

Pourquoi $E = Mc^2$?

Yves Schutz

Pourquoi $E = Mc^2$?

E comme Energie

La semaine dernière nous avons commencé à faire parler cette fameuse équation et nous avons discuté d'un premier élément de cette équation, le E de énergie. Et ce que vous en avez retenu ... La version courte : il y a une quantité numérique qui ne change pas quand quelque chose se produit. La version plus longue : l'énergie d'un système est un concept abstrait qui indique quelle est la capacité du système à produire du travail et que sa caractéristique essentielle est de se conserver, c'est-à-dire que l'énergie ne peut être ni détruite, ni créée, ni renouvelée, elle ne peut qu'être échangée ou transformée au prix de la dégradation inexorable de sa qualité, la qualité étant quantifiée par un autre concept, l'entropie. Plus cette dernière est élevée, moins l'énergie est apte à se transformer et plus l'énergie se transforme, plus l'entropie augmente et moins grande est sa capacité à se transformer davantage.

L'énigme que je vous avais soumise en fin de cours et qui mêlait allègrement énergie noire, constante cosmologique et énergie du vide quantique n'est à ce jour pas résolue par la physique.

Par quel miracle la constante cosmologique a la valeur qu'elle a, résultant d'un ajustement ultra précis des contributions gravitationnelles et de l'énergie du vide quantique, et qui est la seule permettant l'existence de l'univers tel que nous le connaissons.

Mais peut-être que certains y ont réfléchi et veulent proposer une solution ?

Pourquoi $E = Mc^2$?

M comme Masse

Nous allons aujourd'hui nous intéresser à un deuxième membre de l'équation le M, M pour masse. Même si le concept de masse est apparu au cours de l'histoire, tout comme l'énergie, sous différentes appellations, que ce soit quantité de matière, masse inerte ou inertielle, masse grave ou gravitationnelle soit passive soit active, nous sommes un peu plus à l'aise pour définir en physique ce terme de masse, même si cette définition reste cependant délicate.

Masse

Intuitivement on identifie le concept de masse au concept de quantité de matière, c'est-à-dire une quantité de matière de densité donnée et contenue dans un volume délimité par les dimensions de l'objet considéré. En effet, nous pouvons difficilement imaginer ce que serait un morceau de matière qui n'aurait pas de masse et inversement il est tout aussi difficile d'imaginer un objet qui possède une masse et qui ne se présenterait pas sous forme de matière. Dans notre esprit nous voyons donc les concepts de masse et de matière comme allant de pair : l'un ne saurait exister sans l'autre.

La quantité de matière (ou corps ou masse) se mesure par la densité et le volume pris ensemble.

Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*



Newton dans les Principes mathématiques de la philosophie naturelle le dit sans aucune ambiguïté possible.

La masse est donc défini par Newton comme le produit de la densité et du volume, définition pas très heureuse puisque la densité ne peut se définir que comme la masse par unité de volume !

La masse est la quantité de matière d'un corps exprimée par une grandeur.

Dictionnaire de l'Académie Française, 9^e édition

En langage plus moderne, retenons plutôt la définition que donne le dictionnaire de l'Académie Française : *La masse est la quantité de matière d'un corps exprimée par une grandeur.*

Donc la masse mesure la quantité de matière d'un corps, plus le résultat de la mesure de la masse d'un corps donne une valeur élevée, plus il y a de la substance dans le corps. On dira également que plus la masse d'un corps est élevée, plus il y a d'atomes dans ce corps.

La quantité de matière (ou corps ou masse) se mesure par la densité et le volume pris ensemble.

Cette quantité se connaît par le poids des corps : car [...] les poids des corps sont proportionnels à leur masse.

Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*



Comme l'a précisé Newton, la masse peut être connue par le poids de la quantité de matière c'est-à-dire en posant la quantité de matière sur une balance. En terme plus savant, comme nous le verrons un peu plus tard, le poids d'un corps est le résultat de l'interaction de sa masse avec le champ gravitationnel dans lequel se trouve le corps.

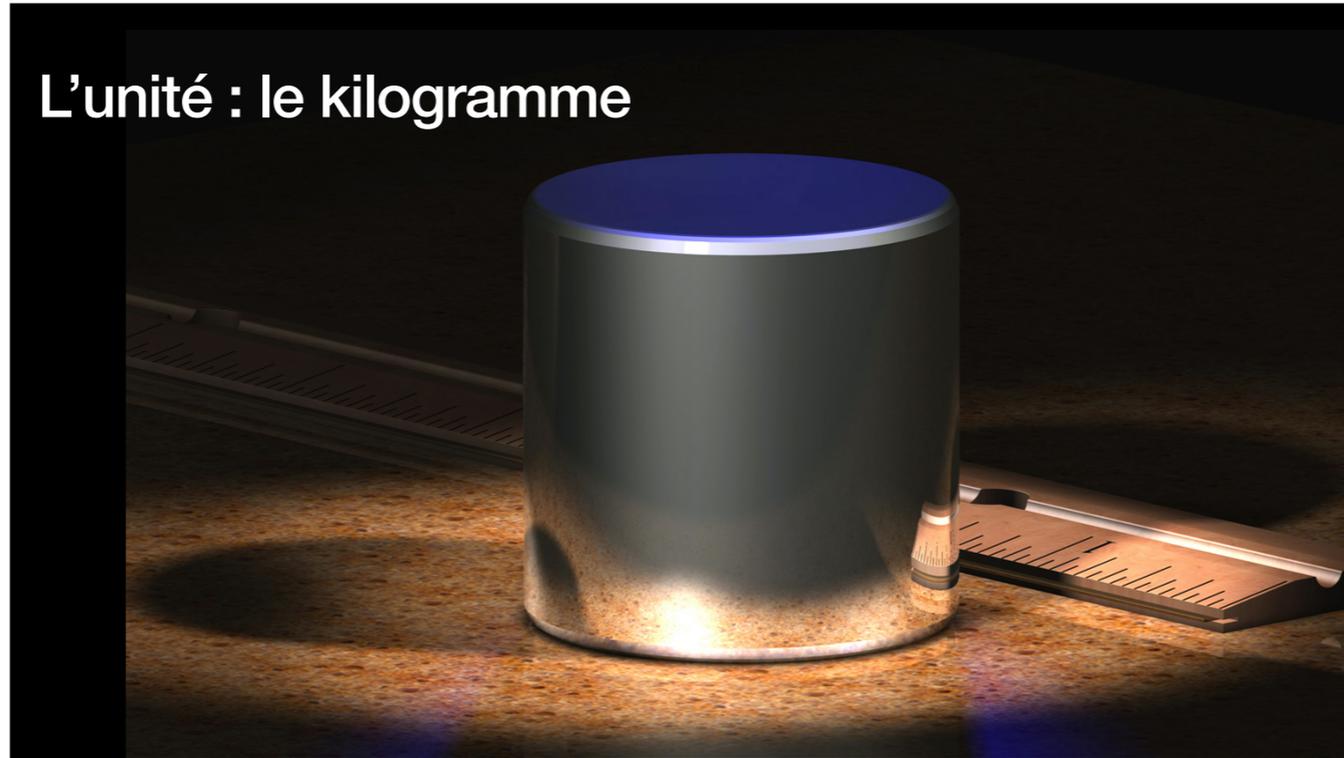
Masse et poids

Il est regrettable que l'usage commun veut que la masse d'un corps et son poids se mesurent avec la même unité, le kg, ce qui bien évidemment est une erreur. L'unité pour la masse est bien le kg mais pour le poids, qui est comme nous le verrons une force, l'unité correcte est le Newton (Unité du Système international correspondant à la force qui communique à une masse de un kilogramme une accélération de un mètre par seconde carrée) ... mais allez donc chez votre maraîcher favori et demandez lui 3 Newton de pommes de terre, au mieux il vous dira qu'il y a des clients qui attendent et qu'il n'a pas de temps à perdre avec vos facéties. Si malgré tout vous tenez à être rigoureux sans passer pour un casse pied, demandez lui plutôt pour 4€ de pommes de terre.

Pour ne pas confondre masse et poids, nous disait le professeur de physique au collège, chez le boucher au moment de choisir votre morceau de viande préférée, la quantité de viande nécessaire pour votre repas est déterminée par la masse et le poids détermine le prix que vous allez devoir payer au boucher.

Anecdote : à la poste, pesée d'un colis, le cadran de la balance indique Masse = 1 kg. Je n'ai pas voulu informer le préposé aux colis que dans si la balance indique bien la masse de l'objet avec la bonne unité, il faudrait encore multiplier la masse par 9,81, la valeur du champ gravitationnelle dans le bureau de poste, pour obtenir le poids qui lui déterminera le coût de l'envoi de mon colis. Il faut dire qu'il y avait des gens qui attendent leur tour, et payer 10 fois le prix n'était pas non plus dans mes intentions.

L'unité : le kilogramme



A l'origine l'unité était le gramme défini comme la masse d'un cm^3 d'eau à la température de la glace fondante.

Actuellement dans le Système International d'unités (SI), l'unité de base de la masse est le kilogramme qui, depuis 1795, était par définition la masse du Prototype International du Kilogramme (un cylindre en alliage Platine (90%) - Iridium (10%)) déposé au Bureau International des Poids et Mesures de Sèvres, le pavillon de Breteuil du parc de Saint Cloud à Paris et dont nous avons tous entendu parler à l'école. Un cylindre de 39,17 mm de diamètre et de hauteur. Une masse quelconque est ainsi mesurée par simple pesée (comparaison avec la masse du prototype étalon).

Cette définition étant arbitraire et liée à des conventions sociales et observant, par ailleurs, que la masse du prototype pouvait évoluer avec le temps le Comité International des Poids et Mesures a recommandé de redéfinir le kilogramme à partir des constantes universelles présentes dans les lois fondamentales de la physique, par exemple la constante de Planck, c , ...

L'unité : le kilogramme

$$[h] = \frac{[M] \times [L^2]}{[T]}$$

En 2019, après avoir défini les unités seconde et mètre en fixant

pour la seconde la valeur de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé comme égale à 9 192 631 770 Hz (un décompte d'un nombre fixé d'oscillations de l'atome de césium entre deux niveaux d'énergie choisis) et

pour le mètre la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide comme égale à 299 792 458 m/s (la distance parcourue par la lumière dans le vide en une durée donnée),

la valeur de la constante de Planck a été fixée égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$.

L'unité : le kilogramme

$$1\text{kg} = 1.4755214 \times 10^{40} \times \frac{h\Delta\nu_{Cs}}{c^2}$$

Ainsi pour la nouvelle définition du kilogramme, il faut réaliser une expérience dans laquelle sont reliées la constante de Planck h et une mesure de masse. C'est le cas de la balance de Kibble qui exploite l'équilibre entre une force exercée par une masse et une force magnétique, cette dernière étant induite par une tension aux bornes d'une résistance, toutes deux mesurées par des effets quantiques où h intervient. La balance de Kibble fournit donc une relation qui permet, au choix : de mesurer h si la masse m est connue, ou de mesurer m si la valeur numérique de h est connue.

La masse se conserve

La caractéristique essentielle que partage la masse avec l'énergie est, le principe de conservation. La masse se conserve, tout comme l'énergie se conserve. On ne peut n'y créer, ni détruire de la masse. Et comme je vous le rappelais la semaine dernière, Planck a érigé ces deux principes en principes premiers, c'est-à-dire des principes qu'on ne peut déduire de principes plus élémentaires, à partir desquels toute la physique peut être déduite et auxquels toute nouvelle physique doit impérativement se plier.

Contrairement au principe de conservation de l'énergie, le principe de la conservation de la masse était reconnu dès l'antiquité, en fait il était déjà énoncé par les atomistes. Comme je suis convaincu que vous avez révisé mon cours d'il y a 2 ans, je me contenterai d'un très bref rappel du concept atomiste de l'antiquité. D'abord l'atome de Démocrite n'avait rien à voir avec notre atome actuel. L'atome d'alors est décrit comme le plus petit élément de toutes choses, indivisible incompressible et homogène. Les atomes qui existent en une infinité de forme sont éternels et se déplacent dans le vide pour l'éternité.

Les atomistes de l'antiquité ont ainsi formulé la conservation de la masse :

La disparition, la naissance et la dégradation des choses ne sont pas causées par les caractéristiques des atomes, mais par un réarrangement de ceux-ci

Leucippe, Démocrite, Epicure, Lucrèce



La disparition, la naissance et la dégradation des choses n'étaient pas causées par les caractéristiques des atomes, mais plutôt par un réarrangement de ceux-ci.

On ne peut ni créer de nouveaux atomes ni les détruire et la diversité des choses de la Nature n'est le résultat que de l'infinité de façons de réarranger les variétés d'atomes. Pour créer une nouvelle forme, couleur, géométrie ... nul n'est besoin de créer un nouvel atome, il suffit de réarranger les atomes existants, atomes qui existent pour l'éternité. Le principe de conservation de la masse est ainsi posé, principe qui heurtera bien évidemment les scolastiques puisque la création et la fin du monde sont incompatibles avec ce principe.

...car rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes sont les mêmes, et qu'il n'y a que des changements, des modifications.

Traité élémentaire de chimie, Antoine Lavoisier



Le principe de conservation de la masse sera précisé bien plus tard ... par un chimiste, Antoine Lavoisier dans son *Traité élémentaire de chimie*, publié en 1789, avant qu'il ne perde la tête (1794).

Nouvelle théorie atomique

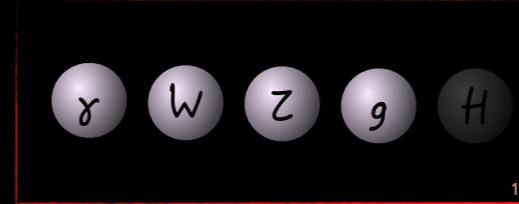
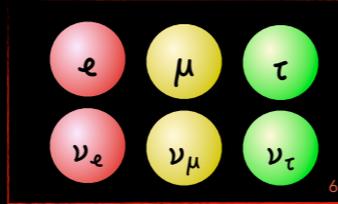
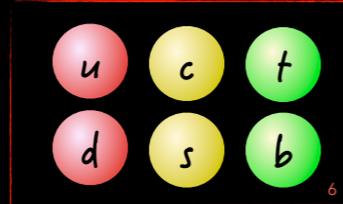
John Dalton, *A New System of Chemical Philosophy*



Vous vous rappelez aussi de John Dalton qui, au début du 19^{ème} siècle, développa une nouvelle théorie atomique dans laquelle il proposa que chaque élément est composé d'atomes d'un seul et unique type et que ces atomes sont immuables et indestructibles mais peuvent se combiner en structures plus complexes. C'est ainsi que la masse, quantité de matière devient une histoire d'atomes qui nous mènera au cours du 20^{ème} siècle aux particules élémentaires. Nous savons aujourd'hui que le proton tout comme l'électron ne peut pas disparaître et donc un proton peut subsister sur des temps cosmologiques et les protons aujourd'hui présents étaient déjà présents au début de l'histoire de l'univers raconté par la théorie du Big Bang. Sauf que des théoriciens prédisent la mort du proton ($\rightarrow \pi^0 + e^+$) et donc la disparition de la matière ... à plutôt longue échéance, la durée de vie du proton serait de 10^{31} années, soit mille milliards de milliards de fois l'âge de l'univers vieux déjà de près de 14 milliards d'années.

Modèle Standard de la physique des particules

Une vision du monde subatomique



Il y a :

champs 25

- des ~~particules~~ *particules* élémentaires (61)
- des interactions fondamentales (3)

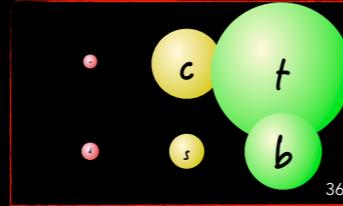
réunies dans un formalisme mathématique : des symétries et des champs

Y. Schutz, HistoireS de Particules, 2022

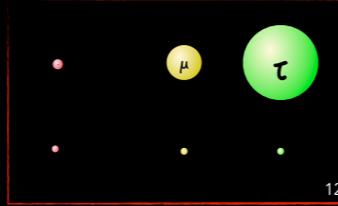
Au cours du 20^{ème} siècle, cette idée que tous les éléments de la Nature étaient composés à partir des mêmes éléments a été poussée à son extrême pour aboutir à la liste suivante des particules dites élémentaires constituant toute la matière connue existante ou ayant existé à un moment de l'histoire de l'univers. Il y a des quarks et des leptons... mais ce qui nous intéresse aujourd'hui c'est la masse, et l'on pourrait penser dans un premier temps que la masse d'un élément et la somme des masses des constituants. Regardons donc quelle est la masse des constituants.

Modèle Standard de la physique des particules

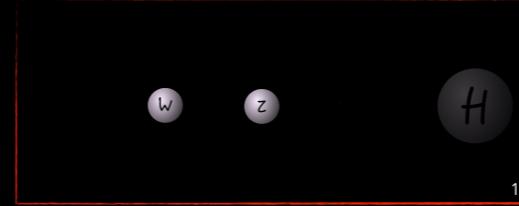
Des symétries brisées !



36



12



13

Le monde réel :

$$M_{u,d,c,s,t,b,e,\nu,W,Z} \geq 0$$

Toutes les particules de matière, les quarks, les leptons (électrons et neutrinos) ont une masse mesurée expérimentalement y compris le neutrino dont la masse est certes très petite mais définitivement non nulle. Aujourd'hui on ne connaît pas de particules de matière qui ne soit pas massive. Le lien entre matière et masse est donc bien présent dans la Nature y compris dans le monde des particules élémentaires. On verra plus tard qu'il faut revoir cette assertion et ce lien masse-matière, c'est d'ailleurs tout l'objet de ce cours.

Masse

Mais n'allons pas trop vite. Laissons de côté pour le moment masse-quantité-de-matière et intéressons nous à cette autre définition de la masse donnée par Henri Poincaré.

Les masses sont des coefficients qu'il est commode
d'introduire dans les calculs

Henri Poincaré, *La science et l'hypothèse* (1902)



« les masses sont des coefficients qu'il est commode d'introduire dans les calculs ».

Pour mieux comprendre ce que sont ces coefficients, revenons à la physique « inventée » par Galilée au courant du 17^{ème} siècle. Chez Galilée la masse intervient dans deux domaines distincts, l'un concerne la gravitation ou la loi de la chute des corps qui assurera sa célébrité, et l'autre la dynamique où il énoncera les lois de l'inertie. Deux lois qui apportent un éclairage radicalement nouveau sur les lois du mouvement léguées par Aristote. Mais parce que ces nouvelles lois défient l'observation (on n'observe pas ce que la loi nous dit) elles heurtent notre bon sens.

Principe d'inertie

Galilée, Discours sur les deux systèmes du monde



Aristote pensait que l'état naturel d'un corps est le repos et que quelque soit le mouvement, dès que la cause du mouvement est supprimée, le corps retourne à son état naturel c'est-à-dire le repos. Cette loi est bien conforme à l'observation : quand sur votre vélo vous vous arrêtez de pédaler, votre vitesse va diminuer pour finalement être nulle, vous êtes avec votre vélo à l'arrêt.

Galilée dit le contraire : « Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins qu'il ne soit contraint, par des forces s'imprimant sur lui, à changer cet état. » C'est-à-dire que si un corps est au repos il le restera et que s'il est en mouvement il le restera ... tant qu'aucune force extérieure n'agit sur le corps soit pour lui donner de la vitesse soit pour le ralentir.

Le mouvement du corps en réponse à une force donnée dépendra de la masse de ce corps : plus la masse est élevée plus il sera difficile de changer l'état de mouvement du corps.

Loi sur la chute libre des corps

Galilée, Discours sur les deux systèmes du monde



Vous connaissez tous l'histoire de l'étude de Galilée de la chute des corps, la fausse celle qui lui aurait fait lâcher en même temps du haut de la tour de Pise une boule de fer et une boule de bois, toutes deux auraient alors touché le sol en même temps. Et la vraie histoire celle où il mesure minutieusement la vitesse d'objets de masse différente le long de plans inclinés. Et il déduit, grâce aussi à une expérience de pensée astucieuse, qu'en l'absence de toutes forces autres que celle de la gravitation, la vitesse acquise par un objet ne dépend pas de la masse de l'objet. En autres termes tous les objets quelque soit leur masse tombe à la même vitesse ce qui est contraire à l'observation : essayez avec un marteau et une plume.

Masses

Pour chacun de ces 2 domaines, dynamique et gravitation, j'ai parlé de masse sans préciser de quelle masse il s'agissait. En fait ce ne sont pas les mêmes masses. Il y a d'un côté la masse d'inertie qui est la masse qui détermine la résistance d'un corps à une modification de son mouvement et la masse grave qui détermine la sensibilité d'un corps à l'attraction de la gravité.

On sait que Newton a formalisé mathématiquement les idées de Galilée et surtout les a rendues opératoires. Grâce à Newton donc et son invention de cet objet mathématique abstrait qu'est la force, les lois du mouvement se mettent en équations faciles à manipuler, où la définition des masses devient évidente et les calculs un jeu d'enfant ... de collège

- Masse inerte

La masse qui intervient dans la dynamique est la masse inertielle ou masse inerte, c'est elle qui mesure la résistance au mouvement. C'est la propriété d'un corps quelconque (particule élémentaire, pomme, planète,...) qui est susceptible d'être mis en mouvement. La masse inerte caractérise la faculté du corps à résister au mouvement. Si j'applique une action sur un corps, plus ce corps a une masse élevée moins il aura tendance à se mettre en mouvement. Un moteur de trottinette aura du mal à faire bouger un camion, il accélèrera moins qu'avec son vrai moteur de camion.

- Masse inerte

Accélération = Force / masse inerte

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{M_I}$$

La deuxième loi de Newton nous dit que lorsque on applique une force à un corps, ce corps va accélérer et l'accélération est égale à cette force divisée par la masse. Donc plus la masse est élevée plus l'accélération est faible. La masse d'inertie caractérise le fait que les corps résistent au mouvement. La masse d'inertie représente la propension du corps à rester au repos.

En symboles mathématiques la deuxième loi de Newton s'écrit

- Masse grave

La masse qui intervient dans la gravitation est la masse gravitationnelle ou masse grave. Pour en parler je ne vais pas utiliser le langage de Newton, mais le langage moderne de champ. Comme vous avez assisté assidûment aux cours de 2022, la notion de champ vous est familière... si un rappel est nécessaire levez le doigt.

On se rappelle que la charge électrique détermine comment un objet chargé électriquement va réagir vis-à-vis du champ électromagnétique.

- Masse grave

$$\text{Force} = \text{masse grave} \times \text{champ de gravitation}$$

De même on va considérer la masse gravitationnelle comme une charge, non pas électrique, mais disons une charge gravitationnelle. Cette charge indique de quelle manière un corps va interagir avec le champ gravitationnel.

On peut distinguer la masse grave passive qui indique comment un corps réagit en présence de gravitation et la masse gravitationnelle active qui indique de quelle manière le corps va créer de la gravitation, gravitation qui à son tour va agir sur les autres corps.

On va tout de suite décréter que les masses gravitationnelles active et passive sont égales. En effet il n'y aucune raison de penser que la faculté d'un corps à ressentir la gravitation ne se mesure pas de la même manière que la faculté qu'à le corps à créer la gravitation.

- Masse grave

Force = masse grave x champ de gravitation

$$\vec{F} = M_G^L \times G \frac{M_G^T}{|\vec{r}_{TL}|^2}$$

Ainsi dans le système Terre-Lune, la force qui s'exerce sur la Lune est égale à la masse gravitationnelle de la Lune multipliée par la valeur du champ gravitationnel créé par la Terre à l'endroit où se trouve la lune, ce qui en langage mathématique devient la célèbre formulation de l'attraction universelle de Newton qu'on apprend à l'école. G est la constante de gravitation égale, dans le SI, à $6,626 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kgxs}^2)$

$$\vec{F} = M_G^L \times G \frac{M_G^T}{|\vec{r}_{TL}|^2}$$

$$\vec{F} = M_I^L \times \vec{a}$$

Nous nous retrouvons donc avec deux équations l'une décrivant la force que subit la Lune dans le champ gravitationnel de la Terre et l'autre décrivant l'accélération à laquelle la Lune est soumise du fait de cette même force. En combinant ces deux équations de façon à faire disparaître F, on obtient l'équation de l'accélération

$$\vec{a} = \frac{M_G^L}{M_I^L} \times G \frac{M_G^T}{|\vec{r}_{TL}|^2}$$

Et que nous a appris Galilée à propos de la chute des corps ? La vitesse d'un corps en chute libre ne dépend de la masse de ce corps. Et pour respecter cette loi, il faut poser que le rapport des masses inerte et grave de la Lune soit égal à 1 (ou égal à une constante quelconque) en d'autres termes que la valeur de la masse inerte est égale à la valeur de la masse grave.

$$\vec{a} = \frac{\cancel{M_G^L}}{\cancel{M_I^L}} \times G \frac{M_G^T}{|\vec{r}_{TL}|^2}$$

$$M_G^L = \text{constante} \times M_I^L$$

Mais cette égalité est-elle vraie pour tous les corps (ou $M_G/M_I = k$, k indépendant de la nature du corps ?) ? Newton postula que le rapport entre les masses inerte et grave d'un même corps est indépendant de la substance dont il est composé.

$$M_G^L = M_I^L$$

On se retrouve ainsi avec deux quantités, définies de façon différente et jouant des rôles différents, qui se révèlent être égales. Etonnant, deux quantités qui concernent des domaines aussi différents que la dynamique et la gravitation, sont égales ! C'est tout aussi curieux que si la charge gravitationnelle et la charge électrique, qui n'ont rien à voir l'une avec l'autre, étaient égales. C'est une constatation, ça ne s'explique pas. C'est une loi de la Nature, c'est comme ça et la Nature ne nous dit pas pourquoi. On appelle ce principe le principe d'équivalence faible, et on peut le formuler comme suit : la trajectoire d'un corps tombant en chute libre ne dépend ni de sa structure, ni de sa composition.

Galilée avait-il raison ?

<https://tube-sciences-technologies.apps.education.fr/w/bb2a494e-1c13-4c94-ad12-c17792123691>

Et si vous n'êtes toujours pas convaincu de la loi de la chute libre des corps, regardez ceci. Une enceinte dans laquelle on va lâcher d'une hauteur de 122 m, simultanément une boule de jeu de quille et une plume, laquelle des deux va arriver en premier ? 1'24 → 1'30 ... Pas de surprise, l'objet le plus lourd tombe le plus vite. Aristote en aurait tiré la conclusion que les objets lourds tombent plus vite que les objets légers, pas Galilée! Après avoir réalisé le vide dans l'enceinte, l'expérience est répétée et ... 2'50 .. alors convaincu que Galilée a raison !

Chambre à vide construite par la NASA pour tester ses équipements dans un environnement spatial. Elle mesure 30.5 m de haut pour un diamètre de 37.2 m, soit un volume de 22.653 m³. Elle est réalisée entièrement en aluminium et est entourée d'une enceinte en béton maintenue à 20 Torr (20/760 = 2% de la pression atmosphérique). Le vide nominale est < 4x10⁻⁶ Torr est atteint en 8 h heures de pompage (vide interstellaire 10⁻¹³ Torr).

$$M_G^L = M_I^L \quad ?$$

Au fil des siècles, nombre d'expériences ont vérifié ce principe d'équivalence ($M_G/M_I = k$, k indépendant de la nature du corps). Galilée l'aurait en fait d'abord déduit en chronométrant des boules chutant le long de plans inclinés... Mais, dès 1687, Newton le vérifie en observant que des pendules de même longueur dotés de boules faites de divers matériaux se balancent toujours au même rythme, avec une précision de trois chiffres après la virgule ($T=2\pi\sqrt{l/g}$).

En 1889, à l'aide de pendules plus sophistiqués (pendules de torsion), le physicien hongrois Loránd Eötvös le confirme cette fois à huit chiffres après la virgule. C'est avec cette donnée que Einstein a pu bâtir la RG en toute confiance.

Avec des pendules de torsion améliorés en 1990 la précision de la mesure de l'égalité entre masse inerte et masse grave est passée à 10^{-13} .

$$M_G^L - M_I^L < 10^{-15}$$

Actuellement les tests de l'égalité sont réalisés à l'aide de satellite : être en orbite autour de la Terre revient à tomber en permanence, donc on peut réaliser des chutes libres qui durent très longtemps. Les précisions atteintes sont inférieures à 10^{-15} et les mesures indiquent toujours que Newton avait raison. Alors à quoi bon poursuivre les vérifications ? Parce que, si la théorie de la relativité générale est parfaite pour décrire l'interaction gravitationnelle, elle ne l'est pas pour les trois autres interactions régissant la physique des particules gouvernées par la mécanique quantique et unifiées dans le fameux Modèle Standard. Or les théories actuellement développées pour tenter d'unifier ces quatre interactions – telle la théorie des cordes – prévoient toutes la violation du principe d'équivalence à un moment donné.

accélération \equiv gravitation

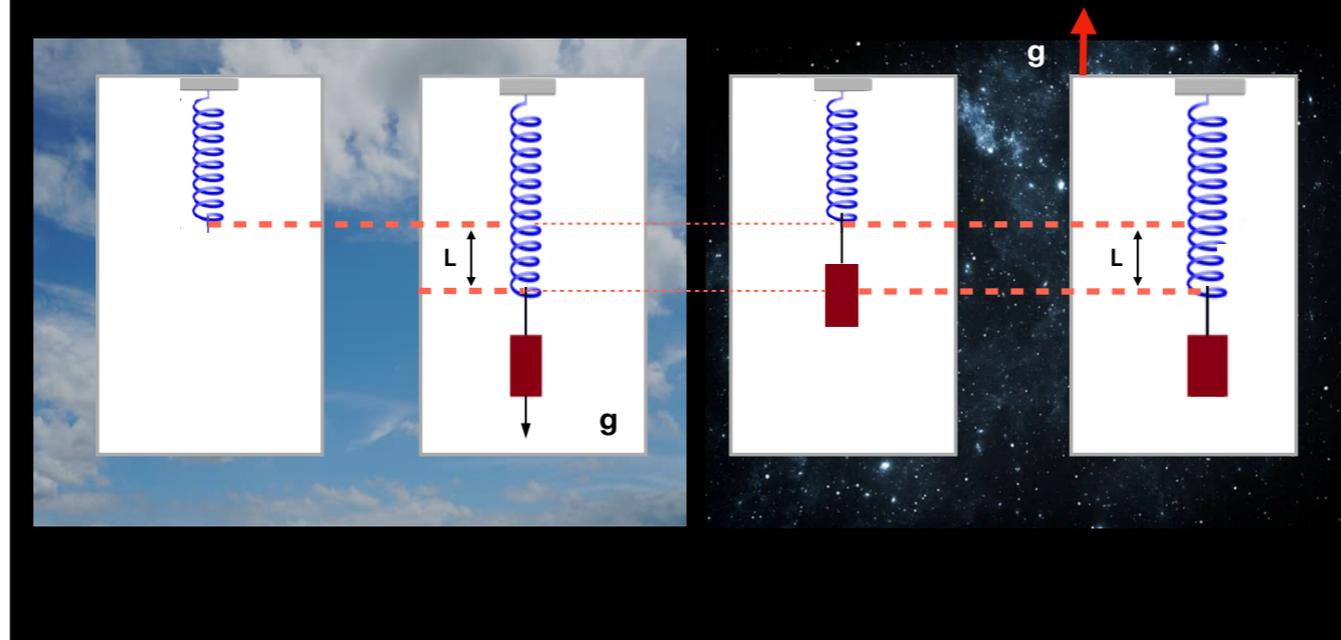
S'il y a un principe d'équivalence faible c'est qu'il doit exister un principe d'équivalence fort. C'est Einstein qui va l'énoncer :

Accélération et gravitation sont deux actions équivalentes ce qui revient à dire que la masse inerte qui intervient lorsqu'un corps est accéléré et la masse grave qui intervient lorsqu'un corps est plongé dans un champ gravitationnel sont identiques. Elles ne sont plus simplement égales c'est-à-dire ont la même valeur numérique, mais identiques, c'est la même chose : il n'est plus besoin de distinguer masse inerte et grave (passive), il y a seulement une masse (gravitationnelle active).

Einstein raconte qu'il a eu la révélation lorsqu'il y a réalisé qu'en chute libre on ne sent plus son propre poids. Tous les objets qui tombent en même temps, le chapeau, le parapluie, le téléphone, tombent à la même vitesse de sorte qu'ils semblent flotter autour de nous comme si notre corps et tous les objets ne ressentaient plus la gravité. Il en conclut que l'accélération annule la gravité ce qui est assez paradoxale : l'effet annule sa cause.

accélération \equiv gravitation

1915



Pour illustrer le principe d'équivalence fort imaginons l'expérience suivante : une masse est suspendue à un ressort fixé dans la partie supérieure d'une boîte . Lorsque la boîte se trouve immobile sur Terre, la masses soumise à l'influence du champ de gravitation g (accélération due au champ gravifique) et elle étire le ressort d'une certaine longueur. Imaginons à présent la même boîte suffisamment éloignée du système solaire pour ne plus subir d'influence de gravitation et supposons qu'elle soit accélérée à la même valeur g . Le ressort subira exactement le même allongement. Et on en conclut que les effets d'un champ de gravitation ou d'un champ d'accélération sont les mêmes.

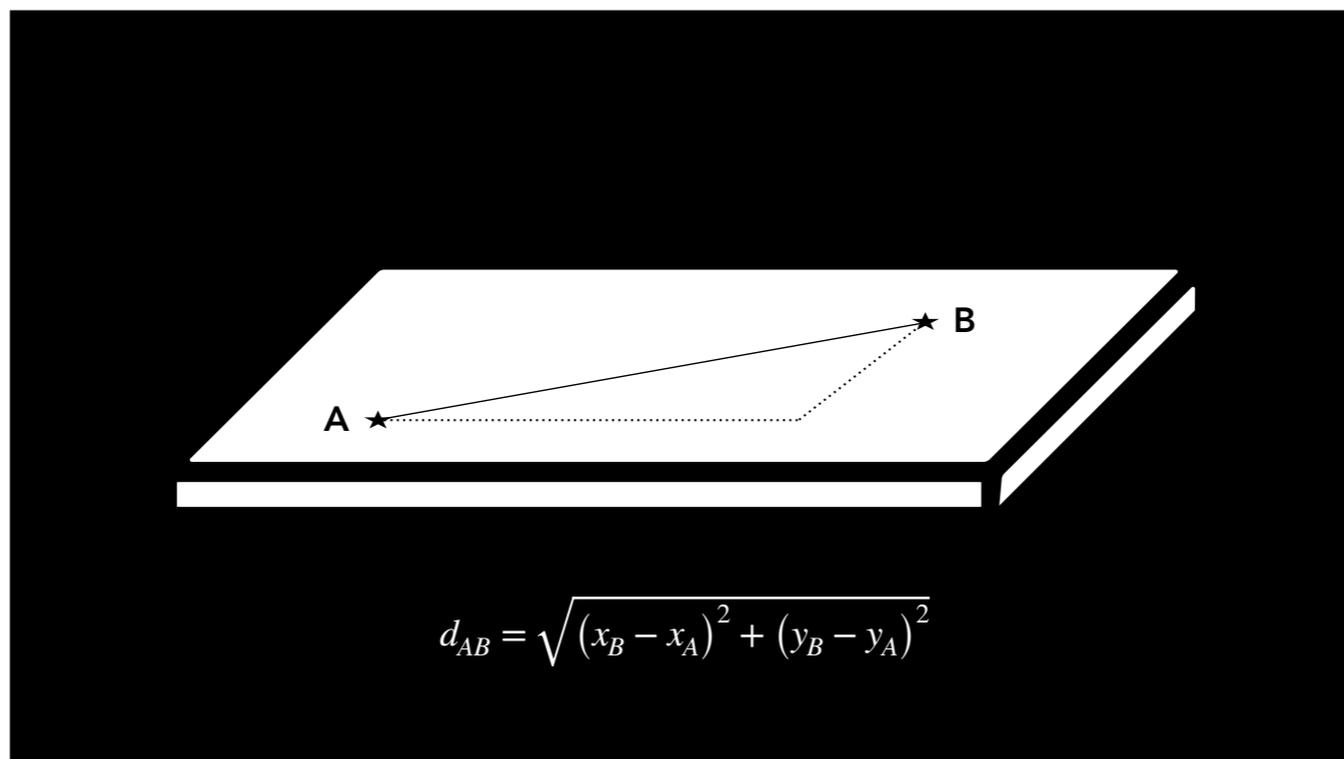
Cette observation implique qu'un astronaute (ou cosmonaute ou taikonaute) dans une fusée sera incapable de dire s'il est en chute libre dans un champ gravitationnel ou bien s'il est hors de tout champ gravitationnel et que la fusée accélère.

La Relativité Générale

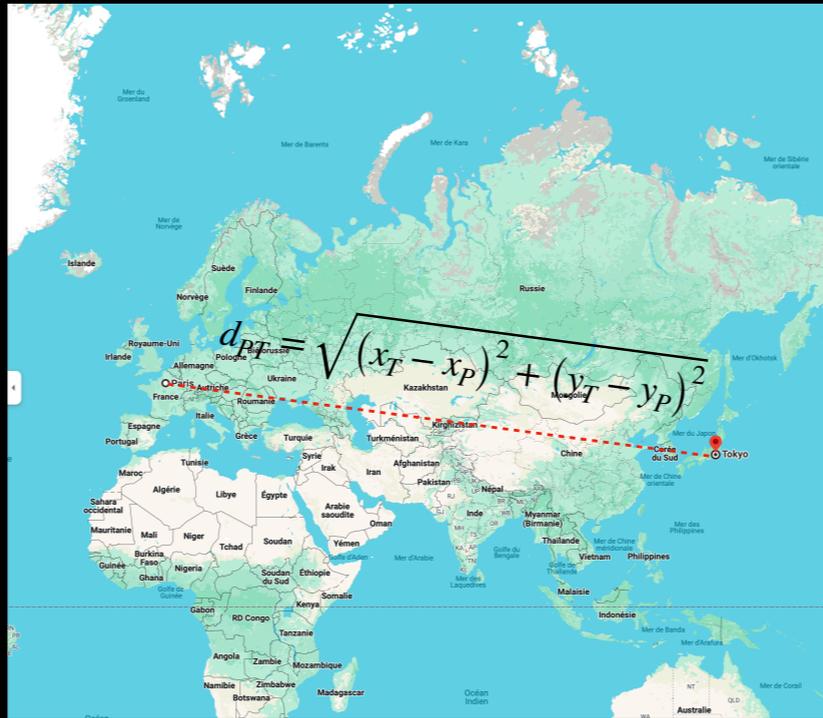
C'est à partir de telles constatations qu'Einstein a construit sa nouvelle loi de la gravitation, la théorie de la relativité générale.

Nous pouvons interpréter la gravitation de manière géométrique, elle est définie comme la géométrie (la façon de mesurer les distances et les intervalles de temps) ou plutôt la déformation de la géométrie de l'espace-temps.. L'équation de la RG, lue dans un sens, nous dit comment les objets suivent la courbure de l'espace temps, et, lue dans l'autre sens, comment les objets déforment, créent la courbure de l'espace temps.

Ce qui va déterminer le mouvement d'un corps dans un champ de gravitation n'a rien à voir avec sa masse mais il va suivre tout simplement une géodésique, c'est-à-dire le plus court chemin pour aller d'un point à l'autre.

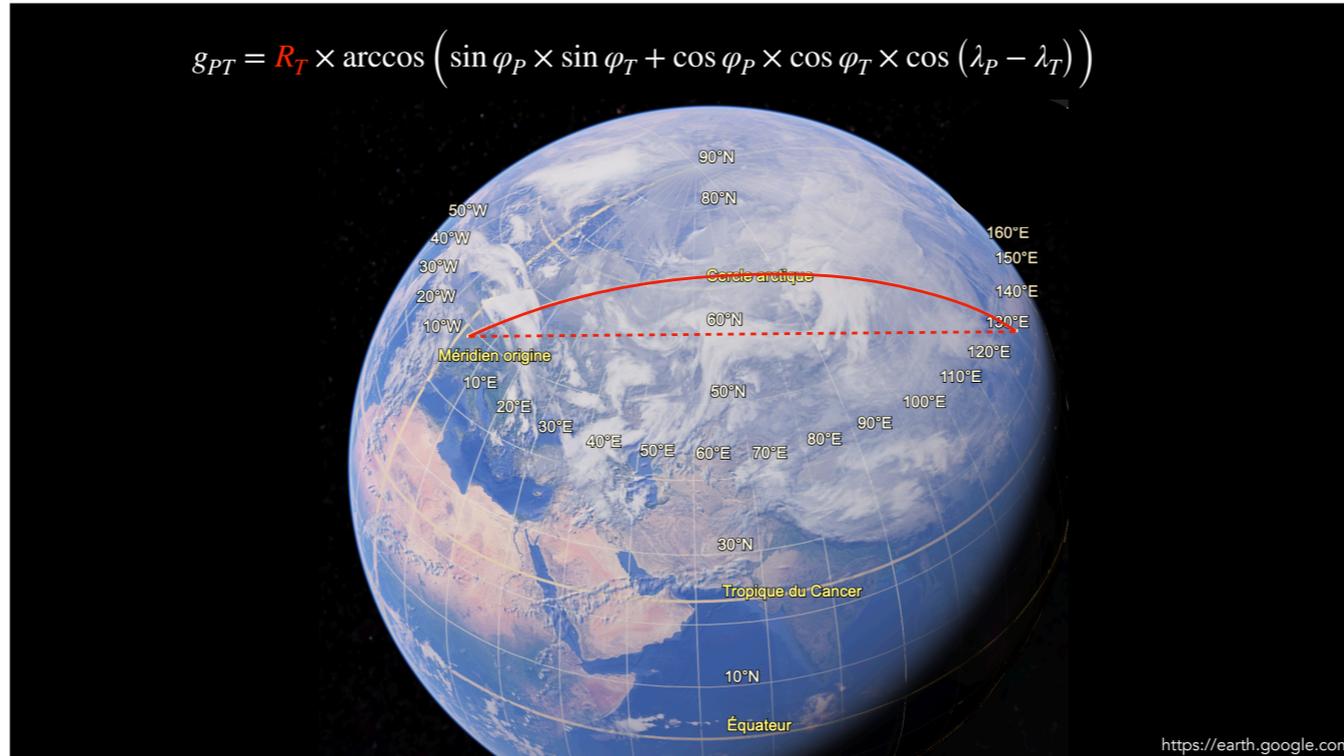


Dans un espace plan, ce chemin est la ligne droite, dans l'espace-temps déformé, il va suivre la courbure de l'espace temps.



<https://www.google.fr/maps/>

$$g_{PT} = R_T \times \arccos \left(\sin \varphi_P \times \sin \varphi_T + \cos \varphi_P \times \cos \varphi_T \times \cos (\lambda_P - \lambda_T) \right)$$



Quel est donc le rôle de la masse (gravitationnelle active) ? C'est celui de créer la gravitation ou dit dans le langage de la RG de courber l'espace-temps (C'est la mesure des distances entre les événements dans l'espace-temps qui est modifiée). Pour connaître quelle est la courbure, il suffit de regarder comment les objets se déplacent puisque leur trajectoire suit justement la courbure. Et du coup à partir des équations de la RG on sait, enfin il y en qui savent, calculer la distribution de masse (ou plutôt l'énergie en général) qui a donné lieu par son effet gravitationnel cette courbure.

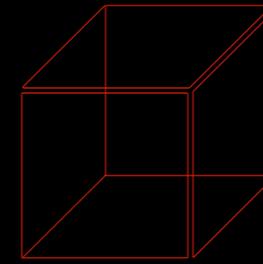


Si on fait l'inventaire de tous les objets dans un environnement donné et que l'on calcule la courbure de l'espace temps induit par ces objets, le résultat obtenu ne permet pas d'expliquer la dynamique observée (mouvement des étoiles) des objets. Il y a donc une différence entre la masse que l'on voit et la masse que l'on reconstitue par l'intermédiaire du mouvement des objets se déplaçant dans l'espace-temps déformé.

Un anneau de matière noire modélisé autour de l'amas de galaxies CL0024+17, situé à environ 4 milliards d'années-lumière.
NASA, ESA, M. J. JEE AND H. FORD ET AL. (JOHNS HOPKINS UNIV.)

Matière noire

Fritz Zwicky, Vera Rubin, Dennis Walsh,...



1933

Une réponse possible donnée pour expliquer cette différence : il y a des objets qu'on ne voit pas, de la masse qui est invisible (matière noire), Quelle est cette masse cachée

- planètes que l'on ne voit pas, ébloui par les étoiles ... mais il en faudrait beaucoup. Il y a 10 fois plus de masse cachée que de masse visible. La masse des planètes autour de chaque étoile devrait être 10 fois grande que la masse de l'étoile. Dans le système solaire, la masse des planètes ne représente que 1/1000 de la masse du soleil.

- trous noirs ? les trous noirs auraient d'autres effets qui permettraient de les voir.

- quelque chose que l'on ne connaît pas ? des particules pas encore découvertes et donc non décrites par le MS. Ces particules devraient exister en grand nombre et ne pas interagir du tout ou un petit peu ... donc on les cherche .. sans trouver

- la théorie RG n'est pas bonne

Dans tous les cas il faut trouver une nouvelle théorie ou MS ou RG.

Vous avez certainement entendu parler du satellite EUCLID mis en orbite (point L2) début juillet 2023. Sa mission est de mesurer la distribution de la matière noire et des galaxies dans l'Univers et la manière dont cette répartition a évolué depuis le Big Bang sous l'effet de l'énergie noire. En mesurant à la fois les déformations des images des galaxies lointaines dues à la matière présente entre nous et ces galaxies et les décalages spectraux de la lumière émise par ces galaxies (mesure de distance), il est possible d'analyser simultanément les propriétés statistiques des distributions de la matière noire et des galaxies et d'en décrire l'évolution au cours du temps, signature de l'énergie noire.

Je vous renvoie au cours de l'année dernière dédié à la matière noire pour en savoir davantage.

L'anti-matière

Puisque nous sommes dans l'exotique, voilà une autre question qui pourrait hanter vos nuits blanches ...

Vous vous rappelez de l'histoire que je vous avais racontée lors de mon cours de 2021. L'anti-matière est le fruit de l'imagination du peu-causant Paul Dirac. En 1928, âgé de 27 ans, en s'appuyant uniquement sur des considérations mathématiques et des critères d'esthétique mathématique, il arrive à construire une équation alliant la relativité restreinte et la mécanique quantique qui reproduit avec une précision encore jamais atteinte auparavant le spectre de l'hydrogène. Mais en résolvant son équation pour un électron libre (sans interactions avec d'autres particules), ils trouvent des solutions qui correspondent à des électrons d'énergie (de masse) négative ! Un résultat calamiteux qui ne correspond à aucune réalité physique... mais son équation est tellement belle. Il lui faudra presque deux ans pour proposer une interprétation de ce résultat, il prédit l'existence d'une nouvelle particule (il est le premier théoricien à prédire l'existence d'une nouvelle particule), le positron anti particule de l'électron de même masse que l'électron mais de charge électrique opposée.

Combien pèse 1kg d'anti-matière ?

Se pose maintenant la question : est-ce que l'antimatière tombe à la même vitesse que la matière ordinaire, ou se comporte-t-elle différemment. Est-ce que l'antimatière se comporte à l'identique de la matière dans le champ de gravité terrestre ? Anti-gravité ? Interaction gravitationnelle entre matière et anti-matière répulsive, mais aussi entre anti-matière et anti-matière et donc impossibilité de former quoi que ce soit pas d'anti-étoiles, anti-planètes, anti-galaxies (ce qui serait très pratique pour expliquer l'absence apparente d'anti-matière dans l'univers, et expliquerait le mystère de l'énergie noire) ?

L'expérience n'a à ce jour pas donné la réponse. Donc il faut la faire. Justement une expérience (GBAR) au CERN y travaille et tente de répondre à la question : Est-ce que l'anti matière tombe-t-elle vers le haut ?

Comment ? Le principe est simple, la mise en oeuvre est complexe et très technique. Alors je ne vous dirai que le principe.

1. Fabriquer de l'antimatière : L'objectif est de fabriquer des atomes d'antimatière de suffisamment basse énergie. Pour cela on utilise le complexe d'accélérateurs du CERN qui dans un premier utilise des protons accélérés à haute énergie (PS) pour créer des particules secondaires par bombardement d'une cible métallique. Parmi les particules créées de nombreux anti-protons trop énergétiques et désordonnés pour être utilisés tels quel. On va donc dans un deuxième temps les ordonner et les ralentir et les stocker dans un déccélarateur d'anti protons (AD) à des vitesses de l'ordre du centième de la vitesse de la lumière. On associe ensuite les antiprotons à des anti électrons obtenus à partir d'un autre accélérateur d'électrons qui créent les positrons par création de paires du rayonnement de freinage, pour former des atomes d'anti hydrogène refroidis à des températures de l'ordre du micro Kelvin. Il faut 10^{10} électrons et 10^7 anti protons pour former un seul atome d'anti hydrogène.

2. Les atomes d'anti hydrogène font ensuite une chute de 20 centimètres et l'on enregistre leur annihilation à la fin de la chute. Mesurer l'accélération de l'anti-hydrogène sous l'effet de la gravité et la comparer avec l'accélération de l'hydrogène ordinaire permet aux scientifiques de l'expérience GBAR et ALPHA-g de rechercher les différences entre le comportement de la matière et celui de l'antimatière. Cela leur permet notamment de vérifier le principe d'équivalence d'Einstein, qui veut que la trajectoire d'une particule soit indépendante de sa composition et de sa structure interne lorsque cette particule est soumise uniquement aux forces gravitationnelles. L'observation d'une différence dans la façon dont l'hydrogène et l'anti hydrogène tombent sous l'effet de la gravité démontrerait que ce principe est en

fait erroné.

En septembre 2023 est publiée dans le revue Nature (Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter. Nature 621, 716–722 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06527-1>. 27 septembre 2023) un article présentant les premiers résultats de l'expérience ALPHA-g au CERN qui amènent la conclusion : « the acceleration of an antihydrogen atom is consistent with the familiar, attractive gravitational force between matter and the Earth. »

Ite massa est

Pour finir intéressons-nous à l'origine de la masse et pour cela plongeons dans le monde des particules élémentaires et interrogeons-nous quel est le statut de la masse des particules élémentaires, masse qui devrait déterminer la masse de toutes les choses de la Nature si nous nous restreignons au principe intuitif que la masse d'une chose est la somme des masses des constituants de cette chose.

Dans les années 1960, on parvient à construire un modèle, le Modèle Standard qui décrit les particules élémentaires et leur interaction. On se rappellera de mon cours de l'année dernière, que ce modèle a ceci de particulier, en plus du fait qu'il est d'une redoutable efficacité pour calculer toutes les quantités mesurables obtenus expérimentalement avec les accélérateurs, il est construit à partir de groupes de symétrie insérés dans une théorie de jauge. C'est un exercice mathématique rigoureux s'appuyant sur des principes de physique incontestables et incontestés. Le résultat de cet exercice, le MS donc, est une théorie qui décrit, dans le formalisme des champs quantiques, toutes les particules élémentaires connues et toutes les interactions connues, à l'exclusion de l'interaction gravitationnelle (pour cette dernière nous avons la RG). Le fait remarquable, voire inouï, de cette exercice est qu'il suffit de choisir le bon groupe de symétries pour déterminer intégralement la structure des interactions. Si vous êtes perdus, levez le doigt maintenant pour demander des éclaircissements

A ce jour, après plus de 80 ans, aucune observation, aucun résultat de mesures expérimentales n'ont pu faire douter de la validité du MS. Le MS décrit bien la réalité, ou mieux dit une réalité, la réalité que l'expérience a jusqu'à présent pu explorer. On peut donc faire confiance au MS et l'interroger sur ce qu'il peut nous dire à propos de la masse des particules

$$M_\gamma = 0$$

Prenons l'interaction EM. Le groupe de symétries qui la décrit (U(1)) implique que le médiateur de l'interaction, le photon (vous vous rappelez que dans le MS une interaction se décrit par l'échange entre les particules en interaction d'un type particulier de particules, on les appelle des bosons, chaque interaction étant caractérisée par sa propre particule médiatrice), ait une masse nulle.

Bon là pas de problème, le modèle est bien en accord avec l'expérience. La masse du photon est bien nulle, en tout cas inférieure à 10^{-54} kg. Donc le groupe de symétrie associé à la théorie de jauge donne la bonne réponse pour le médiateur de l'interaction.

$$M_F = 0$$

Examinons le cas de l'interaction faible, là aussi le groupe de symétrie qui décrit l'interaction exige que le médiateur de l'interaction faible doivent avoir une masse nulle. Or le fait que l'interaction ait une portée très faible implique que le médiateur de l'interaction faible doit avoir une masse (sinon la portée de l'interaction serait infinie). Donc contradiction. entre l'expérience et la théorie.

$$M_{\gamma, Z, W, q, e, \mu} = 0$$

Et ce n'est pas tout, comme par un effet de contagion, le MS impose à toutes les particules, y compris les particules de matière, quarks, électrons..., d'avoir une masse nulle. Très troublant, non! Et ceci est en parfaite contradiction avec tout ce qu'on observe, y compris l'existence de l'univers tel que nous le connaissons aujourd'hui et tel qu'on peut le constater en montant sur une balance.

Que faire ? Le MS serait-il faux ? Ou bien en avons nous oublié un ingrédient essentiel ?

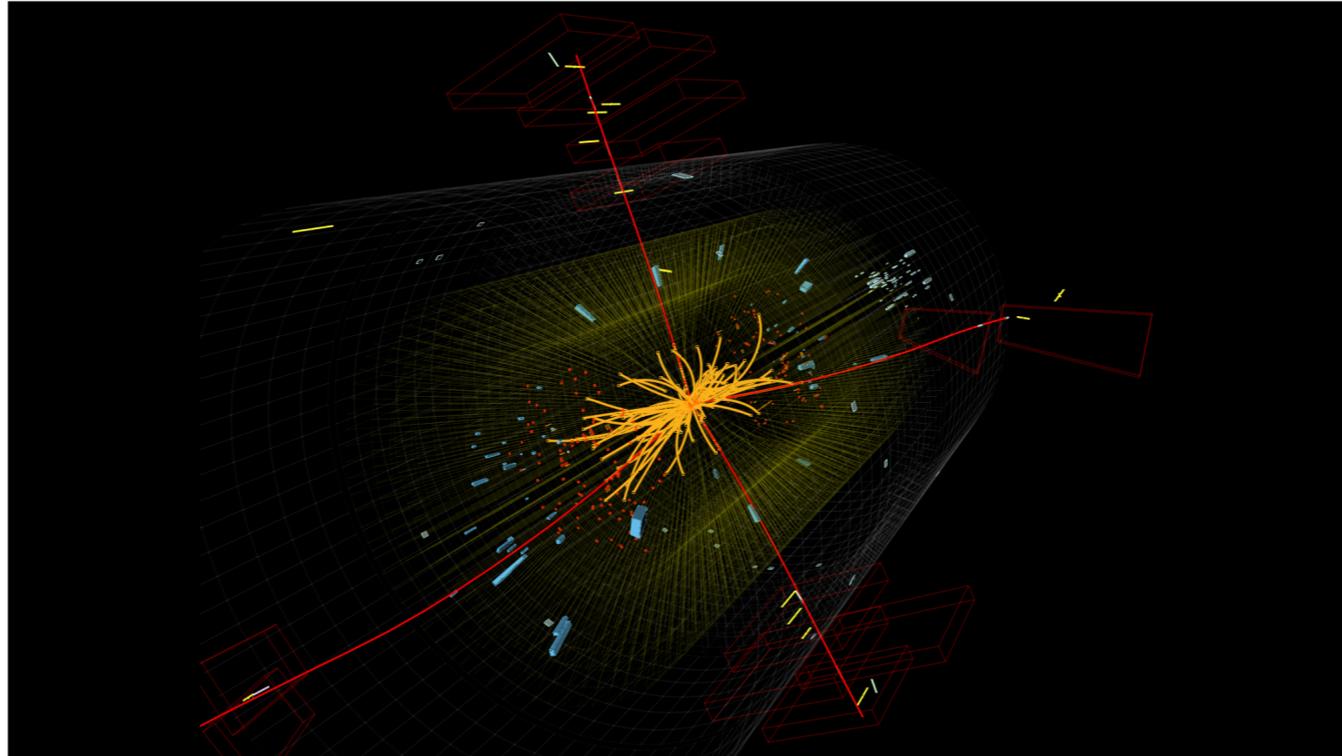
Le champ BEH

Le salut est venu en 1964 de 3 physiciens, l'américain Robert Brout et le belge François Englert qui travaillaient ensemble à Bruxelles et l'écossais Peter Higgs. Il se sont rappelés de Galilée lorsque celui-ci légiféra sur la chute des corps en reconnaissant que la théorie peut prédire le contraire de l'observation .. bien sûr à condition de réinterroger l'observation (Selon Galilée une force intervient, la résistance de l'air qui va davantage freiner les corps lourds que les corps légers et c'est cette force qui crée la différence des vitesses que l'on observe dans la chute des corps.)

Ils ne remettent pas en question la validité du MS et acceptent donc la prédiction que les particules n'ont pas de masse. Mais ils vont y ajouter quelque chose et ce quelque chose est un nouveau champ (rappelez-vous que le MS est une théorie quantique des champs, où les particules sont décrites par l'excitation de champs et les interactions sont des interactions entre champs À nouveau levez le doigt si vous êtes perdus). Il s'agit d'un champ qui peuple le vide, il est homogène et présent partout avec la même valeur quelque soit l'endroit de l'espace-temps que l'on interroge (champ scalaire qui a la même valeur en tout point et se mesure par un nombre). Comme ils sont mathématiquement particulièrement adroits, ils arrivent à intégrer ce nouveau champ dans le formalisme du MS sans en casser les fonctionnalités. Les calculs restent possibles et leurs résultats ne sont pas affectés.

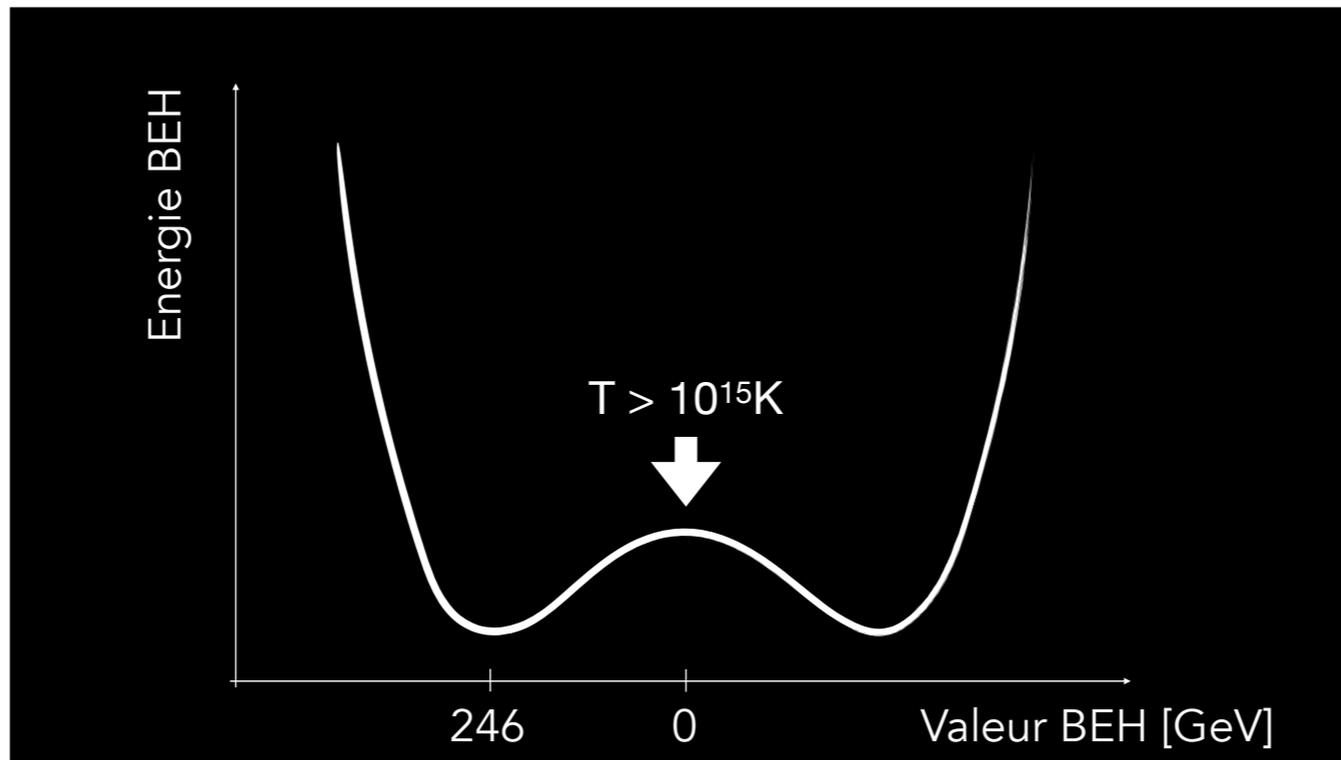
Ils proposent alors le mécanisme suivant : les particules qui n'ont pas de masse interagissent plus ou moins avec le champ et c'est l'interaction, et l'interaction seule, des particules avec ce champ qui leur donne de l'inertie. Les particules qui interagissent vont à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière et on dit qu'elles ont une masse non nulle et celles qui n'interagissent pas vont à la vitesse de la lumière et on dit qu'elles ont une masse nulle.

La masse des particules qui jusqu'à présent était une propriété intrinsèque des particules perd son statut. Les particules n'ont pas de masse et la masse observée devient une propriété secondaire qui résulte d'une interaction, une interaction des particules avec le vide qui du coup n'est plus vide ! La masse des particules est non pas une propriété innée mais une propriété acquise. Le champ a été quantifié et les quanta de ce champ sont les bosons de Higgs. Mais le MS est incapable de prédire la masse du boson de Higgs.

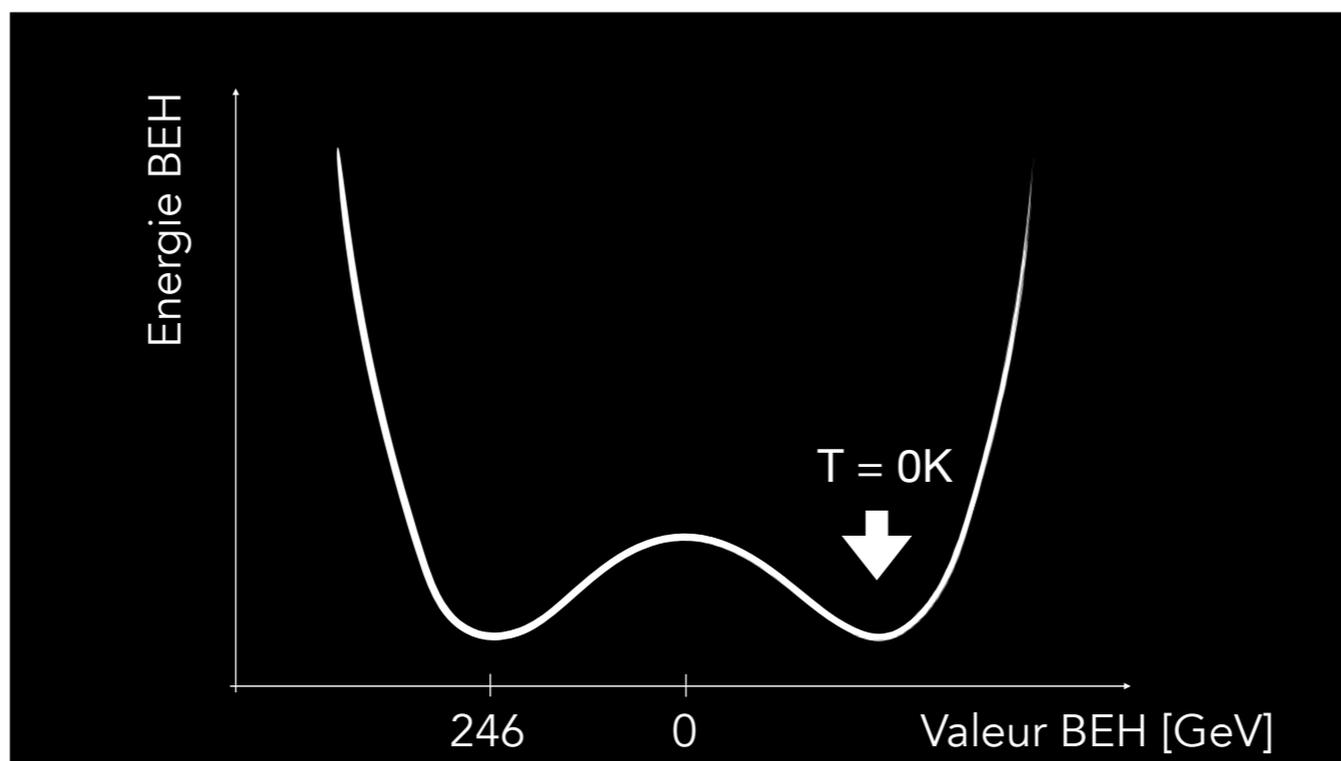


Inutile de vous rappelez sans doute que 48 ans plus tard au CERN, le LHC a permis de créer dans le présent les condition physique du passé et ainsi de réveiller de la léthargie dans laquelle il était tombé il y a près de 14 milliards d'années le boson de Higgs pour l'observer pendant les quelques fractions de seconde pendant lesquelles il a bien voulu se monter avec exactement les propriétés prédites par la théorie.

$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu e e$



Ce qui m'amène, pour finir, vers un peu de cosmologie telle que nous nous la racontons aujourd'hui (vous en apprendrez davantage en révisant mon cours de l'année dernière). Comme tous les champs quantiques, le champ de Higgs trouve son origine dans le Big Bang. Le champ Higgs n'a pas toujours eu une valeur non nulle, il a lui aussi une histoire. La valeur du champ était nulle au temps les plus anciens de l'univers au temps où toutes les particules avaient une masse elle aussi forcément nulle et se déplaçaient donc à la vitesse de la lumière.



Puis le champ de Higgs a décidé qu'il était plus confortable pour lui de se trouver dans un état d'énergie moindre mais qui du coup donne au champ de Higgs la valeur non nulle que nous connaissons aujourd'hui. C'est la brisure de la symétrie électrofaible, les interactions EM et faible se dissocient

Ainsi donc, de toutes les particules du modèle standard seuls le boson de Higgs lui-même et les neutrinos ont une masse intrinsèque, toutes les autres particules, celles qui constituent la matière connue, quarks et électrons, ont une masse intrinsèque nulle et leur masse, que nous savons mesurer, est acquise par interaction avec le champ de Higgs.

Pourquoi pesons-nous autant ?

Finalement pour nourrir votre réflexion de la semaine je vous propose la question suivante : sachant que seul 1% de la masse d'une particule composite est dû à la masse des composants, d'où viennent les 99% restants ? Un indice : la réponse est dans le titre du cours. Je ramasserai les copies la semaine prochaine. A mardi prochain où nous allons nous intéresser à c .

Le « tout est plus que la somme de ses parties » disait Aristote



Mission Apollo 15 en 1971 sur la lune, David Scott a lâché simultanément d'une hauteur de 1,6m, un marteau de 1,3kg et une plume de faucon de 0,039g