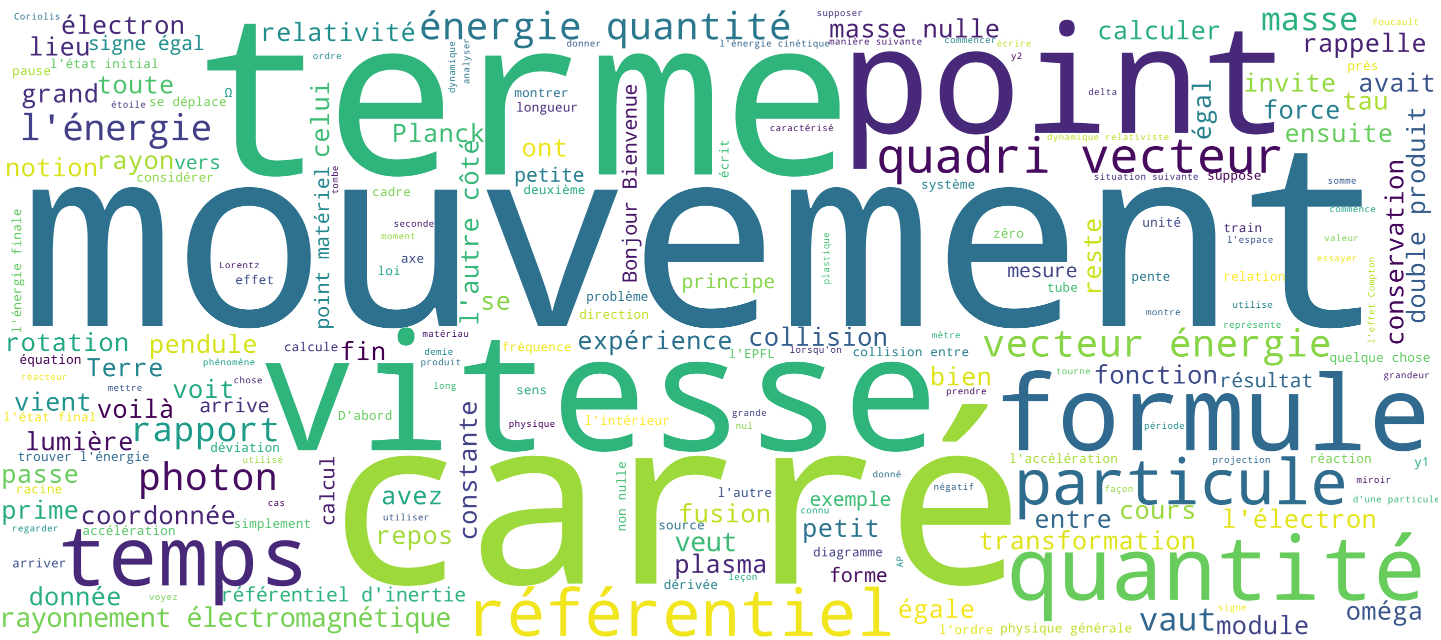
Le photon

Mécanique, cours 24.2

Jean-Philippe Ansermet

http://go.epfl.ch/traite-meca-2-24



Search MOOC

Video

EPFL

Le photon

- Particules de masse nulle
- Rayonnement électromagnétique
- Collision électron-photon

Mécanique | 2013 6

Bonjour. Bienvenue au cours de physique générale de l'EPFL. Dans ce module, j'aimerais introduire la notion de photon. Je vais commencer par montrer que dans le cadre de la dynamique relativiste, on peut envisager des particules de masse nulle. On va voir ensuite comment l'étude du rayonnement électromagnétique a conduit à l'idée de photon. Et on va illustrer la notion de photon par l'analyse d'une collision entre un électron et un photon.

Notes

Summary

0m 00s

Particules de masse nulle

Condition de masse :

$$E = \sqrt{\boldsymbol{p}^2 c^2 + m^2 c^4}$$

On peut avoir une masse nulle :

$$E = c\,|\boldsymbol{p}|$$

$$\frac{c\,|\boldsymbol{p}|}{E} = \frac{v}{c} \qquad\qquad v = c$$

Mécanique | 2013 12

D'abord, des particules de masse nulle. Je rappelle la formule qu'on a appelée la condition de masse qui liait l'énergie, la quantité de mouvement p et la masse m d'une particule. On voit que dans cette formule, on peut très bien supposer que m égale 0. On arrive alors à la situation suivante : On a un lien entre E et le module de la quantité de mouvement. On a donc une particule de masse nulle qui a une énergie non nulle et une quantité de mouvement non nulle. Je rappelle maintenant cette formule-là, qu'on avait obtenue, qui lie la vitesse et la quantité de mouvement, et comme ici, c p sur E vaut 1, on a v sur c qui vaut 1, ça veut dire qu'on a des particules qui se déplacent à la vitesse de la lumière, mais qui ont des masses nulles.

Notes

Summary

0m 39s

Photon et rayonnement électromagnétique

Planck, pour expliquer le rayonnement du corps noir :

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

Einstein, assimile les 'quanta' de Planck à des particules se déplaçant à la vitesse de la lumière, donc de masse nulle.

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

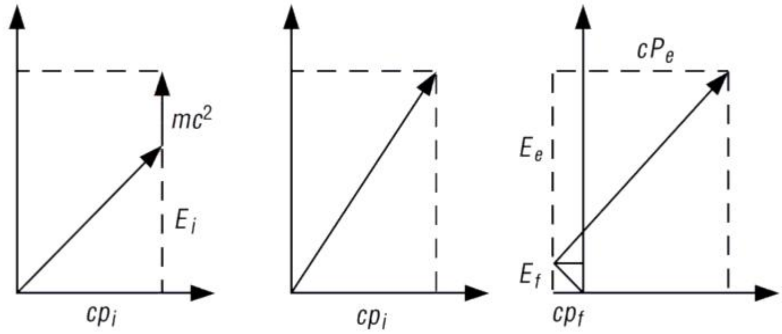
Mécanique | 2013 17

L'idée de photon survient d'un travail, d'une étude faite à la fin du dix-neuvième siècle sur l'état du rayonnement électromagnétique à l'intérieur de quelque chose comme un four qui rougeoie. Les gens étudiaient l'énergie en fonction de la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique dans ce four. Et Planck, en 1900, rend compte de toutes ces observations avec une formule qui marche à toutes les longueurs d'onde et à toutes les fréquences. Pour expliquer sa formule, Planck doit supposer que le rayonnement et les parois échangent l'énergie sous la forme de quanta d'énergie. Et un quantum d'énergie d'échange de rayonnement électromagnétique à la fréquence nu vaut E égal h nu, où h est connu de nos jours comme la constante de Planck. On peut aussi écrire h barre oméga, avec donc oméga qui vaut 2 pi fois nu, et donc h barre qui vaut h sur 2 pi. Einstein interprète ce résultat en disant qu'on peut considérer le rayonnement électromagnétique comme un gaz de particules et que l'énergie des particules est donnée par la formule de Planck. Avec le temps, ces particules-là on été dénommées photons. On a donc un rayonnement électromagnétique caractérisé par des photons, les photons ont une quantité de mouvement qui est donnée par l'énergie divisée par c, et si on utilise la formule de Planck, on a h nu divisé par c.

Notes

Summary

1m 39s



Mécanique | 2013 19

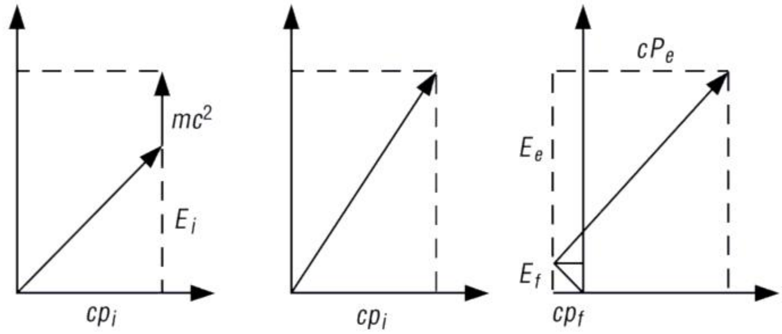
Prenons un exemple : l'effet Compton. Dans les vidéos d'expérience, je montre la collision entre des rayons X et les électrons d'un morceau de plastique. En fait, la collision a lieu avec les électrons du matériau. Pour représenter cette collision, je regarde un diagramme que je fais dans, au lieu de faire dans l'espace des quadri-vecteurs, je fais le quadri-vecteur énergie quantité de mouvement multiplié par c, j'ai donc des énergies, les unités sont des énergies dans les deux axes, ici je représente c p, et sur l'ordonnée je représente l'énergie. Initialement, j'ai un électron au repos. Cet électron a un quadri-vecteur énergie quantité de mouvement comme ceci, parce que sa quantité de mouvement est nulle, il est au repos. La partie spatiale, qui donne l'énergie, vaut m c carré, c'est l'énergie de la particule au repos. Le photon, lui, est caractérisé par E égale c p. Donc on a ici une pente de 1. Maintenant, on a la conservation du quadri-vecteur énergie quantité de mouvement. Ça veut dire qu'après la collision le quadri-vecteur énergie quantité de mouvement est le même qu'avant la collision. J'ai dessiné le quadri-vecteur énergie quantité de mouvement total ici, c'est la somme de ces deux vecteurs.

Notes

Summary

3m 36s

Effet Compton : rétrodiffusion



$\boldsymbol{p}$: quantité de mouvement du photon

$\boldsymbol{P}$: quantité de mouvement de l'électron

Conservation du quadri-vecteur énergie-quantité de mouvement :

$$\boldsymbol{P} + \boldsymbol{p}_f = \boldsymbol{p}_i$$

$$\sqrt{P^2c^2 + m^2c^4} + c|p_f| = mc^2 + c|p_i|$$

Mécanique | 2013 22

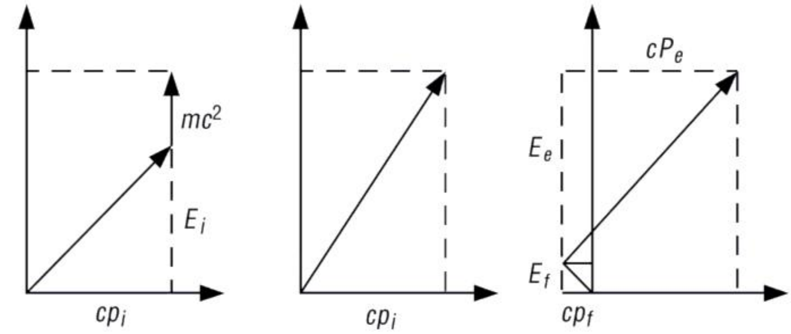
Et maintenant, on va analyser une collision telle que le photon, à la fin de la collision, revient en arrière. Ça veut dire que sa quantité de mouvement p f est négative, et donc j'ai une pente de 1 sur ce diagramme, avec une énergie E f, et un c p f négatif. Ici, j'ai le quadri-vecteur énergie quantité de mouvement de l'électron. Je l'ai dessiné pour arriver à ce point-là, qui est équivalent à ce point-là, pour avoir la quantité de mouvement, enfin le vecteur énergie quantité de mouvement qui reste le même comme ceci. On va désigner par petit p la quantité de mouvement du photon et grand P la quantité de mouvement de l'électron. La conservation du quadri-vecteur énergie quantité de mouvement totale s'exprime de la manière suivante : voilà la partie quantité de mouvement à la fin, et la valeur initiale, et ici j'ai écrit la conservation de l'énergie. L'énergie du photon, c'est c p, c p f dans l'état final, c p i dans l'état initial, l'énergie de l'électron dans l'état initial, c'est m c carré, dans l'état final j'ai utilisé ici, pour l'énergie, la condition de masse, j'ai donc mon p carré et mon m carré qui apparaissent ici sous la racine.

Notes

Summary

5m 18s

Effet Compton : rétrodiffusion



$\boldsymbol{p}$: quantité de mouvement du photon

$\boldsymbol{P}$: quantité de mouvement de l'électron

Conservation du quadri-vecteur
énergie-quantité de mouvement :

$$\boldsymbol{P} + \boldsymbol{p}_f = \boldsymbol{p}_i$$

$$\sqrt{P^2c^2 + m^2c^4} + c|p_f| = mc^2 + c|p_i|$$

$p_f = |\boldsymbol{p}_f| \quad p_i = |\boldsymbol{p}_i|$

$$P - p_f = p_i$$

$$\sqrt{P^2c^2 + m^2c^4} + cp_f = mc^2 + cp_i$$

$$P = p_i + p_f$$

$$(p_i + p_f)^2c^2 + m^2c^4 = (mc^2 + cp_i - cp_f)^2$$

$$4p_ip_fc^2 = 2mc^2cp_i - 2mc^2cp_f$$

$$p_f = \frac{mc\,p_i}{2p_i + mc} \qquad E_f = \frac{E_i}{1 + 2p_i/mc}$$

Je vous invite maintenant à faire une pause et essayer de conclure pour trouver l'énergie finale du photon rétrodiffusé en fonction de son énergie initiale. Personnellement, je conduis le calcul comme ceci : je conviens d'appeler p f et p i les modules, la quantité de mouvement du photon finale et initiale. La projection de cette loi vectorielle me donne ceci, j'ai un moins p f parce que je suppose une rétrodiffusion. La conservation de l'énergie est tout simplement comme ceci. De cette première équation je tire grand P que je vais mettre ici à l'intérieur. Ce c p f, je le passe de l'autre côté du signe égal, et cette égalité je l'élève au carré. Il me vient alors ce terme au carré, et ici, j'ai mon terme qui vient de la condition de masse avec le grand P qui est substitué par p i plus p f. Quand je développe les carrés, ici j'ai un double produit 2 p i p f, ici j'ai aussi un 2 p i p f, quand je passe de l'autre côté du signe égal, j'en ai un 4, et ici j'ai le m carré c 4 qui tombe avec celui-là, j'ai un double produit ici et un autre double produit là. Et maintenant j'ai une formule avec p f ici et là, et je peux résoudre pour p f comme ceci. Et de p f, je calcule c p f pour trouver l'énergie finale, et j'ai la formule que voici. J'obtiens donc que le photon est rétrodiffusé avec une énergie plus petite que l'énergie du photon incident.

Notes

Summary

7m 06s