

***TEMA 9.***  
***FÍSICA MODERNA***  
***o***  
***FÍSICA QUÀNTICA***



## ***ÍNDEX***

---

- 9.1. Síntesi electromagnètica (Equacions de Maxwell)
- 9.2. Ones electromagnètiques (la llum és una ona electromagnètica)
- 9.3. Fenòmens de les ones electromagnètiques (repàs Tema 5)

### ***INTRODUCCIÓ A LA FÍSICA QUÀNTICA***

- 9.4. Limitacions de la física clàssica: efecte fotoelèctric i espectres atòmics
- 9.5. La teoria quàntica. Hipòtesi de Planck.
- 9.6. Explicació d' Einstein per l'efecte fotoelèctric
- 9.7. Hipotèsi de Broglie
- 9.8. Principi d'indeterminació de Heisenberg

### ***INTRODUCCIÓ A LA FÍSICA RELATIVISTA***

- 9.9. Teoria de la relativitat (molt breu)

## 9.1. Síntesi electromagnètica (Equacions de Maxwell)

Ja hem estudiat que un camp magnètic variable indueix un corrent elèctric i que un corrent elèctric genera un camp magnètic.

Totes les lleis que hem estudiat en el [Tema 7. Camp elèctric](#) i [Tema 8. Camp magnètic](#), a l'any 1860 el físic Maxwell les va unificar en 4 equacions anomenades EQUACIONS DE MAXWELL.

**L'OBJECTIU NO ES SABER-SE-LES PER AIXÒ NI LES ENSENYO, SINÓ SABER QUE LES LLEIS DEL CAMP ELECTROMAGNÈTIC ES TROBEN RECOLLIDES EN LES QUATRE EQUACIONS DE MAXWELL.**

### EQUACIONS DE MAXWELL

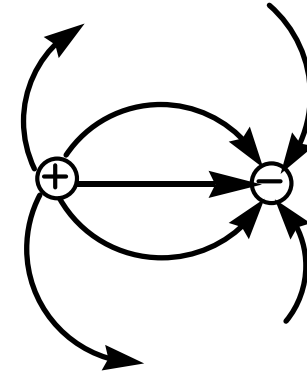
- Relacionen el  $\vec{B}$  i el  $\vec{I}$
- Constitueixen les bases de l'electromagnetisme de la física clàssica.
- Maxwell a partir de les seves equacions va predir l'existència d'ones electromagnètiques (no necessiten cap medi per propagar-se) i que la LLUM ERA UNA ONA ELECTROMAGNÈTICA.

### 1ª Equació de Maxwell.

Les línies de camp elèctric sempre neixen a la càrrega positiva i moren a la càrrega negativa.

### 2ª Equació de Maxwell.

Les línies de camp magnètic són sempre tancades sobre si mateixes.



### 3ª Equació de Maxwell.

Un camp magnètic variable  $\vec{B}(t)$  és font d'un camp elèctric variable  $\vec{E}(t)$

### 4ª Equació de Maxwell.

Un camp elèctric variable  $\vec{E}(t)$  és font d'un camp magnètic variable  $\vec{B}(t)$

## 9.2. Ones electromagnètiques

D3

Maxwell va postular els camps magnètics variables i els camps elèctrics variables es propaguen en l'espai en forma d'una ona o radiació electromagnètica, a una velocitat donada per:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4 \pi 10^{-7} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{Aquesta velocitat és justament la velocitat de la llum al buit})$$

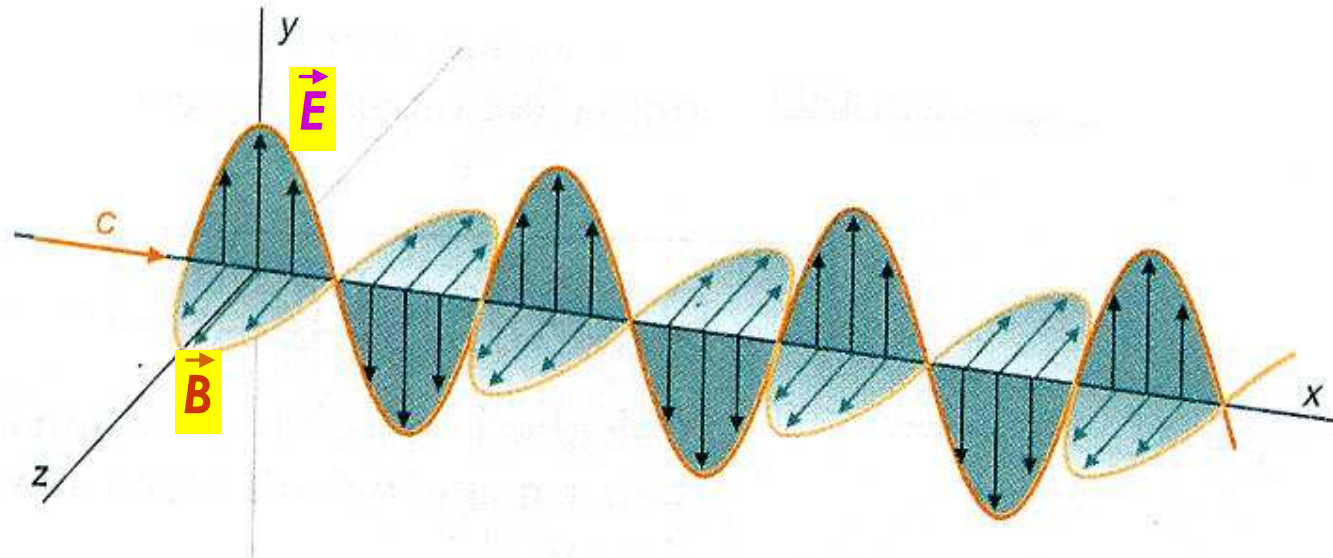
permeabilitat magnètica      permitivitat elèctrica del medi

Així al 1865 Maxwell va suggerir que la llum era una ona electromagnètica.

(aquesta predicció va ser confirmada més tard pel físic alemany Hertz, que va demostrar experimentalment que circuits oscil·lants emetien ones electromagnètiques)

Les ones electromagnètiques són ones transversals (la direcció de propagació és perpendicular a la direcció de la pertorbació o oscil·lació).

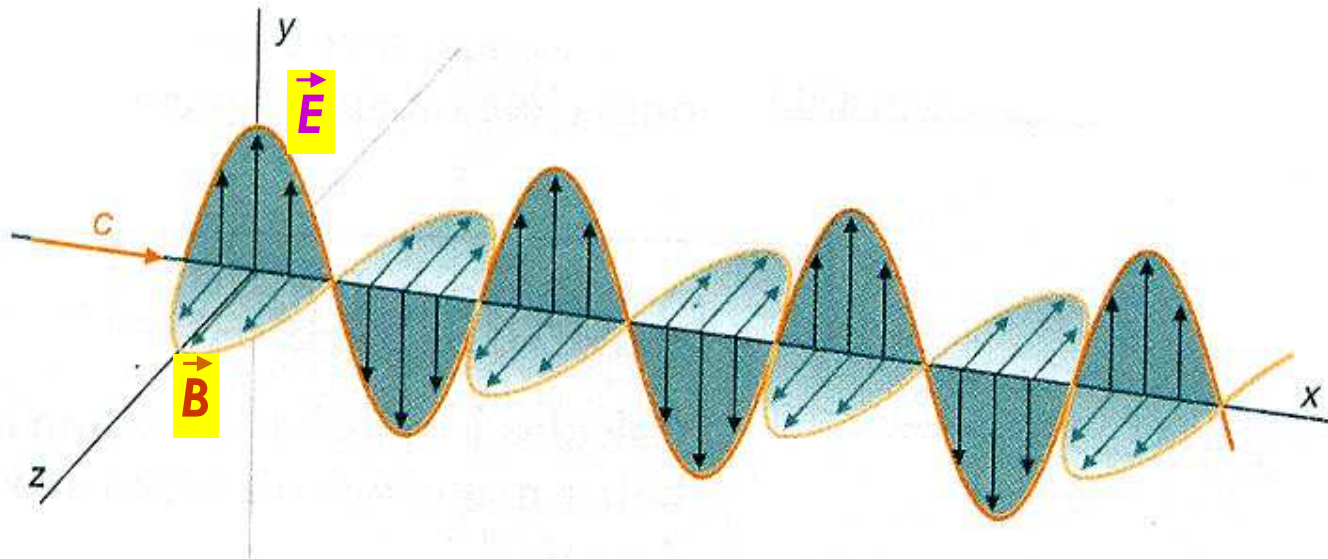
**El camp elèctric oscil·la en la direcció y, el camp magnètic oscil·la en la direcció z i l'ona avança en la direcció x, a la velocitat de  $3 \cdot 10^8$  m/s en el buit.**



Equació d'ona  $f(x,t) \longrightarrow \vec{E}(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx) \hat{j} \text{ o } y$   
 $\longrightarrow \vec{B}(x,t) = B_0 \sin(\omega t - kx) \hat{k} \text{ o } z$

En les ones electromagnètiques el camp elèctric i el camp magnètic són sempre perpendiculars entre ells i perpendiculars a la direcció de propagació de l'ona.

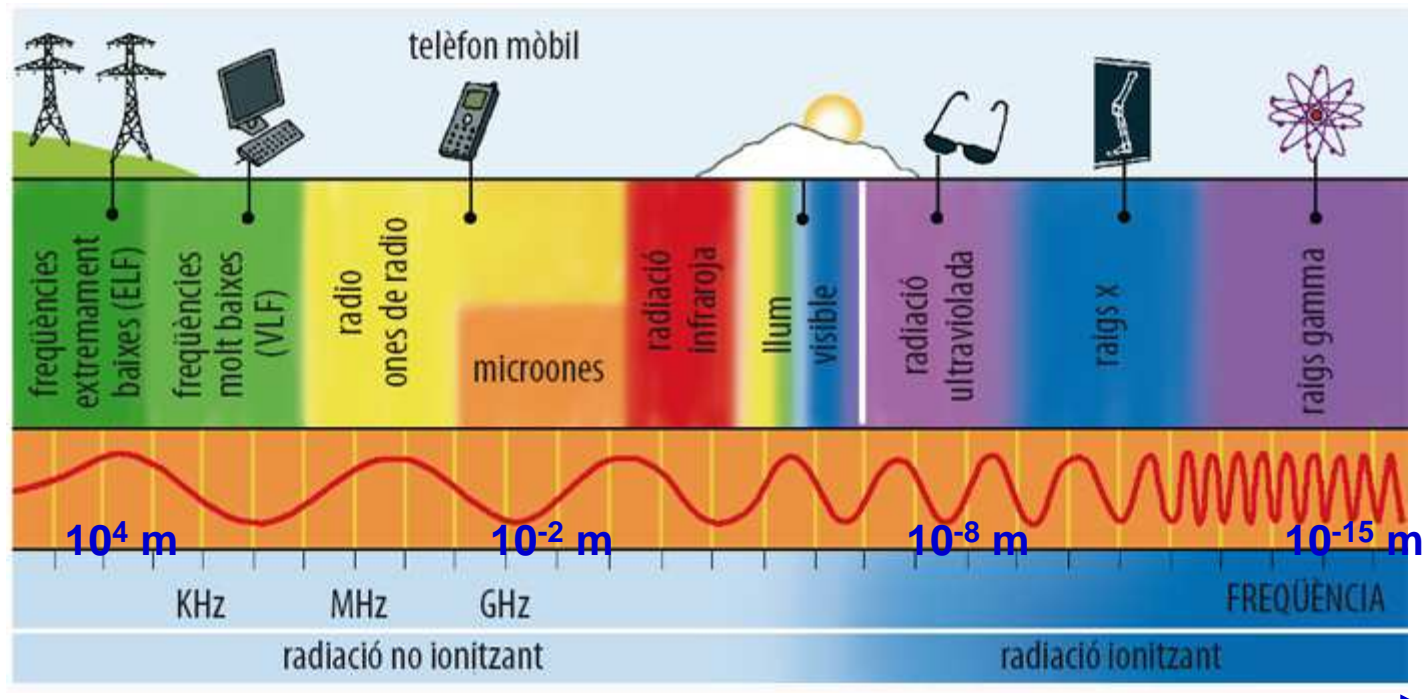
Recordeu que el so és una ona mecànica, si el so es propaga per l'aire, el que vibra són les molècules que formen l'aire; en canvi en una ona electromagnètica la pertorbació és la vibració d'un camp magnètic i un camp elèctric.



Totes les ones electromagnètiques es propaguen en l'aire (o en el buit) a la mateixa velocitat  $3 \cdot 10^8$  m/s, però cada classe de radiació té la seva freqüència i longitud d'ona.

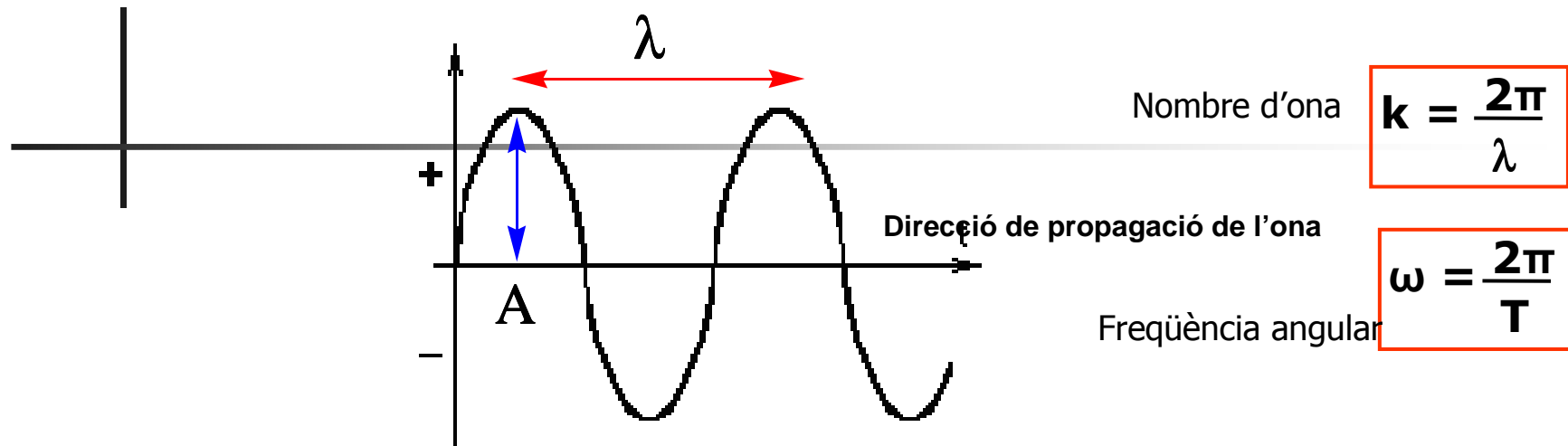
Com a ones electromagnètiques no només tenim la **llum visible** (llum blanca composta per llums de diversos colors, l'arc de Sant Martí), sinó que existeixen altres radiacions o ones electromagnètiques no visibles a l'ull humà, com la **radiació infraroja** o la radiació **ultraviolada**.

El conjunt de totes les radiacions electromagnètiques rep el nom d'espectre electromagnètic.



En aquest sentit, la freqüència augmenta, però la longitud d'ona disminueix





**T (Període):** El temps que triga l'ona a recórrer una distància equivalent a la seva longitud d'ona ( $\lambda$ ), és a dir, a fer una oscil·lació completa. La seva unitat en el SI és s (segon).

**f (Freqüència):** representa el nombre d'oscil·lacions completes que fa l'ona en un segon. La seva unitat en el SI  $s^{-1} = \text{Hz}$  (Hertz)

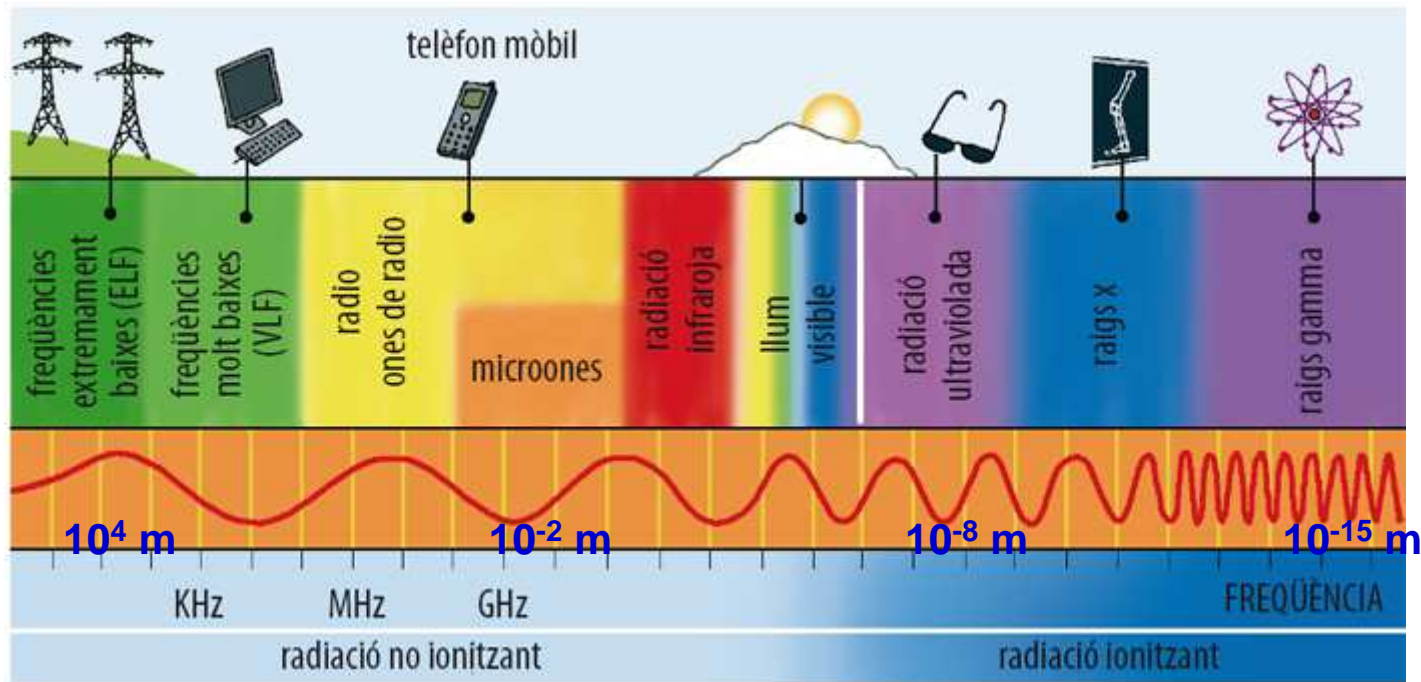
$$f = \frac{1}{T}$$

$$V \text{ (velocitat)} = \frac{e}{t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

$$v = \lambda \cdot f$$

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

La freqüència i la longitud d'ona són inversament proporcionals.



En aquest sentit, la freqüència augmenta, però la longitud d'ona disminueix

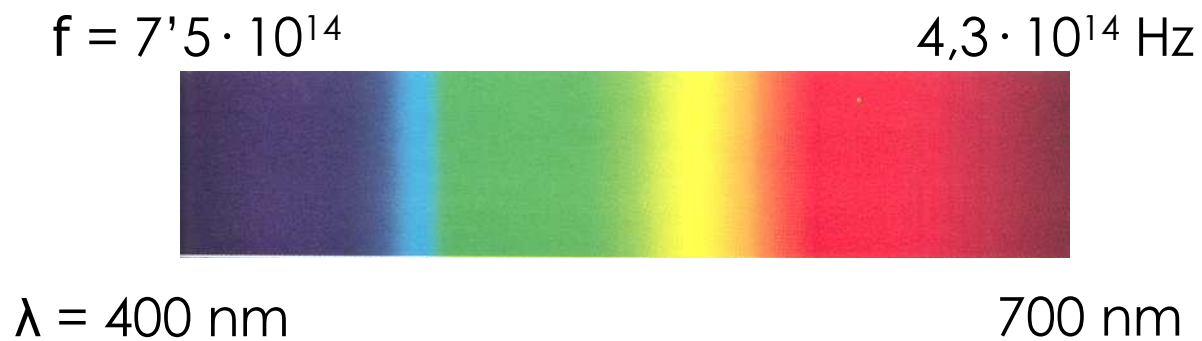
## Ones electromagnètiques. Espectre electromagnètic.

### L'espectre electromagnètic

- Raigs gamma  $f \approx 10^{19}, 10^{20} \dots \text{ Hz}$   
 $\lambda \approx 10^{-11}, 10^{-12} \dots \text{ m}$
- Raigs X  $f \approx [10^{16} \rightarrow 10^{20}] \text{ Hz}$   
 $\lambda \approx [10^8 \rightarrow 10^{-12}] \text{ m}$
- Radiació UV  $f \approx 10^{16}, 10^{17} \text{ Hz}$   
 $\lambda \approx 10^{-7}, 10^{-8} \text{ m}$
- Radiació visible  $10^{14} > f > 10^{15} \text{ Hz}$   
 $\lambda \approx 10^{-6} \text{ m}$

- Radiació Infrarroja  $f \approx 10^{13}, 10^{14}$  Hz  
 $\lambda \approx 10^{-4}, 10^{-5}$  m
- Microones  $f \approx 10^{11}, 10^{12}$  Hz  
 $\lambda \approx 10^{-2}, 10^{-3}$  m
- TV i radio FM  $f \approx 10^8$  Hz  
 $1 \leq \lambda \leq 10$  m
- Ones de radio AM  $10^7 > f > 10^6$  Hz  
 $\lambda \approx 10^2$  m
- Ones de radio llargues  $f \approx 10^5, 10^4 \dots$  Hz  
 $\lambda \approx 10^3, 10^4 \dots$  m

## Ondas electromagnétiques “visibles”.



Espectre continu

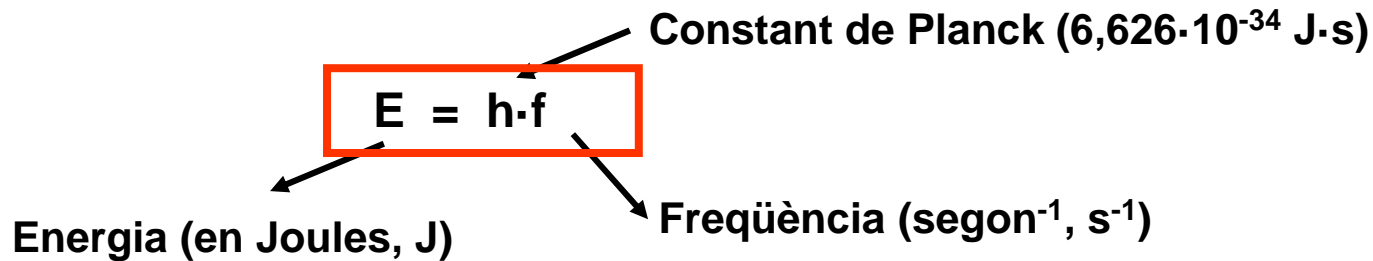
Recordou 1 nm =  $10^{-9}$  m

### 9.3. Fenòmens ondulatoris de les ones electromagnètiques

Newton considerà la llum com una partícula, però hi havia una sèrie de fenòmens ondulatoris com la difracció de la llum que no es podia explicar si la llum fos una partícula, i es va proposar que la llum era una ona.

Avui dia es considera que la llum té un doble un comportament (partícula-ona o corpuscle-ona o fotó-ona), que vol dir que hi ha fenòmens que són fàcils d'explicar si considerem la llum com una partícula i altres fenòmens que són més fàcils d'explicar si considerem la llum com una ona.

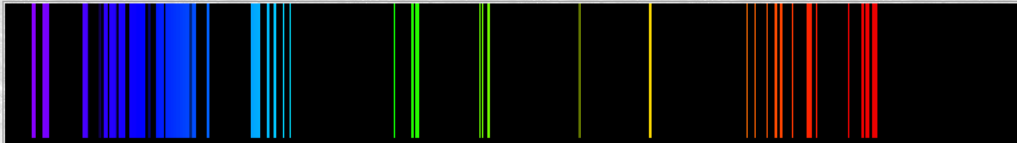
És important recordar que si la llum és considerada com una partícula anomenada fotó, l'energia que transporta quan viatja és, proporcional a la freqüència:



**Exercici 1.** Calculeu l'energia d'un fotó de llum visible corresponent a la ratlla groga de l'espectre d'emissió del sodi de longitud d'ona,  $\lambda = 589 \text{ nm}$ .

Velocitat de la llum en el buit (m/s)

$f = \frac{v}{\lambda}$



(  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$  )

**589 nm**

$$f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{589 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$
$$E = h \cdot f = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 5,1 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1};$$

**$E = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J}$**

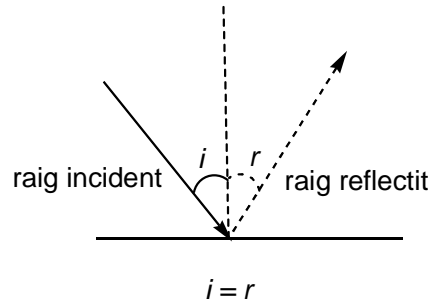
Fenòmens ondulatoris explicats segons un comportament de la llum com a partícula, fotó o corpuscle:

- Reflexió de la llum
- Refracció de la llum. Angle límit

Fenòmens ondulatoris explicats segons un comportament ondulatori de la llum:

- Difracció de la llum
- Polarització de la llum

**REFLEXIÓ DE LA LLUM**

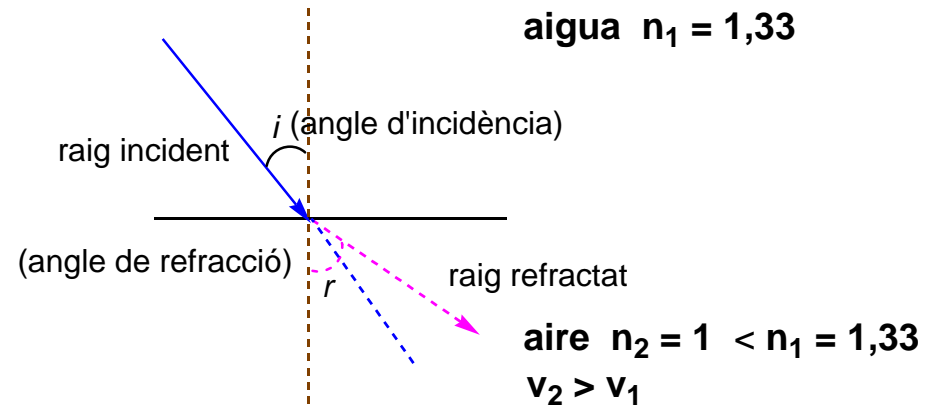
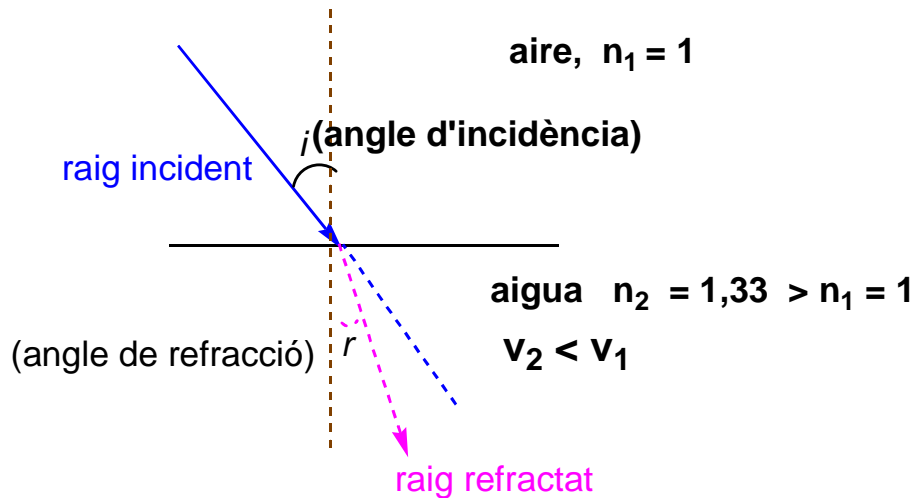


L'ona incident i l'ona reflectida tenen la mateixa freqüència (f), longitud d'ona ( $\lambda$ ) i velocitat de propagació (v).

$$v = \lambda \cdot f$$

**REFRACCIÓ DE LA LLUM**

$n$  (índex de refracció) =  $\frac{c}{v}$      $n$  (aire) = 1;    $n$  (aigua) = 1,33;    $n$ (vidre) = 1,54



**Llei de Snell**  $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

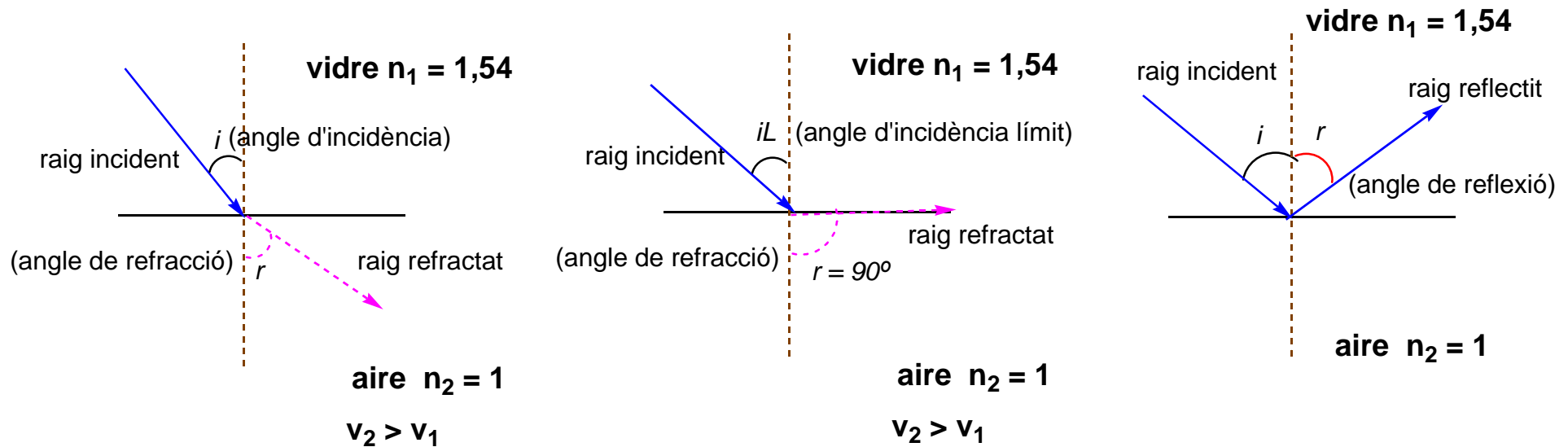
L'ona incident i l'ona refractada tenen la mateixa freqüència (f), però diferent longitud d'ona ( $\lambda$ ) i per tant diferent velocitat de propagació (v).



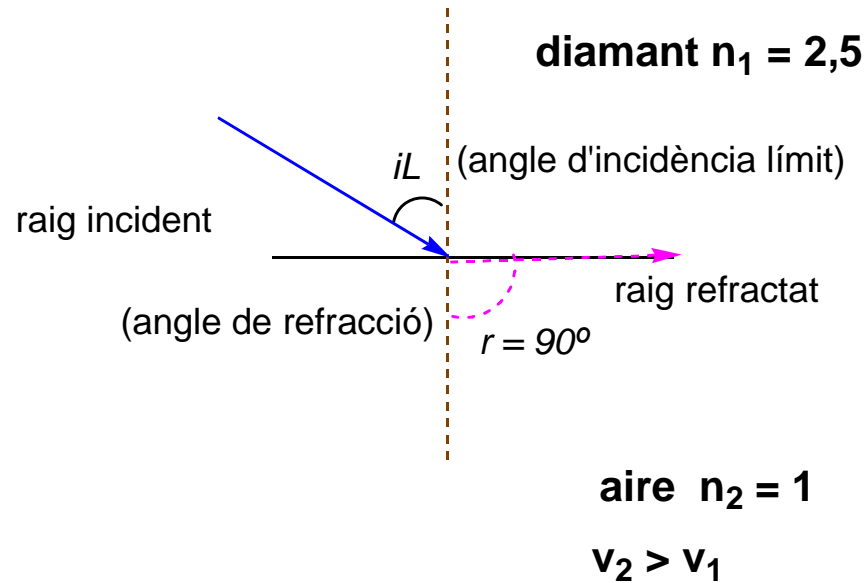
## REFRACCIÓ DE LA LLUM. Angle límit

Hi ha un angle d'incidència anomenat ANGLE LÍMIT pel qual l'angle de refracció és precisament  $90^\circ$ , per angles d'incidència més grans que aquest valor, el raig refractat desapareix i només es dona angle reflectit. L'angle límit el representem per

$$\alpha_{iL}$$



**Exercici 1.** L'índex de refracció del diamant és 2,5. Quin és l'angle límit de la llum que passa del diamant a l'aire?

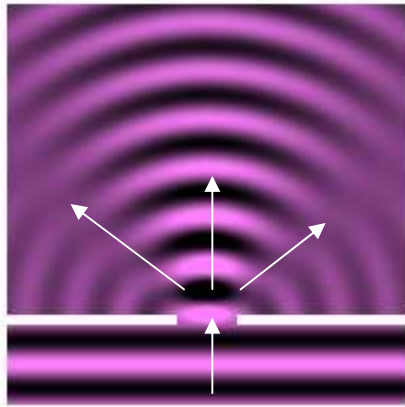


**Llei de Snell**  $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

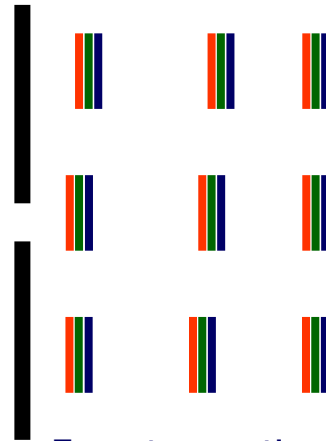
$$2,5 \sin \alpha_{iL} = 1 \sin 90^\circ$$

$$\alpha_{iL} = \arcsin \frac{1}{2,5} = 23,58^\circ$$

**DIFRACCIÓ DE LA LLUM**

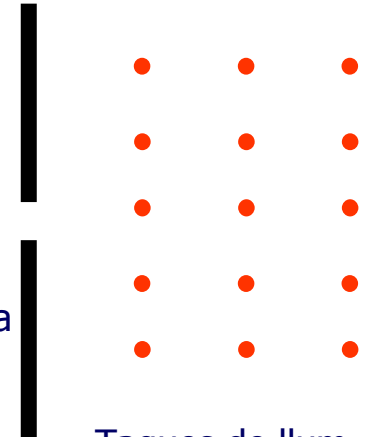


Raig de llum blanca



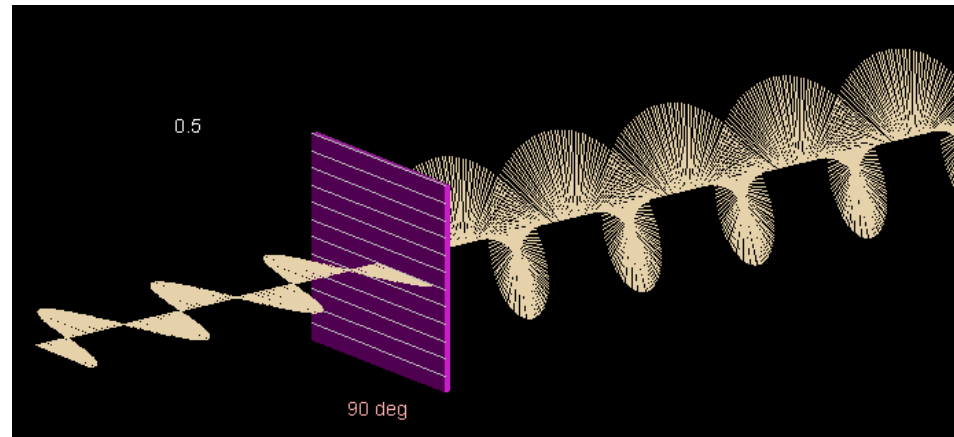
Espectre continu de la llum: difracció + dispersió

Raig de llum monocromàtica vermella  
 $\lambda = 630 \text{ nm}$



Taques de llum vermella separades de zones de fosc.

**POLARITZACIÓ LA LLUM**  
(si la pertorbació oscil·la en varies direccions, momés deixem passar una direcció d'oscil·lació, polarització lineal)



***Introducció a la  
física quàntica***

## **9.4. Limitacions de la física clàssica**

**D19**

### **1<sup>a</sup> limitació**

- Explicar els espectres discontinus dels àtoms

### **2<sup>a</sup> limitació**

- Explicar l'efecte fotoelèctric

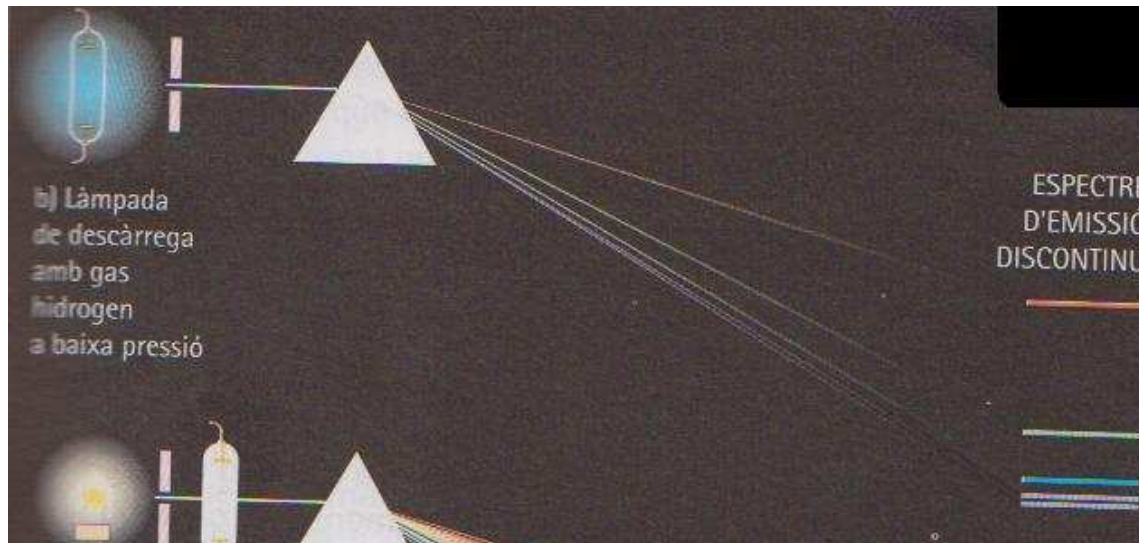
## Espectres discontinus dels àtoms

D20



Espectre continu de la llum

Podem aconseguir el mateix efecte, si fem passar la llum per una xarxa de difracció



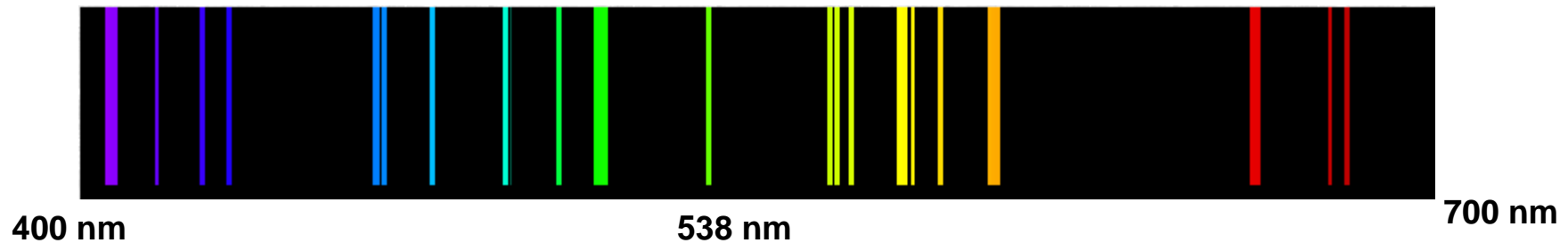
**Espectre discontinu  
d'emissió de l'hidrogen**

La física clàssica no podia explicar perquè cada element de la TP, té el seu espectre discontinu (ratlles de colors sobre fons negre), diferents dels altres.

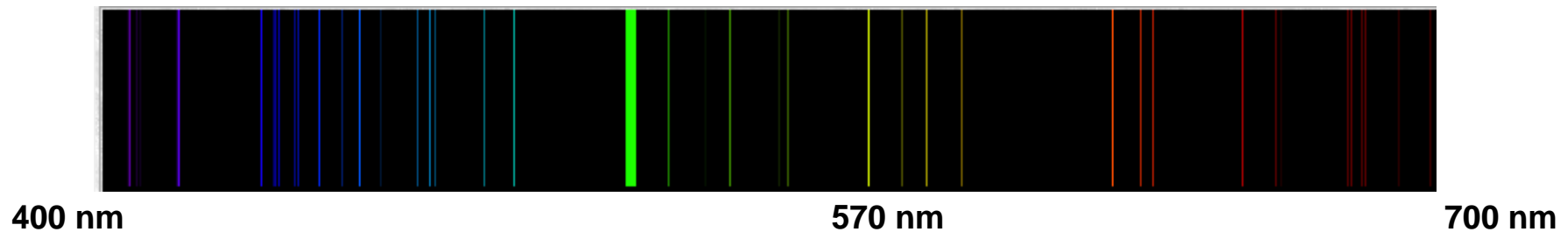
Cada element de la taula periòdica en estat gasós té el seu espectre d'emissió. Els espectres són com empremtes dactilars (Cada persona té la seva empremta, cada element en estat gasós té el seu espectre).

Estudiant els espectres d'emissió podem saber de quina substància es tracta.

### Espectre discontinu d'emissió del carboni



### Espectre discontinu d'emissió del magnesi



Cada ratlla correspon a una radiació d'una determinada longitud d'ona i freqüència. L'energia que EMET L'ÀTOM NO ÉS CONTÍNUA SINÓ DISCONTÍNUA.



<http://jersey.uoregon.edu/elements/Elements.html>

(veure els espectres d'emissió i d'absorció dels elements en estat gasós)

## 9.5. Hipòtesi de Planck (l'energia és discontinua a nivell microscòpic).

Cada element de la taula periòdica emet llum a unes determinades longituds d'ona. Aquest fenomen no podia ser explicat per la Física Clàssica.

Per explicar aquest fet es va formular en 1913 la teòria quàntica de Bohr, ell considerava que l'àtom estava format per:

- diferents capes o nivells
- cada capa té la seva energia que no podia ser qualsevol energia sinó que el seu valor està quantitzat.
- Quan un electró s'excita (absorbeix energia) passa d'un nivell a un altre nivell d'energia més elevada, quan torna a l'estat fonamental, emet energia en forma d'ona electromagnètica.

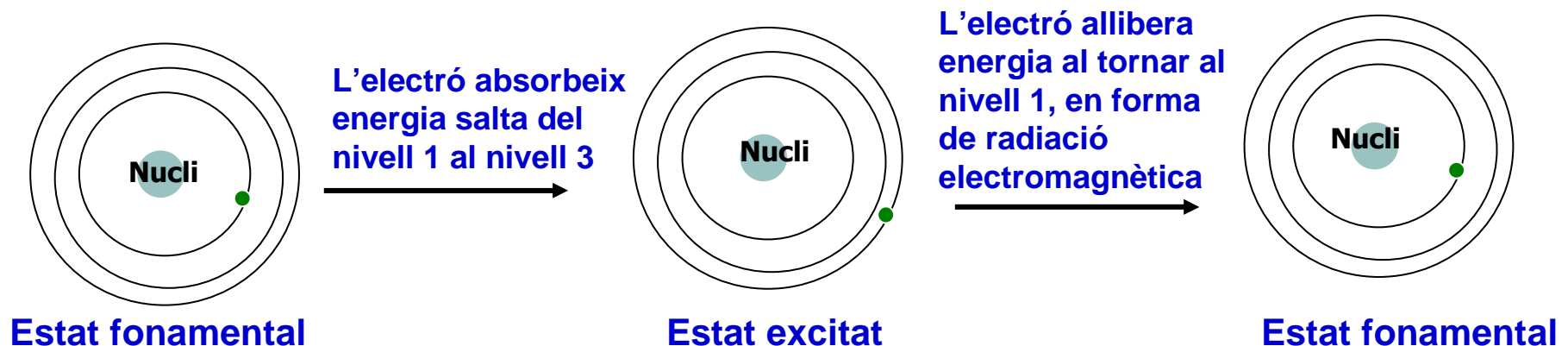
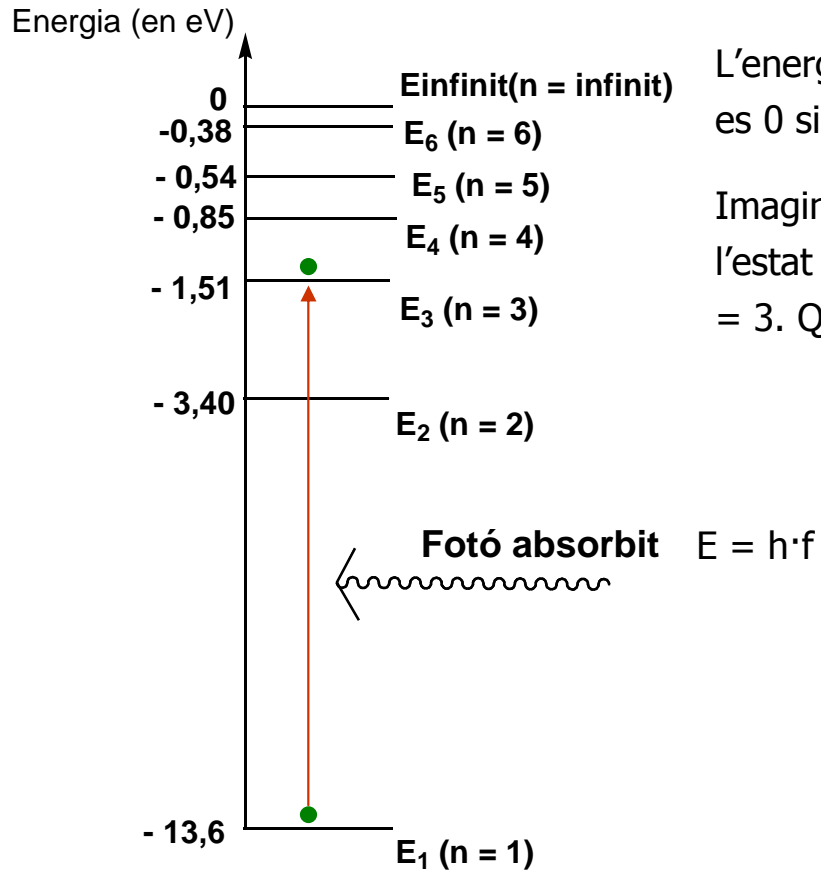


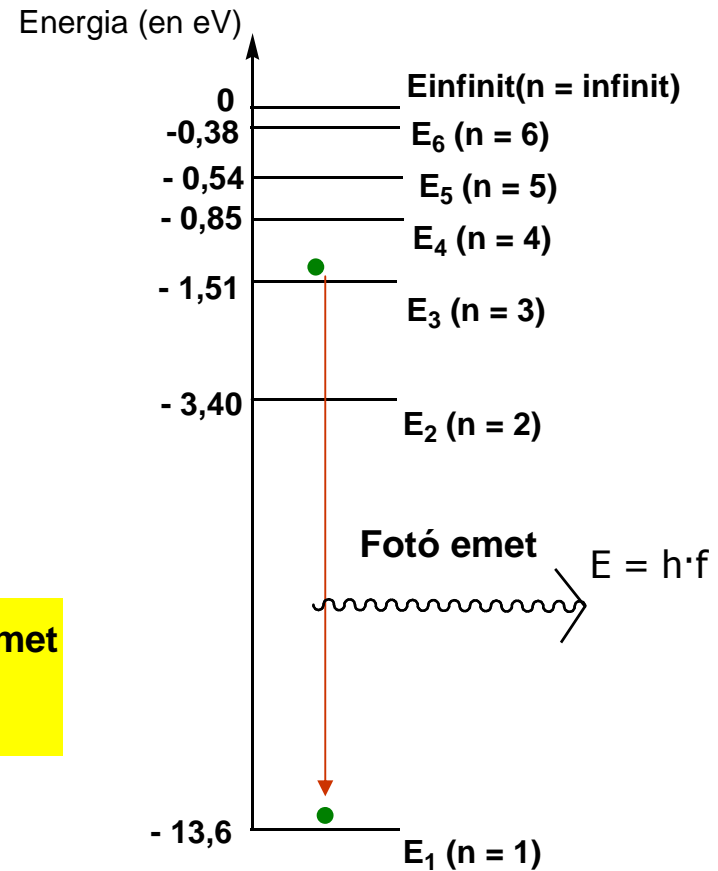


Diagrama d'energia corresponent als nivells d'energia de l'àtom d'hidrogen

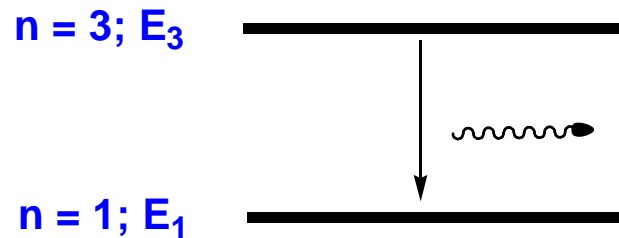


L'energia que té l'electró dins de l'àtom són negatives, i quan es 0 significa que l'àtom ha perdut l'electró, s'ha ionitzat.

Imaginem que l'únic electró de l'àtom d'hidrogen es troba en l'estat fonamental  $n = 1$ , absorbeix energia i salta a l'orbital  $n = 3$ . Quan l'electró torna a  $n = 1$ , emet llum d'energia  $E = h \cdot f$



**Exercici 1.** Quan l'electró de l'àtom d'hidrogen fa la transició de l'estat excitat  $n = 3$  a l'estat fonamental  $n = 1$  emet radiació electromagnètica de longitud d'ona  $\lambda = 656 \text{ nm}$ . Calculeu la freqüència i l'energia d'un fotó d'aquesta radiació.



L'electró salta de  $n = 1$  a  $n = 3$ , alliberant energia (radiació electromagnètica)

$$E_{\text{fotó}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} = E_1 - E_3 = hf$$

$$v = \lambda f$$

$$f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{656 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

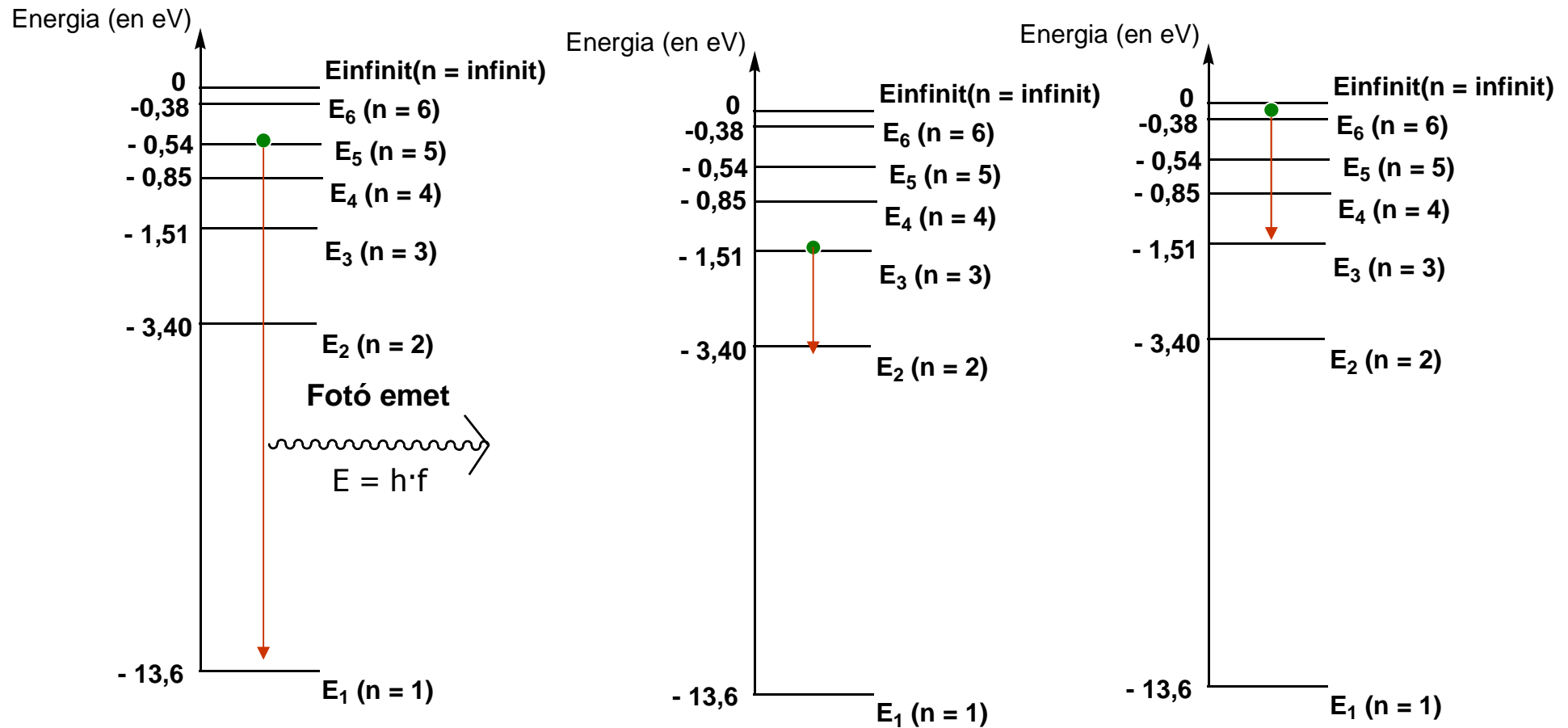
$$E_{\text{fotó}} = hf$$

$$E_{\text{fotó}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$E_{\text{fotó}} = 3,03 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



Diagrama d'energia corresponent als nivells d'energia de l'àtom d'hidrogen



**Cada salt emetrà una ona de diferent energia (per tant diferent freqüència i diferent longitud d'ona); cada salt correspondrà una ratlleta de l'espectre discontinu de l'element. Com cada element té els seus nivells a diferent energia, es donaren diferents salts, i això explica que cada element tingui el seu espectre propi i diferent dels altres.**