

Titre : Dynamique Relativiste

Présentée par : Guilhem Mariette

Rapport écrit par : Izia Pétillon

Correcteur : Laurent Le Guillou

Date : 11/12/2020

| Bibliographie | | |
|---|---------------|---------|
| Titre | Auteurs | Éditeur |
| Électromagnétisme | Feynman | |
| Relativité : fondements et applications | Pérez | Dunod |
| Abrégé de relativité restreinte | L. Le Guillou | |

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :
L3

Pré-requis :
Cinématique relativiste

I/ Théorèmes relativistes (~10min)

1) Relation d'Einstein

Rappels sur les quadrivecteurs, expression de l'énergie-impulsion, cas du photon

2) Conservation de la quadri-impulsion

Principe fondamental : la quadri-impulsion totale est conservée

Exemple de la fission nucléaire, ordre de grandeur et vidéo

II/ Cas du photon (~15min)

1) Caractéristiques du photon

Masse nulle, quadri-impulsion d'un photon

Exemple de la voile solaire avec la pression de radiation et ordre de grandeur

2) Effet Compton

Explication du phénomène, schéma et calcul de la différence de longueur d'onde entre le photon incident et émis en fonction de l'angle de diffusion.

Ordre de grandeur pour l'expérience historique de Compton

III/ Cas d'une particule massive (~11min)

1) Quadri-force

Généralisation de la mécanique classique, expression de la quadri-force de Lorentz

2) Mouvement d'une particule chargée

Présentation du cyclotron, principe de fonctionnement, saturation de la vitesse de la particule, rayon cyclotron et ordre de grandeur du TRIUMPF

Conclusion :

Cas des réactions nucléaires, des photons (le phénomène Compton), particules massives grâce à la généralisation de la mécanique classique et cyclotron.

Autre type d'accélérateur : synchrotron comme le LHC.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Q : Pourquoi avoir présenté le photon avant la particule massive puisque vous avez besoin de la particule massive pour l'électron ?

R : Gestion du temps, cyclotron à la fin qui sert de partie tampon

Q : Choix de la métrique, qu'est-ce que ça devient si vous faites le choix différent (1, -1, -1, -1) ?

R : $p^\mu p_\mu = -m^2 c^2$ devient $p^\mu p_\mu = +m^2 c^2$

Q : Pour le photon, on définit souvent un autre quadrivecteur, le quadrivecteur d'onde, pouvez-vous en donner l'expression ?

R : On divise la quadri-impulsion par \hbar pour construire le quadrivecteur d'onde avec $p^\mu p_\mu = +m^2 c^2$

Q : Qu'est-ce qu'il se passe si le système considéré subit une force ?

R : La force peut travailler, et intervenir dans le bilan énergétique : on revient à l'équivalent du théorème de l'énergie cinétique

Q : Relation d'Einstein, pour une particule massive au repos, quel sens vous donnez à E ?

R : $2\pi/\lambda = \omega/c$, au repos E c'est l'énergie de masse qui est contenue dans la cohésion de la particule

Q : Application : réactions nucléaires, fission de l'atome de l'Uranium 235. Vous pouvez écrire le bilan de ce qu'il se passe ? Éclairer d'avantage le rôle du neutron ?

R : $E = \gamma mc^2$

avec $Q = \Delta mc^2$

Q : Comment écririez-vous $E(\text{uranium})$ si l'atome au repos ?

R : $E = mc^2$

Q : Cette énergie Q de réaction, où part-elle ? Que devient-elle ?

R : L'énergie libérée dans la fission de l'uranium 235 part sous forme d'énergie cinétique, emportée par les noyaux fils formés et les neutrons libérés. Les noyaux-fils bousculent les atomes autour d'eux et en quelques collisions chauffent le milieu. C'est pour cela qu'on dit que l'énergie part sous forme de chaleur dans le réacteur, mais c'est bien une énergie cinétique au départ.

Q : Combien de neutrons émis en moyenne ?

R : Ici on présente un exemple de fission avec 2 neutrons émis, et une autre avec 3 neutrons.

Q : Ce sont les seules réactions de fission possibles ?

R : Il peut y avoir des réactions de 0 à 8 neutrons, le plus courant étant 2 ou 3.

Q : Lorsqu'un neutron interagit avec un noyau, est-ce que la fission est la seule réaction possible ?

R : Le noyau d'Uranium est susceptible d'absorber le neutron et devenir de l'Uranium 236

Q : Stabilité des noyaux-fils formés ?

R : Ce sont des noyaux instables en général, car présentant un excès de neutrons, ils se désintègrent en général par émission β^- .

Q : Que vaut Q pour ce type de réaction ?

R : Typiquement 200 MeV pour la fission de l'uranium-235.

Q : Si vous faites le produit scalaire du quadrivecteur d'onde et du quadrivecteur position, qu'est-ce que ça donne ?

R : On retrouve la phase d'une onde associée au photon.

Q : *Quelle particularité a cette expression ?*

R : C'est un invariant de Lorentz.

Q : *Vous avez évoqué une voile solaire, quelle différence entre une voile totalement noire qui absorbe le rayonnement reçu et une voile qui serait totalement réfléchissante ?*

R : L'impulsion transférée par le photon est double dans le cas d'une voile réfléchissante.

Q : *Est-ce que la pression de radiation du soleil est la seule à prendre en compte si on se situe loin de la Terre ?*

R : Il faut aussi prendre en compte les vents solaires, constitués de particules éjectées par le soleil qui ont un effet faible mais non nul.

Q : *Pourquoi l'effet Compton ne peut-il pas être expliqué dans le cadre de l'électromagnétisme de Maxwell ?*

R : On aurait une onde et non pas un photon qui ne possède pas de quantité de mouvement, la diffusion ne dépendrait pas de λ et surtout, la longueur d'onde diffusée serait la même que celle absorbée.

Q : *Est-ce que des photons optiques par exemple d'une longueur d'onde de l'ordre de 500nm pourraient induire l'effet Compton ?*

R : Longueur d'onde suffisamment grande pour que le photon interagisse avec le cortège électronique de l'atome dans son ensemble : c'est la diffusion Rayleigh que l'on traite classiquement.

Q : *Manip Compton ordre de grandeur de longueur d'onde ?*

R : Rayons X, longueur d'onde $< 10^{-10}$ m.

Q : *Ordre de grandeur de l'énergie du photon incident ?*

R : Quelques dizaines de keV à 10^5 keV, en rayons X et gamma.

Q : *Que se passe-t-il lorsque θ est nul ?*

R : Pas d'interaction.

Q : *Pour $\theta = \pi$?*

R : Rétrodiffusion, maximum d'énergie transmise par le photon à l'électron.

Q : *Donnez l'expression générale de la quadri-force en fonction de l'énergie et l'impulsion ?*

R : Attention, Il y a un gamma en facteur ! Idem pour la quadriforce de Lorentz !

Q : *Vous avez évoqué le LHC, pourriez-vous en décrire plus précisément la structure et le principe de fonctionnement ? Comment y crée-t-on le champ \vec{B} ?*

R : Alternance de cavités radiofréquences (champ électrique accélérateur), et de cavités magnétiques pour courber la trajectoire et refocaliser le faisceau. Ne pas dire qu'il y a un immense champ magnétique qui couvrirait toute la zone du LHC (10 km de diamètre !), imaginez la taille des bobines !

Q : *Autre grande limitation dans les accélérateurs circulaires ? Pourquoi a-t-on construit un accélérateur circulaire aussi immense ?*

R : Lorsque les particules sont accélérées avec un rayon de courbure élevé, elles rayonnent, c'est ce qu'on appelle le rayonnement synchrotron. Donc si le rayon de courbure est trop important, toute l'énergie fournie aux particules est immédiatement perdue via ce rayonnement. Par contre, on peut aussi utiliser un tel accélérateur comme source intense de rayons X et gamma (exemple : l'ESRF à Grenoble).

C'est par contre limitant lorsqu'on veut accélérer des particules, d'où le besoin de construire des accélérateurs aussi grands pour augmenter le rayon de courbure et pouvoir monter très haut en énergie.

Commentaires lors de la correction de la leçon

- Bon plan, mais il est gênant de présenter l'effet Compton (diffusion d'un photon sur une particule chargée possédant une masse, comme l'électron) sans avoir encore traité les particules massives.
- Rappel peut-être un peu trop rapide sur les quadrivecteurs, vous l'avez fait mais peut-être rajouter un développement sur l'énergie.
- Vous avez utilisé la métrique opposée que celle j'utilisais mais ça n'a pas d'importance en soi. Il faut juste veiller à avoir une présentation cohérente. Il est préférable d'utiliser les métriques « + - - - » ou « - + + + », et éviter les conventions à bases de nombres imaginaires qu'on trouve parfois dans certains vieux ouvrages de relativité, et qui essaient de masquer ainsi le fait que l'espace-temps n'est pas euclidien.
- Énergie au repos très important, il faut bien insister sur cette notion qui fait toute la différence avec la mécanique classique : en relativité il y a conservation de l'énergie totale (énergie cinétique et de masse), et pas conservation de l'énergie cinétique d'une part, et de la masse d'autre part. C'est choquant et il faut en parler.
- Attention à bien être au clair sur l'énergie Q produite dans une réaction nucléaire, par exemple de fission.
- Nombre de neutrons émis lors d'une fission de l'uranium-235 : entre 0 et 8, même si typiquement 2 ou 3 neutrons sont émis... Dans certaines réactions rares, un des noyau fils émet spontanément un neutron quelques secondes / dizaines de secondes après son apparition : c'est ce qu'on appelle un *neutron retardé*. C'est la faible fraction de neutrons retardés qui permet de contrôler la réaction en chaîne dans une centrale.
- Stabilité des noyaux fils : vallée de stabilité, lorsqu'on casse un noyau d'uranium 235, on produit des noyaux qui sont en général en dehors de la vallée de stabilité, excédentaires en neutrons. Ils se stabilisent en général par une cascade désintégrations bêta, et plus rarement par émission d'un neutron (neutrons dits *retardés*).
- Pendant votre calcul de l'effet Compton, et de manière générale, attention à ne pas s'emmêler dans les signes devant le jury. Donner un ordre de grandeur de la longueur d'onde pour l'expérience de Compton.
- À $\theta = 0$ il n'y a juste pas eu d'interaction.
- Insister sur l'interprétation du résultat : effet Compton totalement inexplicable par Maxwell, aucun moyen d'expliquer la différence de longueur d'onde. Il faut invoquer le fait que la lumière possède aussi un aspect corpusculaire, et que le photon transporte à la fois une quantité finie d'énergie et une quantité de mouvement. Retour de l'idée de la lumière sous forme de corpuscule, il faut insister davantage.

- Présenter le tenseur du champ électromagnétique sortirait complètement du cadre de cette leçon. Si vous présentez la quadri-force (pas nécessaire), attention à bien mettre le facteur gamma devant.
- D'un point de vue pédagogique, peut-être d'abord présenter le comportement d'une particule chargée dans un champ électrique constant et uniforme, et montrez que la vitesse qui sature et tend vers c . Présenter ensuite le comportement dans un champ magnétique : dans ce cas le comportement est analogue : il n'y a pas de grande différence hormis un facteur gamma dans la fréquence synchrotron. Présenter seulement ensuite le cyclotron plutôt que tout parachuter d'un coup.
- Attention au vocabulaire : « Rayon de translation maximal »... il s'agit ici d'une rotation !
- On peut évoquer l'expérience de Bertozzi plutôt que le cyclotron pour parler de la saturation de la vitesse.
- Attention, si vous parlez du LHC, il faut bien savoir l'expliquer : ne pas oublier que l'accélérateur fait presque 10 km de diamètre, avec des maisons, des habitants, des routes, des champs au dessus de l'anneau souterrain...
- Effet Compton en UV-visible, l'onde a une longueur d'onde suffisamment grande pour interagir avec tout l'atome, c'est la diffusion Rayleigh. Il faut une longueur d'onde plus faible pour pouvoir commencer à sonder à plus petite échelle et interagir avec les électrons et que l'effet Compton devienne dominant.
- Pour un photon d'énergie supérieure, le processus dominant sera la création de paires $e^+ e^-$.
- Attention à vos explications concernant la distribution angulaire de l'effet Compton. Par exemple, la rétrodiffusion Compton existe et sa probabilité n'est pas nulle : on l'observe par exemple quand on enregistre un spectre gamma avec un scintillateur : on observe un plateau Compton (photons ayant fait un effet Compton dans le détecteur) et un pic dit « de rétrodiffusion » (photons ayant fait un effet Compton ailleurs dans la pièce, et photons diffusés à $\sim 180^\circ$ qui parviennent au détecteur). Il vaut mieux dire qu'on ne sait pas plutôt que se lancer dans des explications sans être trop sûr.

Partie réservée au correcteur

Certaines remarques ci-dessous reprennent certains des commentaires précédents.

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Le plan de la leçon est raisonnable. Cependant, discuter du photon avant les particules massives pose problème lorsqu'il s'agit de traiter l'effet Compton dans la partie sur le photon. Inverser les deux parties pourrait résoudre ce problème, ou découper différemment la leçon.

Il est important de bien maîtriser les exemples que vous utiliser pour illustrer votre propos : par exemple, la fission nucléaire de l'uranium-235 (notamment ce que devient l'énergie dégagée, qui part essentiellement sous forme d'énergie cinétique des produits de la réaction), ou encore le principe de base du fonctionnement du LHC (qui est un accélérateur assez complexe à décrire, très loin du principe basique du synchrotron qu'on trouve dans les bouquins de relativité...).

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Lors de l'exposé sur le quadrivecteur énergie-impulsion, il est important de discuter ce que devient l'expression de l'énergie en relativité restreinte, et de prendre le temps de distinguer énergie totale, énergie de masse (au repos) et énergie cinétique. L'existence de l'énergie au repos est une des différences fondamentales avec la mécanique classique, et les conséquences pratiques sont considérables (énergie nucléaire, etc).

Attention à bien maîtriser le calcul de l'effet Compton : en utilisant les quadrivecteurs énergie-impulsion du photon et de l'électron, le calcul peut s'effectuer efficacement en quelques lignes.

Il n'est pas indispensable d'introduire le quadrivecteur « force de Lorentz », ni même le concept de quadriforce. Par contre, si vous le faites, il faut faire attention à sa forme exacte : en particulier, il y a un facteur gamma, à la fois dans l'expression générale de la quadriforce comme dans celle de la quadriforce de Lorentz qu'il ne faut pas omettre. On pourrait dériver proprement la quadriforce de Lorentz en utilisant le tenseur du champ électromagnétique, mais ce serait très au-delà du programme de cette leçon d'agrégation.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Il n'y a hélas pas beaucoup d'expériences qui soient réalisables en pratique dans le cadre d'une leçon d'agrégation pour illustrer la théorie de la relativité restreinte. Discuter les expériences historiques (par exemple ici, l'expérience de Bertozzi) peut être un bon substitut.

Bibliographie conseillée :

- D. Langlois, « *Introduction à la relativité* », Vuibert (2011)

L'ouvrage de David Langlois est une très bonne introduction aux concepts de la théorie de la relativité, utilisant les notations modernes et qui couvre l'ensemble des notions de relativité utiles pour l'agrégation.

- Y. Simon, « *Relativité restreinte* », Armand Colin (1971)

C'est un ouvrage un peu ancien, mais la présentation et l'analyse détaillée des expériences historiques (sous forme d'exercices avec une correction très détaillée) est très bien faite.