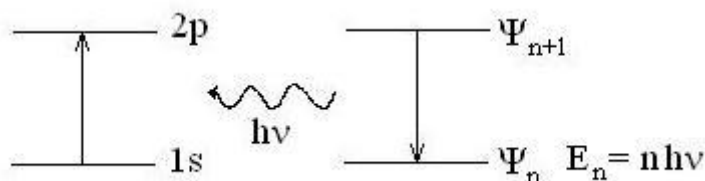


## Què és un fotó?

Una primera contestació seria dir que és l'element constitutiu (o partícula) de la radiació electromagnètica<sup>1</sup>. Què més podem dir d'aquesta partícula? Considerem, a manera d'exemple, la interacció entre l'àtom d'hidrogen al seu estat fonamental i la radiació electromagnètica (vegeu figura).



Hem triat una transició ( $1s \rightarrow 2p$ ) permesa per les regles de selecció. La conservació de l'energia permet relacionar l'energia guanyada per l'hidrogen,  $\Delta E_H$ , amb l'energia perduda per la radiació  $\Delta E_R = h\nu$ . En altres paraules,  $\Delta E_H = h\nu$ . Ara bé, la teoria de la relativitat ens diu que la variació d'energia ve lligada a la variació de la massa, d'acord amb la famosa fórmula d'Einstein  $\Delta E = \Delta m c^2$ . Aleshores tenim que  $\Delta E_H = h\nu = \Delta m c^2$ . En altres paraules, l'hidrogen ha incrementat la seua massa amb una quantitat  $\Delta m = h/(\lambda c)$ . La conservació de la matèria ens diu que aquesta ha de ser la massa del fotó absorbit. Aleshores podem atribuir-li massa al fotó i, a més a més, dir que aquesta massa està relacionada amb la longitud d'ona de la radiació de la qual prové l'esmentat fotó, mitjançant la fórmula  $m = h/(\lambda c)$ . Tanmateix, la conservació de l'energia ens permet assignar al fotó una energia  $h\nu$ .

També veiem que l'hidrogen ha canviat el seu moment angular des d'un valor determinat pel nombre quàntic  $\ell = 0$  fins a  $\ell = 1$ . Aquest increment és conseqüència de l'absorció del fotó. Aleshores, el principi de conservació de moment angular ens permet assignar al fotó un moment angular  $\ell = 1$  (recordem ací que l'electró té un moment angular  $1/2$ ).

Finalment, com la llum es propaga a la velocitat  $c$ , diem que el fòto presenta una velocitat  $c$ .

Podem fer ara una sèrie de comprovacions: hem dit que l'energia del fotó és  $E = h\nu$ , però també, d'acord amb la teoria de la relativitat,  $E = mc^2 = pc$ . Aleshores comprovem que  $p = h/\lambda$  (fórmula de DeBroglie). També comprovem que la massa del fotó ha de ser  $m = h/(\lambda c)$ , com havíem deduït abans. Però encara més, la teoria de la relativitat permet distingir entre la massa en repòs,  $m_0$ , i la massa en moviment,  $m$ ,  $m_0 = m\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Com hem dit que la velocitat del fotó és precisament "c" concloem que la seua massa en repòs és zero!

Què vol dir una massa en repòs zero? Adonem-nos que el fet que la velocitat de la radiació electromagnètica en el buit sia "c" deriva de  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Hi ha però molts mitjans amb constants dielèctriques i permeabilitats magnètiques majors que els valors del buit, cosa que fa que en aquests mitjans la velocitat de la radiació sia menor que  $(\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$ . En el límit de velocitat zero<sup>2</sup> el fòto presentaria la massa en repòs  $m_0 = 0$ . El límit de velocitat zero implica també no transmissió de radiació. Podem interpretar-ho dient que el mitjà, en presentar constants dielèctriques i permeabilitats magnètiques infinites, no permet la transmissió de radiació. Microscòpicament açò es podria traduir dient que no hi ha transmissió de radiació perquè el fotó ha "desaparegut" en fer-se la seua massa igual a zero.

<sup>1</sup> En rigor, el fotó és la partícula que s'intercanvia entre la radiació i la matèria quan interaccionen. Des d'un punt de vista quàntic, una radiació monocromàtica és un oscil·lador harmònic en un estat excitat  $\Psi_n$  d'energia  $E_n = nh\nu$ . Quan aquesta radiació passa a un altre estat  $\Psi_{n-1}$  (d'energia  $E_{n-1} = (n-1)h\nu$ ) és perquè la radiació ha perdut una energia  $h\nu$  i la matèria l'ha absorbida (conservació de l'energia). Diem que la radiació ha perdut una partícula (fotó) d'energia  $h\nu$  i que la matèria l'ha absorbit.

<sup>2</sup> Cal adonar-se que, en la fórmula  $m_0 = m\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , "c" representa la velocitat límit de propagació d'una senyal en el mitjà considerat, és a dir, la velocitat de la llum. Aleshores, la velocitat "v" del fotó és sempre "v = c", cosa que fa que, no importa el mitjà, la massa en repòs del fotó sia única (zero). Tanmateix, és incorrecte calcular la massa del fotó en un mitjà on  $v < (\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$  a partir de la massa en repòs i la fórmula anterior fent que  $v/c = \sqrt{\epsilon_0\mu_0/\epsilon\mu}$  (obtindríem  $m = 0$ !). Per al fotó, la fórmula anterior sempre dona lloc a una indeterminació  $m = 0/0$ .