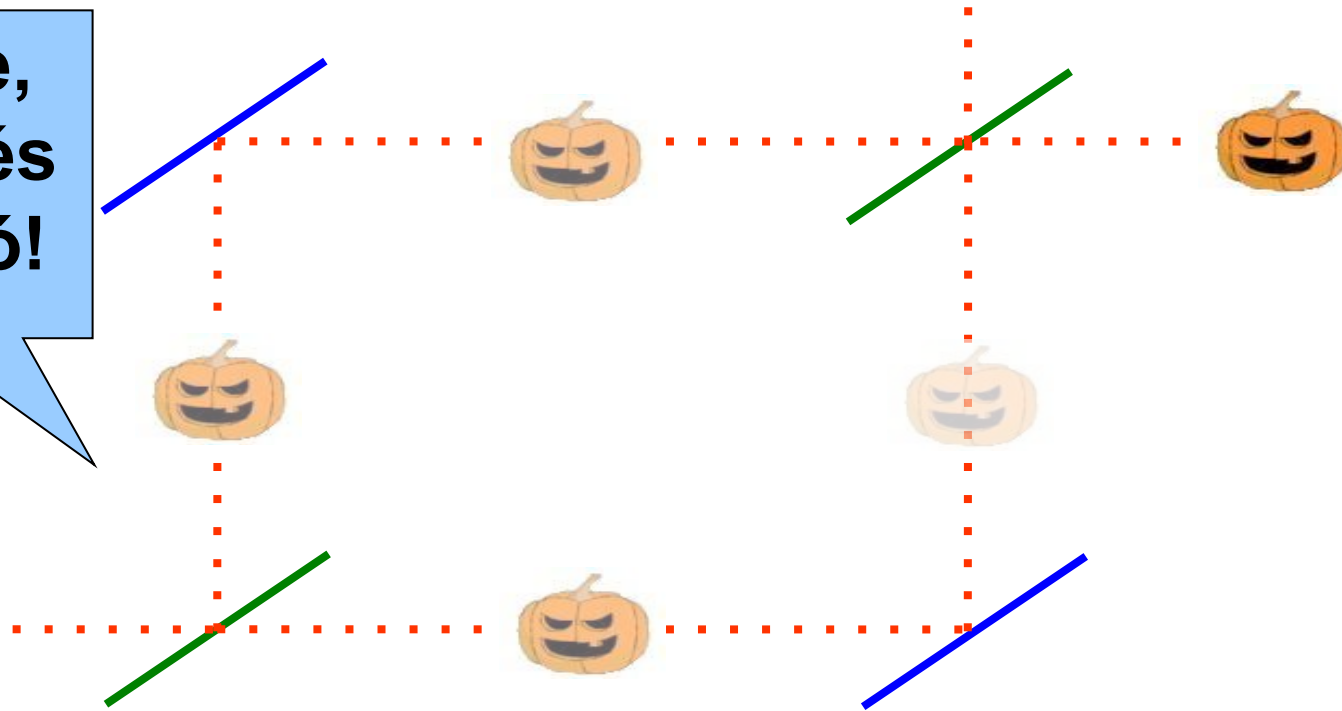
**... també sembla
com si sabés que
hi ha dos camins**

Tot “funciona” si pensem en ones

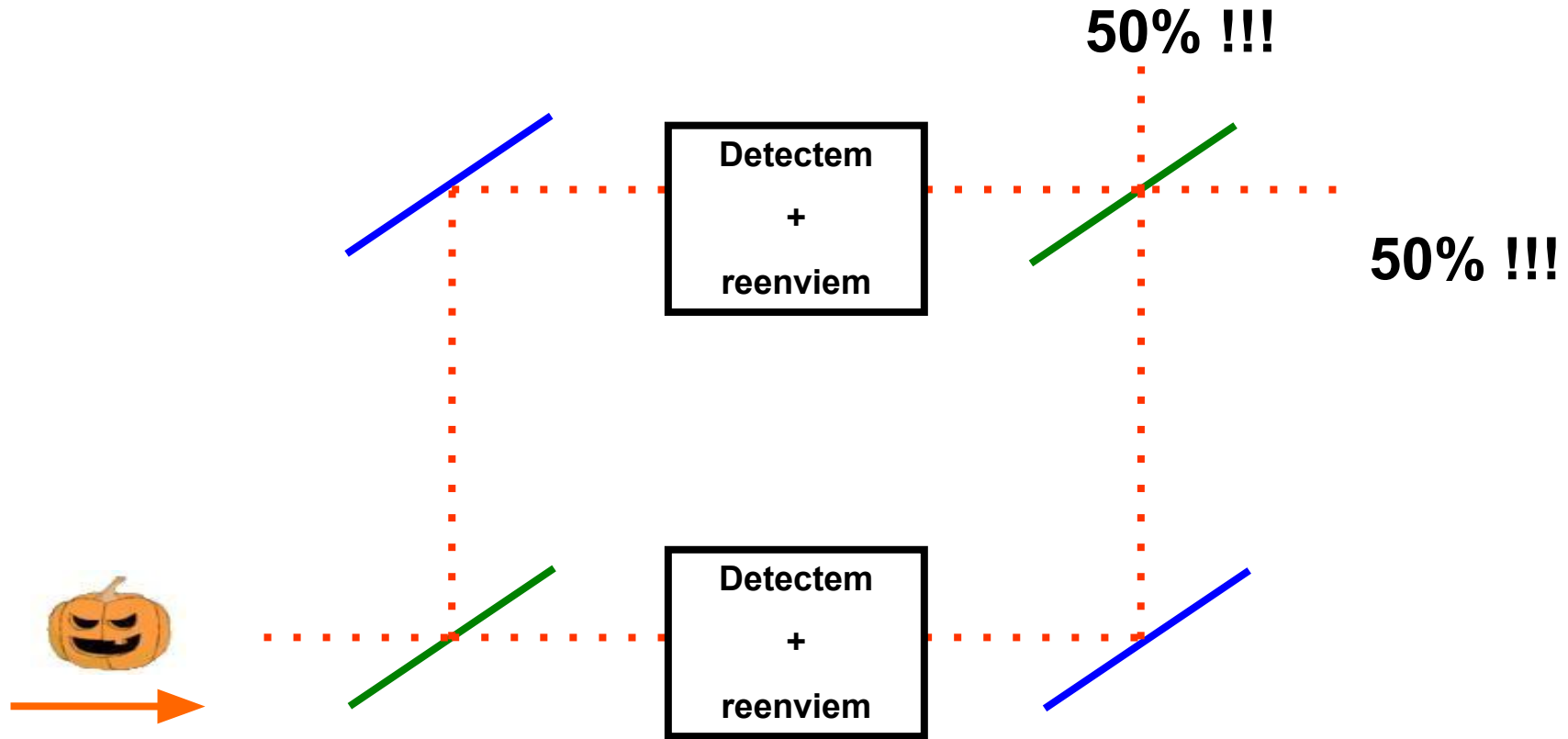


Costa MOLT d'imaginar...

**Compte,
que no és
MIG fotó!**

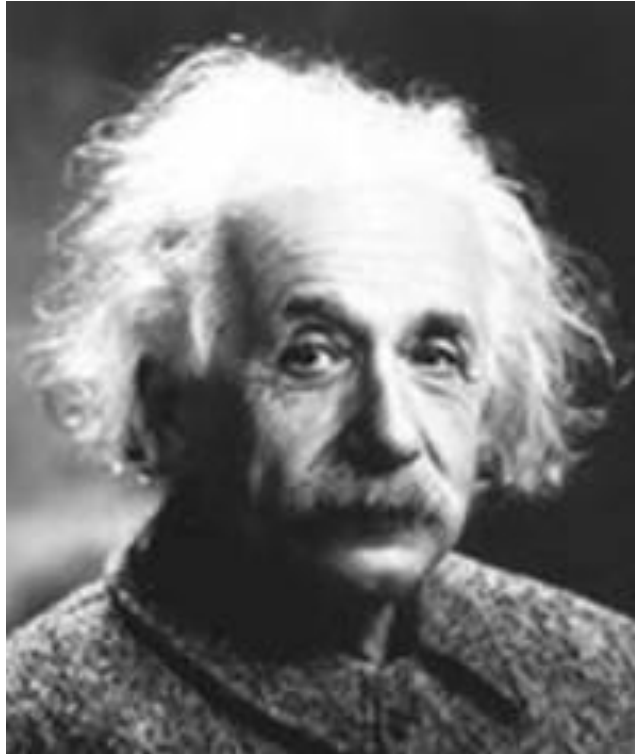


I si els espiem?



“Doble personalitat”

- Quan mirem on és, es comporta com una **PARTÍCULA !**
- Quan no estem mirant, es comporta com una **ONA !**



“Aquests cinquanta anys de cavil·lacions no m’han portat més a prop de respondre la pregunta: què és el quàntum de llum?”

A. Einstein, 1951

I avui?

Einstein va ser premiat el 1922 amb el premi Nobel de Física de 1921 *pels seus serveis a la Física Teòrica i **especialment** per la seva descoberta de la llei de l'efecte fotoelèctric.*

I Millikan va rebre el premi Nobel de 1923 pel *seu treball en la càrrega elemental elèctrica i l'efecte fotoelèctric.*

En la teoria de pertorbacions quàntica, la interacció de sòlids i àtoms amb la radiació Electromagnètica, l'efecte fotoelèctric és tractat i analitzat en termes d'ones electromagnètiques: Les dues visions són equivalents perquè els fotons o absorció d'ones només es poden donar entre nivells d'energia quantitzats, essent la seva diferència d'energia la transportada pel fotó.

Moltes gràcies

Esquema. Idees:

Llum. Repàs històric sobre el concepte de llum

Ones. Breu descripció. Ones mecàniques: Necessitat d'un medi de propagació.
Tipus: Longitudinals (so) i transversals (Ones superfície d'aigua)
Exemple: Propagació aigua i moviment del tap
La intensitat $I = (A_1 + A_2)^2$ amb A_i positiu i o negatiu dona lloc
A INTERFERÈNCIES.

Ones e.m. Descobriment Hertz + equacions de Maxwell
No necessiten medi material
Tap → Càrrega elèctrica. Antena
Interferències: Llum + llum pot donar fosc

Forta evidència que la llum té naturalesa ondulatoria.

Però no tot s'explica. Ovelles negres: Radiació del cos negre

Efecte fotoelèctric. UCE Prada, 22 d'agost 2023

Efecte fotoelèctric

Radiació cos negre. Això no toca. Planck: quantum de llum: $E = h \nu$

Efecte fotoelèctric: No s'explica si la llum són ones:

L'efecte és immediat: Gronxador, no ho és!

Einstein li compra. DIFÍCIL ANAR EN CONTRA DE GAIREBÉ TOT
I DE GAIREBÉ TOTHOM

L'explicació: Tampoc costa tant d'entendre en termes de partícules de llum!

Quan la llum es comporta com a partícula i quan com a ona?

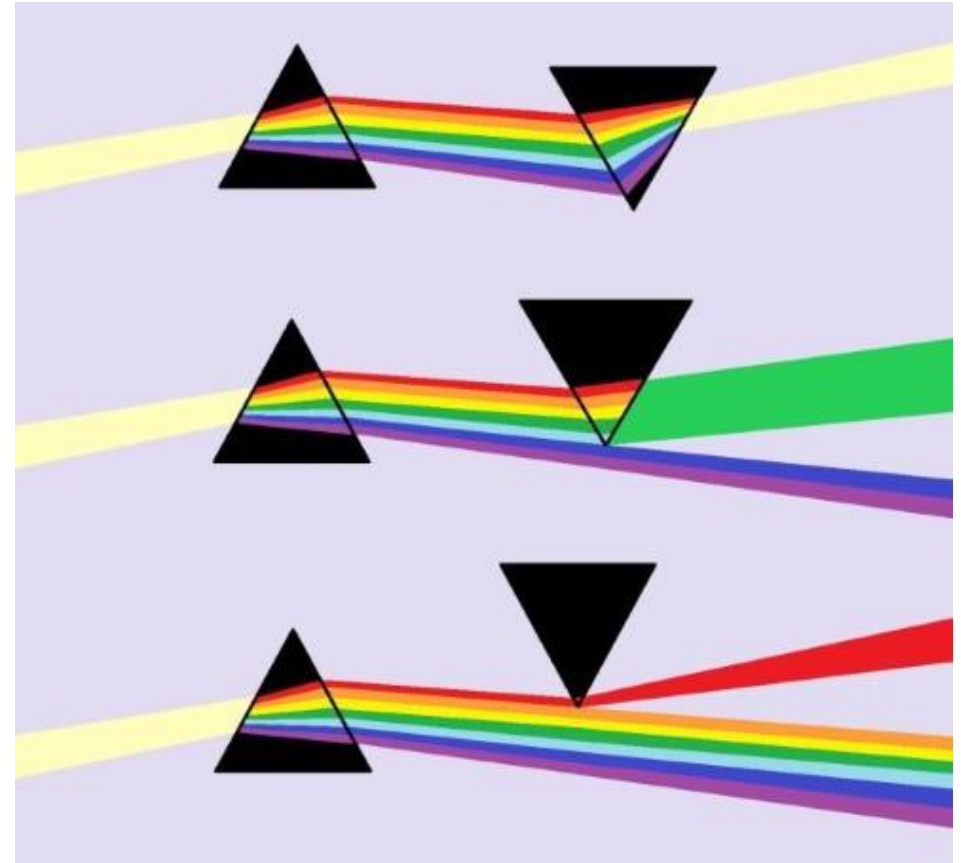
Només la llum té comportament dual?

Hipòtesi de de Broglie. Concepte dualitat ona-partícula. Quàntica.

Tothom al microcosmos és dual: Fulerè,...

APLICACIONS EFECTE FOTOELÈCTRIC (i cosins: Ef. Fotovoltaic): Panels solars,
cèl·lules fotoelèctriques, sensors, naus espacials adquireixen càrrega,... i buscar més!)

Experiment crucial de Newton



In 1916,

Robert Millikan painstakingly accumulated experimental data with which he hoped to disprove Einstein's theory, but instead he found Einstein's law beautifully confirmed.

with the reception of Arthur Compton's 1923 experiments showing X-rays acting as particles with momentum,

Einstein's notion of light-quanta and theory of the photoelectric effect received widespread acceptance.[46]

Arrhenius's presentation is especially problematic. He presented

a misleading narrative.[54] He explained the omission of relativity as it "... pertains essentially to epistemology and has therefore been the subject of lively debate in philosophical circles. It

will be no secret that the famous philosopher [Henri] Bergson in Paris has challenged this theory, while other philosophers have

acclaimed it wholeheartedly." The message here being that relativity belongs to philosophy and not physics.

Einstein was awarded the 1921 Nobel Prize in Physics for "his discovery of the law of the photoelectric effect", and Millikan was awarded the Nobel Prize in 1923 for "his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect"

In quantum perturbation theory of atoms and solids acted upon by electromagnetic radiation, the photoelectric effect is still commonly analyzed in terms of waves; the two approaches are equivalent because photon or wave absorption can only happen between quantized energy levels whose energy difference is that of the energy of photon.

Wikipedia

El fotó

Quantum:

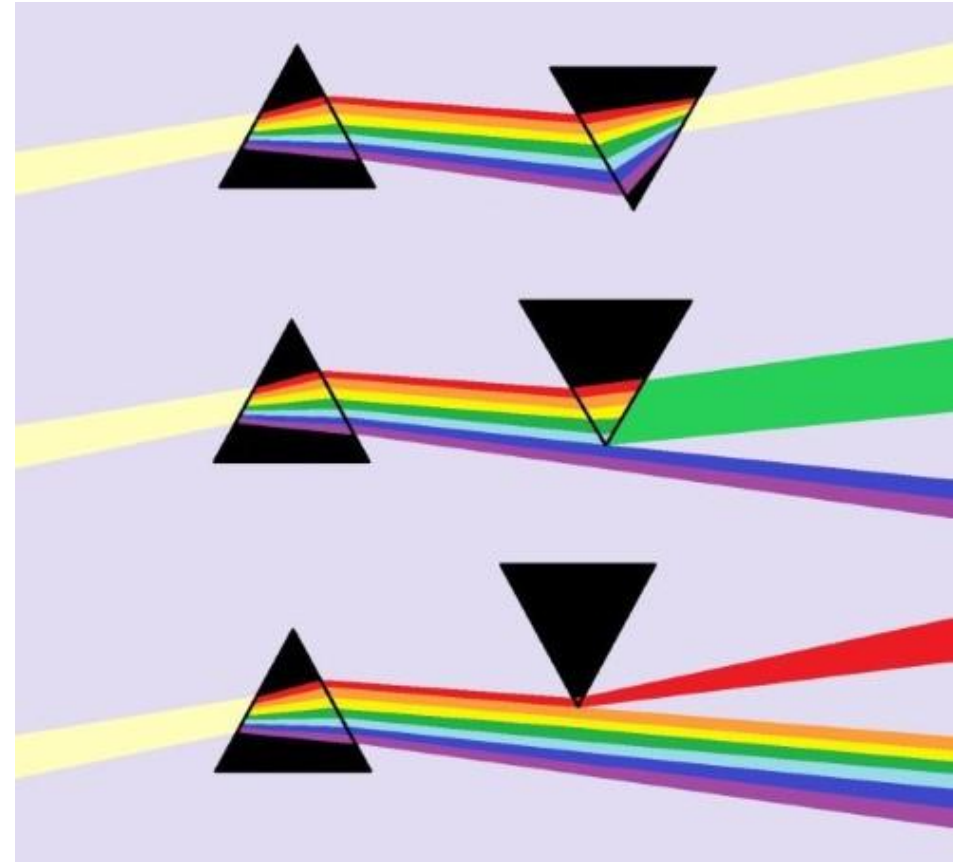
partícula proposada per Max Planck el 1900 per descriure la radiació del cos negre

Paquet mínim d'energia lluminosa, amb $E = h \nu$ $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$
J.s

Quantum de llum... usat per Einstein per explicar l'efecte fotoelèctric

Fotó El 1926 el físic òptic Frithiof Wolfers i el químic Gilbert N. Lewis varen popularitzar el terme «fotó»

Experiment crucial de Newton



Experiment crucial de Newton

