

LP06 : DYNAMIQUE RELATIVISTE (L2)

Prérequis

- dynamique newtonienne
- cinématique relativiste
- quadrivecteur position

Idées directrices à faire passer

- équivalence masse-énergie
- intérêt des quadrivecteurs pour être certains d'avoir une écriture covariante
- permet une généralisation de la mécanique classique

Commentaires du jury

- il faut parler de collisions
- le principe d'action réaction est perdu !
- manipuler les quadrivecteurs et passer du temps sur les exemples

Bibliographie

[1] Relativité restreinte, Grossetête, Ellipses

Introduction : Montrer les limites du PFD de la dynamique classique aux hautes énergies. Prendre l'exemple de particules accélérées dans un Van Der Graff. Nous aurons toujours la même préoccupation (qui est celle d'Einstein) : on se base sur la transformation de Lorentz rendant invariante les équations de l'électromagnétisme, mais la mécanique newtonienne doit rester le cas limite basse énergie.

I Relation fondamentale de la dynamique : approche quadrivectorielle

1 RFD relativiste

- la relation s'écrit comme en mécanique classique (on cherche à réécrire le principe d'inertie !)
- en revanche, ce qu'il se cache derrière chacune des grandeurs énoncées peut être différent
- donner la valeur attendue pour E et \vec{p} dans la limite non relativiste
- définir l'énergie cinétique dans ce cas

2 Quadrivecteur impulsion-énergie

- montrer que cette relation conduit à pouvoir former un quadrivecteur impulsion énergie (puisque le pseudo PS entre ce 4-vecteur et le 4-vecteur position est invariant)
- donner la forme du 4-vecteur et rappeler qu'il se transforme par transformation de Lorentz d'un référentiel à un autre

2.1 Cas d'une particule de masse non nulle

- suivre la démonstration du Grossetête :
- se placer dans le référentiel propre, y exprimer le 4-vecteur impulsion-énergie
- appliquer la transformation de Lorentz pour passer dans un référentiel quelconque
- développer aux basses énergies
- en déduire la valeur prise par l'énergie dans le référentiel propre \rightarrow énergie de masse, indépendante du référentiel
- en déduire la relation entre 4-vecteurs $P = mV$
- en déduire la relation fondamentale : $E^2 = m^2c^2 + p^2c^4$
- donner la relation utile : $\vec{v} = c^2 \vec{p} / E$

2.2 Cas d'une particule de masse nulle

- les équations de Maxwell prédisent que le signal lumineux (et donc les photons associés) se propagent à c dans tout référentiel
- montrer alors la nécessité d'une masse nulle
- en déduire alors les relations fondamentales associées aux particules de masses nulles

3 Quadrivecteur force

- redonner les quatre forces fondamentales de l'univers
- préciser qu'en fait, la relativité restreinte ne traite bien que de la force électromagnétique (force de Lorentz)
- suivre la démarche du Grossetête pour avoir une écriture covariante du RFD
- on obtient alors l'expression du 4-vecteur force dans un référentiel quelconque
- cas d'une particule isolée -> formulation relativiste du principe d'inertie : "La ligne d'univers de toute particule libre, soumise à aucune action extérieure est une droite"
- donner sans démonstration la loi de transformation du vecteur force par changement de référentiel -> montrer que la force est invariante dans la limite classique

II Mouvement d'une particule chargée

1 Particule dans E permanent

- donner et appliquer le TEC à une particule chargée
- on obtient la formule classique mais avec une expression différente de E/ec
- en déduire la vitesse d'une particule (faire les cas limites)
- interpréter le graphe proposé en intro
- montrer qu'un électron est facilement relativiste, pas un proton

2 Particule dans B permanent

- déduire d'une approche énergétique que $v^2 = \text{constante}$
- écrire alors le RFD : il ne diffère du cas classique que par le facteur γ
- donner l'équation classique du mouvement
- donner l'expression de la fréquence cyclotron et le rayon qui dans le cas relativiste dépend de la vitesse via le facteur γ

3 Les accélérateurs de particules : cyclotron, synchrocyclotron et synchrotron

- expliquer le principe du cyclotron
- limité par la désynchronisation lors de la montée en énergie
- on a alors conçu des synchrocyclotrons
- le synchrotron adapte par ailleurs l'intensité de son champ B pour garder une trajectoire de rayon constant.

III Chocs entre particules

1 Système isolé de particules

- en relativité il est impossible de définir un quadrivecteur pour un ensemble de particules (puisque la notion de simultanéité n'est pas conservée par changement de référentiel)
- on peut uniquement le faire pour des systèmes sans interaction puisqu'alors la notion de temps n'intervient plus !
- le quadrivecteur somme a toutes les propriétés du 4-vecteur impulsion-énergie
- définir un choc, dire que le 4-vecteur impulsion-énergie total n'est défini qu'avant et après le choc. La notion de simultanéité garde un sens à la condition d'avoir un choc très bref.
- définir chocs élastique/inélastique
- conservation de l'impulsion et de l'énergie totale pendant le choc

2 Dynamique des chocs de particules, chocs élastiques

- pour le moment on se place dans le référentiel galiléen et on étudie les relations classiques pour un choc élastiques
- en déduire en particulier $\vec{P}_1 \cdot \vec{P}_2 - E_1 E_2 / c^2 = \vec{P}'_1 \cdot \vec{P}'_2 - E'_1 E'_2 / c^2$
- appliquer cette équation au cas de la diffusion Compton (après avoir présenté l'expérience, le mode opératoire...)

3 Energie de seuil : possibilité de réactions

- introduire le référentiel de centre de masse
- expliquer la question : on cherche l'énergie disponible pour être transformée en masse -> production de particules lors d'un choc
- préciser que les particules ne peuvent être au repos dans le référentiel du laboratoire
- c'est uniquement vrai dans le référentiel du centre de masse (à définir)
- on cherche le seuil de création de particules (on se place donc dans le cas de particules toutes au repos dans le c.d.m) -> c'est l'énergie disponible dans le c.d.m
- faire le cas 1) collision d'une particule sur une cible 2) collision particule/particule
- faire les calculs sur transparent (manque de temps)
- en fait le calcul est bien plus simple pour une collision particule/particule

Conclusion : bilan de ce qui a été vu, ce qui se passe actuellement au Cern...

Q/R

- 1. Problèmes des collisionneurs par rapport au cible fixe ?** Il faut accélérer les deux faisceaux, probabilité de rencontre bien plus faible
- 2. Différence entre le LEP et le LHC au Cern.** LEP : collision électron/positron, LHC collision proton/antiproton
- 3. Peut on construire une mécanique du solide relativiste ?** Non, la notion de solide indéformable ne peut avoir de sens sans instantanéité.
- 4. Qu'est ce que l'expérience de Bertozzi ?** C'est mon expérience introductive d'accélération d'électrons jusqu'à la limite relativiste.