LP : Collisionneurs de particules

Julie Limonet et Louis Usala
11/01/22

Bibliographie

✎ *Relativité, Fondements et applications*, **José-Philippe Pérez**

✎ Cours de Langlois

Prérequis

niveau L3

- Cinématique relativiste
- Dynamique relativiste
- Quadrivecteur énergie-impulsion (en particulier)

Table des matières

1 Définition et propriété **2**

2 Collisions de particules **3**
2.1 Effet Compton 3
2.2 Collisions inélastiques 4

3 Accélérations de particules **4**
3.1 Accélération avec un champ électrique 4
3.2 Déviation par un champ magnétique 4
3.3 Application aux collisionneurs 5

Présentation de la leçon

Leçon qui vient après d'autres cours de relativité et qui permet d'en voir des applications.

Introduction

La collision est un outil essentiel de la physique des particules car elle permet de faire apparaître de nouvelles particules.

1 Définition et propriété

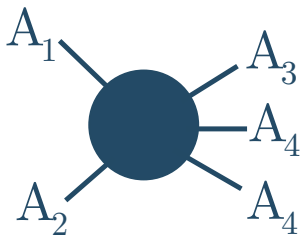
Définition

Collisionneur : accélérateur de particules, mettant en jeu des faisceaux dirigés de particules

Définition

Collision : 2 particules entrent en collision lorsqu'elles subissent des variations de vitesse brutales dans une zone quasi ponctuelle de l'espace, du fait de leur interaction.

Cette définition vague montre à quel point on sait peu de ce qu'il se passe pendant une collision. On résume ça par un schéma avec des particules entrant dans une boîte noire et des particules en sortant. Cela-dit, on a des outils théoriques pour parler de ces collisions.



Important

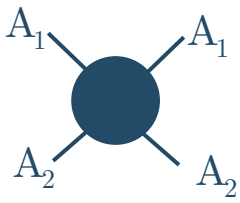
Propriété : Conservation du quadrivecteur P, i.e. à la fois de l'énergie et de l'impulsion.

On rappelle que l'énergie totale d'une particule est composée d'énergie de masse et d'énergie cinétique :

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}. \tag{1}$$

On distinguera deux cas :

- Collisions élastiques : nombre ET nature des particules inchangées.



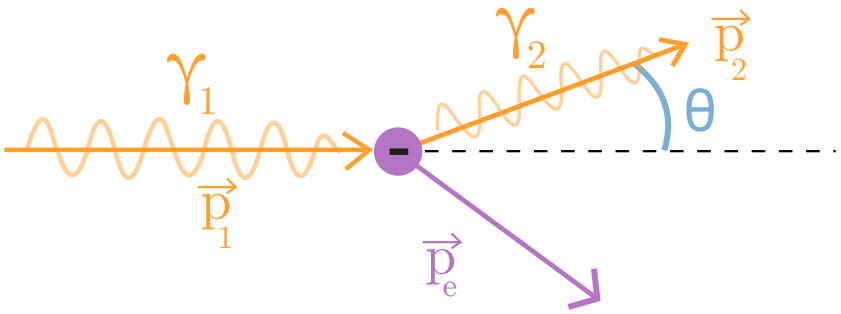
On a alors conservation de l'énergie de masse :

$$\sum_i m_i c^2 \Big|_{init} = \sum_i m_i c^2 \Big|_{fin} . \tag{2}$$

- Collision inélastique : changement de la nature ou du nombre des particules. On a alors transfert d'énergie de masse en énergie cinétique et inversement.

2 Collisions de particules

2.1 Effet Compton



On peut écrire les quadrivecteurs du problème : $P^\mu_{e_1} = (mc, \vec{0})$, $P^\mu_{\gamma_1} = (E_{\gamma 1}/c, \vec{p}_1)$, $P^\mu_{e_2} = (mc, \vec{p}_e)$ et $P^\mu_{\gamma_2} = (E_{\gamma 2}/c, \vec{p}_2)$.
On se place dans le référentiel dans lequel l'électron initial est immobile : il est ainsi la particule cible. Utilisons la conservation de l'énergie :

$$p_1 c + m_e c^2 = p_2 c + \sqrt{(p_e c)^2 + (m_e c^2)^2}. \tag{3}$$

Celle-ci se réécrit :

$$p_e^2 = (p_1 - p_2)^2 + 2 m_e c (p_1 - p_2). \tag{4}$$

Ajoutons la conservation de l'impulsion :

$$\mathbf{p_1} = \mathbf{p_2} + \mathbf{p_e}, \tag{5}$$

qui permet d'obtenir :

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2 p_1 p_2 \cos\theta. \tag{6}$$

En utilisant la relation de De Broglie $p_i = \dfrac{h}{\lambda_i}$ pour les photons :
étapes de calcul

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_C (1 - \cos\theta) \quad ; \qquad \lambda_C = \frac{h}{c m_e} \sim 2\,\text{pm}. \tag{7}$$

Ce résultat a valu le prix Nobel 1927 à Arthur Compton. *Décrire l'expérience*

2.2 Collisions inélastiques

On s'intéresse ici à des collisions qui ne préservent pas la nature ou le nombre de particules. Des particules A_1, A_2 se rencontrent et se transforment en particules A_3, A_4, ... C'est le cas de l'expérience *noter le nom* qui consiste a faire se rencontrer deux protons à haute énergie et de former 3 protons et 1 anti-proton.

Important

Ici on a plus de particules dans l'état final. D'après l'équation d'Einstein $E = mc^2$, on comprend que la matière qui compose ces nouvelles particules doit être une nouvelle forme prise par l'excédent d'énergie des protons de départ.

Pour faire une telle réaction, il faut suffisamment d'énergie.

Définition

Energie de seuil : Energie minimale que doivent avoir les constituants de départ pour que la réaction ait lieu.

Déterminons ce critère pour la réaction entre protons vue plus haut. On note $\mathcal{R}$ le référentiel où A_2 est immobile et $\mathcal{R}^*$ le référentiel du centre de masses. Dans ce second référentiel, l'impulsion du système total est nulle avant comme après la réaction. On a invariance de

$$E^{*2} = E^2 - \sum (pc)^2 \tag{8}$$

Le critère d'énergie de seuil s'écrit :

$$E^{*2} = (E_1 + m_2c^2)^2 ... \tag{9}$$

finir le calcul
Application
L'énergie de seuil de la collision entre protons est

$$E_s = 6m_pc^2 = 6\,\text{GeV} \tag{10}$$

transition

3 Accélérations de particules

3.1 Accélération avec un champ électrique

On considère une particule de charge q dans un champ électrique constant ϵ. Les équations du mouvement donnent

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} = q\epsilon \rightarrow \mathbf{p} = q\epsilon t\mathbf{u_x}. \tag{11}$$

...

3.2 Déviation par un champ magnétique

On considère une particule de charge q et de vitesse initiale $v\mathbf{u_x}$ qui entre dans une zone de champ magnétique uniforme et constant $B\mathbf{u_y}$. L'équation du mouvement s'écrit

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B} = \frac{qB}{\gamma m} * finir* \tag{12}$$

Pour $v << c$, on a $\gamma \sim 1$ sonc le rayon de courbure est $r = \dfrac{\gamma m v}{qB}$

3.3 Application aux collisionneurs

Cyclotron

Faire le schéma.

Conclusion

La cosmologie en conclusion c'est comme un "vingt de mieux à coeur" quand t'as pas de coeur, meuf.

Questions

- **Quelle est la première particule découverte dans un accélérateur de particules ?** C'est l'électron, dans le tube de "Krucs".
- **Et dans un collisionneur ?** L'antiproton, des neutrinos, etc
- **A propos des quadrivecteurs, pourriez-vous réécrire les quadrivecteurs impulsion mentionnés pour le photon et l'électron.** Attention, la première composante est l'énergie totale, pas que l'énergie de masse.
- **Est-ce que la pseudo-norme est invariante.**
- **La collision a été définie comme un changement brutal de vitesses. Dans quel référentiel regarde-t-on ce changement de vitesses ?** Dans le référentiel du centre de masses.
- **On a utilisé la conservation du quadrivecteur. Quelle est précisément cette conservation ?** C'est la conservation de sa pseudo-norme.
- **Quel est le contexte historique de la découverte de l'effet Compton ?**
- **A quoi correspond l'inégalité E>Eseuil ?** Il faut au minimum avoir l'énergie pour créer les particules dans leur état au repos.
- **Exemple d'ondes qui ont une masse.** Tout ce qu'on veut. Dualité onde-corpuscule.
- **Retour sur les calculs et les définitions des axes dans le schéma.** Se placer dans un repère cylindrique.
- **Effet Compton. Est-ce qu'on pourra voir l'effet de l'agitation thermique (vitesse des atomes) sur la diffusion ?** On pourrait prendre en compte les phonons, mais on travaille avec des rayons X qui sont très largement plus énergétiques que les modes propres de vibration du réseau (infrarouge).
- **Commenter le passage de la pulsation cyclotron classique à la pulsation quantique.** $m \to \gamma m$: l'inertie augmente. C'est le cas aussi pour une accélération linéaire mais dans ce cas elle augmente en γ^2 (à vérifier).
- **D'où vient le facteur γ dans la pulsation cyclotron ? C'est le passage de p à v, celui de tau à t ?**
- **Exemples de convertion d'énergie dans l'autre sens : énergie de masse devenant de l'énergie cinétique ?** C'est le cas de la fission nucléaire et de la fusion nucléaire ?
- **On pourrait gagner de l'énergie en fissionnant les gros atomes en petits et en les re-fusionnant en gros atomes ?**

- **Intérets de fusionner des particules et de transformer de l'énergie cinétique en énergie de masse ?** Dans le domaine médical : créer des particules instables et observer leurs désintégrations.
-
- **Si on coupe le champ E mais pas le champ B dans un cyclotron, que se passe-t-il ?** Perte d'énergie par rayonnement synchrotron. **Ca a un intérêt ?** Ca permet de faire des analiyses. C'est utilisé dans des accélérateurs de particules.
- **Autre nom du rayonnement synchrotron ?**
- **Dans quel cas on utilise des accélérateurs linéaires ?** Amorce des synchrotrons. Accélération de particules non chargées (qu'on ne pourrait pas dévier).
- **Quel est le double intérêt de l'accélérateur circulaire ?** On accélère plus car on fait autant de tours que voulu et on collisionne plus facilement car on peut faire circuler les particules dans les 2 sens pour faire gagner à toutes les particules de l'énergie mais dans des sens opposés.
- **On utilise la conservation de la quadriimpulsion, donc on doit avoir le centre de masses en MRU ?** C'est le cas, le système total est isolé.
- **JM veut utiliser un tokamak parce qu'une leçon niveau M5 ça pourrait être drôle.**
-
-
-
-

Commentaires

- Inertie : on a un facteur γ en accélération circulaire et γ^3 en accélération linéaire. Faites des accélérateurs circulaires. C'est bien les accélérateurs circulaires.
- Partie 1 : les définitions sont prévisibles. Peut-être qu'on n'aurait pas besoin de faire tout ça et qu'on pourrait mettre à la place des rappels sur l'énergie dans $\mathbb{R}^{3+1}$, voire définir les types de collision par rapport à ce critère.
- Rayonnement de perte d'énergie : "Bremsstrahlung"
- Collusion (ha ha ha) de notation entre la pseudo norme du quadri vecteur en 4D et la norme du vecteur en 3D.
- Faire le PDF en notations relativistes pour être sûr.
- Les schémas sont vraiment cools. Compton sort un peu du contexte. On sort du fil rouge si on ne contextualise pas plus.
- Gagner de l'énergie avec la fusion ou la fission : on ne fusionne pas les petits plus que le fer. On ne fissionne pas les gros plus que le fer.
- Garder la partie "application médicale" pour avoir un lien cool avec la vie du quotidien.
- Se référer à la formule quand on choisit de changer r ou B dans le cadre du cyclotron vs synchrotron.

- La leçon est super, le plan est très satisfaisant. Garder Compton, ça fait une belle entrée en matière.
- Intro un peu confuse. Ca fait bizarre de parler à demi-mot de la possibilité de former de nouvelles particules sans trop expliquer puis de reconstruire l'idée au fur et à mesure de la leçon.
- "Y'a des super vidéos de vulgarisation sur le YouTube, n'hésitez pas." c.f. *Je m'énerve pas, j'explique* sur les accélérateurs de particules et le LHC.