



Faculté de Physique : L.M.D

Licence de Physique:
L 3



Relativité Restreinte

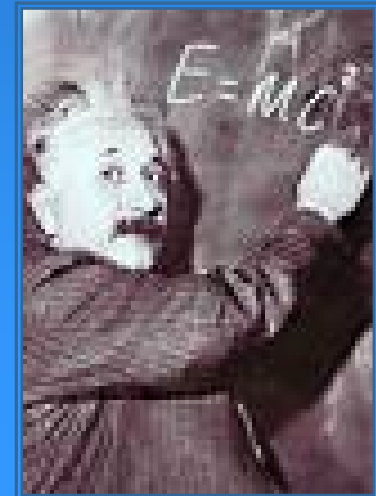
Chapitre 3

Dynamique Relativiste

La masse et l'énergie ne sont que des manifestations différentes de la même chose.

Albert Einstein

Mohamed BENDAOU : Professeur



I. Dynamique newtonienne

I. 1. Rappel de quelques lois de la mécanique classique.

Soit, dans un référentiel d'inertie (R) , une particule de masse m animée d'une vitesse : $\vec{V}$

A l'instant t la particule se trouve en un point M tel que:

$$\overrightarrow{OM} = \vec{r}$$

O est l'origine dans (R) .

A cette particule on associe un vecteur:

$$\vec{p} = m \vec{V}$$

1

appelé “quantité de mouvement” ou “impulsion” de la particule.

Si la particule est *libre*, c'est à dire si elle n'est soumise à *aucune action extérieure*, sa *quantité de mouvement* est *conservée* au cours du mouvement, et ce dernier est rectiligne et uniforme: C'est le **principe de l'inertie**.

Par contre lorsque la particule est soumise à une *action extérieure*, son mouvement varie: A chaque instant dt sa quantité de mouvement varie d'une quantité $\overrightarrow{dp}$

telle que: $\overrightarrow{dp} = \overrightarrow{F} \cdot dt$ où $\overrightarrow{F} = \frac{\overrightarrow{dp}}{dt}$ 2

est, par définition, la “force” qui agit sur la particule:

En mécanique classique on peut écrire:

$$\overrightarrow{F} = \frac{d(m \overrightarrow{V})}{dt} = m \frac{d\overrightarrow{V}}{dt} = m \overrightarrow{\Gamma}$$

$\overrightarrow{\Gamma}$ est l'accélération de la particule à l'instant t .

$$\overrightarrow{F} = m \overrightarrow{\Gamma}$$

est la *relation fondamentale* de la dynamique newtonienne.

Cette dernière n'est plus valable en dynamique relativiste,
Par contre l'expression (2), qui définit la force, reste valable

Dans le référentiel (R) le “travail” élémentaire dW de la force $\vec{F}$ qui agit sur la particule de masse m le long d'un déplacement élémentaire $\vec{dr}$ est, par définition:

$$dW = \vec{F} \cdot \vec{dr}$$

où: $\vec{dr} = \vec{V} dt$


$$dW = \frac{d\vec{p}}{dt} \cdot \vec{V} dt = m \vec{V} d\vec{V} = d\left(\frac{1}{2} m V^2\right) = dE_c$$

où :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

est “*l'énergie cinétique*” de la particule dans le référentiel (R) . .

Cette expression cesse d'être valable lorsque la vitesse n'est plus négligeable devant c .

$$\vec{F} \cdot \vec{dr} = dE_c$$

$$\vec{F} \cdot d\vec{r} = dE_c$$

et lorsque la particule se déplace de M_1 à M_2 dans (R) , le *travail* effectué par la force $\vec{F}$

est

$$W = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} = E_{c2} - E_{c1}$$

E_{c1} et E_{c2} désignent les valeurs de *l'énergie cinétique* en M_1 et M_2

D'où le théorème de l'énergie cinétique:

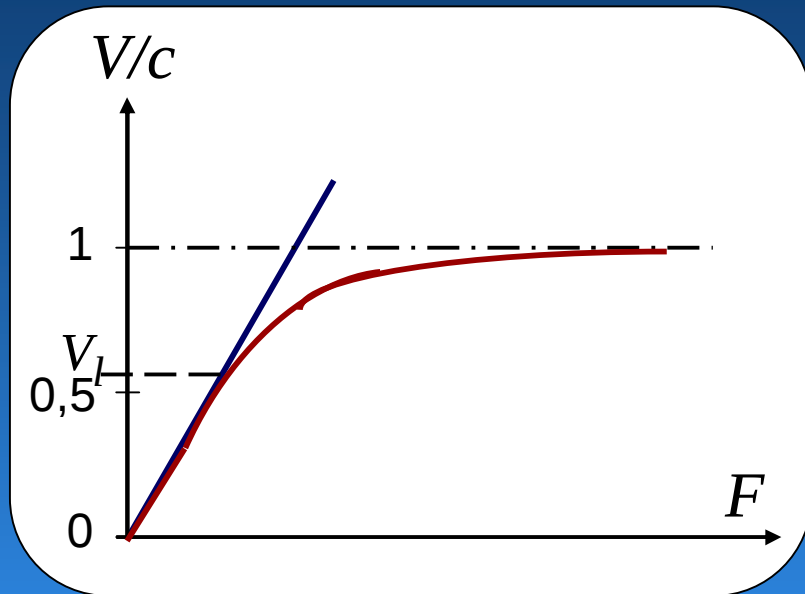
Le travail d'une force quelconque qui agit sur une particule, dans un référentiel galiléen, est égal à la variation de l'énergie cinétique de cette particule.

Si la force dérive d'un potentiel E_p , on montre que *l'énergie totale de la particule*

$$E = E_c + E_p$$

est conservée au cours du mouvement

I. 2. Limites des lois de la dynamique classique.



La vitesse V d'une particule soumise à une force F constante (voir Exercice) **ne croît plus linéairement** en fonction du temps dès qu'elle atteint une certaine valeur V_l et tend vers une limite $V = c$.

Les lois de la dynamique newtonienne ne sont plus valables lorsque la vitesse dépasse une valeur limite V_l .

Il faut alors élaborer d'autres lois en utilisant la transformation de Lorentz.

I I. Impulsion & Energie en Relativité

II. 1. Quadrivecteur Impulsion-Energie.

Soit une particule animée d'une vitesse $\vec{V}$ dans un repère galiléen (R) .

Associons à cette particule :

- un vecteur impulsion $\vec{p}$
- une Energie E

Dans (R) , toute variation élémentaire, pendant dt , de l'impulsion $\vec{dp}$ de la particule, est due à l'action d'une force: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

Pendant ce temps *l'énergie* E de la particule varie de $dE = \vec{F} \cdot \vec{dr}$
où $\vec{dr} = \vec{V} dt$ représente le déplacement élémentaire de la particule.

$$\longrightarrow dE = \frac{d\vec{p}}{dt} \cdot \vec{dr} \qquad \longrightarrow \vec{dp} \cdot \vec{dr} - dE \cdot dt = 0$$

Soit :

$$\vec{dp} \cdot \vec{dr} - \frac{dE}{c} \cdot c dt = 0$$

Cette expression apparaît comme le produit pseudo scalaire du *quadrivecteur position* élémentaire

$$d\vec{R} = (d\vec{r}, c \cdot dt)$$

et de l'élément différentiel d'un *quadrivecteur*

$$\vec{P} = (\vec{p}, \frac{E}{c})$$

appelé quadrivecteur "*Impulsion-Energie*"

II. 2. Equations de la dynamique relativiste.

Impulsion & Energie .

Soit une particule en mouvement dans un repère galiléen (R)
à la vitesse $\vec{V}$ *variable*

Au cours d'un instant infiniment petit dt la vitesse $\vec{V}$
peut être considérée constante (voir chapitre II).

Soit un repère (R_0) lié à la particule, ce dernier est, pendant le temps dt , en mouvement de translation uniforme par rapport à (R) ,

On peut appliquer la transformation de Lorentz au 4-vecteur **Impulsion-Energie**.

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{p}_{//} = \gamma_0 \left(\vec{p}_{o//} + \frac{\vec{V}}{c} \frac{E_o}{c} \right) \\ \vec{p}_{\perp} = \vec{p}_{o\perp} \\ \frac{E}{c} = \gamma_0 \left[\frac{E_o}{c} + \frac{\vec{V}}{c} \cdot \vec{p}_o \right] \end{array} \right. \quad \text{avec :} \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_o^2}} \\ \beta_o = \frac{V}{c} \end{array} \right.$$

La particule est immobile dans le repère (R_0) , donc:

$$\vec{p}_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{p}_{//} = \gamma \left(\frac{\vec{V}}{c} \frac{E_0}{c} \right) \quad \vec{p}_\perp = 0$$

D'autre part E_0 est l'énergie de la particule dans (R_0) où elle est immobile.

C'est donc l'Energie de la particule au repos". ou "Energie propre de la particule". C'est une constante

il vient:

$$\vec{p} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} \frac{\vec{V}}{c^2}$$

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} \quad (3)$$

Si $V \ll c$

On fait un développement limité

$$\vec{p} \approx \left[1 + \frac{1}{2} (V/c)^2 \right] \frac{E_0}{c^2} \vec{V} \approx \frac{E_0}{c^2} \vec{V} \quad \left| \quad E \approx \left[1 + \frac{1}{2} (V/c)^2 \right] E_0 \approx E_0 + \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2} E_0$$

En mécanique newtonienne

$$\vec{p} = m_0 \vec{V}$$

$$E_0 = m_0 c^2$$

Avec

(3)

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{V}}{\sqrt{1 - (V^2/c^2)}}$$

Si on écrit:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

Les expressions de l'impulsion & de l'énergie deviennent

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

&

$$E = m c^2$$

Remarque: Certains auteurs rejettent le concept de masse variable. Pour eux la masse ***m*** est une grandeur caractéristique de la particule et ne peut en aucun cas dépendre de son état cinématique.

Par contre, d'autres auteurs, Einstein et Feynman par exemple, estiment que la grandeur physique ***m***, qui représente l'aptitude de la particule à résister à toute variation de vitesse, doit être considérée comme une masse.

Nous désignons par ***m₀*** la masse de la particule au repos, et par ***m*** sa masse lorsqu'elle atteint la vitesse ***v***

La ***vitesse*** de la particule s'exprime en fonction de l'***impulsion*** et de l'***énergie***, par

$$\vec{v} = \frac{c^2}{E} \vec{p}$$

Energie cinétique.

Si $V \ll c$

Nous avons vu que:

$$E \approx E_0 + \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2} E_0$$

Et avec

$$E_0 = m_0 c^2$$

$$E \approx E_0 + \frac{1}{2} m_0 V^2$$

Le 2^{ème} terme représente l'énergie cinétique, en mécanique newtonienne, d'une particule animée d'une vitesse V et la constante E_0 est son énergie propre (*)

En mécanique relativiste on définit "l'énergie cinétique" par:

$$E_c = (m - m_0) c^2$$

Le théorème de l'énergie cinétique, énoncé dans le cadre de la mécanique newtonienne, reste valable en mécanique relativiste

(*) On sait qu'en mécanique classique l'énergie est définie à une constante près, en relativité cette constante est déterminée: C'est l'énergie propre de la particule.

Equivalence de la masse et de l'énergie.

L'expression

$$E_o = m_o c^2$$

est la célèbre formule

qui établit l'équivalence entre la masse et l'énergie

Ainsi la masse peut être transformée en énergie.

Une masse de 1 gramme renferme une énergie

$$E = 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 9 \cdot 10^{13} \text{ Joules}$$

c'est l'énergie que fournirait la combustion de 3000 tonnes de charbon.

“ Comment se fait-il que cela n'ait pas été remarqué auparavant ?”

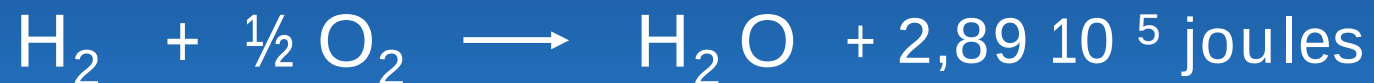
Einstein :

“ Tant que l'énergie n'est pas émise extérieurement elle ne peut être observée. C'est comme un homme fabuleusement riche qui ne dépense ni ne donne jamais rien; personne ne peut savoir combien il est riche”.

En effet

Les énergies mises en jeu dans les réactions chimiques sont insignifiantes par rapport à celles que renferment les atomes qui interviennent dans les réactions.

Ainsi la formation d'une *molécule d'eau* est obtenue à partir de la réaction *fortement exothermique*:



18 grammes de matière (2 g d'hydrogène et 16 g d'oxygène)
cèdent au milieu extérieur $E = 289\,000$ Joules.

Cette énergie équivaut à une **variation de masse** $\Delta E = mc^2$:

$$\Delta m = \frac{2,89 \cdot 10^5}{9 \cdot 10^{16}} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ Kg} \quad \longleftrightarrow \quad \frac{\Delta m}{m} = \frac{3 \cdot 10^{-12}}{18 \cdot 10^{-3}} = 1,7 \cdot 10^{-10}$$

Il est impossible de déceler cette variation de masse.

C'est la raison pour laquelle la **loi de Lavoisier** qui exprime le principe de la conservation de la masse, reste valable en chimie

Exercice

La fission de l'Uranium est déclenché dans les réacteurs nucléaires, par la collision d'un neutron lent avec un noyau d'Uranium U^{235} Cette réaction nucléaire



produit deux noyaux plus légers et deux neutrons rapides, elle entraîne une perte de masse de l'ordre de un millièème.

$$\text{On trouve } E = \Delta m c^2 = 9.10.10^{10}$$

Ainsi l'énergie libérée par le noyau est énorme. Laissons Einstein poursuivre sa comparaison entre l'atome et l'avare.

" L'atome est le riche avare qui, pendant sa vie, ne dépense point d'argent (énergie), mais dans son testament il lègue sa fortune à ses deux fils, sous la condition qu'ils donnent une petite somme à la communauté, moins d'un millième de toute sa fortune.

La fortune des deux fils est un peu moindre que celle qu'avait possédée le père, mais la part donnée à la communauté, bien que relativement petite, est encore tellement énorme qu'elle porte en elle une grande menace de malheur.

Détourner cette menace est devenu le problème le plus urgent de notre temps".

Ces lignes, écrites en avril 1946, soit une année après le largage des deux bombes atomiques sur les villes japonaises de Hiroshima et Nagasaki, montrent l'inquiétude d'Einstein devant l'utilisation, à des fins néfastes, de l'une de ses découvertes.

Expression de l'énergie en fonction de l'impulsion.

On sait que (ch II) $\vec{V}^2 = -c^2$ avec $\vec{V} = (\gamma_0 \vec{V}, \gamma_0 c)$

Ecrivons $m_0 \vec{V} = (\gamma_0 m_0 \vec{V}, \gamma_0 m_0 \frac{c^2}{c})$ soit $m_0 \vec{V} = (\vec{p}, \frac{E}{c})$

d'où $\vec{P} = m_0 \vec{V}$

Avec les quadrivecteurs, on retrouve des formules analogues à celles de la mécanique newtonienne

$$\left. \begin{array}{l} \vec{P}^2 = -m_0^2 c^2 \\ \vec{P} = (\vec{p}, \frac{E}{c}) \end{array} \right| \longrightarrow p^2 - \frac{E^2}{c^2} = -m_0^2 c^2$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Exercice

Dans un accélérateur de particules, le champ électrique E est créé par une différence de potentiel U .

1°) Etudier, en utilisant les lois de la dynamique relativiste, l'évolution de la vitesse V en fonction de la tension d'accélération U .

Retrouver les résultats de la mécanique classique lorsque U est faible.

2°) Tracer les courbes $V/c = f(U)$ dans le cas :

- de l'électron $e = - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$ $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$

- du proton $q = + 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$ $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$

A partir de quelles tensions doit-on appliquer les lois de la mécanique relativiste dans ces deux cas. $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

II. 3 . Impulsion & Energie du photon.

En *mécanique ondulatoire*, on associe à une onde électromagnétique, des particules appelées "*photons*", qui se déplacent , dans le vide, à la vitesse c quelque soit le référentiel **(R)** considéré.

Ces particules ne sont par conséquent jamais au repos.

Si on considère les expressions :

$$\vec{p} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \vec{v} \quad \text{et} \quad E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

on constate que lorsque $V = c$ les valeurs de $\vec{p}$ et E deviennent infinies sauf si

$$m_0 = 0$$

Un photon est une particule dont la masse est nulle .

L'expression de l'énergie s'écrit dans le cas du photon

$$E = p c$$

En mécanique quantique l'énergie est quantifiée

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

h constante de Planck et $\hbar = h / 2\pi$

D'autre part :

$$E = p c$$

$$p = \hbar \frac{\omega}{c} \quad \text{soit} \quad p = \hbar k$$

Pour des raisons de symétrie $\vec{p} \parallel \vec{k}$ donc :

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

Multiplions le quadri vecteur d'onde par $\hbar$

$$\hbar \vec{K} = (\hbar \vec{k}, \hbar \frac{\omega}{c}) = (\vec{p}, \frac{E}{c}) = \vec{P} \quad \longrightarrow \quad \vec{P} = \hbar \vec{K}$$

comme

$$\vec{K}^2 = 0$$



$$\vec{P}^2 = 0$$

Exercice

A une **onde électromagnétique** Einstein a associé des particules (**photons**) de masse $m_0 = 0$ et animées, dans le vide, d'une vitesse c .

De même à un faisceau de **particules matérielles** de masse m_0 non nulles, et animées d'une vitesse V , Louis de Broglie a associé une **onde de matière**. L'énergie et l'impulsion, associées à ces particules matérielles, vérifient les relations :

$$E = h \nu = \hbar \omega \quad \text{et} \quad \vec{p} = \hbar \vec{k}$$

1°) Montrer qu'il n'y a pas de phénomène de **dispersion** dans le vide dans le cas des photons.

2°) Trouver la formule de **dispersion** dans le cas d'une onde de matière,

En déduire la **vitesse de phase** et la **vitesse de groupe**.



Louis de Broglie

1892 - 1987

Solution

1°) Dans le cas du **photon**

$$\left. \begin{array}{l} E = \hbar \omega \quad \text{et} \quad \vec{p} = \hbar \vec{k} \\ \text{D'autre part} \quad E = p c \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{\omega = c k}$$

La relation $\omega = f(k)$ est **linéaire**, par conséquent il **n'y pas de dispersion**.

2°) Dans le cas d'une **onde de matière** on a:

$$\left. \begin{array}{l} E = m c^2 = \hbar \omega \\ p = m V = \hbar k \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{On divise membre à} \\ \text{membre} \end{array} \Rightarrow \boxed{v_{\phi} = \frac{\omega}{k} = \frac{c^2}{V}}$$

La vitesse de phase n'est pas égale à la vitesse V des particules

Pour avoir la formule de dispersion, on part de l'expression

$$E^2 = p^2 c^2 + m_o^2 c^4$$

avec

$$\left. \begin{array}{l} E = \hbar \omega \\ \vec{p} = \hbar \vec{k} \end{array} \right| \rightarrow \hbar^2 \omega^2 = \hbar^2 k^2 c^2 + m_o^2 c^4$$



$$\omega^2 = k^2 c^2 + \frac{m_o^2 c^4}{\hbar^2}$$

$\omega = f(k)$ n'est pas linéaire. Il y a donc un phénomène de dispersion

$$\left. \begin{array}{l} \text{En différentiant, il vient: } \omega \cdot d\omega = c^2 k \cdot dk \\ v_g = \frac{d\omega}{dk} = c^2 \frac{k}{\omega} \end{array} \right\} \Rightarrow v_g = \frac{c^2}{v_\phi}$$

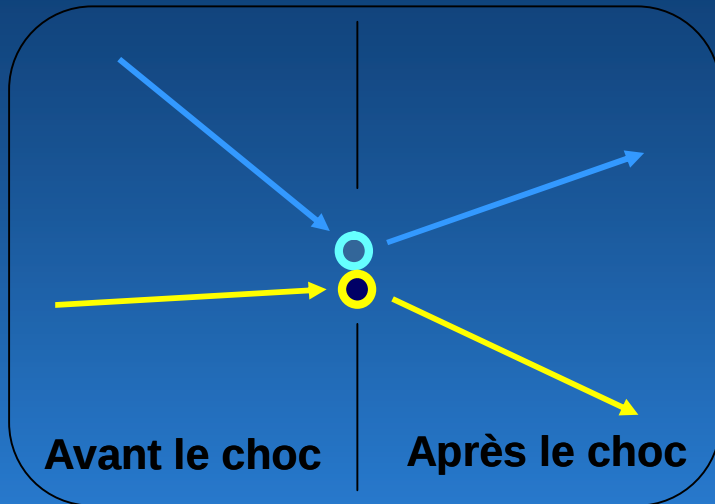
En remplaçant v_ϕ par sa valeur, on obtient:

$$v_g = V$$

La vitesse du groupe d'ondes est égale à la vitesse des particules.

III. Interactions entre particules

Considérons des *particules libres* qui , à un instant donné, se heurtent.



Au cours de ce choc elles entrent en interaction pendant **un temps très bref**, ce qui se traduit par une **variation** des **impulsions** et des **énergies**.

Puis elles **reprennent un mouvement rectiligne et uniforme**, et se comportent de nouveau comme des particules libres.

Le *choc est élastique* si :

- le nombre de particules est le même avant et après le choc.

L'énergie cinétique est *conservée* après le choc.

Le *choc est inélastique* dans le cas contraire:

- Réaction de capture,
- Désintégration,
- Création de nouvelles particules au cours du choc....

Dans **tout référentiel d'inertie**, et quelque soit la nature du choc, nous devons vérifier les lois de:



- la conservation de l'impulsion



- la conservation de l'énergie



- la conservation de la charge

avant et après le choc.

L'étude du phénomène sera faite dans 2 référentiels d'inertie :



Le **référentiel du laboratoire** (L) lié à l'expérimentateur, ce dernier, bien que lié à la Terre, **peut être considéré comme galiléen**.



Le **référentiel** (C) lié au **centre de masse** des particules.



Le **référentiel du laboratoire** (L) :

Les deux premières lois de conservation s'écrivent:

$$\sum_i \vec{p}_i = \sum_i \vec{p}_i',$$

&

$$\sum_i E_i = \sum_i E_i'$$

- Le premier membre comporte les valeurs des grandeurs avant le choc,
- et le second les nouvelles valeurs de ces grandeurs après le choc

Ces expressions montrent que le **quadrivecteur impulsion-énergie** est conservé.

$$\sum_i \vec{P}_i = \sum_i \vec{P}_i'$$



Le référentiel du centre de masse (C)

En mécanique newtonienne le centre de masse C dans (L) est tel que:

$$\vec{OC} \sum_i m_i = \sum_i m_i \vec{OM}_i$$

Si on dérive par rapport au temps, on a :

$$\vec{V}_C \sum_i m_i = \sum_i m_i \vec{V}_i = \sum_i \vec{p}_i$$

Dans le référentiel du centre de masse (C) *l'impulsion totale est nulle*

En effet

$$\vec{V}_C^* = 0$$



$$\sum_i \vec{p}_i^* = 0$$

Toutes les grandeurs repérées dans (C) porteront un astérisque.

En **mécanique relativiste** on définit aussi *un référentiel du centre de masse* , (C) dans lequel *l'impulsion totale du système est nulle*:

$$\sum_i \vec{p}_i^* = 0$$

On montre alors que:

Le centre de masse se déplace par rapport à l'observateur O de (**L**) à la vitesse:

$$V_c = c^2 \frac{\sum_i \vec{p}_i}{\sum_i E_i}$$

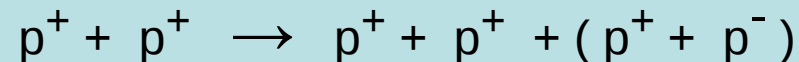
Cette expression est analogue à celle obtenue dans le cas d'une seule particule.

Avant & après un choc entre particules:

$$\sum_i \vec{p}_i^* = \sum_i \vec{p}_i'^* = 0$$

Exercice Dans le référentiel (L) du laboratoire un proton p^+ arrive avec une vitesse V_1 sur un proton immobile ($V_2 = 0$).

1°) Quelle doit être l'impulsion minimale du proton incident pour que la réaction



soit possible?

En déduire la vitesse $V_1 = V$ qui correspond à cette impulsion.

Au cours de cette réaction une partie de l'énergie cinétique sert à créer une paire proton-antiproton. L'antiproton p^- est une particule de même masse que le proton et de charge opposée. L'énergie seuil est atteinte lorsque les 4 particules, sont immobiles, après le choc, dans (C)

2°) Calculer cette énergie cinétique en Joules et en Electron-Volts. En déduire la tension d'accélération qui permet d'obtenir cette énergie.

IV. Applications

IV. 1. Effet Compton

IV. 2. Effet Cerenkov

IV. Applications

Effet Compton.

Phys. Rev. 22,409, (1923)

Arthur H. Compton 1892 1962



L'effet Compton concerne **la diffusion** d'une **onde électromagnétique** par les **électrons** de la matière.

Cette diffusion se fait avec un changement de fréquence $\nu \rightarrow \nu'$

L'énergie du rayonnement incident

$$E = h \nu \approx 18000 \text{ eV}$$

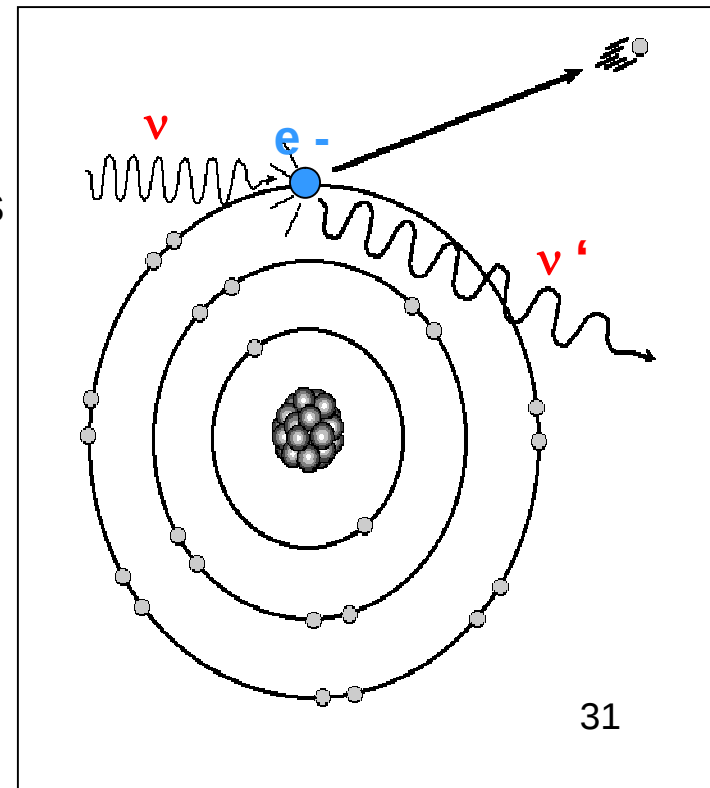
est largement supérieure à l'énergie de liaison des électrons externes de l'atome de carbone.

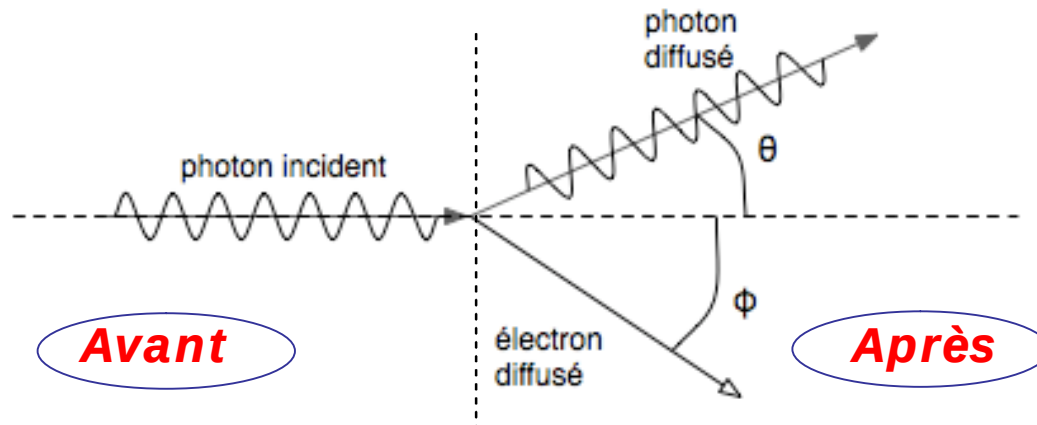
Ainsi on peut supposer que ces électrons se comportent comme s'ils étaient libres et considérer un problème de:

choc entre un **photon** incident de longueur d'onde :

$$\lambda = 0,71 \text{ \AA}$$

et un **électron** au repos.





Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

Bilan

Energie

$$E + m_0 c^2 = E' + c \sqrt{p'^2_2 + m_0^2 c^2}$$

Impulsion

$$\vec{p}_1 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$$



$$\vec{p}'_2 = \vec{p}_1 - \vec{p}'_1$$

Avant le choc	Impulsion	Energie
photon	$p_1 = \frac{E}{c}$	$E_1 = E$
électron	$p_2 = 0$	$E_2 = m_0 c^2$

Après le choc	Impulsion	Energie
photon	$p'_1 = \frac{E'}{c}$	$E'_1 = E'$
électron	p'_2	$E'_2 = c \sqrt{p'^2_2 + m_0^2 c^2}$

On élève au carré les 2 membres de: $\vec{p}'_2 = \vec{p}_1 - \vec{p}'_1$

$$p'^2_2 = p^2_1 + p'^2_1 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}'_1 \Rightarrow p'^2_2 = \frac{E^2}{c^2} + \frac{E'^2}{c^2} - 2 \frac{E E'}{c^2} \cos \theta$$

A partir du bilan des énergies

$$(E - E') + m_0 c^2 = c \sqrt{p'^2_2 + m_0^2 c^2}$$

On élève au carré, on remplace p'^2_2 par sa valeur, on divise par $E E' m_0 c^2$

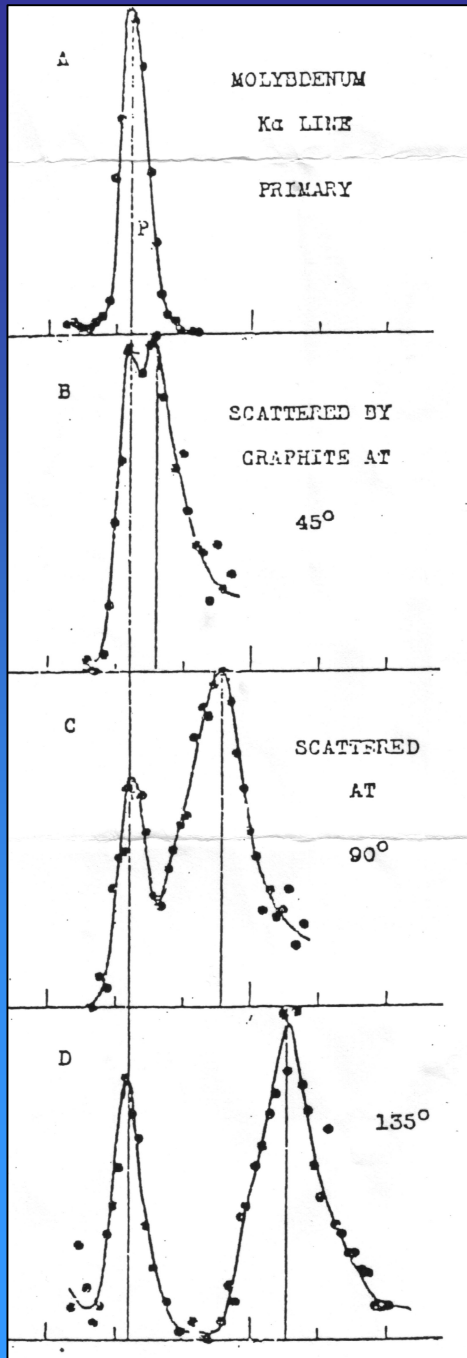
$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)$$

$$\boxed{E = \frac{h c}{\lambda}} \Rightarrow \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

$$\boxed{\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)}$$

$$\lambda_c = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ mètre}$$

longueur d'onde de Compton³³



Dans l'expérience le rayonnement est produit dans un **tube de rayons X**, ayant une cible de **molybdène**, et soumis à une différence de potentiel de l'ordre de **50 000 volts**.

Le rayonnement incident correspondant à la raie Ka du Molybdène, de longueur d'onde:

$$\lambda = 0,71 \text{ \AA} ,$$

arrive sur une **cible de graphite**, et est diffusé sous plusieurs angles.

Les résultats expérimentaux, obtenus par Compton sont représentés sur la figure ci-contre

L'**intensité** est portée en ordonnée,

et l'abscisse est proportionnelle à la **longueur d'onde** λ