LP07' : Collisionneurs de particules.

Année : 2021-2022
Passage : Julie Limonet
Correcteurs : Léo Mangeolle et Hector Hutin

A propos du titre.

Comme cela n'a pas échappé à Julie, cette leçon ressemble fortement à l'ancienne LP07 "Dynamique relativiste" présentée sous un nouveau titre. On peut donc se demander : pourquoi le jury a-t-il voulu ce changement ? Ce qu'on peut imaginer, c'est qu'iels en avaient marre de la première partie où on introduit le quadrivecteur énergie-impulsion, le quadrivecteur travail-force, et où l'on passe un quart d'heure à s'extasier sur à quel point c'est une révolution complète de notre vision de l'espace-temps et un changement de paradigme qui a profondément influencé la physique aussi bien que la science-fiction et patati et patata. On commence à le savoir, le jury aime l'expérience concrète de la réalité véritable en conditions réelles, et pour cela, quoi de mieux que des collisionneurs de particules ?

A propos de la partie introductive.

Dans son introduction, Julie nous a expliqué ce qu'est un collisionneur, ce que sont une collision élastique et une collision inélastique, en toutes lettres. Il pourrait être judicieux, cependant, de donner ici la formule de l'énergie relativiste, $E = \sqrt{m^2c^4 + \vec{p}^2c^2}$, d'identifier l'énergie de masse et l'énergie cinétique dans cette formule, et de définir les termes "élastique" et "inélastique" en termes de transferts entre ces deux contributions. Cela permet de faire déjà quelque chose d'intéressant dans cette partie qui, sinon, ressemble à une liste de définitions peu palpitante.

En particulier, dire "les accélérateurs de particules permettent de découvrir de nouvelles particules" dans l'introduction paraît un peu prématuré si l'on n'explique pas d'abord qu'il est possible de générer de la masse (et donc de nouvelles particules éventuellement très massives) à partir d'énergie cinétique. De même, définir "collisionneur = accélérateur" peut se défendre (encore que l'on peut discuter de l'intérêt d'écrire ça au tableau), mais cette identification ne prend son sens qu'une fois qu'on a compris que le but des collisions c'est de convertir en masse de l'énergie cinétique (sinon dans l'absolu on pourrait aussi bien collisionner des particules à des vitesses de l'ordre d'1 m/s).

D'une manière générale, faites comme vous voulez mais ça ne sert à rien de prendre trop de temps à poser des définitions, il est souvent toujours temps de définir les concepts au moment où on en a besoin, et au pire si on oublie dans le feu de l'action, le jury pourra revenir dessus au moment des questions - ou au mieux il considérera que c'était implicite.

A propos des collisions.

Le plan choisi par Julie (collisions élastiques avec Compton, puis collisions inélastiques avec l'énergie de seuil) est très bien. Essayez d'avoir un ou deux repères concrets à mentionner (contexte historique de l'effet Compton - ce qu'il a permis de mettre en évidence -, exemples de particules qui ont été découvertes dans des collisions inélastiques, etc), ça fera toujours bien.

Au moment des questions, on est revenu sur les différents usages de cette propriété de conversion entre énergie de masse et énergie cinétique des particules. Le jury en manque de réalité concrète pourra vous emmener vers les applications médicales (apparemment on fabrique des radioisotopes comme le cobalt 60 dans des collisionneurs, qu'on utilise ensuite pour brûler des tumeurs ou des choses comme ça) ou vers la production d'énergie (fusion et fission, cette fois c'est l'inverse, on fabrique de l'énergie cinétique en consommant de la masse).

Pendant les questions, on s'est aussi demandé ce que ça voulait dire, pour une onde, d'avoir une masse (d'après la dualité onde-corpuscule, si le corpuscule a une masse, l'onde a une masse). Techniquement, ça veut dire que votre fonction d'onde $\psi(\mathbf{r}, t)$ possède un terme de masse en $m^2\psi^*\psi$ dans son lagrangien (ou son hamiltonien), ce qui se traduit par un terme du type $m^2\psi$ dans son équation d'onde - par exemple Klein-Gordon, $(-\partial_t^2 + \nabla^2 - m^2)\psi = 0$, et le cas $m = 0$ redonne d'Alembert qui en est la version non-massive. Pour

Schrödinger c'est un peu caché, il faut prendre la version non-relativiste de Klein-Gordon, en gros au lieu d'une relation de dispersion $\omega^2 = c^2k^2 + m^2c^4$ on a $\omega = mc^2\sqrt{1 + k^2/(m^2c^2)} \approx \text{cst} + \frac{k^2}{2m}$ qui fait apparaître la masse au dénominateur dans l'équation de Schrödinger. Pour les électrons c'est encore différent, c'est l'équation de Dirac, mais on a aussi un terme en $m\psi^*\psi$ dans le lagrangien. D'une manière générale, on dit qu'une particule possède une masse lorsqu'il y a un gap dans sa relation de dispersion, ce qui est le cas pour Klein-Gordon et Dirac mais pas pour d'Alembert. Le cas de Schrödinger à cet égard est un peu étonnant, mais ça vient probablement du fait que c'est une équation d'enveloppe - à voir.

Notez juste pour info que si vous voulez vous aventurer à balancer des noms de particules, il sera toujours moins risqué de nommer des cousins de l'électron (le muon, le tau) ou leurs antiparticules, ou des cousins massifs du photon (les bosons W+, W-, et Z), qui appartiennent à la théorie électro-faible désormais bien connue, plutôt que des choses issues de la chromodynamique (quarks, gluons). Notamment les gluons n'ont pas de masse proprement dite mais possèdent une "masse émergente", responsable du confinement de la couleur, qui reste à ce jour l'un des problèmes non résolus de la physique mathématique ; donc si on peut éviter d'en parler c'est mieux.

A propos des cyclotrons/synchrotrons.

Dans cette partie, on utilise le PFD relativiste, il faut faire bien attention à distinguer le temps propre τ du temps dans le laboratoire t (il y a un facteur γ entre les deux), le quadrivecteur $\hat{p}^\mu$ du vecteur impulsion $\vec{p}$ (à la limite ça c'est pas trop grave), et surtout le quadrivecteur force $\hat{F}^\mu$ du vecteur force $\vec{F}$ (en effet les composantes spatiales $\hat{F}^j = \gamma F^j$, c'est pas évident - ici j'ai mis un chapeau pour les distinguer mais c'est une convention qui n'est pas vouée à sortir de ce pdf). Par chance c'est équivalent d'écrire $\frac{\mathrm{d}p^j}{\mathrm{d}\tau} = \hat{F}^j$ ou $\frac{\mathrm{d}p^j}{\mathrm{d}t} = F^j$ parce que les facteurs gamma se compensent, mais autant faire les choses explicitement pour bien montrer que vous utilisez la relativité.

Conclusion.

Parler ou ne pas parler du boson de Higgs, telle est la question.

FIGURE 1 – Ensemble, recyclons pour un monde meilleur.