REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA

FACULTE DES SCIENCES

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Physique Computationnelle

Par

SMAILI Amira

Sur le thème

Étude des Boson de Higgs et problème de masse

Soutenu le 22/06/2022 devant le jury composé de :

Mr Kouidri Ismail	Examinateur	M.C.	U. Saida
Mr Abada Ahmed	Rapporteur	M.C.	U. Saida
Pr. LASRI Boumediene	Président	M.C.	U. Saida

Année Universitaire 2021 – 2022

Remerciement

Tout d'abord nous tenons à remercier *Allah* tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude et gratitude à notre directeur de thèse, Dr. Ismail Kouidri, pour son encadrement, ses conseils et ses sacrifices pour donner le meilleur et pour assurer le suivi pendant la période de préparation de notre thèse d'étude et pour m'avoir accordé leur confiance en la matière. Le succès de ce projet. Merci, j'ai développé mes compétences dans plusieurs domaines notamment concernant la masse des particules, pour rédiger des articles scientifiques.

Je voudrais remercier tous les membres du jury pour avoir consacré du temps à la révision de cette thèse et pour leur présence à ma soutenance. Pour avoir accepté de juger ce manuscrit, j'exprime ma gratitude aux rapporteurs, M. Ahmed Abada et Pr. LASRI Boumediene.

Nous adressons nos sincère remerciements à tous les professeurs qui par leurs conseils et leurs efforts durant tous les années passées nous sommes là, vraiment un grand remerciement pour leurs qualité d'enseignement qui nous a été dispensé.

Dédicace

En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce modeste travail avec une grande fierté à tous ceux qui me sont chers :

*Ma très chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

*Mon très cher père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

** Que Dieu vous bénisse ma mère et mon père, et que le succès soit toujours à ma portée afin que je puisse vous combler de bonheur.

*Mon chère frère et mes belles sœurs puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite.

A toute ma famille.

Résumé

Le **boson de Higgs**, connu aussi sous d'autres noms comme **boson BEH** , est une particule élémentaire dont l'existence, postulée indépendamment en 1964 par François Englert et Robert Brout, par Peter Higgs et par Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen et Thomas Kibble, permet d'expliquer la brisure de l'interaction unifiée électrofaible (EWSB, pour l'anglais *electroweak symmetry breaking*) en deux interactions par l'intermédiaire du mécanisme de Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble et d'expliquer ainsi pourquoi certaines particules ont une masse et d'autres n'en ont pas[9]. Son existence a été confirmée de manière expérimentale en 2012 grâce à l'utilisation du LHC et a conduit à l'attribution du prix Nobel de physique à François Englert et Peter Higgs en 2013.

L'Origine de la masse Plusieurs questions ont été posées concernant, entre autres, le mécanisme et la masse des bosons. Pour apporter une réponse à ces questions, la notion de brisure de symétrie est introduite, dans la théorie électrofaible.

Table des matières

Chapitre III La masse selon Peter_Higgs d'où provienne ?

Liste des Abréviations

QED : électrodynamique quantique

QCD : la chromodynamique quantique (est une théorie physique qui décrit l'interaction forte, l'une des quatre force fondamentales, qui permet de comprendre les interactions entre les quarks et les gluons.)

fm : Symbole du femtomètre, unité de mesure de longueur su système international (SI), valant 10^{-15} mètre.

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction

Introduction général

Ce travail de mémoire s'inscrit dans le cadre du master de Physique computationnelle dont le sujet est l'étude du bosson de Higgs et du problème de masse. Ce sujet qui remplit bien la fonction de la physique des particules s'appuie principalement sur la construction lagrangienne du champ de Higgs en l'étudiant d'abord comme s'il était libre puis en passant à un modèle lié (en interaction).

La physique des particules a connu une croissance exponentielle grâce à la modélisation numérique et aux formules théoriques. Le développement par Lagrange du champ libre scalaire et fini (en interaction) a tout d'abord permis d'arriver aux équations de base qui décrivent la différence de masse de matière à partir de l'utilisation des équations d'Euler-Lagrange [1].

L'étude de l'équation de la méthode d'Euler pour les bosson de Higgs constitue la base de ce travail non seulement à partir de la théorie mais aussi à partir d'une analyse numérique basée sur des méthodes d'analyse numérique assez complexes telles que la méthode des différences finies.

Ce mémoire présente des méthodes de résolution numériques de la fameuse équation dite Equation de méthode d'Euler .

Ce travail est divisé en trois parties:

- La première partie s'attache à présenter La masse d'un corps est une notion théorique correspondant à l'idée intuitive et floue de « quantité de matière » contenue dans un corps. Elle se manifeste d'abord par la force de gravitation qui s'exerce universellement entre corps massifs. Cette « masse pesante » est directement liée au poids d'un corps et mesure l'action de la pesanteur sur celui-ci. La masse, par ailleurs, caractérise la résistance d'un corps à la modification de son mouvement : c'est le coefficient d'inertie, ou « masse inertielle », de Chapitre 1 du corps .Dans ces deux acceptations, la masse est additive selon la mécanique newtonienne.

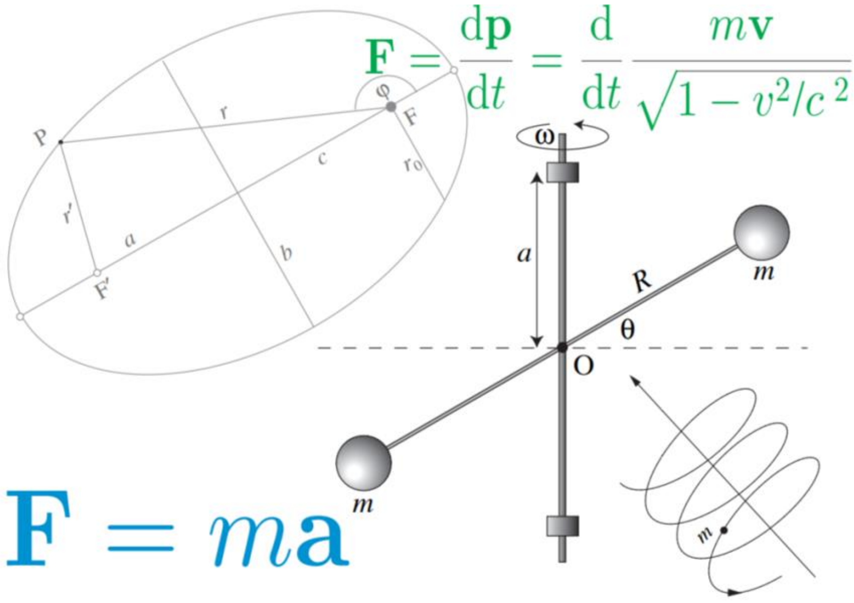
-La seconde partie est dédiée Einstein a montré en 1905 que cette propriété n'était qu'approximative : la masse d'un corps mesure son énergie interne (relation d'Einstein, $E_0 = mc^2$), de Chapitre 2 et toute variation d'énergie s'accompagne d'une variation de masse.

-La dernière partie est consacrée à l'exposition de nos résultats numériques toute en se basant sur la programmation où on écrit des programmes inspirés par le langage fortran 77 de nous donner des solutions acceptables de notre fameuse équation d'une manière numérique toute en se basant sur la méthode des différences finies.

Enfin une conclusion nous donnera les résultats obtenus et proposera des futurs travaux.

Chapitre I

Définition de masse Selon Newton



I. 1. Introduction *:*

Le concept physique de masse, créé par Newton, peut être considéré comme le piédestal de la mécanique classique, en permettant l'expression complète du principe d'inertie et de la loi fondamentale de la dynamique, une fois admis que la masse est une grandeur invariable attachée à un corps, distincte du poids qui est dû à la gravité conçue comme une sollicitation sur les corps qui leur est extérieure. Il était dès lors possible de fonder également, et d'exprimer quantitativement, la loi de la gravitation universelle, dont la force est en raison directe des masses en présence et varie en fonction de leur distance mutuelle. Le concept de masse manifesta sa fécondité dans la physique tout entière ainsi qu'en chimie. Il devait cependant encourir, en même temps que la mécanique, de sévères critiques portant sur la fausse évidence de sa définition, en réalité imprécise (comme “quantité de matière des corps”), et faisant implicitement appel à d'autres grandeurs et à des principes de la physique qui eux-mêmes la supposent. Cette circularité des notions de la mécanique en montre les limites. Plus radicalement encore, la théorie de la relativité restreinte devait conduire à repenser la masse en relation à l'énergie, ce qui entraîna des conséquences considérables, notamment sur la possibilité de pénétrer la matière, “réservoir d'énergie”, dans ses éléments constitutifs. Le concept de masse ainsi “relativisé” n'a pas cessé pour autant d'être une des notions-clé de notre connaissance du monde physique, non seulement de la matière, mais de l'Univers, aux diverses étapes de son évolution, qui le peuplent d'“objets” allant des particules aux galaxies.

I.2- Rappels sur les forces:

I.2.1 Les effets d’une force :

Une force n’est pas visible, mais on peut voir les $effets\ d’une\ force$.

Les forces sont reconnues et décrites par leurs effets. Quelques indices :

- Une force peut modifier la vitesse d'un corps
- Les forces peuvent déformer d'autres objets lors de l'impact, par exemple
- Une force agit dans une certaine direction (mot clé : vecteur)

Elle peut :

•changer la nature du mouvement d'un corps : effets dynamiques
•déformer un corps : effets statique

En l'absence de force, aucun de ces effets n'est possible. Inversement, aucun de ces effets n'est possible sans que la cause en soit une force.

I.2.2. Effets dynamiques :

Il y a changement de la nature du mouvement lorsque la valeur de la vitesse change, ou bien lorsque la direction de la vitesse d'un corps change.

•un corps, initialement immobile, est mis en mouvement (ex. : fusée qui est lancée)
•un corps, se déplaçant à une vitesse donnée, augmente sa vitesse (ex. : moto qui accélère)
•un corps, se déplaçant à une vitesse donnée, diminue sa vitesse (ex. : train qui décélère)
•un corps, se déplaçant à une vitesse donnée, est arrêté (ex. : voiture qui heurte un arbre)
•un corps en mouvement change de direction (ex. : bille en acier déviée par un aimant)
•un corps en mouvement change de sens (ex. : rebondissement d'une balle)

I.2.3 Effet statique :

Les forces peuvent aussi entraîner la déformation d'un corps. ex: déformation d'une cannette de boisson par une main

I.3. Représentation d'une force :

En physique, une force est représentée par un vecteur. Un vecteur possède, tout comme une force, 4 caractéristiques :

•le point d'application : le point où la force s'applique à un corps.
•la direction : la ligne/droite d'action de la force .
•le sens.
•la norme : la grandeur/l'intensité da la force.

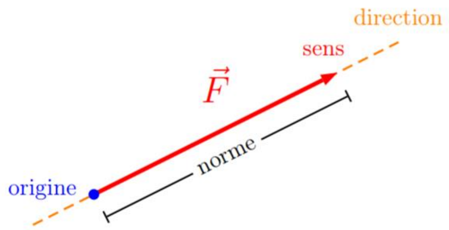


Figure 1 : *vecteur force* .

I.3-1 Unité SI et instrument de mesure d'une force:

On peut mesurer la norme d'une force à l'aide d'un dynamomètre. A la base de son principe de fonctionnement est la „Loi de Hooke" qui sera traitée dans la section suivante.

L'unité SI de la norme d'une force est le Newton (N).

I.4-Les propriétés des matériaux :

définissent leur comportement en réponse à des actions extérieures et n déterminent l'étendue de leurs performances. L'analyse de ces propriétés est l'un des aspects fondamentaux de la science des matériaux. Elles sont exploitées tant dans l'utilisation de l'objet final que dans le processus de fabrication et orientent, pour une large part, les choix des concepteurs. La plupart des propriétés physiques, mécaniques, chimiques, métallurgiques ou de mise en forme sont dites «intrinsèques», car directement liées à la composition atomique et à la structure interne du matériau. Quantitatives, elles sont mesurées par des essais normalisés et interviennent dans des méthodes de calcul propres à chaque discipline. Ces évaluations permettent de déterminer avec précision, et dans le cadre d'utilisations prédéfinies, le comportement de toute réalisation fonctionnelle ultérieure. D'autres propriétés, à caractère essentiellement qualitatif, s'expriment en termes d'aptitude ou de facilité à remplir une fonction donnée.

I.4.1-Propriétés intrinsèques:

Elles peuvent être exprimées par une qualité (l'acier est résistant, le cuivre est conducteur d'électricité) mais sont surtout appréciées en termes de quantité (limite élastique de l'acier, résistivité du cuivre). Un coefficient relatif à l'état du matériau exprime le rapport entre une grandeur physique liée à cet état et la grandeur extrême correspondante pour laquelle la propriété est encore vérifiée. On donne ainsi un seuil de validité pour cette propriété.

I.4. 1. 1 Rigidité :

Tout matériau soumis à une contrainte se déforme. Pour une faible déformation, tant que celle-ci est réversible (le matériau reprend sa forme initiale lorsque la contrainte cesse), la déformation est proportionnelle à la contrainte. En tension ce coefficient de proportionnalité est le module d'Young. En cisaillement, ce coefficient est le module de Coulomb.En compression, c'est le module de compression volumique.

I.4.1.2 Résistance :

C'est la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre.

I.4.1.3 Ductilité :

C'est la propriété qu'a un matériau de se déformer de façon permanente avant de se rompre. La ductilité facilite la mise en forme des matériaux à l'état solide.

I.4. 1. 4 Ténacité :

C'est la résistance qu'un matériau oppose à la propagation brutale des fissures. On la caractérise par l'énergie nécessaire pour entrainer la fissure.

I.4.1.5 Viscoélasticité :

Phénomène qui fait qu'après application ou relachement d'une contrainte, la déformation totale se produit progressivement. La déformation est suffisamment faible pour que le matériau retrouve ses dimensions initiales après la disparition de la contrainte. Ce comportement est surtout caractéristique des polymères et des élastomères. Pour mesurer certaines caractéristiques (comme le module d'Young) de matériaux présentant ce comportement, il est nécessaire de préciser la durée de la contrainte.

I.4.1.6. Viscoplasticité :

Phénomène qui fait qu'après application instantanée d'une contrainte supérieure à celle de la limite d'élasticité du matériau, il se produit une déformation progressive, dont une partie persiste après relachement de la contrainte.

I.4.1.7 Fluage :

Phénomène qui fait qu'en appliquant une contrainte constante à un matériau, on observe une déformation qui s'accroit avec le temps, sans se stabiliser. Il se manifeste pour les métaux et alliages métalliques, lorsque la température est supérieure à environ 50% Tf (Tf:température de fusion en Kelvin). Il se manifeste pour les matières plastiques au voisinage de la température ambiante.

I.5-Mouvement en une dimension :

Commençons par étudier le mouvement d'un point en une dimension d'espace. Dans ce cas, la position d'une particule est spécifiée par une seule coordonnée x, et le mouvement de la particule par une fonction du temps $x(t)$. La vitesse moyenne d'une particule entre les temps t_1 et $t_2$est

$$\bar{v} = \frac{x(t_2)-x(t_1)}{t_2-t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (\mathrm{I}-1)$$

La vitesse instantanée (ou simplement vitesse) de la particule est la limite de la vitesse moyenne quand l'intervalle Δt tend vers zéro, soit la dérivée

$$v(t) \equiv \dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} \qquad (\mathrm{I}-2)$$

La notation $\dot{x}$ pour la dérivée, utilisée par Newton, l'est encore dans ce contexte, pour désigner une dérivée par rapport au temps. L'accélération, de même, est la dérivée par rapport au temps de la vitesse :

$$a(t) \equiv \dot{v}(t) = \frac{dv}{dt} = \ddot{x}(t) = \frac{d^2x}{dt^2} \qquad (\text{I}-3)$$

Le concept de vitesse instantanée est à l'origine de la notion de dérivée et forme la base du calcul différentiel et intégral.

À l'inverse, étant donnée une vitesse $v(t)$ connue en fonction du temps, ainsi qu'une position initiale x_0 au temps $t = 0$, on retrouve la position en fonction du temps par une intégrale. Plus précisément, le déplacement de la particule entre les temps t et $t + \varepsilon$ " est donné par $\Delta x = v(t)\varepsilon$" au premier ordre en ε " et le déplacement sur un intervalle de temps fini $[0, t]$ est exactement donné par l'intégrale

$$\Delta x = \int_0^t v(t')\ dt' \qquad (\text{I} - 4a)$$

$de\ sorte\ que$

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v(t')\ dt' \qquad (\text{I} - 4b)$$

De même, étant donnée une accélération $a(t)$ connue en fonction du temps, ainsi qu'une vitesse initiale v_0, on retrouve la vitesse $v(t)$ par une intégrale. On retrouve ensuite la position $x(t)$ par une deuxième intégrale, étant donnée la position initiale x_0.

I.5.1. Transformation de la vitesse et de l'accélération:

Soit $v \equiv \frac{dr}{dt}$ la vitesse d'une particule dans le référentiel S et $v' = \frac{dr'}{dt'}$ sa vitesse dans le référentiel S'. La transformation nous permet de relier v à v' :

$$r' = r - Vt \qquad (\mathrm{I}-5a)$$

$$x' = x - Vt \qquad (\mathrm{I}-5b)$$

$$v' = \frac{dr'}{dt'} = \frac{d}{dt}(r - Vt) = \frac{dr}{dt} - V \equiv v - V \qquad (\mathrm{I}-5c)$$

D'autre part, l'accélération a d'une particule est la même dans les deux référentiels, car V est une constante indépendante du temps :

$$a' = \frac{dv'}{dt} = \frac{d}{dt}(v - V) \qquad (\mathrm{I}-6a)$$

$$= \frac{dv}{dt} = a \quad \left(\frac{dV}{dt} = 0\right) \qquad (\mathrm{I}-6b)$$

On dit que l'accélération a est invariante par la transformation de Galilée.

I.6. Les lois du mouvement de Newton :

I. 6.1. Les Principia de Newton :

Isaac Newton (1642/1727) publia ses Principes mathématiques de la philosophie naturelle (en latin Principia Mathematica Philosophiæ Naturalis) en 1687. Dans cet ouvrage monumental, Newton cherche à expliquer le mouvement des objets à la fois terrestres et célestes à l'aide de principes unifiés formulés sous une forme mathématique. Citons la préface de Newton :

Les anciens qui ne considérèrent guère autrement la pesanteur que dans le poids à remuer, cultivèrent cette partie de la Mécanique dans leurs cinq puissances qui regardent les arts manuels; mais nous qui avons pour objet, non les Arts , mais l'avancement de la Philosophie, ne nous bornant pas à considérer seulement les puissances manuelles, mais celles que la nature emploie dans ses opérations, nous traitons principalement de la pesanteur, la légèreté, la force électrique, la résistance des fluides & les autres forces de cette espèce, soit attractives, soit répulsives : c'est pourquoi nous proposons ce que nous donnons ici comme les principes Mathématiques de la Philosophie naturelle. En effet toute la difficulté de la Philosophie parait consister à trouver les forces qu'emploie la nature, par les phénomènes du mouvement que nous connaissons, & à démontrer ensuite, par là, les autres Phénomènes. C'est l'objet qu'on a eu en vue dans les propositions générales du Ier & IIe Livre , & on en donne un exemple dans le IIIe en expliquant le système de l'Univers : car on y détermine par les propositions mathématiques démontrées dans les deux premiers livres , les forces avec lesquelles les corps tendent vers le Soleil & les planètes; après quoi, à l'aide des mêmes propositions mathématiques, on déduit de ces forces, les mouvements des planètes, des comètes, de la Lune & de la Mer. Il serait à désirer que les autres phénomènes que nous présente la nature puissent se dériver aussi heureusement des principes mécaniques : car plusieurs raisons me portent à soupçonner qu'ils dépendent tous de quelques forces dont les causes sont inconnues, & par lesquelles les particules des corps sont poussées les unes vers les autres, & s'unissent en figures régulières, ou sont repoussées & se fuient mutuellement; & c'est l'ignorance où l'on a été jusqu'ici de ces forces, qui a empêché les Philosophes de tenter l'explication de la nature avec succès. J'espère que les principes que j'ai posés dans cet Ouvrage pourront être de quelque utilité à cette manière de philosopher, ou à quelque autre plus véritable, si je n'ai pas touché au but.

Cet extrait de la préface des Principia démontre à quel point Newton avait les vues larges et l'ambition de poser les bases d'une science nouvelle, révolutionnaire, basée à la fois sur une description mathématique du monde physique et sur un modèle particulier du monde, qu'on pourrait appeler le modèle newtonien. Dans ce modèle général, on suppose que l'Univers est composé d'une multitude de particules qui exercent les unes sur les autres diverses forces. Ces particules, en retour, réagissent aux forces exercées en modifiant leur mouvement en accord avec les lois du mouvement que Newton a formulées. Newton a décrit dans son ouvrage sa théorie de la force gravitationnelle, qui constitue l'archétype de la force dans le modèle newtonien. Il formule l'espérance que tous les phénomènes de la Nature puissent être expliqués par les principes de la mécanique et la connaissance de forces fondamentales inconnues à son époque.

Cet idéal est encore, grosso modo, celui des scientifiques d'aujourd'hui, encore que nous soyons plus modestes et réalistes que Newton semblait l'être et que les physiciens aient développé il y a presque cent ans, une manière «plus véritable de philosopher», comme dirait Newton, à savoir la mécanique quantique.

I.6.2. Deuxième loi :

Citons encore une fois Newton pour la deuxième loi :

Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportion nels à la force motrice, et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force à été imprimée.

Le langage relativement flou de l'époque a été remplacé de nos jours par l'énoncé suivant, qui nécessite toutefois quelques explications :

La force totale sur une particule est égale à sa masse fois son accélération :

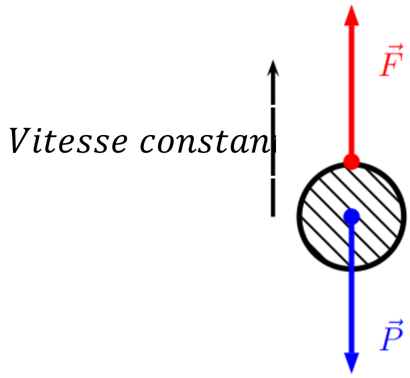
$$F = ma \qquad (\mathrm{I}-7)$$

On exprime souvent cette relation en fonction de la quantité de mouvement p de la particule :

$$P = mv \qquad (\mathrm{I}-8a)$$

$$F = m\frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt} \qquad (\mathrm{I}-8b)$$

En dépit de la familiarité de tous avec cette loi, sa signification n'est pas aussi immédiate que ce que l'on peut croire dans les cours d'introduction à la physique



$figure\ 2 - une\ sphère$ à $Vitesse\ constante$

I.6.3. Seconse loi de newton et énergie cinétique :

Bien que Sir Isaac Newton (1642-1726) ait formulé $F = ma$ comme sa deuxième loi du mouvement, il pensait inexplicablement que la formulation pour déterminer l'énergie cinétique d'un corps en mouvement était $E_C = m\, v$ Pour de nombreux contemporains intéressés par la physique, cela semblait discutable. L'expérimentateur hollandais $W.J.$ Gravesande (1688-1742) mena une série d'expériences consistant à faire tomber des poids de plomb dans un lit d'argile molle ; plus le poids ou la hauteur de la chute est élevé, plus la profondeur mesurée de l'indentation résultante est grande. Cela corrobore le fait que l'énergie cinétique était proportionnelle à la masse et à la vitesse au moment de l'impact. Cependant, Gravesande a laissé la détermination de la variation exacte de l'énergie cinétique avec la masse et la vitesse à son amie Émilie du Châtelet (1706-1749). dont l'analyse des données expérimentales a abouti à $E_C = m\, v^2$ Pourquoi cette expression manque-t-elle $\frac{1}{2}$ facteur a reçu diverses explications

Cependant, lorsqu'ils sont soumis à une approche moderne, la dérivation du bon $E_C = \frac{1}{2}mv^2$ formulation se fait facilement.

Par exemple, une dérivation d'applicabilité limitée (la force est constante, et la vitesse et l'accélération initiales sont nulles) peut être obtenue à partir des équations du mouvement, telles qu'elles étaient comprises au début du 18^{eme} siècle. A partir de la deuxième loi de Newton :

$$F = ma \qquad (\mathrm{I}-9)$$

Nous reconnaissons que l'énergie cinétique possédée par la masse "m" à une vitesse "V" est équivalente au "travail" dépensé par une force "F" sur une distance "d" tout en accélérant la masse jusqu'à cette vitesse :

$$E_c = F.d \qquad (\mathrm{I}-10)$$

En remplaçant « F » de la deuxième loi, nous obtenons :

$$E_c = ma\,d \qquad (\mathrm{I}-11)$$

Pour les conditions limites spécifiques citées, la valeur de "d" à tout moment "t" est "½ $a\,t^2$", qui peut être utilisée dans une autre substitution, cette fois pour "d":

$$E_c = ma\left(\frac{1}{2}a\,t^2\right) \qquad (\mathrm{I}-12)$$

De plus, encore une fois pour les conditions limites spécifiques citées, la valeur de "a" à tout moment "t" est "V/t", qui peut être utilisée dans une substitution encore plus poussée, cette fois pour "a":

$$E_c = m\frac{V}{t}\left(\frac{1}{2}\frac{V}{t}\ t^2\right) \qquad (\mathrm{I}-13)$$

La simplification évidente de cette équation aboutit à la formulation recherchée :

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (\mathrm{I}-14)$$

Cependant, il serait incorrect de crier "$Eureka$" ou "$Q.E.D.$" à ce stade en raison des conditions limites particulières citées lorsque cette dérivation a commencé ; le résultat est simplement indicatif de ce que pourrait être le cas général (qu'un résultat de cas limité puisse s'avérer être une relation générale est quelque chose dont il faut prendre note). La preuve générale que la formulation de l'énergie cinétique est conforme à la formulation ci-dessus est la suivante, sans narration :

$$E_c = \int_{r_0}^{r_t} \vec{F}.d\vec{r} \qquad (\mathrm{I}-15a)$$

$$E_c = \int_{V_0}^{V_t} m\frac{dV}{dt}Vdt \qquad (\mathrm{I}-15b)$$

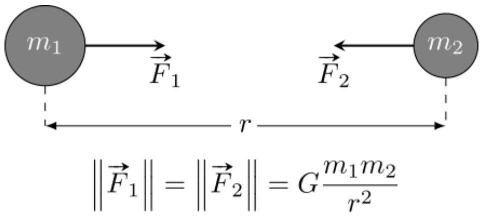
$$E_C = \frac{1}{2}[mv^2]_{V_0}^{V_t} \qquad (\mathrm{I}-15c)$$

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (\mathrm{I}-15d)$$

$$Q.E.D$$

I.7. Gravitation universelle :

Les Principia de Newton comportent non seulement les lois du mouvement décrites ci-haut, mais énoncent aussi la loi de la gravitation universelle, à l'aide de laquelle Newton explique le mouvement des planètes autour du Soleil. Newton y pratique ici la méthode dite hypothético-déductive : il sait que les planètes adoptent des orbites elliptiques autour du Soleil et formule l'hypothèse qu'une force d'attraction décroissant comme l'inverse du carré de la distance est exercée par le Soleil sur les planètes. Il démontre ensuite que cette hypothèse suffit à expliquer les lois empiriques de Kepler sur le mouvement des planètes. Il étend ensuite son hypothèse d'attraction à tous les objets de l'univers, tant terrestres que célestes, d'où l'épithète universelle associée à cette force. Newton raconta plus tard dans sa vie que c'est en voyant une pomme tomber d'un arbre qu'il comprit que cette pomme était attirée par la Terre par la même cause qui garde la Lune en orbite autour de la Terre et cette dernière autour du Soleil.



$figure\ 3 - forces\ d'action\ et\ réaction$

I.7.1. Loi de la gravitation universelle :

La loi de la gravitation universelle s'exprime comme suit : chaque objet exerce sur chaque autre objet une force d'attraction, proportionnelle au produit des masses M et m des deux objets, et inversement proportionnelle au carré de la distance r qui les sépare; cette force est dirigée suivant le vecteur qui relie les deux objets. On écrit

$$F = -G\frac{Mm}{r^2}\,\hat{r} \qquad (\mathrm{I}-16)$$

où :

• F : force exercée sur deux objets.

• M, m : masse des deux objets.

• r : distance entre deux objets.

• $\hat{r}$: vecteur unité dirigé de deux objets.

• G : constante de Cavendish $(6{,}6726(8) \times 10^{-11}\ Nm^2/kg^2)$.

La loi de la gravitation universelle a été établie par Newton à la suite d'une chaîne de raisonnement assez intéressante :

1. Newton s'est aperçu, vers 1680, que la deuxième loi de Kepler (loi des aires) n'est respectée que si la force d'attraction du Soleil sur une planète est dirigée en ligne droite vers le Soleil (force centrale).

2. Newton est familier avec l'observation empirique que tous les objets terrestres subissent la même accélération vers le sol, quelle que soit leur masse, quand on fait abstraction de la résistance de l'air. Cette observation, défendue par Galilée, implique que la force gravitationnelle s'exerçant sur un objet est proportionnelle à la masse de cet objet, de sorte que l'accélération correspondante est indépendante de la masse. On peut donc écrire (en grandeur) $F \propto m_1$, où m_1 est la masse de l'objet 1, subissant la force exercée par l'objet 2.

3. D'après la loi d'action-réaction, cette force doit être égale et opposée à la force exercée par l'objet 1 sur l'objet 2. Donc il faut que $F = m_1 m_2\, f(r)$, où $f(r)$ est une fonction de la distance entre les deux objets.

I.7.2. Champ gravitationnel :

La loi de la gravitation universelle obéit au principe de superposition : la force de gravitation agissant sur une particule et causée par plusieurs autres particules est la somme vectorielle des forces exercées par chacune des particules prises séparément. Dit autrement, la force de gravité newtonienne provient d'une interaction de paires : le fait d'ajouter une troisième particule dans le voisinage d'une paire de particules ne modifie pas la force mutuelle des particules de la paire. Soit N particules de masses

m_i $(i = 1,2,\ldots,N)$ situées aux positions r_i. La force F qu'elles exercent sur une particule de masse m située au point r est

$$F = -G \sum_{i=1}^{N} \frac{m_i m}{|r-r_i|^3} (r-r_i) \qquad (\mathrm{I}-17)$$

On définit le champ gravitationnel $g(r)$ au point r comme la force gravitationnelle exercée à ce point sur une masse infinitésimale m, divisée par m :

$$g(r) = -G \sum_{i=1}^{N} \frac{m_i m}{|r-r_i|^3} (r-r_i) \qquad (\mathrm{I}-18)$$

I.8. Forces fondamentales et forces macroscopiques :

Les progrès de la physique sont marqués par une réduction dans le nombre des lois fondamentales et par une compréhension de phénomènes de plus en plus complexes en fonction de ces lois fondamentales. Au cours du XXe siècle, on est arrivé à une compréhension du monde microscopique basée sur l'existence de $quatre\ forces\ dites\ fondamentales$:

I.8.1. La force de gravité :

Il s'agit de l'archétype de la force newtonienne. Les physiciens ont naturellement tenté de comprendre tous les phénomènes naturels en fonction de forces modelées sur la force de gravité. Cependant, la théorie de Newton est maintenant considérée comme un cas limite (faibles vitesses et faibles champs) de la théorie de la relativité générale d'Einstein (1915), la théorie «moderne» de la gravitation.

I.8.2. La force électromagnétique :

Le XIXe siècle fut le siècle de l'électricité. Les forces impliquant des charges statiques sont décrites quantitativement depuis Coulomb (1785) et les forces exercées par des courants électriques ont été étudiées quantitativement par Ampère et Faraday. On a longtemps tenté de décrire les forces mutuelles de charges en mouvement par une loi de force précise ne dépendant que de la position et des vitesses des charges, mais on s'est aperçu que ce n'était ni pratique ni possible d'ailleurs. Les forces électromagnétiques sont donc essentiellement décrites à l'aide des concepts de champ électrique et champ magnétique.

I.8.3. La force nucléaire forte :

C'est la force responsable de la cohésion des protons et neutrons dans les noyaux. Plus fondamentalement, c'est la force qui lie les quarks. La décrire dans le langage classique est malheureusement inutile, car les phénomènes impliqués se produisent à des échelles de grandeur (ou d'énergie) qui demandent une description quantique. Comme la mécanique quantique n'est pas formulée à l'aide de la notion de force, mais plutôt à l'aide du concept d'énergie, il est plus juste de parler d'interaction forte dans ce cas. La théorie fondamentale qui décrit cette interaction est la chromodynamique quantique.

I.8.4 . La force nucléaire faible :

La manifestation la plus courante de cette force est la désintégration bêta, ainsi que la réaction de fusion proton + proton dans le soleil. L'interaction faible, comme l'interaction forte, n'est pas descriptible adéquatement dans le langage newtonien. Dans le modèle standard des particules élémentaires, cette interaction est étroitement reliée à l'interaction électro- magnétique, mais ses effets sur des particules de basse énergie sont beaucoup plus faibles. C'est cependant grâce à cette faiblesse que le soleil ne s'est pas consumé avec la rapidité d'une bombe H et que la vie a eu le temps d'apparaître...

I.9. Applications élémentaires des lois du mouvement :

I.9.1. Équations du mouvement :

Considérons un objet, qu'on peut en pratique considérer comme ponctuel, se déplaçant sous l'influence de forces exercées par d'autres objets. Supposons que les forces ressenties par cet objet ne dépendent que de la position et de la vitesse de l'objet, et peut-être du temps de manière explicite. Cette hypothèse nous évite d'avoir à considérer simultanément le mouvement des autres objets qui exercent des forces sur l'objet qui nous intéresse. La deuxième loi de Newton prend alors la forme

$$F(r, v, t) = m\frac{d^2r}{dt^2} \quad (1.24) \qquad (\mathrm{I}-19)$$

ou, si on l'exprime en composantes,

$$m\ddot{x} = Fx(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t) \qquad (\mathrm{I}-20a)$$

$$m\ddot{y} = Fy(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t) \qquad (\mathrm{I}-20b)$$

$$m\ddot{z} = Fz(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t) \qquad (\mathrm{I}-20c)$$

Il s'agit donc d'un système de trois équations différentielles couplées (on suppose que l'on connaît explicitement les trois fonctions Fx, Fy et Fz). Ces équations différentielles sont appelées équations du mouvement.

Remarques :

✓ Les équations du mouvement (1.20c) sont du deuxième ordre en dérivées. Cela signifie que leur résolution demande que l'on spécifie des conditions initiales suffisantes, en l'occurrence la position initiale et la vitesse initiale de la particule. Une fois ces quantités spécifiées, l'avenir de cette particule est tout tracé, car la solution aux équations (1.20c) est alors entièrement déterminée, comme le stipule le théorème d'unicité des solutions des équations différentielles C'est la manifestation la plus simple du déterminisme classique.

✓ Le fait que la solution des équations (1.20c) existe ne veut pas dire qu'elle puisse être exprimée analytiquement. En fait, le nombre de problèmes ayant une solution analytique complète, c'est-à-dire une expression explicite de la fonction $r(t)$, est très petit. Même le problème de Kepler, celui du mouvement d'une particule dans un champ de gravité en $1/r^2$, n'admet pas de solution explicite pour la position en fonction du temps. Cependant, il est en général simple de résoudre ces équations si diverses contraintes (mécaniques ou autre) font qu'une seule coordonnée varie dans le temps. Le problème est alors effectivement unidimensionnel.

✓ L'absence de solution analytique n'empêche pas le calcul numérique de la solution des équations (1.20c). Pour une seule particule (ou un petit nombre de particules), ce problème est numériquement simple, sauf que la précision des solutions obtenues se dégrade progressivement au cours du temps. La contemplation des solutions numériques a non seulement l'avantage de favoriser l'intuition du problème, mais permet aussi de poser des diagnostics sur la nature chaotique ou non du mouvement.

I.9.3.Conservation de l'énergie en une dimension :

Commençons pas considérer le mouvement d'une particule de masse m contrainte de se déplacer en une seule dimension, avec coordonnée x. Supposons que cette particule subisse une force $F(x)$ qui ne dépend que de la coordonnée de la particule . Ce dernier détail est important : il ne faut pas que F dépende de la vitesse de la particule (donc toute force de viscosité ou de frottement est exclue) ou que F dépende de manière explicite du temps .Dans ce cas, on peut définir la fonction suivante, qu'on appelle le potentiel de la force F, ou encore l'énergie potentielle de la particule au point x :

$$U(x) = -\int F(x)\,dx \qquad (\mathrm{I}-24a)$$

Ou

$$F(x) = -\frac{dU}{dx} \qquad (\mathrm{I}-24b)$$

L'intégrale ci-haut est indéfinie, et donc $U(x)$ est défini à une constante additive près.D'autre part, on définit l'énergie cinétique K de la particule comme

$$K = \frac{1}{2} mv^2 \qquad (\mathrm{I}-25)$$

et l'énergie totale E comme :

$$E = K + U(x) = \frac{1}{2} mv^2 + U(x) \qquad (\mathrm{I}-26)$$

Nous allons maintenant démontrer que l'énergie E est constante au cours du mouvement de la particule, en vertu de la deuxième loi de Newton et des définitions de K et U. Pour ce faire, il suffit de calculer la dérivée totale par rapport au temps de l'énergie et de constater qu'elle s'annule :

$$dE\ dt = \frac{1}{2} m \frac{d}{dt} v^2 + \frac{dU}{dt} \qquad (\mathrm{I}-27a)$$

$$= \frac{1}{2} m \left(2v\frac{dv}{dt}\right) + \frac{dU}{dx}\frac{dx}{dt} \qquad (\mathrm{I}-27b)$$

$$= v\big(ma - F(x)\big) = 0 \qquad (\mathrm{I}-27c)$$

La dernière égalité est valable en vertu de la deuxième loi de Newton.

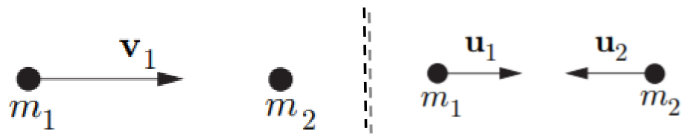
I.9.4. Conservation de la quantité de mouvement :

La loi de conservation de la quantité de mouvement est une conséquence immédiate de la troisième loi de Newton : si un système est isolé, donc s'il ne ressent aucune force externe, sa quantité de mouvement totale est constante dans le temps. les conséquences de ce principe sur des processus de collisions de particules ou d'objets macroscopiques, sans avoir besoin de connaître précisément la nature des forces en présence.

I.9.4.1Collisions élastiques :

Considérons deux particules de masses m_1 et $m_2$qui se déplacent initialement à des vitesses v_1 et v_2. On suppose que ces particules exercent une force l'une sur l'autre, mais que cette force a une portée très courte, de sorte qu'elles se meuvent librement la plupart du temps, sauf quand elles entrent en collision, c'est-à-dire quand elles s'approchent très près l'une de l'autre. Nous ne nous soucierons pas des détails de la force s'exerçant entre ces deux particules, car ce qui nous intéresse ici est la relation entre les vitesses de ces particules après la collision et avant la collision et non le mouvement détaillé des particules pendant la collision.

On supposera que le processus de collision est élastique, c'est-à-dire que l'énergie cinétique des particules est la même avant et après la collision. Ceci implique qu'aucune autre particule n'est créée lors de la collision et que l'énergie interne des particules n'est pas modifiée. Dans le cas contraire, la collision est dite inélastique. En réalité, les collisions entre objets macroscopiques (par ex. des boules de billard) sont toujours inélastiques, car une certaine fraction de l'énergie est perdue en chaleur. Des collisions inélastiques se produisent aussi aux niveaux atomique et nucléaire si les particules (atomes, noyaux, etc.) émergent de la collision dans un état excité ou si de la lumière ou des particules supplémentaires sont émises pendant la collision.



$laboratoire$ $centre\ de\ masse$

Figure 4 : Collision unidimensionnelle de deux particules. Dans le référentiel du laboratoire la particule 2 est au repos avant la collision. À droite, on se place dans le référentiel du centre de masse.

I.9.4.2. Invariance par translation et conservation de la quantité de mouvement

Dans cette section, nous allons montrer comment la conservation de la quantité de mouvement d'un système isolée peut être vue comme une conséquence d'un principe de symétrie : l'invariance par translation. Soit $U(r1\,, r2\,, \ldots, rN)$ l'énergie potentielle de N particules en interaction. Si les N particules forment un système isolé, alors l'énergie potentielle ne dépend que de la position de ces particules et non de la position d'un quelconque objet externe qui pourrait exercer une force sur les particules du système. De plus, l'énergie potentielle ne peut pas dépendre du choix de l'origine, qui est tout à fait arbitraire. En effet, l'espace ne comporte pas de point de référence préférentiel : on dit qu'il est homogène. Ceci signifie que U reste inchangé lorsqu'on effectue une translation simultanée de toutes les coordonnées par un vecteur b :

$$\mathrm{U}(\mathrm{r}1 + \mathrm{b}, \mathrm{r}2 + \mathrm{b}, \ldots, \mathrm{rN} + \mathrm{b}) = \mathrm{U}(\mathrm{r}1\,, \mathrm{r}2\,, \ldots, \mathrm{rN}) \quad (\mathrm{I}-28)$$

La conséquence de cette invariance par translation est que la force totale sur le système est nulle. En effet, calculons la dérivée du membre de gauche par rapport au vecteur b; on trouve

$$\frac{\partial\,\mathrm{U}}{\partial\,\mathrm{b}} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}} \frac{\partial\,\mathrm{U}}{\partial\,\mathrm{r}_i} = -\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}} F_i \qquad (\mathrm{I}-29)$$

Où F_i est la force exercée sur la i eme particule, qui dérive de U. Or, comme le membre de droite de $(\mathrm{I}-28)$ est indépendant de b, la dérivée $(\mathrm{I}-29)$ est forcément nulle, et donc la force totale aussi, ce qui implique la conservation de la quantité de mouvement totale du système.

Le fait que la force totale exercée sur un système isolé est nulle a été démontré en utilisant la troisième loi de Newton : les forces internes s'annulent par paires. Or, la troisième loi de Newton peut être vue comme une conséquence du principe d'invariance par translation. En effet, la façon la plus simple de respecter l'invariance par translation est que U ne dépende que des différences de coordonnées$\mathrm{r}_i - \mathrm{r}_j$, comme dans le cas de l'énergie potentielle gravitationnel

$$\mathrm{U} = -\mathrm{G} \sum_{i<j} \frac{m_i m_j}{|\mathrm{r}_i - \mathrm{r}_j|} \qquad (\mathrm{I}-30)$$

En général, l'énergie potentielle d'un système de particules est non seulement invariante par translation, mais est aussi une somme sur les paires de particules :

$$U = \sum_{i<j} U_{ij}\left(\mathrm{r}_i - \mathrm{r}_j\right) \qquad (\mathrm{I}-31)$$

C'est le cas notamment de l'énergie potentielle gravitationnelle $(\mathrm{I}-30)$. Autrement dit, les particules interagissent deux à deux, de manière invariante par translation. C'est d'ailleurs la seule façon de définir Fi j, la force s'exerçant sur la particule i par la particule j. D'après l'expression de la force en fonction de l'énergie potentielle, on trouve

$$\mathrm{F}_{\mathrm{i\,j}} = -\frac{\partial\, U_{ij}}{\partial\, \mathrm{r}_i} = \frac{\partial\, U_{ij}}{\partial\, \mathrm{r}_j} = -\mathrm{F}_{\mathrm{i\,j}} \qquad (\mathrm{I}-32)$$

ce qui est bien la troisième loi de Newton. En résumé, la conservation de la quantité de mouvement totale d'un objet est une conséquence du principe d'invariance par translation (homogénéité de l'espace). La troisième loi est aussi une conséquence de ce principe, si l'énergie potentielle est une somme sur les paires de particules, comme en $(\mathrm{I}-31)$Il est à noter que, contrairement à l'énergie, il n'existe pas de 'quantité de mouvement potentielle' et de 'quantité de mouvement interne'. Autrement dit, il n'y a pas d'autre forme de quantité de mouvement. On ne peut pas dire qu'une partie de la quantité de mouvement d'un objet soit camouflée à l'intérieur sous forme de chaleur ou autrement, comme pour l'énergie.

I.10.Quantité de mouvement et énergie :

Nous avons vu que la loi de Newton $F = ma$ est invariante par transformation de Galilée. Or, puisque la transformation de Galilée a été remplacée par la transformation de Lorentz, il faut également modifier la loi de Newton si on désire qu'elle demeure valable dans tous les référentiels inertiels. En fait, nous écrirons toujours la loi de Newton comme $F = \dot{p}$. C'est la définition de la quantité de mouvement p qui va changer. On sait que, lors d'une collision élastique, la quantité de mouvement et l'énergie sont conservées. Nous allons voir que ceci est impossible dans le cadre de la théorie de la relativité si on garde les définitions $p = mv$ et $K = \frac{1}{2} mv^2$, et qu'il faut plutôt utiliser les expressions suivantes :

$$\mathrm{p} = \frac{\mathrm{mv}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c}}} \qquad (\mathrm{I}-33a)$$

$$\mathrm{E} = \frac{\mathrm{mc}^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{\mathrm{c}^2}}} \qquad (\mathrm{I}-33b)$$

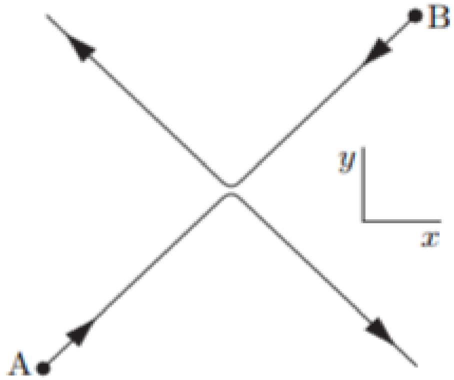
Où K = E − mc2.

Pour démontrer l'incompatibilité de la formule $p = mv$ avec la relativité, considérons le processus de collision illustré à la$Figure$ 5. Deux particules identiques entrent en collision à la même vitesse v, à un angle de 45° par rapport à l'horizontale, dans le référentiel S, et émergent de cette collision toujours avec le même angle. L'impulsion totale des deux particules est nulle, car S est le référentiel du centre de masse du système. Déplaçons-nous maintenant dans un référentiel S' se déplaçant à une vitesse $V = V_{ex}$ par rapport à S. Calculons la composante verticale de l'impulsion totale avant et après la collision dans S' :

$$\mathrm{P}_{y}^{tot} = \frac{1}{\gamma}\frac{\mathrm{mv}_y}{1-\frac{\mathrm{v}_x\mathrm{V}}{\mathrm{c}^2}} - \frac{1}{\gamma}\frac{\mathrm{mv}_y}{1+\frac{\mathrm{v}_x\mathrm{V}}{\mathrm{c}^2}} \quad \text{(avant)} \qquad (\mathrm{I}-34a)$$

$$\mathrm{P}_{y}^{tot} = -\frac{1}{\gamma}\frac{\mathrm{mv}_y}{1-\frac{\mathrm{v}_x\mathrm{V}}{\mathrm{c}^2}} + \frac{1}{\gamma}\frac{\mathrm{mv}_y}{1+\frac{\mathrm{v}_x\mathrm{V}}{\mathrm{c}^2}} \text{(après)} \qquad (\mathrm{I}-34b)$$

On constate que ces deux quantités sont différentes : la quantité de mouvement n'est plus conservée dans S'



$Figure$ 5: $Collision\ de\ deux\ particules$ à 45° $dans\ le\ référentiel\ S$

La modification qu'on doit apporter est de remplacer $p = m\,\frac{dr}{dt}$ par

$p = m\,\frac{dr}{d\tau}$(10.87) où τ est le temps propre de la particule, c'est-à-dire le temps tel qu'il s'écoule dans le référentiel de la particule. Ceci équivaut à la relation (10.84), car $d\tau/dt = \sqrt{1 - v\,2/c\,2}$.

I.11. Quadrivecteur impulsion :

En fait, on doit considérer le quadrivecteur impulsion défini par

$$\mathrm{p} = \mathrm{mu} = \left(\frac{\mathrm{mc}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c}}}, \frac{\mathrm{mv}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c}}} \right) \qquad (\mathrm{I}-35)$$

Les composantes spatiales de ce quadrivecteur forment la quantité de mouvement relativiste. Quant à la composante temporelle, elle est égale à $p^0 = E/c$, où E est défini par l'expression (I −33). Montrons la pertinence de cette expression en étudiant sa limite non relativiste : dans l'approximation $v/c \ll 1$, on a le développement de Taylor

$$\mathrm{E} = \frac{\mathrm{mc}^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c}}} \approx \mathrm{mc}^2 + \frac{1}{2}\mathrm{mv}^2 + \cdots \qquad (\mathrm{I}-36)$$

Donc, modulo la constante mc^2 , $E = p^0 c$ est l'énergie cinétique de la particule. En fait, on définit l'énergie cinétique relativiste comme la différence entre E et la constante mc^2 :

$$\mathrm{K} = \mathrm{E} - \mathrm{mc}^2 = \mathrm{mc}^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c}}} - 1 \right) \qquad (\mathrm{I}-37)$$

L'énergie cinétique n'est non nulle que si la vitesse de la particule est non nulle et elle coïncide avec l'expression $\frac{1}{2}\,mv^2$ quand la vitesse v est petite par rapport à c. La raison qui nous force à utiliser les formes $(\mathrm{I}-33a)$ et

$(\mathrm{I}-33b)$ de l'impulsion et de l'énergie est que la conservation de ces quantités est maintenant valable dans tous les référentiels. Considérons un processus de collision élastique dans lequel deux particules ont respectivement des quadrivecteurs impulsion p_1 et

p_2 avant la collision et des quadrivecteurs impulsion $p_3$et p_4 après la collision. La conservation de l'énergie et de l'impulsion s'écrit

$$p_1 + p_2 - p_3 - p_4 = 0 \qquad (\mathrm{I}-38)$$

Le membre de gauche de cette équation est un quadrivecteur. Si toutes ses composantes sont nulles dans un référentiel, elles seront aussi nulles dans tout autre référentiel inertiel, en raison de la transformation de Lorentz . Autrement dit, si l'énergie et l'impulsion sont conservées dans un référentiel, elles seront aussi conservées dans tout autre référentiel. C'est le résultat recherché. En substituant dans la transformation la forme $p = (E/c, p)$, on voit que les composantes de l'impulsion et l'énergie E se transforment donc ainsi quand on passe du référentiel S au référentiel S' :

$$\mathrm{p}'_x = \frac{\mathrm{p}_x - VE/c^2}{\sqrt{1-\frac{\mathrm{V2}}{\mathrm{c}^2}}} \qquad (\mathrm{I}-39a)$$

$$\mathrm{E}' = \frac{\mathrm{E} - \mathrm{Vp}_x}{\sqrt{1-\frac{\mathrm{V2}}{\mathrm{c}^2}}} \qquad (\mathrm{I}-39b)$$

$$\mathrm{p}'_y = \mathrm{p}_y \qquad (\mathrm{I}-39c)$$

$$\mathrm{p}'_z = \mathrm{p}_z \qquad (\mathrm{I}-39d)$$

Notons la relation suivante entre l'énergie et l'impulsion :

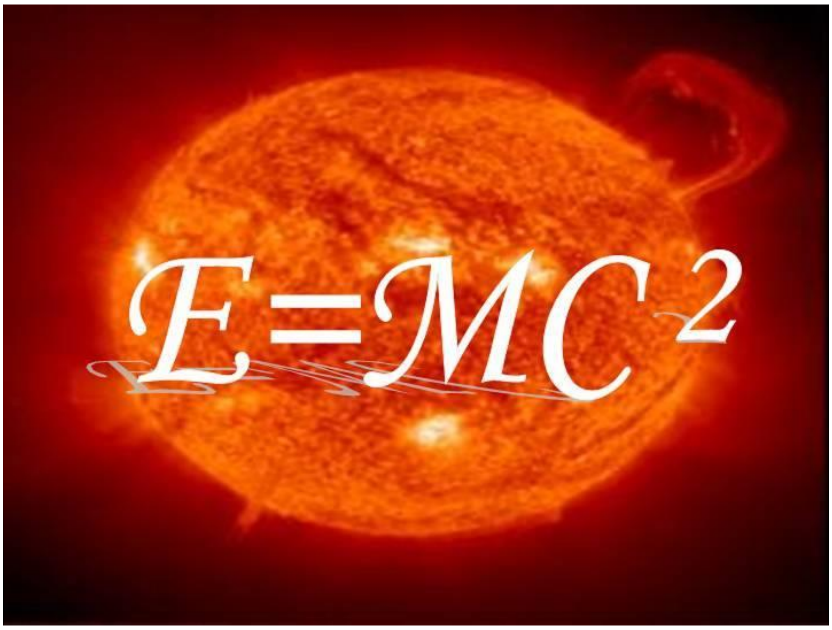
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \qquad (I-40)$$

Cette relation provient de l'invariant

$$p \cdot p = m^2 u \cdot u = m^2 c^2 \qquad (I-41)$$

Chapitre II

Définition de masse Selon A. Einstein



II.1-Introduction :

L'équation $E = mc^2$ a été formulée en 1905 par Albert Einstein dans le cadre de la relativité restreinte. Elle signifie qu'une particule isolée et au repos de masse m possède, du fait de cette masse, une énergie E, appelée énergie de masse donnée par le produit de m par le carré de la vitesse de la lumière. [1-3]

Cette relation a fortement marqué les esprits car elle montre que, du fait de l'énormité du facteur c^2, une masse même petite à l'échelle humaine (par exemple 1 gramme) possède une quantité considérable d'énergie (environ 10^{14} joules pour une masse d'un gramme). Cependant, il faut se méfier des conversions directes : d'autres lois (conservation de la charge, du nombre baryonique...) montrent qu'on ne peut espérer convertir arbitrairement la matière en énergie suivant cette formule (on peut convertir en énergie une quantité égale de matière et d'antimatière).

II.2- Formulation générale

Si la formule $E = mc^2$ concerne une particule au repos, c'est-à-dire une particule dont la vitesse est nulle dans le référentiel choisi, que devient cette expression dans un autre référentiel, avec une particule animée d'une vitesse v ?

Alors que la géométrie euclidienne raisonne sur des points repérés dans l'espace par trois coordonnées, la relativité restreinte raisonne sur des événements repérés dans l'espace-temps par quatre coordonnées, une de temps et trois d'espace. De même que la distance euclidienne entre deux points est invariante par changement de repère, de même la théorie relativiste stipule que le carré de l'intervalle d'espace-temps défini par :

$$c^2\Delta\tau = c^2\Delta t^2 - \Delta s^2 \qquad \text{(II-1)}$$

où Δt représente l'intervalle de temps entre les deux événements et Δs la distance, est invariant par changement de repère. Autrement dit quand on mesure les coordonnées des mêmes événements dans plusieurs repères

$(t, x, y, z))$, (t', x', y', z'), $(t", x", y", z")$,… différents la quantité suivante ne change pas de valeur :

$$c^2\Delta\tau = c^2\Delta t^2 - \Delta s^2 = c^2\Delta t'^2 - \Delta s'^2 = c^2\Delta t''^2 - \Delta s''^2 = \cdots. \qquad \text{(II-2)}$$

Alors que la mécanique newtonienne considère d'une part l'énergie et d'autre part la quantité de mouvement d'un corps en mouvement, la relativité unifie ces deux concepts dans un objet unique : le quadrivecteur énergie-impulsion. Ce vecteur à quatre dimensions a pour composante temporelle l'énergie $E/c\vec{p}$ de la particule et pour composante spatiale son vecteur impulsion (ou quantité de mouvement) à trois dimensions. Comme il est le pendant du vecteur impulsion mv de la mécanique classique (produit de la masse par la vitesse) il est égal à $m\,u$ où u est maintenant le quadrivecteur vitesse.

De même que le carré de l'intervalle d'espace-temps était invariant par changement de coordonnées, de même l'est le carré de la norme du quadrivecteur énergie-impulsion. Autrement dit la quantité

$$(E/c)^2 - p^2 \qquad \text{(II-3)}$$

est indépendante du repère dans lequel on l'évalue. Mais séparément, l'énergie et l'impulsion en dépendent.

Dans le repère propre de la particule, celui où elle est au repos, la vitesse, et donc l'impulsion, est nulle. Si on note E l'énergie dans ce repère propre l'invariance de la quantité précédente s'écrit :

$$(E/c)^2 - p^2 = (E_0/c)^2 - 0 \equiv (E_0/c)^2 \qquad \text{(II-4)}$$

La valeur de E nous est donné par le fameux mc^2 de sorte que l'on aboutit à l'équation capitale suivante :

$$E^2/c^2 - p^2 = (mc)^2 \qquad \text{(II- 5)}$$

ou encore :

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4 \qquad \text{(II-6)}$$

La théorie montre que dans un repère où la vitesse de la particule est v l'énergie et la quantité de mouvement sont données par les formules :

$$p = \gamma mv \equiv mv/\sqrt{1-(v^2/c^2)} \qquad \text{(II-7a)}$$

$$E = \gamma mc^2 \equiv mc^2/\sqrt{1-(v^2/c^2)} \qquad \text{(II-7b)}$$

avec la notation classique,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \qquad \text{(II-8)}$$

On vérifie que $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$ et on déduit de ces formules la relation importante entre énergie et impulsion :

$$p = (v/c)(E/c) \qquad \text{(II-9)}$$

II.3-Illustrations

En mécanique newtonienne, l'énergie d'une particule isolée provient de sa vitesse et se manifeste sous forme d'énergie cinétique. Au contraire, d'une façon inattendue à l'époque de sa découverte, $E = mc^2$ exprime qu'une particule de masse m possède intrinsèquement une énergie E, même si elle est au repos. Elle stipule que la masse est une forme d'énergie comme le sont l'énergie potentielle ou l'énergie cinétique. L'énergie d'un corps devient donc la somme de son énergie cinétique et de sa masse.

Cette équivalence entre masse et énergie ouvre un éventail de possibilités inconnues de la physique pré-relativiste. En relativité restreinte, la masse peut être convertie en chaleur, énergie cinétique ou autre forme d'énergie. En effet lorsque les particules d'un système donné subissent une transformation, par exemple lors d'une collision, la relativité restreinte impose que l'énergie totale (évaluée dans un certain système de coordonnées) se conserve. Mais comme l'énergie comprend la masse, il est tout-à-fait possible que de la masse apparaisse lors de la réaction (par exemple sous forme de particules) au détriment d'énergie ou que, au contraire, de l'énergie soit libérée par « consommation » de masse.

$$E = mc^2 \qquad \text{(II-10)}$$

Où :

« E » est l'énergie en Joule $[J]$.

« m » est la masse en kilogramme $[kg]$.

« c » est la vitesse de la lumière en mètre par seconde $[m/s]$.

II.4.Domaine d'application général de la formule

Mais cette relation n'est pas réservée au domaine du nucléaire. Par exemple en chimie, lorsque $1\ kg$ d'hydrogène se combine avec $8\ kg$ d'oxygène pour former de l'eau, environ 10^8 joules d'énergie est libérée. Cette énergie correspond à une perte de masse d'environ $10^{-9}\ kg$, ce qui entraine que la masse de l'eau formée est inférieure de cette quantité à la masse initiale de 9 kilogrammes des réactifs.

Cependant le défaut de masse, de l'ordre du dixième de milliardième en valeur relative, est trop infime pour pouvoir être mis en évidence par des mesures expérimentales, qui arrivent au mieux à l'ordre du centième de millionième. C'est pour ça que l'on continue à utiliser le « théorème classique » de la conservation de la masse dans les réactions chimiques et dans la vie courante, mais en toute rigueur c'est inexact.

Néanmoins, les mesures de spectrométrie de masse les plus pointues approchent cet ordre de précision. Et alors on pourra visualiser directement l'équivalent de masse de l'énergie de liaison moléculaire, comme on le fait avec l'énergie de liaison nucléaire.

Un autre exemple illustrant l'équivalence entre masse et énergie est donné par le défaut de masse de l'atome le plus simple : la masse de l'atome d'hydrogène H_1^1 (α)est inférieure à la somme des masses de l'électron et du proton d'une quantité juste égale à l'équivalent en masse de l'énergie d'ionisation de l'atome, bien que ce défaut soit tout à fait hors de portée de la mesure courante, puisqu'il vaut

$$m_\alpha < 2m_p + 2m_n$$

$$\Delta m = \frac{13{,}6 \times 1{,}6.10^{-19}\,J}{(3.10^8 m/s)^2} \approx 2.10^{-35}\,kg \qquad \text{(II-11)}$$

C'est-à-dire un peu plus de dix milliardième (un centième de millionième) de la masse d'un proton...

On peut encore vérifier expérimentalement que la racine carrée du rapport $\frac{E}{m}$ est égale à c dans l'exemple suivant. Dans la désintégration du positronium, il y a création et émission de deux rayons gamma d'énergie (mesurée) $0{,}511\ MeV = 0{,}8186 \times 10^{-13} J$, en compensation de la disparition de deux masses d'électron.

La masse d'un électron étant de $9{,}11 \times 10^{-31}\,kg$, on trouve bien :

$$\frac{E}{m} = \frac{0{,}82.10^{-13}kg}{9{,}11.10^{-31}} = 9.10^{16}m^2/s^2 \qquad \text{(II-12a)}$$

$$\sqrt{\frac{E}{m}} = 3.10^8 m/s \quad = c \qquad \text{(II-12b)}$$

À l'échelle astronomique, la formule explique également comment les étoiles, comme le Soleil, peuvent émettre leur énergie pendant des milliards d'années, alors que cette situation constituait un mystère pour la physique du début du XXe siècle, aucune source d'énergie connue à l'époque ne pouvant en rendre compte.

Au centre du Soleil, les conditions physiques sont telles que s'y produisent des réactions nucléaires capables au bout d'une chaine de processus de transformer 4 noyaux d'hydrogène (4 protons), en un noyau d'hélium. Il se trouve que la masse au repos du noyau d'hélium (^4_2He) est inférieure à la somme des masses au repos des 2 protons et 2 neutrons qui le constituent. L'énergie équivalente à cette différence de masse est la source de l'énergie du Soleil, et grâce à l'importance du facteur de conversion c^2 et à la masse considérable du Soleil, le calcul montre que l'énergie libérée permet à notre étoile de briller pendant une bonne douzaine de milliards d'années.

II.5- Qu'est-ce que la masse ?

Le concept de masse nous est familier car il est associé à une quantité de matière (substance) d'une densité donnée et contenue dans un volume donné par les dimensions d'un objet. Nous verrons que cette définition de la masse, établie sur une corrélation avec une quantité de matière n'est pas exacte car elle est liée à une quantité d'énergie selon l'équation d'Einstein [4-5] écrite sous sa forme originelle :

$$m = \frac{E}{c^2} \qquad \text{(II-13)}$$

On verra ensuite que ce concept de masse doit être élargi depuis la prédiction théorique du boson de Higgs-Englert en 1964 et sa découverte en 2012 au LHC (Large Hadron Collider) du CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) à Genève.

Dire que la masse correspond à une quantité d'énergie est tout-à-fait contre-intuitif, mais quand on s'attaque à la physique, il faut s'habituer à penser contre son cerveau car la physique explique le possible, c'est-à-dire le comportement réel de la nature, par l'impossible, c'est-à-dire des lois physiques qui vont à l'encontre de nos intuitions.

En d'autres mots, les lois de la physique qui contredisent l'observation en apparence obligent à réinterpréter ce que l'on voit d'une façon différente. En effet, on a du mal à imaginer ce que pourrait être une particule de matière qui ne serait pas massive et on a du mal à imaginer ce que serait de la masse qui ne serait pas incarnée en particules de matière.

Qu'apprend-on à l'école au sujet de la masse ? Il s'agit d'une grandeur mesurable : on peut effectuer des mesures qui donnent la masse d'un corps dans une certaine unité qui est le kilogramme (kg). Attention, la masse n'est pas le poids : le poids est une force qui s'exprime en Newton $[N]$ et qui est liée à la gravité qui s'applique à toute masse. La gravité est liée à l'accélération de la pesanteur. Le poids est le produit de la masse par l'accélération de la pesanteur :

$$P = mg \qquad \text{(II-14)}$$

La masse est aussi une grandeur mesurant (le mesuran de ou résultat d'une mesure), c'est-à-dire que c'est une grandeur qui mesure quelque chose : le degré de substantialité d'un corps. Plus il y a de masse, plus il y a de substance, et donc plus il y a d'atomes.

II. 6 . Deux sortes de masses :

Newton comprend à la fin du $XVII^{ème}$ siècle qu'il y a deux sortes de masse. D'une part il y a la masse pesante (ou masse grave, du mot « gravité ») qui est ce par quoi un corps, placé dans un champ de gravitation, subit la force de gravitation ; une sorte d'étiquette que porte un corps et par laquelle il est reconnu par la gravitation. D'autre part il y a une autre masse qui intervient dans la relation fondamentale de la dynamique : la force qu'on exerce sur un corps, quelle que soit l'origine de cette force, est égale au produit de sa masse par l'accélération qu'il subit. Il s'agit de la masse inertielle dans la relation de la dynamique :

$$F = ma \tag{II-15}$$

Cette masse mesure l'inertie d'un corps, c'est-à-dire qu'elle mesure la difficulté qu'il y a à modifier le mouvement d'un corps, à l'interrompre si le corps est en mouvement ou le créer si le corps est immobile. Plus un corps a une masse inerte élevée, plus il est difficile de le mettre en mouvement.

Newton découvre que la masse pesante est égale à la masse inerte (inertielle) et qu'elle s'exprime dans la même unité (kg). Cela a comme conséquence que le mouvement d'un corps dans un champ de gravitation est complètement indépendant de sa masse. Ce qui confirme ce que Galilée avait déjà découvert : tous les corps tombent à la même vitesse (dans le vide) quelle que soit leur masse. Dans un autre exemple : la terre est en mouvement et tourne autour du soleil ; la terre se situe dans le champ de gravitation du soleil. Si l'on remplace la terre par une boule de pétanque, cette boule décrira exactement la même orbite que parcourt la terre autour du soleil ; la trajectoire de la boule de pétanque sera exactement la même que celle de la terre.

Au $XX^{ème}$ siècle, Einstein va reprendre l'égalité entre la masse pesante et la masse inertielle et va postuler qu'il s'agit non pas d'une égalité mais d'une identité. L'inertie et la gravitation sont en quelque sorte la même chose et cela va le conduire à élaborer une nouvelle théorie de la gravitation que l'on appelle la relativité générale.

II.7-La vitesse de la lumière, vitesse limite que les corps massifs ne peuvent pas dépasser :

En mécanique newtonienne, l'inertie d'un corps est mesurée par sa masse :

Inertie = $I = m$. Mais en relativité restreinte, l'inertie n'est plus égale à la masse du corps mais elle est égale à l'énergie totale du corps (l'énergie de masse) divisée par la vitesse de la lumière au carré :

$m = \frac{E}{c^2}$ .On parle ici d'une énergie de masse. Prenons quelques ordres de grandeur avec un corps qui a une masse de 1 g ($10^{-3}\ kg$). La vitesse de la lumière est de $300\ 000\ km/s$ ($108\ m/s$).

$$E[J] = 10^{-3}\ [kg\ ].\left(3.10^8\left[\frac{m}{s}\right]\right)^2 = 10^{-3}\ .9.10^{16}\ [J]$$

$$= 9.10^{13}[J]$$

$$E[J] = 900\ 000\ milliard\ de\ joules \qquad \text{(II-16)}$$

Ce qui donne une énergie de :

$$E = \frac{900\ 000.10^9[J]}{3600\left[\frac{s}{h}\right]} = 250.10^9\left[\frac{J}{s}.h\right]$$

$$E = 250\ \ Twh\ = 250\ 000\ GWh \qquad \text{(II -17)}$$

Un objet de masse « m » possède de l'énergie du seul fait qu'il a une masse.

En ce qui concerne l'inertie, celle-ci augmente avec la vitesse.

$$Inetie\ (au\ repos) : I = m = \frac{E}{c^2} \qquad (II\text{-}18a)$$

$$Inetie\ (en\ mouvement) = \frac{énergie\ de\ masse\ + énergie\ cinétique}{c^2} :$$

$$I_{mvt} = \frac{m.c^2 + T}{c^2} = m + \frac{T}{c^2} \qquad (II\text{-}18b)$$

$$Energie\ cinetique : T = \frac{m.v^2}{2}\ avec\ v = vitesse \qquad (II\text{-}18c)$$

$$\mathrm{I_{mvt}} = \mathrm{m} + \frac{\mathrm{m.v^2}}{\mathrm{c^2}} \qquad (II\text{- }18d)$$

$$\mathrm{Si}\ \begin{cases} \mathrm{v} = 0 & \mathrm{alors\ I = m} \\ \mathrm{v} > 0 & \mathrm{alors\ I >\ m} \end{cases}$$

Énergie d'un corps en mouvement à vitesse « v » avec le facteur de Lorenz « γ » :

$$E = \gamma mc^2 = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}.mc^2 \qquad (II\text{-}19)$$

Si un corps ou une particule est en mouvement, l'énergie cinétique de cette particule va augmenter avec la vitesse et l'inertie de cette particule va donc aussi augmenter avec la vitesse. Plus la particule va aller vite, plus son inertie sera grande et plus il sera difficile de la faire aller plus vite jusqu'au moment où l'inertie sera tellement élevée qu'on ne pourra plus modifier la vitesse du corps ou de la particule. La formule ci-dessus implique donc l'existence d'une vitesse limite, c'est-à-dire une vitesse que les particules ne peuvent pas dépasser, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas dépasser la vitesse de la lumière qui est égale à c $(v = c)$. La lettre « c » vient du mot « célérité ».

Il y a donc un moment où on aura beau donner de l'énergie cinétique à une particule, on ne parviendra plus à augmenter sa vitesse. C'est ce que l'on réalise dans les accélérateurs de particules. Le mot « accélérateur » de particule est un abus de langage puisque précisément, on n'accélère pas les particules. Dans le LHC (Large Hadron Collider) on injecte des protons à une certaine énergie (par exemple $450\ GeV$). Ces protons se déplacent presqu'à la vitesse de la lumière et on leur donne de l'énergie, tour par tour, beaucoup d'énergie $(3{,}5\ TeV)$, et cela se fait à vitesse constante. Tout se passe comme si on « accélère » les protons à vitesse constante. En fait, on donne aux protons de l'inertie, c'est-à-dire de l'énergie, mais on ne leur donne pas d'accroissement de vitesse parce que les protons sont déjà à la vitesse maximale.

II. 8 . Façon dont on comprend les interactions fondamentales en physique ; les forces :

En physique classique, c'est très simple ; on pense à la force gravitationnelle ou à la force électromagnétique. Un objet matériel, électrique ou pas, crée un champ. Si c'est un objet massif, il crée un champ gravitationnel, si c'est une charge électrique, elle crée un champ électrique qui est partout présent dans l'espace et que l'on peut calculer (avec les équations de Maxwell). Si on place une particule dans ce champ, une particule chargée ou une particule qui a une masse, elle va subir une force à l'endroit où elle se trouve et qui est proportionnelle à l'amplitude du champ. Une masse crée donc un champ de gravitation et ce champ de gravitation engendre une force de gravitation pour les objets qui s'y trouvent. Une charge électrique crée un champ électrique qui va exercer une force sur les charges électriques qui se trouveront dans ce champ. En physique classique, une force se transmet par l'entremise d'un champ.

En physique quantique, les choses en vont tout autrement. Il est relativement difficile de se représenter les phénomènes qui se passent en physique quantique par des images ou par une représentation réelle. En effet, tout se calcule par des mathématiques relativement complexes et abstraites. Tout ce que l'on peut faire, c'est prendre des métaphores, dire ce qu'il faut en retenir et dire ce qu'il faut abandonner pour ne pas se laisser tromper.

Voici quelques exemples de concepts et outils mathématiques abstraits de la physique quantique. Ces mathématiques parlent de fonction d'état dans un espace de Hilbert à quatre dimensions, de théorie de jauges, de Lagrangien, de symétrie et de brisure de symétrie, de symétrie globale, de symétrie locale, de symétrie de jauge, de champ de jauge et d'espaces fibrés, de facteur d'échelle par un nombre complexe de module unitaire, de rotation vectorielles du plan, de rotation de l'espace à trois dimensions, de quadrivecteurs, de groupe abélien et non-abélien, de chromodynamique quantique, etc. Bref, beaucoup de mots barbares qui sortent du cadre de cet article. Toutefois, on donnera plus loin une brève description des symétries de jauge.

Il est toutefois remarquable que les mathématiques de la physique quantique ont pu prédire des phénomènes qui se sont toujours vérifiés par les expérimentations, entre autres dans les accélérateurs de particules. Une des dernières découvertes est le boson de Higgs-Englert prédit en 1964 et découvert en 2012. Nous en reparlerons vers la fin de cet article.

Pour se représenter les forces qui existent entre les particules, on va prendre une métaphore qui matérialise les interactions qui agissent entre les particules. En physique quantique, une interaction entre deux objets est aussi une affaire d'objets. C'est-à-dire que quand deux particules interagissent, il faut imaginer qu'elles échangent d'autres particules qui sont caractéristiques de l'interaction qu'elles subissent.

Par analogie, imaginons deux barques qui circulent sur un lac où il n'y a pas le moindre courant d'eau ni de vent ni de vague à la surface. Les deux barques sont en mouvement sur des trajectoires qui se croisent et les barques sont sur le point de rentrer en collision au croisement de leurs trajectoires respectives. Les deux passagers qui se trouvent à bord des barques (un passager par barque) ne disposent d'aucun moyen de diriger celles-ci ni de modifier leurs trajectoires : pas de gouvernail, pas de pagaille, pas de perche, pas de rame, pas de moteur, pas de voile. Si les passagers ne font rien, c'est la collision assurée entre les deux barques. Imaginons qu'un des deux passagers possède un ballon de football qui a une certaine masse et que les deux passagers commencent à se faire des passes avec le ballon en se le renvoyant tour à tour l'un à l'autre. Grâce à cette succession de passes qu'ils se font, par le principe de l'action et de la réaction il y a un échange d'une quantité de mouvement ($p = mv$), et cela va créer une force répulsive qui fait que les deux barques vont finir par s'éloigner l'une de l'autre. Cette analogie, certes critiquable, permet d'expliquer comment s'effectuent les interactions entre les particules. Tout se passe comme si les particules s'échangeaient des ballons qui sont caractéristiques des interactions qu'elles subissent. Il est à remarquer que plus le ballon est lourd, et plus la portée de l'interaction est proche : il est difficile de lancer au loin un ballon très lourd. Les interactions entre particules au moyen de particules d'interaction lourdes sont presque des interactions de contact. Plus le ballon est léger et plus il est facile de le lancer de très loin. À la limite, l'interaction entre particules qui s'effectuent par des particules d'interaction de masse nulle a une portée infinie.

II. 9 . Distinctions entre les particules élémentaires de l'atome :

Au niveau des particules élémentaires, il y a des particules qui ne subissent pas l'interaction nucléaire forte car elles n'y sont pas sensibles. Ces particules, on les appelle des leptons (du grec $\lambda\varepsilon\pi\tau o\varsigma$ qui signifie « léger ») et forment une sous-famille des fermions. Il y a 6 sortes de leptons de trois « saveurs » différentes : l'électron $e-$, le muon $\mu-$ qui est une sorte d'électron « lourd » et le tau (tauon) $\tau-$ qui sont des particules avec une charge électrique et une masse non nulle. Il y a d'autres particules qui y sont associées : le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tauique sans charge électrique et de masse non nulle. À ces 6 particules sont associées des antiparticules de charge opposée c'est-à-dire le positron $e+$, l'anti-muon $\mu +$ et l'anti-tau $\tau +$ ainsi que les 3 antiparticules associées : les antineutrinos.

Il y a les particules élémentaires qui subissent l'interaction nucléaire faible, les hadrons qui sont au nombre d'une centaine de types parmi lesquels on distingue deux familles : les hadrons constitués de trois quarks (baryons) et les hadrons constitués d'une paire de quark et antiquark (mésons). En ce qui concerne l'interaction nucléaire forte, il faut se représenter que les quarks interagissent en s'échangeant des gluons.

II. 10 .Description des interactions entre les particules élémentaires de l'atome (groupes de symétrie et théories de jauge) :

Après la 2ème guerre mondiale, il y a des physiciens théoriciens qui ont eu des idées assez incroyables. Ils ont eu l'idée d'associer chacune des interactions à ce qu'on appelle un groupe de symétrie. Qu'est-ce qu'une symétrie ? Dans la vie courante, une symétrie est une opération qui ne change pas la forme d'un objet, qui le laisse invariant. Par exemple, si on prend une sphère et que l'on fait tourner celle-ci par n'importe quel axe qui la traverse et passe par son centre, cela ne change pas sa forme et cela ne change pas non plus sa position. Cette rotation laisse la sphère invariante. Les physiciens ont identifié des groupes de symétrie qui laissent la structure des interactions invariante. Par exemple, le groupe de symétrie associé à l'électromagnétisme, c'est l'ensemble des nombres complexes dont le module est égal à 1.

$$z = a + jb \rightarrow |z| = \sqrt{a^2 + b^2} = 1 \qquad \text{(II-20)}$$

et qui s'écrivent en notation d'Euler sous la forme

$$e^{j\alpha} = 1 \qquad \text{(II-21)}$$

Il se trouve que, dans le cadre de la mécanique quantique, si l'on fait l'hypothèse que le groupe de symétrie de l'électromagnétisme, c'est l'ensemble des nombres qui s'écrivent sous cette forme, alors le formalisme est tel qu'il permet de calculer toutes les propriétés de l'interaction. L'identification du groupe détermine l'interaction. L'identification de la symétrie de l'interaction détermine toutes ses propriétés. En ce qui concerne l'électromagnétisme, le groupe de symétrie est appelé $U(1)$.

La chose incroyable, c'est que très peu de temps après les physiciens théoriciens ont pu faire le même type d'opération pour l'interaction nucléaire faible et pour l'interaction nucléaire forte : on a trouvé un groupe de symétrie pour l'interaction faible qui s'appelle $SU(2)$ (matrices 2 x 2 spéciales unitaires) et on a trouvé un groupe de symétrie pour l'interaction forte qui s'appelle $SU(3)$ (matrices 3 x 3 spéciales unitaires). Ce qui est extraordinaire c'est que le seul fait de fixer ces groupes, de les identifier, détermine complètement la structure des interactions.

Les groupes de symétrie portent le nom de symétrie de jauge. Elle correspond à l'invariance d'un système physique sous l'action locale d'un groupe de symétrie appelé groupe de jauge dans les théories de jauge. Cela signifie qu'il est possible d'effectuer une transformation donnée à un élément du groupe de symétrie de façon indépendante en chaque point de l'espace-temps sans affecter le résultat des observations. La transformation s'effectue à l'aide d'un outil mathématique qui est le lagrangien. En quelques mots, le lagrangien (découvert par le mathématicien Joseph-Louis Lagrange en 1788) est une fonction mathématique qui permet d'écrire de manière concise les équations du mouvement d'un système faisant intervenir la position, la vitesse et l'accélération d'un objet en exprimant une relation où interviennent l'énergie cinétique, la quantité de mouvement et l'énergie potentielle de cet objet dans le cadre de la mécanique classique. Le formalisme du lagrangien est aussi applicable dans la théorie des champs physiques et dans les théories de jauge de la physique quantique.

Après la $2^{\text{ème}}$ guerre mondiale, on construit des nouveaux accélérateurs de particules, on fait des collisions, on a beaucoup de données expérimentales, on obtient un nombre de données qui augmente très rapidement au cours du temps. Il se trouve que la théorie que l'on construit ainsi qui s'appelle le modèle standard de la physique des particules est une théorie qui rend compte des événements que l'on peut détecter dans les détecteurs de particules. Autrement dit, on a un modèle, une théorie, qui permet d'expliquer les choses de façon élégante parce que ces trois interactions qui, d'un point de vue phénoménologique sont complètement différentes, en fait sont décrites de la même façon par ce qu'on appelle les théories de jauge. Un groupe de symétrie détermine l'interaction, ce n'est pas le même groupe pour les trois interactions (électromagnétisme, force faible et force forte) mais le formalisme mathématique est le même pour les trois groupes. Cela donne un côté très unificateur qui est toujours apprécié parce qu'il est synonyme d'une forme d'élégance dans le formalisme mathématique. Tout va bien, puisqu'on rencontre des résultats, on a une sorte de théorie physique (théorie de jauge) qui décrit parfaitement le monde de l'infiniment petit.

Le problème, on le constate au début des années 60, est que si l'on suppose que les équations de ce modèle sont justes et si on regarde ce qu'elles impliquent – on fait une sorte d'expérience de pensée – qu'est-ce qui se passerait si les équations étaient vraiment justes ? On se rend compte que, si les équations sont vraiment justes, alors les masses de tous les ballons que les passagers se passent l'un à l'autre dans l'analogie avec les deux barques sur le lac, c'est-à-dire les particules qui médiatisent les interactions, leurs masses devraient être nulle. Autrement dit, toutes les interactions devraient avoir une portée infinie et devraient être médiatisées par des particules de masse nulle. Cela va même plus loin car il y a une sorte de phénomène de contagion : si les particules d'interaction ont des masses nulles, alors les particules qui subissent l'interaction devraient aussi avoir des masses nulles. Autrement dit, le modèle standard qui marche très bien prédit, si on le prend au sérieux, que les masses de toutes les particules élémentaires doivent être égales à zéro. Ce qui n'est pas ce que l'on constate : les bosons intermédiaires $W+, W-$ et Z qui caractérisent l'interaction faible sont très lourds et les électrons ont une masse non nulle. Donc il y a une contradiction entre ce que l'on mesure et ce que dit ce modèle. Comment résoudre cette contradiction ?

Rappelez-vous de tout ce qui a été décrit ci-dessus à propos de la masse. L'idée que nous avons de la masse qui est intriquée avec la notion de quantité de matière est indéracinable dans notre cerveau. Quand on pense masse, on pense matière et quand on pense matière, on pense masse. C'est la découverte du boson de Higgs qui va défaire cette idée d'intrication entre matière et masse.

On commençait à comprendre, grâce à l'équation d'Einstein $E = mc2$, que dans les atomes, il y a une énergie de masse, c'est-à-dire que l'énergie contenue dans les atomes font que ceux-ci ont une masse. Cela reste toujours vrai. La découverte du boson de Higgs va simplement élargir ce concept aux particules élémentaires qui, selon le modèle standard des particules sont toutes de masse nulle. Le boson de Higgs est une particule qui caractérise le champ scalaire de Higgs. Un champ scalaire est par exemple un champ de température : il y a telle température à tel endroit de l'espace. Dans cet exemple, le champ scalaire de température indique les températures qu'il y a en tous points de l'espace. Ainsi, depuis la découverte du boson de Higgs, on a pu résoudre la contradiction de la masse nulle des particules selon le modèle standard. Les particules élémentaires de l'atome interagissent avec le vide qui n'est pas vide car il est rempli par le champ de Higgs qui est présent partout dans l'espace. Le boson de Higgs est le quantum du champ scalaire de Higgs. Par comparaison, le photon est le quantum du champ électromagnétique. Les particules élémentaires acquièrent de la masse à cause de leur interaction (on parlera de couplage) avec le champ scalaire de Higgs. La masse des particules élémentaires n'est donc plus contenue dans ces particules élémentaires, cette masse devient une manifestation secondaire des particules élémentaires et cette manifestation de masse a lieu grâce au couplage que les particules élémentaires ont avec le champ de Higgs. Nous reviendrons plus loin au boson de Higgs.

II.11- D'autres exemples qui illustrent la formule E=mc2 pour mieux comprendre :

Dans les exemples qui vont suivre, on va rentrer de plus en plus profondément dans la matière en partant d'un atome d'hydrogène, ensuite on ira au niveau du noyau d'un atome d'hélium et enfin on va rentrer à l'intérieur d'un proton et d'un neutron où se situent les quarks et les gluons. On constatera que l'essentiel de la masse de notre corps est contenue dans l'énergie colossale qui est contenue dans les interactions qui existent entre les quarks et qui est médiatisée par les gluons. Comme nous l'écrivions ci-dessus : la masse de notre corps trouve son origine dans l'énergie qui existe grâce à la danse frénétique de nos particules élémentaires. [6-9]

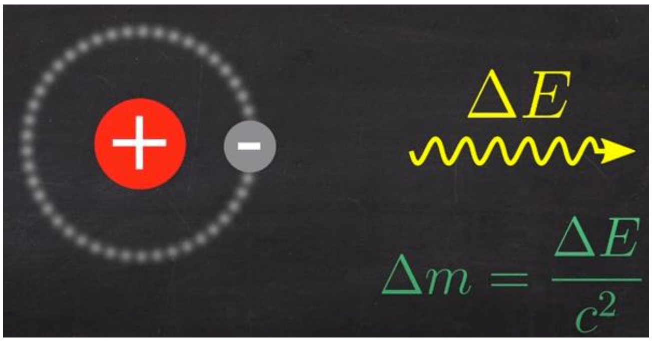
La masse d'un proton est de $1{,}673.10-27\ [kg]$. La masse d'un électron est de $9{,}109.10-31\ [kg]$. On devrait s'attendre à ce que la masse d'un atome d'hydrogène constitué d'un proton et d'un électron soit la somme des masses de ces deux particules ; eh bien non car quand on associe un proton et un électron, on diminue l'énergie potentielle du système. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle le proton et l'électron s'associe pour créer une liaison : ils s'attirent parce qu'ils préfèrent être dans un état d'énergie potentielle la plus basse.

On peut en tirer comme leçon que l'état le plus stable de la matière correspond à un abaissement du niveau d'énergie de la matière.

La formation d'un atome d'hydrogène libère donc une certaine quantité d'énergie ΔE. Comme cet atome, en se formant, a perdu de l'énergie, il a aussi perdu de la masse :

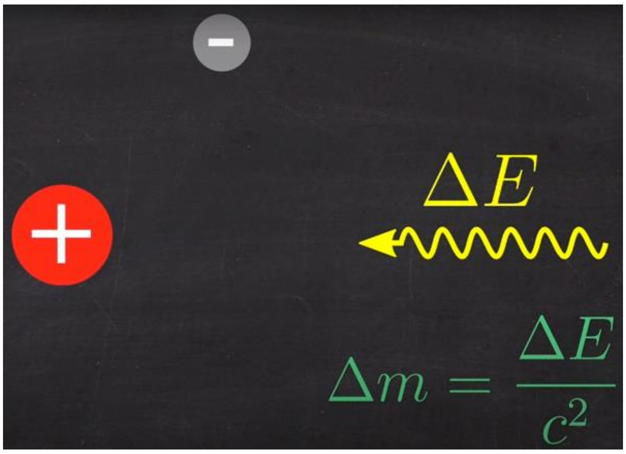
$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \qquad \text{(II-22)}$$

À cause de cette perte d'énergie, l'atome d'hydrogène a une masse inférieure à celle de la somme de ses constituants.



Figeur II-1: Libération d'énergie et perte de masse d'un atome d'hydrogène lors de sa formation.

Une manière équivalente de le dire est que l'énergie libérée par l'atome d'hydrogène lors de sa formation c'est aussi celle qui est nécessaire pour le casser ; c'est ce qu'on appelle l'énergie d'ionisation. Quand on sépare les constituants d'un atome d'hydrogène, on lui apporte de l'énergie et on augmente donc la somme des masses des constituants de cette même quantité. Dans le cas de la formation ou la séparation d'un atome d'hydrogène la variation de masse est très faible et vaut à peu près un milliardième de la masse de cet atome.



Figeur II-2 : Énergie nécessaire et gain de masse des constituants séparés d'un atome d'hydrogène lors de son ionisation.

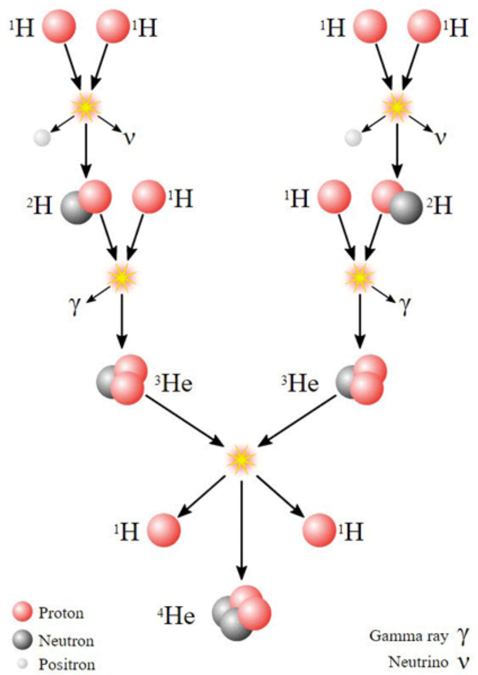
Voyons maintenant un exemple où la variation de masse est beaucoup plus significative, ce qui est le cas dans le noyau d'un atome d'hélium qui est constitué de deux protons et de deux neutrons. La masse d'un proton est $1.673.10-27$ $[kg]$ et celle d'un neutron est $1.675.10-27$ $[kg]$.

Si l'on additionne séparément les masses de deux protons et de deux neutrons, on obtient une masse de

$(1,673+1,673+1,675+1,675)\cdot 10^{-27}$ [kg] $= 6,696\cdot 10^{-27}$ [kg].

Or la masse d'un noyau d'hélium est de $6{,}646.10-27$ $[kg]$. La masse d'un noyau d'hélium est donc inférieure à la somme des masses de ses constituants. Cette perte de masse s'accompagne d'un rayonnement d'énergie. La constitution d'un noyau d'hélium s'effectue par fusion nucléaire ; c'est ce qui se passe dans la réaction en chaine de fusion nucléaire dans le soleil où des protons d'atome d'hydrogène et des neutrons fusionnent pour former des atomes d'hélium. Le soleil rayonne beaucoup d'énergie par ce processus et il ne cesse de perdre de la masse au cours du temps.

Voici ci-dessous le détail de cette réaction en chaîne où l'on peut observer l'émission de rayonnement gamma et l'éjection de positrons et de neutrinos.



Figeur II-3: Réaction en chaîne de fusion nucléaire dans le soleil où les atomes d'hydrogène forment des atomes d'hélium avec un rayonnement d'énergie.

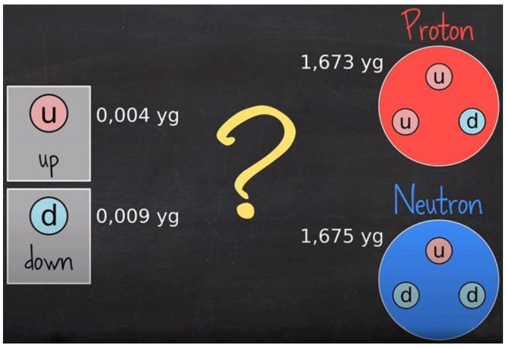
La perte de masse lors de la constitution d'un noyau d'hélium est de l'ordre de 1 % de la somme des masses de ses constituants. Cela peut paraître peu, mais en fait c'est énorme et cela permet au soleil de nous envoyer de la lumière et aux étoiles de briller. Cela veut dire aussi que les 99 % restant de la masse représentent une quantité d'énergie fabuleuse.

Alors, où se trouve donc les 99 % de la masse qui reste et ou se cache l'énergie qu'elle contient ? Pour cela, il va falloir rentrer dans les protons et les neutrons pour s'intéresser aux quarks. Comme on a fait pour les atomes et les noyaux, on peut regarder comment la masse d'un proton ou d'un neutron est reliée à la masse des quarks qui le constituent.

Les masses seront exprimées en $yocto$ (y) gramme : $1\ yg\ =\ 10-24\ g$. La masse d'un proton est de $1{,}673\ yg$ et celle d'un neutron est de $1{,}675$

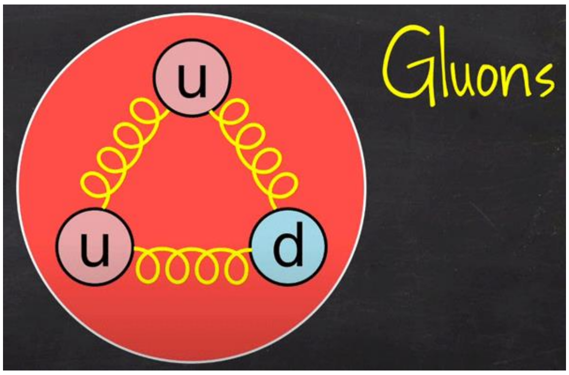
yg. Un proton est constitué de deux quarks up et d'un quark down ; un neutron est constitué d'un quark up et de deux quarks down. La masse d'un quark up est de $0{,}004\ yg$ et celle d'un quark down est de $0{,}009\ yg$. Les quarks interagissent par des gluons et ces derniers ont une masse nulle.

On constate rapidement que la somme des masses des quarks est de loin très inférieure à la masse d'un proton ou d'un neutron. Alors, où se trouve le reste de la masse ?



Figeur II-4 : Masse des quarks up et down et masse du proton et du neutron.

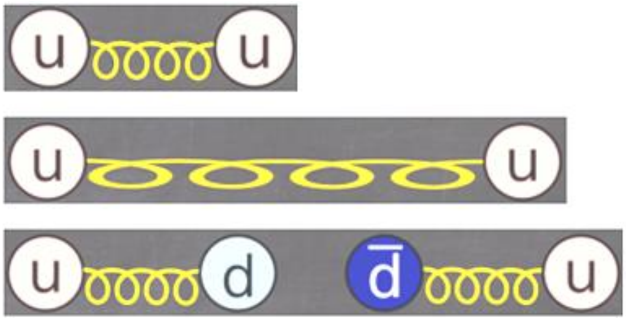
On sait que la masse, c'est du contenu en énergie. Ce qui explique la masse d'un proton et d'un neutron, c'est à 99 % de l'énergie d'interaction entre les quarks. Au sein des protons et des neutrons les quarks sont « reliés » par ce qu'on appelle l'interaction forte (force nucléaire forte). Les quarks interagissent et s'attirent en échangeant d'autres particules que l'on appelle des gluons. On représente souvent les gluons comme des petits ressorts en forme de boudin qui relient les quarks. Cette représentation n'est pas innocente car plus on veut éloigner deux quarks l'un de l'autre, plus ils interagissent et plus la « force de rappel » est grande (plus ils s'attirent). L'attraction entre deux quarks ne devient faible que lorsqu'on les rapproche fortement (on parle de liberté asymptotique).



Figeur II-5 : Représentation des gluons qui sont les particules d'interaction entre les quarks.

Comme l'existence de cette attraction et de cette interaction entre les quarks provoquent leurs mouvements, ils déploient à la fois une énergie cinétique du fait de leur vitesse et une énergie potentielle d'interaction. Ces deux formes d'énergies constituent l'énergie interne globale d'un proton ou d'un neutron et cette énergie interne contribue à 99 % de leurs masses respectives. Ainsi, pour les protons et les neutrons qui représentent l'immense majorité de la matière de notre corps, l'origine de la masse ne vient pas de ses constituants, les quarks, mais de leur énergie : leur énergie cinétique et leur énergie d'interaction.

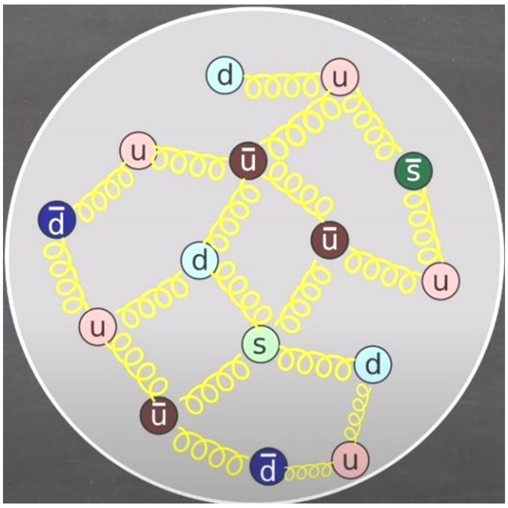
Dans la réalité, la situation est un peu plus complexe. Quand on essaye d'éloigner deux quarks, la force entre les deux augmente. Cela a une conséquence un peu contre-intuitive : il n'est pas possible d'observer un quark tout seul ou isolé ; c'est ce qu'on appelle le confinement des quarks. Si on essaye quand-même de tirer sur cette sorte de ressort (le gluon), au bout d'un moment il se passe un phénomène étonnant : le ressort, c'est-à-dire le gluon se désintègre et l'énergie qu'il contenait se transforme en une paire de quarks et une parie de quark et d'antiquark qui peuvent d'ailleurs être d'un type différents de up et down. Inversement, des paires de quarks et d'antiquarks peuvent fusionner et disparaître en redonnant de l'énergie au gluon.



Figeur II-6 : Formation de paires de quarks et d'antiquarks à partir d'une parie de quarks.

Il est à remarquer que dans l'interaction forte, les gluons sont de masse nulle, ils ont donc une portée infinie d'interaction. Mais la portée effective de l'interaction est très petite tout simplement parce que les quarks ne peuvent pas exister tout seul. Ils sont forcément dans des paquets : soit des paquets de trois quarks comme dans le proton et le neutron, soit des paquets formés par un quark et un antiquark comme dans les mésons. Les quarks ne sont donc jamais tout seul : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons de sorte que la portée effective de l'interaction forte est très petite et a la taille des protons et des neutrons. Pour rappel, les hadrons sont des protons, des neutrons ou des mésons. Quand on crée des quarks lors de collisions de particules, on peut faire sortir un quark de la collision, mais très vite il va faire sortir du vide des paires de quarks et d'antiquarks pour faire fabriquer des particules composites. Cela va provoquer ce que l'on appelle des jets dans les détecteurs d'un collisionneur de particules : on verra des quarks habillés d'autres quarks pour former des particules composites. Dans le jargon de la physique quantique, on dit que les quarks s'habillent pour sortir ; ils s'habillent d'autres quarks ou d'antiquarks.

À l'intérieur d'un proton ou d'un neutron, la cadence de création et de disparition de paires de quarks se produit à un rythme effréné. Une image correcte de leur structure interne n'est pas celle de trois quarks reliés par des gluons, mais plutôt d'une mer de quarks, d'antiquarks et de gluons qui évoluent sans cesse avec comme particularité qu'il y a en final trois quarks de plus qu'il y a d'antiquarks : deux up et un down pour un proton et un up et deux down pour un neutron. Les paires de quarks et d'antiquarks peuvent être vues comme des particules virtuelles. De ce point de vue-là, une manière un peu plus correcte de voir ces 99 % d'énergie interne, c'est de voir l'énergie de cette mer de quarks qui dansent à un rythme frénétique et où les paires de quarks et d'antiquarks se font et se défont.



Figeur II-7 : Structure interne d'un proton où les paires de quarks et d'antiquarks se font et se défont à un rythme effréné dans une mer de quarks et d'antiquarks.

À ce stade de notre voyage au plus profond de l'atome, vous remarquerez qu'on a déjà expliqué 99 % de la masse de notre corps, juste avec de l'énergie interne : l'énergie d'interaction des quarks. Depuis le début, on comprend que la nature de la masse c'est de l'énergie interne grâce à l'équation d'Einstein E = mc2. Cela fonctionne bien car on a regardé des systèmes qui sont composites, c'est-à-dire faits de plusieurs constituants : un atome, un noyau, un proton. Mais un quark, jusqu'à présent, c'est une particule élémentaire qui n'est composée de rien d'autre que d'elle-même. Alors, même si la masse des quarks ne compte que pour 1 %,

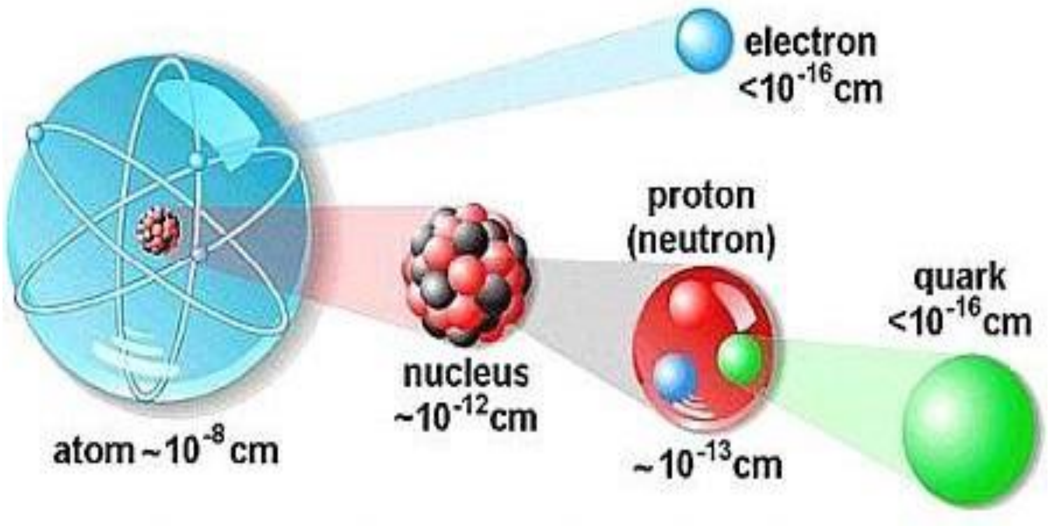
II.12-Conclusions :

C’est grâce au génie d’Albert Einstein et de la découverte de sa formule

E = mc2 en 1905 que l’on peut comprendre aujourd’hui que 99 % de la masse de la matière est due à l’énergie d’interaction qui existe entre les particules élémentaires qui sont présentes dans la structure fondamentale de la matière.

C’est grâce à la découverte du boson de Higgs en 2012 que l’on peut comprendre que la masse des particules élémentaires qui ne représente que 1 % de la masse d’un corps, cette masse est due à l’interaction des particules élémentaires avec le champ de Higgs qui remplit tout l’espace vide, qui du coup n’est pas vide.

Chapitre III
masse selon Peter Higgs
d'où provienne ?



III. 1. Introduction :

Nous arrivons à la partie la plus laborieuse du travail, ou nous conversons tous ce que nous vues dans les chapitres I et II d'un point de vue théorique à des équations numériques accessibles aux calculs. Pour cela réécrivons notre énergie totale des quarks.

Résoudre ces équations numériquement revient à construire un organigramme de calcul inspirés par un programme écrit en fortran 77 qui repose sur la méthode d'Euler. Nous utilisons alors, notre algorithme basé:

III.2. Méthode des différences finies :

Pour résoudre numériquement l'équation relative à l'énergie il semble pertinent d'appliquer la méthode de discrétisation de l'espace et des opérateurs. Sous les hypothèses $\varphi(x)$qu'est au moins de classe C^2, un développement de Taylor nous permet d'écrire les deux égalités suivantes [1]:

$$\varphi(x+h)-\varphi(x)=h\frac{d\varphi}{dx}(x)+\frac{h^2}{2!}\frac{d^2\varphi}{dx}(x)+O(h^3) \qquad (\mathrm{III}-1a)$$

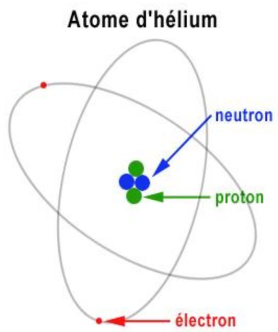
$$\varphi(x-h)-\varphi(x)=-h\frac{d\varphi}{dx}(x)+\frac{h^2}{2!}\frac{d^2\varphi}{dx^2}(x)+O(h^3) \qquad (\mathrm{III}—1\mathrm{b})$$

La différence de ces deux égalités donne :

$$\frac{\varphi(x+h)-\varphi(x-h)}{h}=\frac{d\varphi}{dx}(x) \qquad (\mathrm{III}\text{-}-2)$$

III. 3.les équations de la masse relativiste

Celle nous dit un corps même il a une vitesse nul il a quand même un contenu énergétique qui est égal à $\boldsymbol{mc^2}$.
Alors prend par exemple $^4_2He\ \ 2p + 2n$ il s'agît de regarder .ces bien particulier, le noyauα. Ou quand t'on fait de mesure plus perces des masses en s'aperçoit doit le masse de α est plus petite que le somme de ses constituant.



$$m_\alpha < 2m_p + 2m_n \qquad (III-3)$$

Et donc on les mêmes à l'état libère et le défirent est faible le fait quand même la différence de masse donnée par.

$$\Delta = \frac{(2m_p + 2m_n) - m_\alpha}{m_\alpha} \approx 0.8\ \% \qquad (III-4)$$

De ceci il fait comprendre d'où doivent cette différents (défait de masse) bien on va parler en termes d'énergie ou repos et bien.

$$\underbrace{m_\alpha c^2 = \underbrace{2m_p c^2 + 2m_n c^2}_{3755.68\ Mev} + \underbrace{T + V}_{-28 Mev}}_{3727.68\ Mev} \qquad (III-5)$$

Ou $\begin{cases} 1Mev = 10^6 ev \\ 1ev = 1.6\ 10^{-19} Mev \end{cases}$

Il manque quelque chose inspirée de l'énergie des nucléons (pn).

Le deux proton $(2p)$ et le deux neutron $(2n)$ sont bien en cohésion les uns des autres se sont des particules qui sont en interaction mutuelle donc, elle bouge sans l'effet des forces nucléaires qui les unissent ils ont de l'énergie potentielle des états liées qui les maintient et donc cette énergie et négative.

Quand t'où vent calcule le masse il faut prendre en compte pas seulement de le l'énergie cinétique et l'énergie potentille.

Quand t'où pense d'un phénomène électromagnétique par exemple la propagation de la lumière.

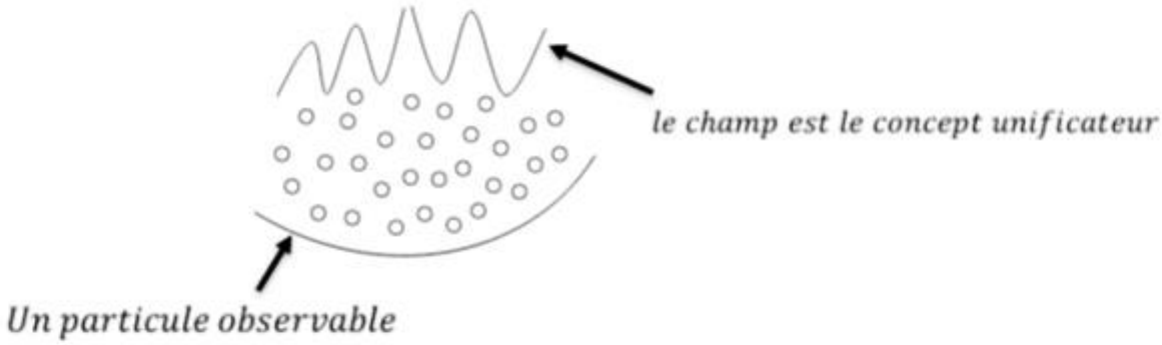
$$Champ\ EM \leftrightarrow photons$$

$$\Downarrow$$

$$fentes\ young$$

$$shéma:\ propagation\ de\ la\ lumiére$$

Ça vaut ce que ça vaut mais ça peut aider à comprendre .Et bien cette dualité onde corpuscule photon $e^-, p, n, \nu,$ ….. Et pas valable que pour les lumens elle est valable pour le p, n, e^-, ν et en faite en physique en introduit un concept unificateur qui



est une excitation du champ : Virtuel – réel.

Et le champ représenté la meilleure manière que l'on a de écrire.

A l'intérieur de ce champ sont représentés à l'état virtuel les Particules si vous injecter suffisamment d'énergie dans ce champ vous pouvez matérialise une particule donc on doit faire passer de l'état virtuel a l'état réel comme ça ≡ matérialiser .

Alors retournons ou problème de la masse se on regarde à la matière qui nous entoure, elle est constituée par des atomes dons le masse est cachée dans les atomes.

Faisons le bilan de ce qui est dures des atomes :

- Energie au repos :

$$Electron : 0{,}5\ Mev$$

$$\left.\begin{array}{l} Proton : 940\ Mev \\ Neutron : 940\ Mev \end{array}\right\} \quad nucléon$$

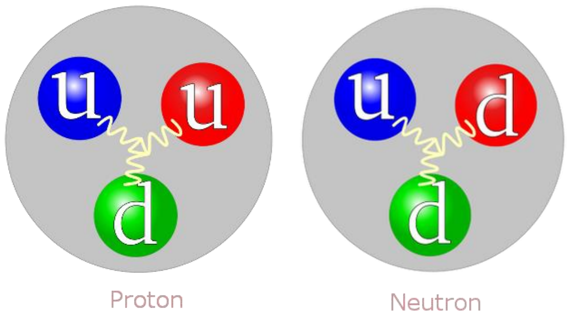
- Energie de liaison :

$$Nucléaire :\ -8Mev\ /nucléon$$

Energie de liaison électronique $10^{-3} ev$ qui lie les e^{-} a l'atome.

Masse de l'atome ? Masse de nucléons ?

Alors un nucléon : est une particule élémentaire formée par 3 quarks .



Et en fait il existe 6 neutrinos de quarks :

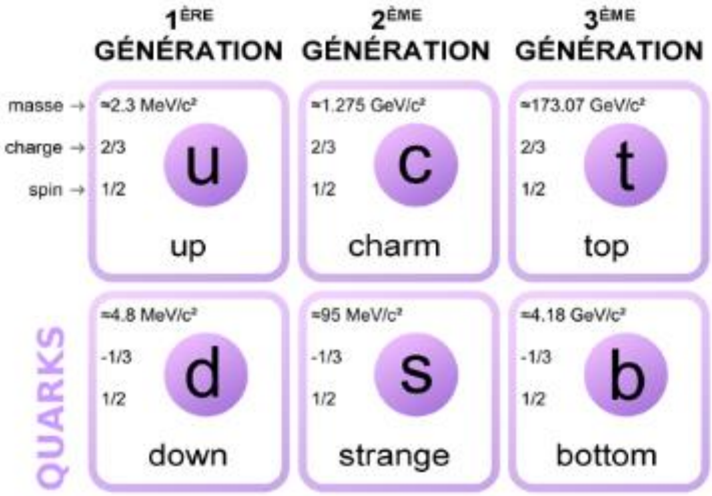
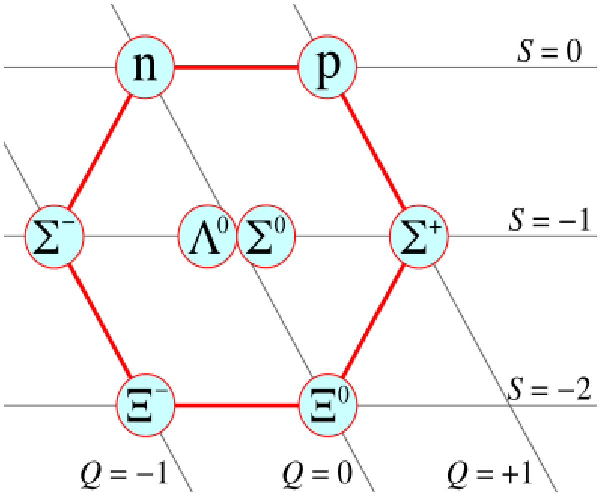


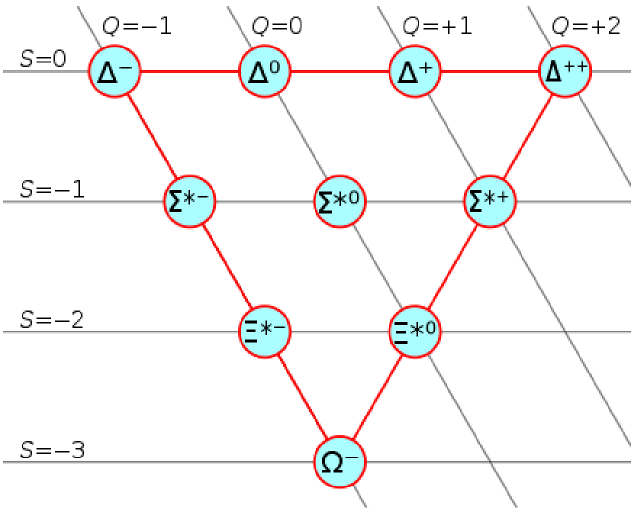
Table III-1 : défini les six quarks, leur masse leur charge et spin

De plus en plus lourd et la matière ordinaire n'est constituée que des parles u et d alors si on combien les 3 quarks plus lèges des s ont peut formes toute une sève de particule ils sont organisés ici dans le tableau.



les huit baryons se spin ½ composes uniquement de quarks u, d et ,

Classes par étranges (S) et charge (Q)



Les dix baryons de spin 3/2 composes uniquement de quarks u, d et,

Classes par étranges (S) et charge (Q)

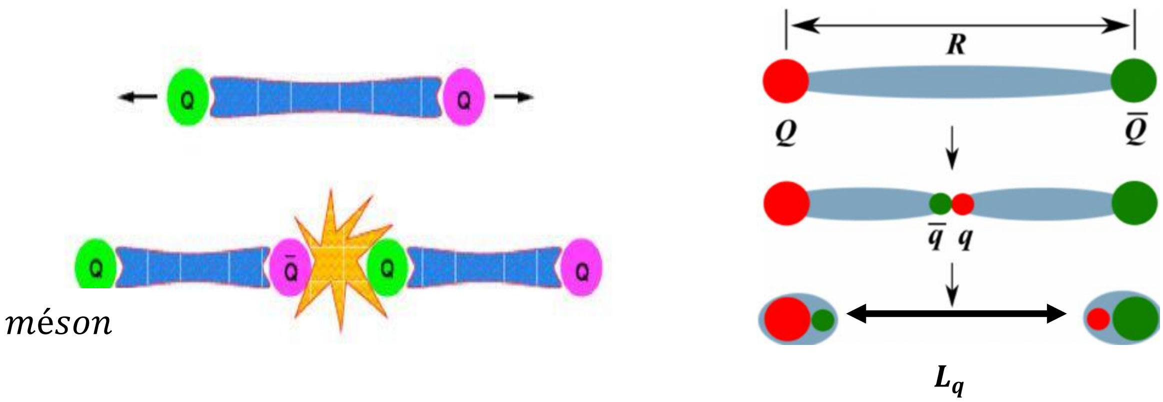
Équivalent du tableau de Mendel pour les nucléons.

On a aussi la famille de baryon Δ. Les 3 $quarks$ portent un charge de couleur, ils interagissent en échangeant et des $gluons\ colores$. Et les quarks portent une charge qu'on appelle charge de couleur.

Alors pourquoi qu'appelle charge de couleur et bien pense une change électrique vous avez deux charges possible $-\ +$ s'attirent et neutralisent le charge électrique et le charge disparait le système deviendrait neutre

Ces trois charge possible peuvent former un état lie car c'est une interaction attraction et une fois qu'ils sont ensemble ils neutralisent leurs proposes couleurs les un des autre et c'est pour ça qui pense à le couleur, les trois couleurs fondamentale : $rouge\ -\ bleu\ -\ vert$ mis ensemble ça fait des blanc donc voilà pourquoi les physiciens qui ont voulus comprendre ce phénomène couleur.

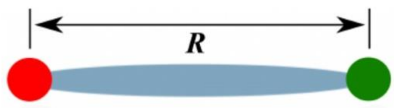
Ils interagissent entre eux en échangeant des gluons mais gluon porte aussi eux même une charge de couleur a fait il en transporte 2 et à cause de ce l'interaction qui existe entre les :



Figeur III-1: la rupture de chaine conventionnelle : la chaine QCD s'étendant entre le quark statique Q et l'antiquark statique $\bar{Q}$ se brise en raison de la création de paires légères qq

- Les gluons peuvent également interagir entre eux 3.
- la charge de couleur est responsable du confinement des quarks et des gluons.

Et quoi qu'elle l'interaction plus existe entre les gluons.
les gluons eux portent une charge de couleur eu fait il en transporte 2 et à cause de cela l'interaction qui existe entre les gluons qui est vraiment très particulière, on va prendre système plus simple comme un mes ont à leur qui est constitué de deux quarte plus précisément un quarte et un anti-quartes $(q, \bar{q})$ et bien on sait que le champ de force qui unit le q et $\bar{q}$ peu en très bôme approximation se représenter par une espèce de tube le champ de force qui ceint les deux quarte et ce tube est très particulier si vous injectez de l'énergie dans le méson par exemple en le faisait rentier en collision avec une autre particule se tube .



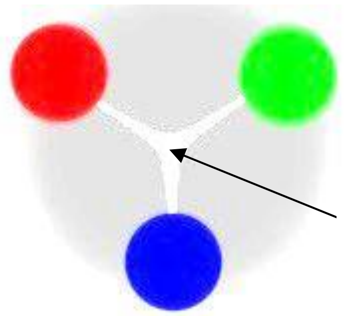
Figeur III-2: en QCD un tube de flux de confinement se forme entre des charge statique distantes .cela conduit au confinement des quarks l'énergie potentielle (dans ce cas) un quarks et un antiquark augmente linéairement avec la distance qui les sépare.

Va s'allonger et un certain moment il va s'allonger tellement qu'il va se casser.

Alors on pouvait se dire génial on va récupérer un quarte à chaque c'est le moment ou le tube ce de cessent ils se reforment de quarte à chaque extrémité donne en voulant casser un méson tout ce que vous arrivez à produire ces deux nouveaux méson si vous essayez un baryon tout ce que vous arrivez à produire ces baryons et de mésons.

Et vous ne pouvez pas isolez un quark et cette caractéristique de trois particulière de l'interaction entre ces quarks ça s'appelle le confinement et la théorie qui ça s'appelle QCD.

On va faire un petit modèle du nucléaire donc :



$tube\ flux\ (gloun)$

Chaque quark va génère un tube de fluxe de couler et ses trois tubes vont se connecter ensemble pour former un triangle équilatéral qui rependent l'échange de gluons entre les quarks.

Alors si on fait le bilan de ce qui est contenu a l'intercens proton

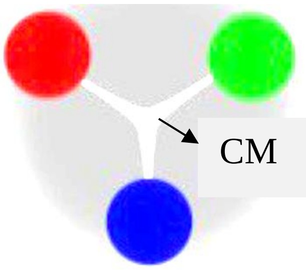
$$(uud)\ = 940\ MeV$$

$$\left.\begin{array}{l} u \approx 2{,}5Mev \\ u \approx 2{,}5Mev \\ d \approx 5\ MeV \end{array}\right\} = 10\ Mev$$

Il y a beaucoup des expériences qui montrent.

Il reste quelque chose ?

Il manque tout supplément l'énergie continue dans les tube de flux en fait un tube de flux c'est une énergie qui est propositionnel a sa longueur et donc en introduit une constante σ qui on appelle la tension de corde qui est aussi la densité d'énergie du champ de couleur et donc un tube de longueur r un contenir une énergie $= \sigma r$.



On va prendre un modèle plus simplifies il tourne autour de CM dans un mouvement de rotation circulaire et on a 3 tube de flux qui se connectent exactement au centre de masse, bon quelle est l'énergie d'un quark ?

$$E_q = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \rightarrow E = pc \qquad (III-6)$$

$$m_{\,quark} << m_P \,.$$

L'énergie totale de mon baryon :

$$MC^2 = \underbrace{3pc}_{3\ quark} + 3\sigma r \qquad (III-7a)$$

$$|\bar{L}_q| = |\vec{r} \wedge \vec{p}| = r.p \qquad (III-7\text{b})$$

$$3rp = l\hbar \qquad (III-7\text{c})$$

Le moment angulaire il ne peut pas quelle valeur mais des valeurs bien détermines de forme $l\hbar$ .Alors $l \in \mathbb{N}$.

Je vois trouve la masse de mon baryon en fonction de sa taille et bien cette fonction= $f(r)$.

A un minima :

$$\frac{\partial f}{\partial r} = 0 \quad \rightarrow \; r_0 = \sqrt{\frac{l\hbar c}{3\sigma}} \qquad (III\ -8\text{a})$$

$$MC^2 = \sqrt{12\hbar c\sigma l}\ (pour\ r = r_0) \qquad (III\ -8\text{b})$$

Et la nature nous oblige à calculer ce minima :

$$M^4C^2 = 12\hbar c\sigma l\ \text{(Simple)} \qquad (III\ -9)$$

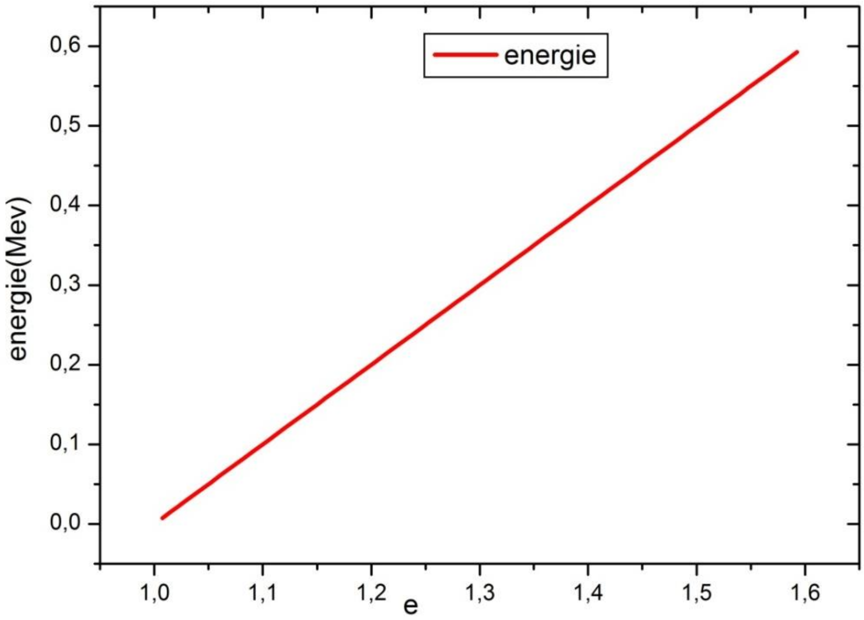
Qu'est ce qui passe si en fait une étude tout à fait quantique le résultat donne par modèle quantique.

$$M^4C^2 = 2\pi\hbar c\sigma\left(N + l + \frac{3}{2}\right) \qquad (III\ -10)$$

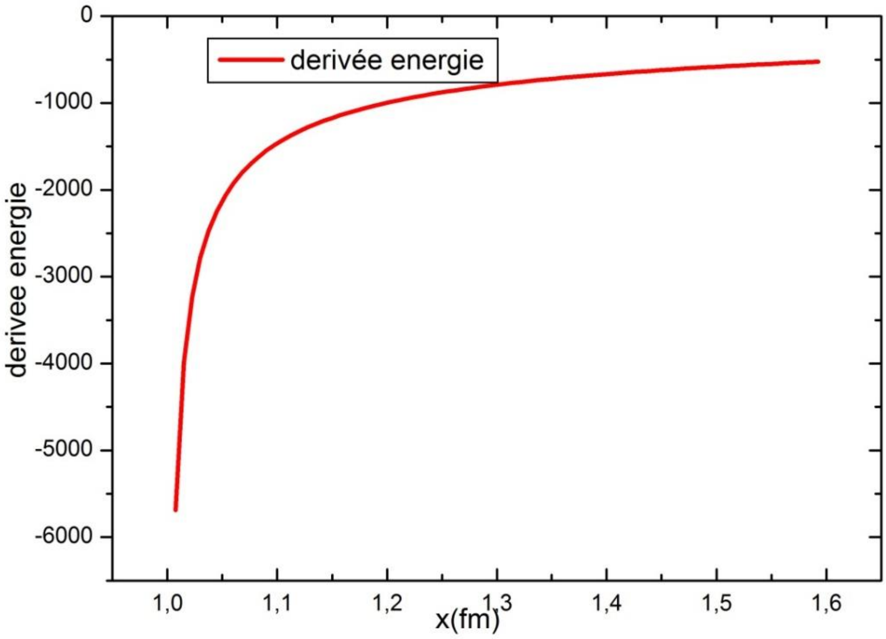
Ou :

$$\begin{cases} N : mouvement\ radual\ c'esta\ dire\ compte\ des\ vibrations\ du\ nuclleons\ mois \\ j'evai\ pas\ trentcompte\ donc\ je\ pronde(\ N = 0) \\ \dfrac{3}{2} : Energie\ du\ pt\ zéro \end{cases}$$

Aboi n'expérimentations a fait est justifié.



Figeur III-3 : L'énergie en fonction de l'énergie



La figure III- 4 : montre l'evolution de la dérivée de notre énergie donnée par A.Einstein en fonction de l'espace en Fermi metre Un comportement monotone est observée.On remarque aussi que ces valeurs sont négatifs ce qui nous laisse a dire que cette augmentation tend vers une valeur nul qui nous aide a determiner la masse.

Des baryons Δ une fonction (N) et nous donne une merveilleuse droit tel que rédite par la théorie donc le modèle maitre extrêmement bien on peut dites les valeurs de σ $(\sigma = 880 \;\; Mev/fm)$.

Alors dans un tube de couleur par fermie vous avez $880 \;\; Mev/fert$ est pratiquement la masse du proton alors la masse du proton est essentiellement le champ de couleur c'est les tubes de flux qui emporte énormément de l'énergie .

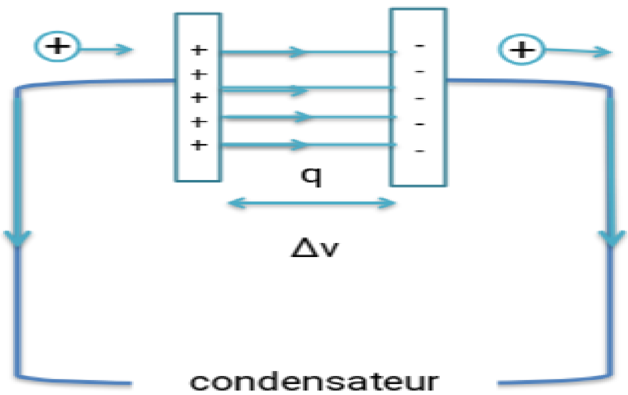
$Exemple : \; personne \; 75 \; kg$

$- \;\; 900 \; g \; d'e^{-} et \; de \; u, d.$

$- \;\; 74/1kg \; deenergie \; champ \; de \; couleur.$

Comme s'il avait une faible masse à la limite si alleu interagissent pas du tout elle aura une masse nulle comme le proton.

Alors pour comprendre ce on va proposer de s'essayer de comprendre ce avec le modèle .



Je viens de déportés un change q et je fais calculer l'énergie de ce système .

$$U = qV(E) + {}^{\varepsilon_0}/_{2}\, E^2 v \qquad (III - 11)$$

- q: $charge$
- v: $volume$
- E: $champ \; électrique$
- $V(E)$: $potentiel \; électrique$

- $\varepsilon_0 : permittivit\acute{e}\ de\ vide$

$$\varepsilon_0/_2 E^2 v = \frac{1}{2} C(\Delta V)^2 \qquad (III-12)$$

- C : capacité

$$u = \frac{U}{v} = \frac{q}{v} V(E) + \varepsilon_0/_2 E^2 \qquad (III-13)$$

Je fais de définie la densité de particule :

$$\boldsymbol{\rho = \frac{1}{V}} \qquad (III-14a)$$

$$U = q\rho V(E) + \varepsilon_0/_2 E^2 \qquad (III-14b)$$

Je veux toutes les expressions qui me donnent une densité d'énergie se mettent exactement sons cette ferme.

Je n'ai pas compte l'énergie au repos de ma particule ? Est donc :

$$U = \underbrace{q\rho V(E)}_{1} + \underbrace{\varepsilon_0/_2 E^2}_{2} + mgc^2 \qquad (III-15)$$

Il faut que ci soit de le même forme que $(1)\ et(2)$.

Il va falloir que je bricole un peur alors en passent le vide est défini comme entant une densité d'énergie nulle c'est à dire quand $E = 0$ et $m = 0$.

$$vide\{(\vec{E} = 0\,, m = 0\,)\} \qquad (III-16)$$

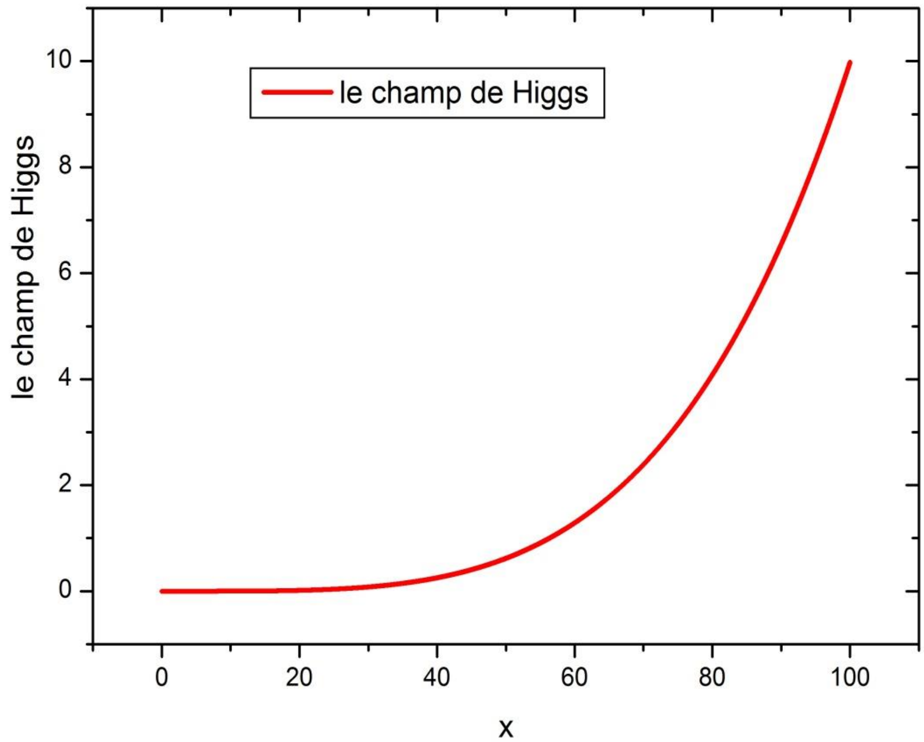
Donc je voudrai illimener mgc^2 et le remplacer par autre chose et je n'ai pas de chaix je vai introdure un autre champ .

$$U = \underbrace{q\rho V(E)}_{\text{Contribution}} + \underbrace{{}^{\varepsilon_0}/_{2}\, E^2 + a\rho\gamma(\varphi) + gE\emptyset + g'\varphi}_{\substack{\text{Contribution supplémentaire}\\ \text{de nouveau champ}}} \quad (III-17)$$

- $Matiere : \rho$
- $Chomp$:E, φ
- $Potentiels$: $\mathrm{V}(E), \gamma(\varphi)$
- $Constante\ de\ couplage: q, {}^{\varepsilon_0}/_{2}, a, g, g'$

Vide : $E = 0$, $\varphi = 0$ Champ nuclée .

Le problème n`je laisse en un état ce marche pas car $E = 0$, $\varphi = 0$ et donc je dois la modifier un peu alors, je vais aller bricoler un peu mon champ φ et



Figeur III-5 : le champ de Higgs en fonction l'espace .

Minima $\varphi = \varphi_0 = \sqrt{\frac{|g''|}{2}}$

$$|g'|2\varphi + 4\varphi^3 = 0 \qquad (III - 18a)$$

$$|g'|2\varphi = -4\varphi^3 \qquad (III - 18b)$$

$$|g'| = -2\varphi^2 \qquad (III - 18c)$$

$$\varphi^2 = \frac{|g'|}{2} \qquad (III - 18e)$$

$$U = q\rho V(E) + {}^{\varepsilon_0}/_2\, E^2 + a\rho\gamma V(\varphi) + gE\varphi - |g'|\varphi^2 + \varphi^4 \qquad (III - 19)$$

Vide. Energie minimale : $E = 0\,, \varphi = \varphi_0$.

Alors. $\varphi = \varphi_0 +$

$$\gamma(\varphi) = \gamma_o + \gamma_1 \qquad (III - 20)$$

γ_o .potentiel associe au vide γ.

Il est important que $\varphi \neq$ o, $\gamma_o \neq o$ et

$$i = q\rho V(E) + {}^{\varepsilon_0}/_2\, E^2 + \underbrace{a\rho\gamma_o + a\rho\gamma_1}_{a\rho\gamma V(\varphi)}$$

$$+gE\varphi_o + gE\mu - |g'|\varphi^2 + \varphi^4 \qquad (III - 21)$$

Ou :

$a\rho\gamma_o$:Terme constante et il mulâtresse c'est un terme constante et ça ensemble très fortز

Ou terme :

$$a\rho\gamma_o = m\rho c^2 \qquad (III - 22a)$$

$$m = \frac{a}{c^2}\gamma_o \qquad (III - 22b)$$

Terme de masse pour la matière = interaction de la matière avec le champ.

φ: Est le champ Higgs.

Sa valeur non nulle sur le vide permet à la particule une masse.

$$m = \frac{a}{c^2}\gamma_o \quad \text{Avec } \gamma = \gamma_0 + \gamma_1 \qquad (III - 23)$$

Par un terme de couplage du tope $a\rho\gamma(\varphi)$

Cette présentation est exprimé par le réf $[2 - 9]$

La basse est une propriété dynamique champs de Higgs pour les masses des entres éléments$(e^-, u, d, \dots .)$.

Champ de couleur pour nucléon (99% de masse de l'atome qui permet d'exprimer l'énergie au repos).

Les atomes sa représentent que 5 % de contenu énergétique totale de lumières.

Les observation actuelles montrent qu'il y a au moins 23% de matière moine qui n'est pas visible mais elle interagit gravitationnelles avec les état dans les galaxies il y a aussi l'énergie sombre =72% qui plotent l'inflation responsable de l'extradons de levées.

Conclusion et perspectives

Conclusion général :

Ce travail de mémoire a été pour moi l'occasion d'aborder un certain nombre de la détermination de l'origine de la masse des particules via des champs de type de Higgs. Ce champ qui a été justifié par les expériences en 2014 ou la communauté scientifique a attribué un prix Nobel à Pater Higgs. Nous avons en effet proposé de simplifier autant que possible la fonction énergie totale toute en traitant l'exemple de l'hélium l'atome la plus léger qui contient deux protons et deux neutres respectivement.

Nous avons traite le problème de deux manières une classique et l'autre purement quantique.

Notre étape de calcul était basée sur la programmation où on écrit des programmes inspirés par le langage fortran 77 et à ce stade nous avons pu résoudre cette fameuse équation d'une manière numérique toute en se basant sur la méthode des différences finies.

Références bibliographiques

I

[1] A.Einstein (1905) Sur l'électrodynamique des corps en mouvement. Annalen der Physik, vol XVII, p891-921

[2] A. Einstein (1905) L'inertie d'un corps dépend elle de son contenu en énergie. Annalen der Physik, vol XVII, p 639-641.

[3] Albert Einstein: Œuvres choisies (traduits de l'allemand). Source du savoir – Seuil- CNRS- tome 2, p. 59-62, textes choisis et présentés par: Françoise Balibar, Olivier Darrigol, Bruno Jech et John Stachel.

[4] A.Einstein (1993), « Traduction oeuvres choisies 2, Relativité I» Sources du savoir, Seuil CNRS (1993) p 60-62

[5] Auffray J.P. (1999) : " Einstein et Poincaré ", Le Pommier-Fayard, 301p.

[6] A. Einstein (1905) : " Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig? " Annalen der Physik ., vol. 18: 639 18:639, 905

[7] E. Gourgoulhon (2006), « cours de Relativité générale », p 32, IAP Paris.

[8] H. Ives (1952) « Derivation of the mass energy relation », J.Opt.Soc.Americ.42,8 ,540-543

[9] H.Poincaré (1905) : Compte Rendus de l'Académie des Sciences , 140, pages 1504 -1508. 4

II

[1] D.Ph, professeur Tilulaire < David SENECHAL > pages 7, 95 ,128

III

[1] G. Aad et al. [ATLAS Collaboration], Phys. Lett. B 716 (2012) 1 [arXiv:1207.7214 [hep-ex]].
[2] S. Chatrchyan et al. [CMS Collaboration], Phys. Lett. B 716 (2012) 30 [arXiv:1207.7235 [hep-ex]].
[3] ATLAS Collaboration, see:

https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults .
[4] CMS Collaboration, see:
https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsHIG .
[5] A. Heister et al. [ALEPH Collaboration], Phys. Lett. B 543 (2002) 1 [arXiv:hep-ex/0207054];
J. Abdallah et al. [DELPHI Collaboration], Eur. Phys. J. C 34 (2004) 399 [arXiv:hep-ex/0404012];
P. Achard et al. [L3 Collaboration], Phys. Lett. B 575 (2003) 208 [arXiv:hep-ex/0309056];
D. Horvath [OPAL Collaboration], Nucl. Phys. A 721 (2003) 453.
[6] G. Abbiendi et al. [ALEPH and DELPHI and L3 and OPAL and LEP Collaborations], Eur. Phys.
J. C 73 (2013) 2463 [arXiv:1301.6065 [hep-ex]].
[7] T. Aaltonen et al. [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 101803 [arXiv:0907.1269
[hep-ex]]; V. Abazov et al. [D Collaboration], Phys. Lett. B 682 (2009) 278 [arXiv:0908.1811
[hep-ex]]; P. Gutierrez [CDF and D Collaborations], PoS CHARGED 2010 (2010) 004.
[8] G. Aad et al. [ATLAS Collaboration], JHEP 1206 (2012) 039 [arXiv:1204.2760 [hep-ex]]; ATLAS
Collaboration, ATLAS-CONF-2013-090; ATLAS-CONF-2014-050; S. Chatrchyan et al. [CMS
Collaboration], JHEP 1207 (2012) 143 [arXiv:1205.5736 [hep-ex]]; CMS Collaboration,
CMS-HIG-13-035; CMS-HIG-14-020.
[9] J. A. Casas, J. R. Espinosa, M. Quiros and A. Riotto, Nucl. Phys. B 436 (1995) 3 [Erratum-ibid. B
439 (1995) 466] [hep-ph/9407389]. M. S. Carena, J. R. Espinosa, M. Quiros and C. E. M. Wagner,
Phys. Lett. B 355 (1995) 209 [hep-ph/9504316].