

# HistoireS de Particules

Yves Schutz

# HistoireS de Particules

## Résumé

### 3. Du chaos ... au Cosmos

- L'Univers (visible) a une histoire dont on ignore et le commencement et la fin
- Au cours de laquelle la matière s'est organisée à partir des particules élémentaires

Lors du cours précédent, je me suis un peu écarté de la physique des particules pour vous raconter l'histoire de l'Univers. Loin des cosmogonies imaginées de tout temps par les hommes, je vous ai parlé de la cosmologie cette science qui concerne tout ce que la physique sait aujourd'hui raconter de l'histoire de l'Univers. Je vous ai raconté comment la cosmologie a pris son essor dans le premier quart du 20ème grâce à des découvertes exceptionnelles qui par l'expérience et le calcul ont démontré d'une part que l'Univers s'étendait au-delà de notre proche banlieue le système solaire d'abord, la Voie Lactée ensuite et d'autre part que l'Univers ne cessait de gonfler selon une loi validée par la mesure : la loi de Hubble-Lemaître. De cette loi, en remontant le temps, les scientifiques ont déduit qu'à un moment de son histoire l'Univers était extrêmement petit, dense et chaud. Et c'est dans ce chaudron que sont nées les particules élémentaires qui se sont organisées sous l'action des forces fondamentales de la Nature pour former les structures de la matière et de l'espace-temps telles que nous les connaissons aujourd'hui. J'avais terminé le cours en précisant que la physique connaît avec certitude l'histoire de l'Univers (par définition l'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe) entre  $t = t_0 + 10^{-12}$ s et aujourd'hui mais ne sait que deviner l'histoire d'avant et ne sait rien dire sur l'Univers lorsqu'il était plus jeune que  $t = t_0 + 10^{-43}$ s. J'ai également plusieurs fois rappelé que le temps zéro hypothétique  $t_0$  qui marquerait l'origine de l'Univers est une déduction mathématiquement correcte mais physiquement irréaliste sans oublier que la notion d'origine n'a pas de sens pour la physique.

# HistoireS de Particules

## 5 étapes

1. Du corpuscule et de l'onde ... à la particule quantique
2. De l'électron ... au zoo de particules
3. Du chaos ... au cosmos
4. Des particules élémentaires ... aux champs quantiques
5. Des histoireS ... vers l'Histoire

# HistoireS de Particules

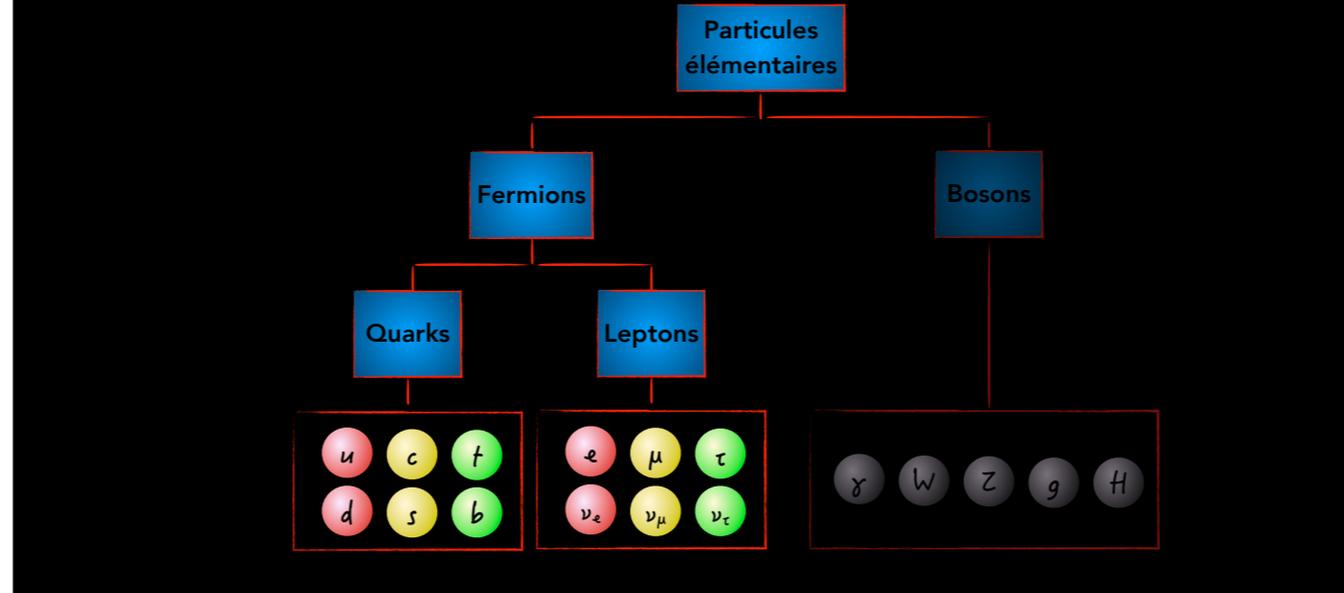
Des particules élémentaires ... aux champs quantiques

Yves Schutz

Dans ce cours nous allons revenir aux particules élémentaires telles que nous les connaissons aujourd'hui, et discuter comment elles interagissent pour former les structures du monde qui nous entoure. Je vais vous donner un aperçu, c'est-à-dire simplement introduire les notions de base qui sous tendent les théories qui nous permettent de calculer les choses. Autant vous avertir tout de suite que ces théories s'appuient sur des concepts qui sont apparemment difficiles à saisir, mais aussi difficiles à partager, car étrangers au bon sens physique hérité de nos expériences de tous les jours. De plus ils font appel à des mathématiques très élaborées, loin des mathématiques que l'on apprend à l'école. A quoi bon en parler alors, me direz-vous. Je dirai que ne serait-ce en connaître l'existence fait partie de la culture scientifique nécessaire pour par exemple lire et saisir l'essence des nombreux articles sur la recherche fondamentale que l'on peut trouver dans les revues de vulgarisation. Pour être encore plus terre à terre, parler de la physique des particules au grand public est un juste retour des choses parce que ce sont tout de même nos impôts qui financent les moyens, souvent importants, mis en oeuvre par la physique des particules.

Donc ne vous découragez pas : ça va être un peu dur mais tout honnête homme curieux des choses de la nature se doit de faire le petit effort pour surmonter l'obstacle mathématique inhérent à la théorie.

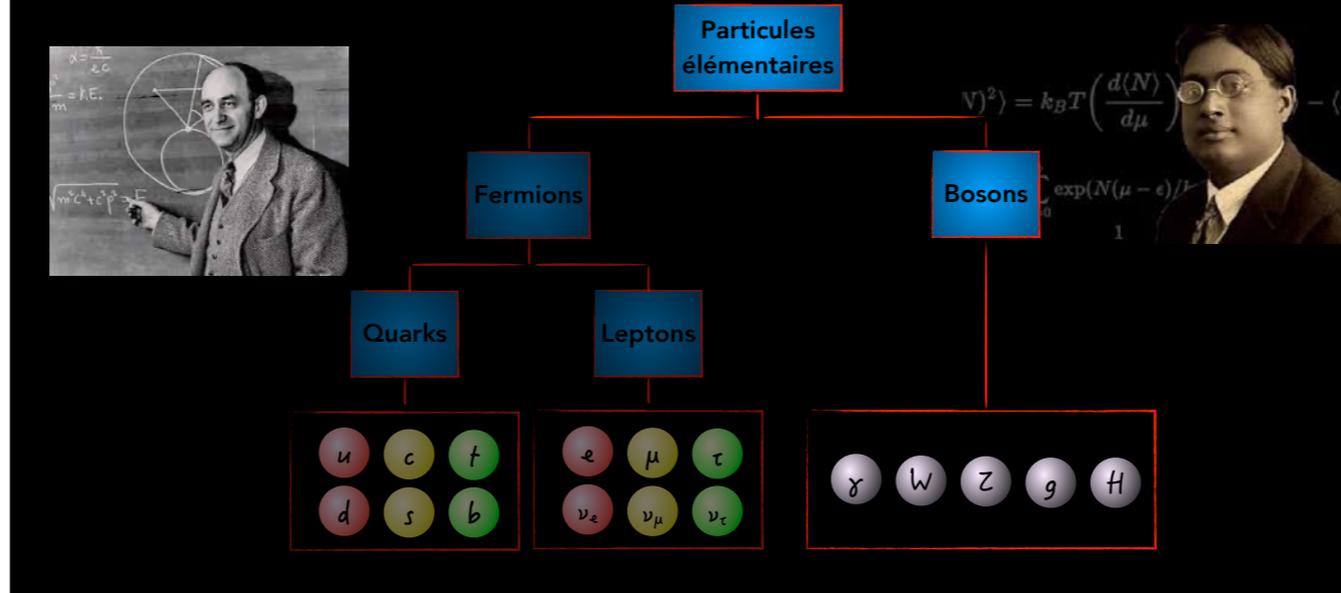
# Les particules élémentaires



Vous avez maintenant vu ce tableau des particules élémentaire à plusieurs reprises déjà. Il résume nos connaissances actuelles sur les particules que nous pensons encore être élémentaires, c'est-à-dire qui ne sont constituées d'une chose plus élémentaire encore. Il faudra sans doute revoir notre appréciation de la notion d'élémentaire d'ici la fin de ce cours.

Je vous avais raconté l'histoire des particules de matière regroupées sous le terme générique de fermions. L'histoire dans les laboratoires qui en commençant avec l'électron, puis le proton et le neutron nous a conduit aux quarks (1962) et aux leptons en passant par une multitude de particules éphémères. Nous retrouvons dans ce tableau les quelques particules nécessaires pour rendre compte de toute la matière connue de l'Univers mais aussi de toutes les particules de matière que les scientifiques ont créées dans des processus violents réalisés grâce aux accélérateurs.

# Les particules élémentaires



Reste à décrire comment ces particules interagissent entre elles et forment les structures macroscopiques qui nous sont familières. Ces interactions nous amènent à introduire une nouvelle catégorie de particules, elles aussi élémentaires mais non constituantes de la matière. Ces particules sont dénommées les bosons. D'où viennent ces noms, fermion et boson. Ils sont dérivés du nom de deux physiciens, théoriciens, remarquables, inventeurs d'une physique statistique, Enrico Fermi pour une assemblée de fermions indiscernables et Satyendranath Bose pour une assemblée de bosons indiscernables. Pour faire court, les fermions sont des particules de spin demi entier et obéissent au principe d'exclusion de Pauli, les bosons, au contraire sont des particules de spin entier et n'obéissent pas au principe d'exclusion de Pauli.

# Les interactions

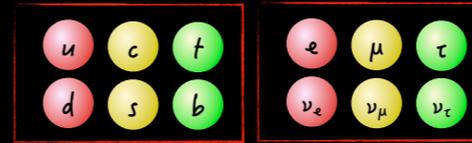
Gravitationnelle  
Électromagnétique  
Forte  
Faible

Pour commencer faisons le tour des interactions fondamentales qu'on appelle parfois aussi forces fondamentales.

En physique classique, la physique mécanique de Newton, on connaît bien la notion de force, une notion mathématique abstraite qui permet de décrire et de calculer une action mécanique d'un objet sur un autre. Dans le monde des particules cette même notion de force peut être considérée, mais on doit prendre en compte les 3 interactions fondamentales qui régissent le petit monde des particules élémentaires.

Ce petit nombre de force est le fruit d'une ambition de la physique qui s'évertue d'expliquer la diversité du réel par une unité sous-jacente. Le concept de l'atome est un exemple de cette démarche. Il en va de même pour les lois de la Nature. Ainsi une seule loi explique la chute des pommes et le mouvement de la Lune, une autre explique à la fois des phénomènes a priori aussi divers que l'électricité et le magnétisme. À force de regrouper ainsi des phénomènes variés dans des descriptions uniques, les physiciens sont parvenus à tout réduire à quatre grandes classes de phénomènes, régis par quatre forces appelées « interactions fondamentales ».

## Interaction gravitationnelle



- Toutes les particules élémentaires y sont soumises
- Négligeables pour les particules individuelles
- Nécessaires dans des conditions de l'Univers primordial ( $t < t_{\text{Planck}}$ )

Commençons par l'interaction gravitationnelle.

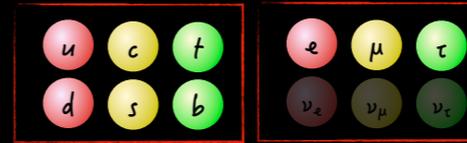
C'est bien évidemment, l'interaction que nous connaissons le mieux et à laquelle nous sommes particulièrement sensibles dans la vie de tous les jours. Elle nous permet de garder les pieds sur Terre, nous donne notre poids ... sur Terre, elle fait tomber les pommes des arbres, les planètes tourner autour du soleil, ne dit-on pas graviter autour du soleil, les galaxies retenir leurs étoiles, elle donne leur forme sphérique aux planètes, ...

Toutes les particules, y compris le photon, sont soumises à la gravité en proportion de leur masse ou de leur énergie (puisque  $E=mc^2$ ).

Cependant l'intensité de l'interaction gravitationnelle étant tellement plus faible que celle des autres interactions ( $10^{-38}$  fois plus faible que l'interaction électromagnétique), elle reste négligeable pour les particules individuelles. Elle est importante pour nous, car elle est toujours attractive et cumulative, c'est-à-dire proportionnelle au nombre de particules mises en jeu (la Terre est constituée d'environ  $10^{50}$  atomes, soit environ  $10^{24}$  kg, densité  $6 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>). Expérience confetti + règle ébonite

Pour que l'interaction gravitationnelle se manifeste à l'échelle des particules il faut des conditions exceptionnelles comme celles des premiers instants de l'univers (énergie de Planck = 10 milliards de milliards de fois l'énergie de masse d'un proton, densité de Planck  $5 \times 10^{96}$  kg/m<sup>3</sup>). Ne disposant d'aucune théorie qui décrive à la fois l'interaction gravitationnelle et les 3 autres interactions, explique pourquoi nous ne pouvons rien dire sur l'Univers à des temps inférieurs au temps de Planck, comme nous l'avons vu la semaine dernière.

## Interaction électromagnétique



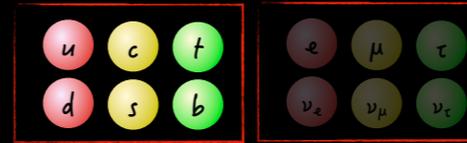
- Toutes les particules chargées
- Conditionne la survie de Homo Industrialis
- Stabilité de l'atome
- Gouverne toutes les réactions chimiques
- Permet les formes des objets

L'interaction électromagnétique ne nous est pas inconnue non plus. C'est parmi les 4 interactions celle qui est la mieux comprise. Elle permet le fonctionnement de tous nos appareils électroménagers, de l'ouvre-huitre électrique au Thermomix. Elle assure la cohésion des atomes et des molécules, gouverne toutes les réactions chimiques et phénomènes optiques, crée les ondes électromagnétiques, lumière, ondes radios, rayons X, gamma, ...

L'interaction électromagnétique est tantôt répulsive (entre charges électriques de même signe), tantôt attractive (entre charges électriques de signe opposée) ce qui diminue leur efficacité à se cumuler. C'est l'interaction électromagnétique qui donne la solidité aux objets et empêche, par exemple, mon doigt de s'enfoncer dans le plateau d'une table. Elle rend possible n'importe quelle forme d'objet : un oeuf, une bouteille, un moule à kouglof... tant que la quantité de matière mise en jeu reste raisonnable . Pour les objets très massifs, une planète par exemple, la force gravitationnelle impose une forme sphérique.

Interaction gravitationnelle et électromagnétique ont des propriétés très similaires : l'intensité de la force est proportionnelle aux masses, pour l'interaction gravitationnelle, aux charges électriques, pour l'interaction électromagnétique, et inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les deux objets en interaction. Einstein cherchera jusqu'à la fin de la vie une théorie unique qui décrirait dans un même cadre les interactions : sans succès.

## Interaction forte



- Les quarks la subissent, les leptons non
- La plus musclée des 4, mais très discrète à notre échelle
- La charge de couleur
- Emprisonne les quarks dans les nucléons et les nucléons dans le noyau

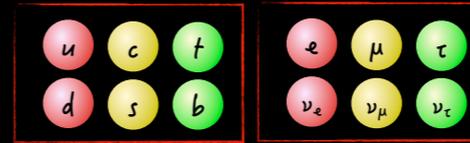
Je vous ai déjà parlé de l'interaction forte. Son existence avait été suggérée par Newton pour expliquer la cohésion de la matière.

C'est la plus musclée des 4 forces, seuls les quarks y sont sensibles. Je vous ai parlé l'année dernière de la couleur, cette étiquette qu'on a collée aux quarks pour les distinguer entre eux. La couleur ou en terme plus technique la charge de couleur joue pour l'interaction forte le même rôle que la charge électrique pour l'interaction électromagnétique. Seules les particules porteuses de la charge de couleur sont sensibles à l'interaction forte. Les leptons ne portent pas de charge de couleur. Alors que la portée des interactions gravitationnelle et électromagnétique est infinie, c'est-à-dire que 2 objets massifs (de charges opposées) localisés aux limites de l'Univers et diamétralement opposés sont encore sensibles à leur attraction mutuelle bien qu'avec une intensité fortement diminuée par leur éloignement (l'intensité varie comme l'inverse du carré de la distance séparant les deux objets).

La portée de l'interaction forte est très courte, de l'ordre de 1 fm c'est-à-dire de la taille d'un proton). Ceci explique qu'elle est très discrète à notre échelle et n'intervient pas dans notre vie de tous les jours. Son rôle principal est d'emprisonner les quarks dans une enveloppe qu'on appelle proton ou neutron et elle contribue à maintenir la cohésion du noyau de l'atome.

Un proton y reste très sensible : un proton fonçant à une vitesse même très proche de la vitesse de la lumière se verrait brutalement freiné par un autre proton qui se trouverait sur sa trajectoire et même stoppé sur une distance de seulement quelques millièmes de milliardième de mètre.

## Interaction faible



- Affecte tous les fermions
- Change la saveur des quarks
- Désintégration radioactive des particules
- Fusion thermonucléaire

L'interaction faible est sans doute la plus méconnue et la moins intuitive des interactions nucléaires. Tous les fermions y sont sensibles et elle est invoquée chaque fois qu'un processus fait intervenir un neutrino : décroissance radioactive des atomes et des particules subatomiques, fusion nucléaire dans les étoiles. Nous lui devons les rayons du soleil qui nous font vivre et le fait d'exister (nucléosynthèse stellaire pour la synthèse des éléments lourds au-delà du Be). Indispensable donc.

Enrico Fermi formula une première théorie de l'interaction faible pour expliquer la radioactivité  $\beta$ , c'est-à-dire la transmutation d'un élément du tableau périodique en un autre élément comme l'avait compris pour la première fois Rutherford. Au niveau élémentaire le processus radioactif est la transmutation d'un proton accompagné par l'émission d'un positon et d'un anti-neutrino et plus élémentaire encore la transmutation d'une quark d'une saveur donnée en un quark d'une autre saveur, respectant la hiérarchie de masse. C'est la seule force capable de changer la saveur.

Aussi toutes les saveurs de quarks devaient être présentes lorsque l'Univers était suffisamment chauds, mais les quarks lourds ( $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$ ) plus fragiles ont disparu par radioactivité beta pour céder la place aux quarks légers  $u$  et  $d$ . Il en va de même pour les leptons, les plus lourds disparaissent au profit de l'électron.

Parmi les 4 forces, la force faible est la seule qui ne sait pas former de système lié. La gravitation assemble des systèmes stellaires, l'interaction électromagnétique des atomes, l'interaction forte des hadrons.

Sa portée est elle aussi très faible, à peine un millième de fermi. De plus l'interaction faible refuse d'obéir à certaines symétries élémentaires que les autres interactions respectent scrupuleusement.

# Comment décrire les interactions ?

Théorie des champs

Maintenant que nous avons identifié les interactions, il faut un cadre théorique qui décrive les propriétés de ces interactions, et qui fournisse les outils permettant de faire des calculs. Cette théorie doit, en suivant les critères formulés par Galilée, reproduire par le calcul l'ensemble des résultats des mesures expérimentales et ce le plus précisément possible, et être en mesure de faire des prédictions qui peuvent être validées ou invalidées empiriquement (principe de réfutabilité).

Au cours du 20ème siècle deux théories ont été développées : une théorie pour l'interaction gravitationnelle, la Relativité Générale, et une théorie unique pour les 3 interactions nucléaires, le Modèle Standard de la Physique des Particules. Les deux théories sont formulées dans un même cadre, la théorie des champs. Les deux théories incorporent les principes de la relativité, mais seule le MS incorpore les principes quantiques. Le Graal du 21ème siècle est de trouver une théorie unique rattachant à un même principe les 4 interactions, un progrès indispensable si l'on veut s'aventurer au delà du mur de Planck et approcher d'avantage le temps zéro de l'univers tel qu'il est suggéré par le modèle cosmologique du Big Bang.

La théorie des champs, kesako ?

# Théorie des champs

## Pourquoi des champs ?

- Réalité newtonienne : l'horrible action instantanée à distance
- Incompatible avec la relativité restreinte

La théorie des champs permet de décrire d'une nouvelle façon les interactions. Elle a été inventée pour résoudre le problème rencontré lorsque Newton a introduit la notion de force pour décrire l'interaction d'objets massifs à distance. Cette notion de force, en fait un objet mathématique très pratique pour faire des calculs que l'on représente généralement par un vecteur dont la longueur représente l'intensité de la force et la flèche la direction dans laquelle s'exerce cette force. Mais une telle représentation de l'interaction implique implicitement la possibilité d'action à distance. En effet, comment deux corps, comme la Terre et le Soleil, sont-ils au courant de leurs présences respectives ? Comment la Terre connaît-elle à chaque instant la masse et la distance du Soleil ? Ainsi lors d'une éruption solaire, et donc une perte de masse du Soleil, comment la Terre est-elle instantanément informée de la nouvelle masse pour adapter la force qui l'attire vers le soleil. Newton était parfaitement conscient du problème et avait résolu le problème par une pirouette : « Hypotheses non fingo ». Le concept de champ est une réponse à l'horreur qu'inspirait la notion d'action à distance et encore d'avantage depuis qu'Einstein avait posé comme principe de physique intouchable qu'aucune information ne pouvait être transmise instantanément (barrière de la vitesse de la lumière).

# Théorie des champs

## Les champs classiques

- Michael Faraday (1830) : **invention du concept de champ**
- James-Clerck Maxwell (1864) : **champ électromagnétique**
- Albert Einstein (1915) : **champ gravitationnel**

Définissons d'abord le concept de champ : c'est une portion d'espace, voire l'espace dans son ensemble, remplie de grandeurs physiques c'est-à-dire des quantités mesurables où chaque point d'espace est lié à la grandeur physique. Ainsi la carte météo peut-être vue comme un champ des températures : en chaque point de la carte on peut mesurer une valeur de la température. On parle de champ scalaire, car la grandeur physique est un nombre. Un champ vecteur peut être représenté par la carte des vents : en chaque point de la carte on peut mesurer la force et la direction du vent, représentées par un vecteur. D'autres objets plus exotiques peuvent peupler des champs : champ tensoriel pour la relativité générale, champ de spineurs pour la mécanique quantique.

Michael Faraday est le premier à avoir formulé l'idée de champ pour interpréter l'action instantanée des forces électriques et magnétiques. J'ai déjà parler de Faraday ouvrier relieur, autodidacte et certainement l'un des savants les plus influents de son époque. Très impliqué dans la diffusion et la vulgarisation scientifique, il crée les « conférences de Noel » qui se tiennent encore aujourd'hui incluant des démonstrations expérimentales, et dont Physique pour Tous se veut le digne héritier.

Anecdote : Interrogé Par Sir William Gladstone, Le chancelier de l'Échiquier, le ministre du gouvernement du Royaume-Uni chargé des finances et du trésor, « Quelles sont les applications pratiques de l'électricité?", Faraday répondit, « Il est for probable que très prochainement vous puissiez en tirez les bénéfices d'un impôt »

Faraday a ainsi pavé le chemin qui a conduit Maxwell à la théorie classique de l'électromagnétisme. James Clerck Maxwell, écossais fortuné, est certainement le plus grand physicien du 19ème siècle. S'inspirant des idées de Faraday, comme il le reconnaîtra lui-même, il publie en 1865 sa théorie de l'électromagnétisme marquant la naissance du champ électromagnétique : « La théorie que je propose peut s'appeler théorie du champ électromagnétique car elle est liée à l'espace qui entoure les corps électriques ou magnétiques »

Les équations de Maxwell ne font que décrire le champ électromagnétique : les charges électriques sont les sources du champ. Une charge électrique modifie le champ, c'est l'interaction du champ électrique et de la charge électrique, et cette modification se propage dans l'espace et le temps à la vitesse de la lumière.

Plus tard, cette idée de champ devint un ingrédient essentiel à la théorie de la gravitation élaborée en 1915 par Einstein. Relativité générale. Pour faire simple, il suffit de remplacer dans ce que j'ai dit précédemment charge électrique par masse pour que le raisonnement reste le même.

Ainsi, pour revenir à l'attraction de la Terre par le Soleil : plus besoin que Terre et Soleil s'échangent instantanément les informations nécessaires pour savoir selon quelle force ils doivent interagir. Le Soleil crée un champ gravitationnel avec lequel la Terre interagit.

Ainsi, quand il se produit une éruption solaire, elle affecte d'abord le champ que dans le voisinage immédiat du Soleil et ce n'est qu'ensuite que la minime modification ainsi provoquée se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière. La Terre n'en verra les effets que 8 minutes plus tard.

# Théorie des champs

## Les champs quantiques

- Dirac, Heisenberg, Pauli (1929) : **électrodynamique quantique**

Quantum = excitation du champ

Électron = quantum électronique

Photon = quantum électromagnétique

<https://www.youtube.com/watch?v=WsPM-vdXmbY>

Tout cela est bien, mais qu'en est-il des particules qui ne sont pas des objets ordinaires mais des particules quantiques qui, comme on l'a vu brièvement lors du premier cours de cette session et en détail lors du cours de l'année dernière, ont des propriétés bien particulières dont on peut rendre compte en les décrivant par des ondes, des ondes de probabilité. En d'autres termes, à l'échelle microscopique une particule n'a pas vraiment de position : la présence d'une particule est distribuée à travers l'espace avec une probabilité plus ou moins grande. Et cette distribution de probabilités de présence peut se décrire par un champ, ce sera le champ électronique. Ainsi le champ électronique nous dira en tout point de l'espace quelle est la probabilité qu'un électron s'y trouve. Nous nous retrouvons ainsi avec deux champs différents : le champ électronique qui nous donne une indication où l'on peut trouver l'électron et le champ électromagnétique de Maxwell. Précédemment la charge électrique interagissait avec le champ EM, maintenant c'est le champ électronique qui interagit avec le champ EM. Mais comme les électrons évoluent dans le monde quantique, champs électronique et électromagnétique ne sont plus tout à fait les mêmes que le champ EM de Maxwell, les champs sont également quantifiés.

La quantification implique que les choses ne sont plus continues mais discrètes. Rappelez-vous de Planck et Einstein : les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement ne sont pas continus mais se font par petits paquets d'énergie, ce sont les quanta de lumière d'Einstein.

L'énergie des états possibles des champs quantiques ne peut pas prendre n'importe quelle valeur mais doit toujours être multiple entier d'un paquet d'énergie élémentaire (comme les orbites des électrons dans l'atome de Bohr). On appelle ce paquet élémentaire un quantum.

Ainsi l'état de plus basse énergie du champ électronique est l'absence de tout électron. Exciter le champ électronique veut dire ajouter un électron, ou 2 électrons ou autant d'électrons que l'on veut. Comme un demi ou un tiers d'électron est un objet physique qui n'existe pas, chaque état excité du champ électronique correspond à un nombre entier d'électrons. C'est ça un champ quantique ...

Si nécessaire voici une image : les états d'un champ quantique sont représentés par cet escalier dont chaque marche représente un état excité du champ : quand je suis au bas de l'escalier, il n'y a aucun quantum, en montant la première marche j'ajoute 1 quantum, deuxième marche 2 quanta, etc... Jamais je ne peux me tenir en suspension entre 2 marches, c'est-à-dire jamais je ne pourrai ajouter une fraction d'électron. Ainsi une marche représente un état d'excitation du champ, i.e un certain

nombre de quanta. On peut monter les marches c'est-à-dire ajouter des quanta mais on peut aussi descendre l'escalier c'est-à-dire ôter des quanta.

Ainsi l'interaction d'un électron avec un autre électron est le résultat de l'interaction entre le champ électronique et le champ EM.

Vous l'aurez deviné, le quantum du champ électromagnétique est donc le photon.

Et pour finir, un champ a une existence propre non réductible à quoi que ce soit d'autre. C'est un concept élémentaire. Et du coup les particules élémentaires ne sont plus les entités élémentaires : une particule est l'excitation d'un champ qui lui est l'entité élémentaire. Et pour revenir au cours de la semaine passée, on peut s'interroger si les champs, peut-être fondus en un champ unique renfermant tout le potentiel des champs connus aujourd'hui, ne seraient pas le pré-monde dont l'existence a précédé l'existence de l'Univers.

# Théorie des champs

## Les champs quantiques

- Dirac, Heisenberg, Pauli (1929) : **électrodynamique quantique**
- Feynman, Schwinger, Tomonaga (1949) : **formulation finale QED**

$$\begin{pmatrix} a_{\text{the}} & = & 0,001\ 159\ 652\ 153\ 5\ (24) \\ a_{\text{exp}} & = & 0,001\ 159\ 652\ 180\ 8\ (76) \end{pmatrix}$$

<https://www.youtube.com/watch?v=5QQHwyzwxyE>

Nous avons donc le principe de base, les champs quantiques, à partir duquel quelques physiciens ont développé une théorie quantique de l'électromagnétisme, l'électrodynamique quantique ou QED l'acronyme de Quantum Electro Dynamics. Pour y arriver il a fallu passer par des mathématiques redoutables, pas mal d'ingéniosité, des astuces salvatrices (la renormalisation). La théorie ainsi forgée est certainement la plus aboutie des théories des interactions et elle est d'une précision époustouflante, par exemple le calcul du moment magnétique anormal de l'électron. Peu importe ici ce que représente cette propriété élémentaire de l'électron, ce que je veux vous montrer la précision avec laquelle les calculs QED suivent l'expérience: ça change au dixième chiffre après la virgule !

## Interaction électromagnétique



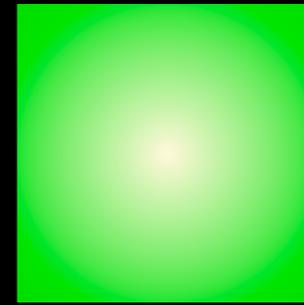
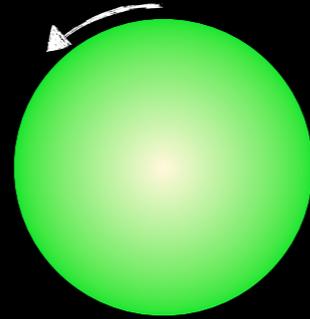
- Interaction fondamentale entre le champ électronique et le champ électromagnétique
- Procède par échange de photons virtuels

Ainsi la force électromagnétique est le résultat de l'interaction du champ quantique électronique dont le quanta est l'électron et du champ quantique EM dont le quanta est le photon. Un électron est une excitation du champ électronique. Sa présence modifie le champ EM, modification qui se propage à la vitesse de la lumière portée par des photons. Quand deux électrons se rencontrent ils échangent des photons virtuels, c'est à dire l'information comment chacun a modifié le champ électromagnétique. Et chaque électron a appris ou sait comment interagir avec le champ électromagnétique dans lequel il est placé.

Nous avons ainsi redéfini ce qu'est un électron et introduit une nouvelle particule le photon, dont l'existence a été suggérée par Einstein en 1905 et prouvée expérimentalement par Compton en 1922 (voir cours de l'année dernière).

## Les symétries

Des transformations qui laissent un objet inchangé



45°

<https://www.youtube.com/watch?v=PqZyHgm6o-c>

Maintenant que nous avons le concept de base à savoir que n'importe quel processus physique peut être décrit comme l'interaction d'un champ quantique de matière avec un champ quantique de force, c'est-à-dire pour un processus électromagnétique l'interaction entre le champ électronique et le champ électromagnétique, on peut progresser et déconstruire la notion de force pour faire émerger les forces de principes encore plus élémentaires.

Pour cela on va considérer que toutes les lois de la physique émergent d'un concept plus profond que les lois elles-mêmes : toutes les lois sont les conséquences de symétries.

En mathématique une symétrie est une transformation qui ne change pas l'apparence d'un objet. Le principe de symétrie est simplement la constatation que quelque chose paraît semblable de différents points de vue.

## Les symétries

- Les symétries de l'univers ne changent pas les lois de la physique
  - Homogénéité de l'espace : **invariance par translation**
  - Isotropie de l'espace : **invariance par rotation**
  - Homogénéité du temps : **invariance par translation dans le temps**

En ce qui concerne la physique et ses lois, on va rechercher les symétries de l'Univers qui ne changent pas les lois de la physique. Ces symétries nous sont toutes familières même si nous n'avons pas l'habitude de les formuler comme je vais le faire.

Une première symétrie est l'homogénéité de l'espace : tous les coins de l'Univers sont pareils, ceci implique que les lois de la physique ne changent pas si je vais d'un endroit à un autre. On appelle cela l'invariance (des lois) par translation. Si je fais une expérience de physique (par exemple la chute d'un corps) à Strasbourg ou sur une planète de Alpha du Centaure ou plus loin encore j'obtiens toujours les mêmes résultats,

De même isotropie de l'espace implique l'invariance par rotation et l'homogénéité du temps implique l'invariance par translation dans le temps, c'est-à-dire si je répète l'expérience faite au 16ème siècle aujourd'hui, j'obtiens encore le même résultat.

Ces invariances ont d'abord un aspect très pratique. En effet, si je veux connaître les effets d'une loi il suffit de faire l'expérience une seule fois en un endroit quelconque, pas la peine de la répéter à chaque fois que je me pose une question. La loi est universelle et il suffit de l'appliquer. Il en va de même lorsqu'on cherche à élaborer une théorie, connaissant les symétries du problème on pourra réduire la complexité du problème à résoudre.

## Emmy Noether (1882-1935)

### Théorème

- Chaque symétrie pour être respectée impose la conservation d'une grandeur
  - Invariance par translation : **quantité de mouvement**
  - Invariance par rotation : **moment cinétique**
  - Invariance par translation dans le temps : **énergie**



Pour cela, il faut néanmoins une base mathématique solide et c'est Emmy Noether qui va la fournir avec un théorème fondateur.

Mathématicienne allemande considérée par Albert Einstein comme « le génie mathématique créatif le plus considérable produit depuis que les femmes ont eu accès aux études supérieures ». Malgré cela, le fait d'être une femme lui rendra l'accès à l'université allemande difficile.

Anecdote, lorsqu'elle postule en 1915 à un poste de Privat Dozent à l'université de Göttingen, sur invitation de David Hilbert, un membre de la faculté proteste : « Que penseront nos soldats, quand ils reviendront à l'université et verront qu'ils doivent apprendre aux pieds d'une femme ? » Hilbert répond avec indignation, en indiquant : « je ne vois pas pourquoi le sexe de la candidate serait un argument contre son admission comme Privatdozent. Après tout, nous sommes une université, pas des bains publics. »

Elle n'obtient pas de poste officiel et travaillera sans salaire, (elle devra encore attendre 4 ans) ce qui ne l'empêche pas de formuler le théorème qui porte son nom.

# Interaction électromagnétique



- Interaction fondamentale entre le champ électronique et le champ électromagnétique
- Procède par échange de photons virtuels
- Electron
  - énergie : **changement de repère temporel**
  - impulsion : **changement de repère spatial**
  - spin : **changement d'orientation**

Revenons donc à l'interaction électromagnétique.

Le théorème de Noether s'applique également au contenu de l'univers, et en particulier aux champs quantiques.

Tous les électrons de l'univers sont identiques car ils sont des excitations d'une unique champ, le champ électronique.

Pour les distinguer on les marque avec des étiquettes indiquant leur énergie, leur impulsion ou leur spin. Ce que nous dit le théorème de Noether est que ces propriétés sont simplement des quantités qui caractérisent la manière dont la fonction d'onde de l'électron réagit à des transformations de symétrie : au changement de repères temporels (énergie), ou à l'emplacement (impulsion) et à l'orientation (spin) de nos laboratoires.

Ainsi forces et matière perdent leur statut de principes premiers, les symétries sont les principes premiers. La physique ne commence plus par dire, il y a de la matière et des forces mais par dire qu'il y a des symétries.

## Les symétries

- Le principe premier est l'existence de symétries des lois
- Chaque symétrie impose la conservation d'une grandeur
- A chaque interaction son groupe de symétries

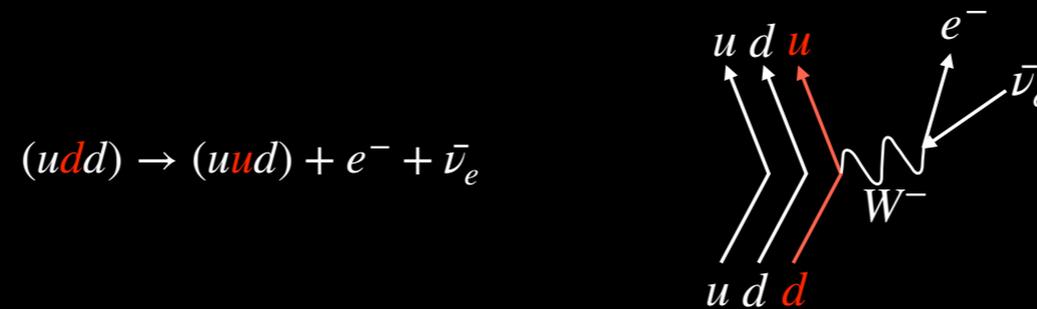
Résumons :  
Pour décrire les interactions, il suffit de rechercher toutes les symétries, c'est-à-dire les transformations qui ne changent pas la dynamique des phénomènes concernés. On utilise ensuite un outil mathématique qui permet de regrouper l'ensemble des symétries propre à chaque interaction. On parlera par exemple de groupe de symétries  $U(1)$  pour l'interaction électromagnétique, groupe de symétries  $SU(3)$  pour l'interaction forte. Il est impossible dans le cadre cours de détailler d'avantage la signification de ces sigles.

Les champs de matière ont également leurs propres symétries et grandeurs conservées. Par exemple, l'interaction forte est indifférente si dans les processus on change les neutrons par des protons et vice-versa. La quantité conservée s'appelle l'isospin. Ou encore, l'interaction forte et électromagnétique sont indifférentes si on change toutes les particules de matière par les particules d'anti-matière.

## Interaction faible



- Ernest Rutherford & Frederik Soddy (1902)
- Enrico Fermi (1932) :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg (1968) : force électrofaible



Passons maintenant à l'interaction faible. L'histoire en accéléré : en 1902 Rutherford explique la radioactivité par la transmutations d'un élément en un autre élément, Pauli invente le neutrino pour faire respecter la conservation de l'énergie en 1931, neutrino découvert expérimentalement en 1956. Entre temps Fermi avait proposé une théorie de l'interaction faible responsable de la radioactivité beta et donné son nom au neutrino, le petit neutre pour le distinguer du gros neutre, le « neutrone ».

En 1968 les efforts combinés de trois théoriciens, deux américains Sheldon Glashow et Steven Weinberg et un pakistanais Abdus Salam parviennent à inclure l'interaction faible dans le cadre de la théorie quantique des champs. En fait ils font plus que ça, ils suggèrent que la force faible et la force électromagnétique ne sont que deux manifestations différentes d'une seule et même force qu'ils appellent l'interaction électrofaible, un tour de force pour lequel ils obtiennent le prix Nobel en 1979. Comme nous l'avons vu précédemment, dans la théorie des champs, l'interaction est transmise par le quanta du champ associé à l'interaction, le photon pour l'interaction électromagnétique. En vertu des symétries de l'interaction électrofaible, ils doivent introduire en plus du photon 3 bosons supplémentaires appelés bosons  $Z^0$ ,  $W^+$  et  $W^-$ . La radioactivité beta- est ainsi représenté au niveau des quarks par la transmutation d'un quark d en un quark u et l'échange d'un boson  $W^-$  qui se désintègre immédiatement en un électron et un anti neutrino.

Contrairement à l'interaction électromagnétique dont la portée est infinie, la très courte portée de l'interaction faible implique que les bosons échangés aient une masse très élevée, de l'ordre de 100 GeV, c'est-à-dire cent fois la masse du proton.

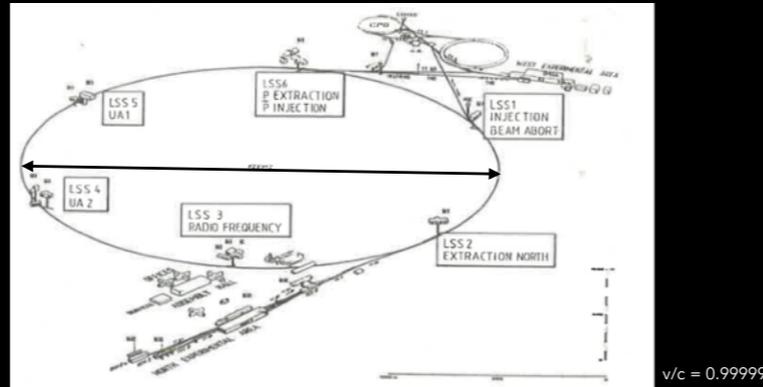
Nous voilà avec une prédiction théorique, l'existence de 3 nouvelles particules. Pour valider la théorie, il faut prouver empiriquement leur existence. Ils furent découverts au CERN (SPS) en 1983, plus de dix ans après la formulation de la théorie.

# Interaction électrofaible

Découverte W et Z (1983)

Recette pour une découverte

- Modifier un accélérateur en collisionneur (Carlo Rubbia & Simon van der Meer)



Ce long délai vient du fait que les accélérateurs alors existant ne permettaient pas de produire dans des collisions de particules élémentaires l'énergie suffisante pour créer des particules aussi massives en vertu de l'équivalence énergie-masse  $E = mc^2$ .

Le CERN à Genève, dont je parlerai plus longuement la semaine prochaine, venait de mettre en service un tout nouvel accélérateur, le supersynchrotron à protons, un anneau de 6,9 km de circonférence qui permettait d'accélérer des protons à 450 GeV pour bombarder des cibles fixes :

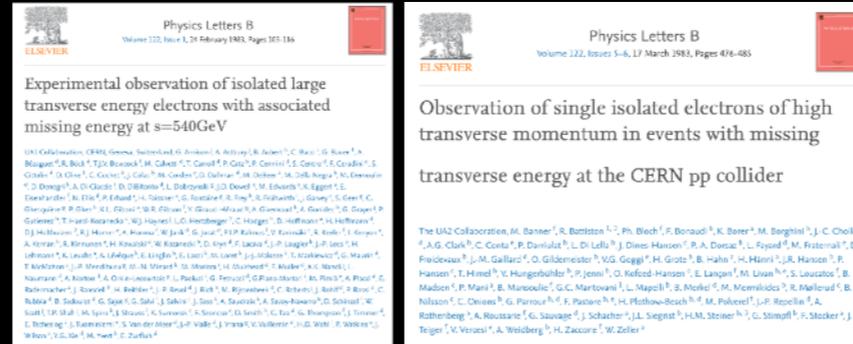
L'accélérateur envoyait alors des faisceaux de particules sur des cibles fixes (450 GeV) ce qui ne permet de disposer que d'une trentaine de GeV dans une collision avec un autre proton. Carlo Rubbia, un physicien italien hors norme, propose de transformer le SPS en un collisionneur de protons et d'antiprotons, produisant alors une énergie suffisante,  $2 \times 450$  GeV, pour créer les bosons recherchés. La transformation du SPS est réalisée par les équipes du CERN en un temps record de trois ans, entre 1978 et 1981.

# Interaction électrofaible

## Découverte W et Z (1983)

### Recette pour une découverte

- Modifier un accélérateur en collisionneur (Carlo Rubbia & Simon van der Meer)
- Des collaborations internationales (Carlo Rubia & Pierre Darriulat)



Parallèlement deux ensembles de détections (on appelle cela dans le jargon de la communauté des expérience) sont mis au point et baptisés très prosaïquement UA-1 et UA-2 (UA = Underground Area). Leur objectif principal, la chasse aux bosons Z et W, est similaire, mais le moyen de l'atteindre diffère. UA-1, un appareillage pesant la bagatelle de 2000 tonnes, est piloté par Carlo Rubbia. Il inaugure l'ère des grandes collaborations internationales (130 physiciens de 12 instituts). Il est conçu pour détecter et identifier de nombreux types de particules émises lors de la collision d'un proton et d'un anti-proton dans toutes les directions. En comparaison, UA-2 fait figure de nain (200 tonnes) et ne rassemble qu'une cinquantaine de physiciens de 6 instituts. Son objectif est plus précisément ciblé : détecter les électrons et des positons issus de la désintégration des bosons.

# Interaction électrofaible

Découverte W et Z (1983)

## Recette pour une découverte

- Modifier un accélérateur en collisionneur (Carlo Rubbia & Simon van der Meer)
- Des collaborations internationales à grande échelle
- Construire des détecteurs géants : UA1 & UA2



UA1 est conçu pour détecter et identifier de nombreux types de particules émises lors de la collision d'un proton et d'un anti-proton dans toutes les directions.



En comparaison, UA-2 fait figure de nain (200 tonnes) et ne rassemble qu'une cinquantaine de physiciens de 6 instituts. Son objectif est plus précisément ciblé : détecter les électrons et des positons issus de la désintégration des bosons.

# Interaction électrofaible

Découverte W et Z (1983)



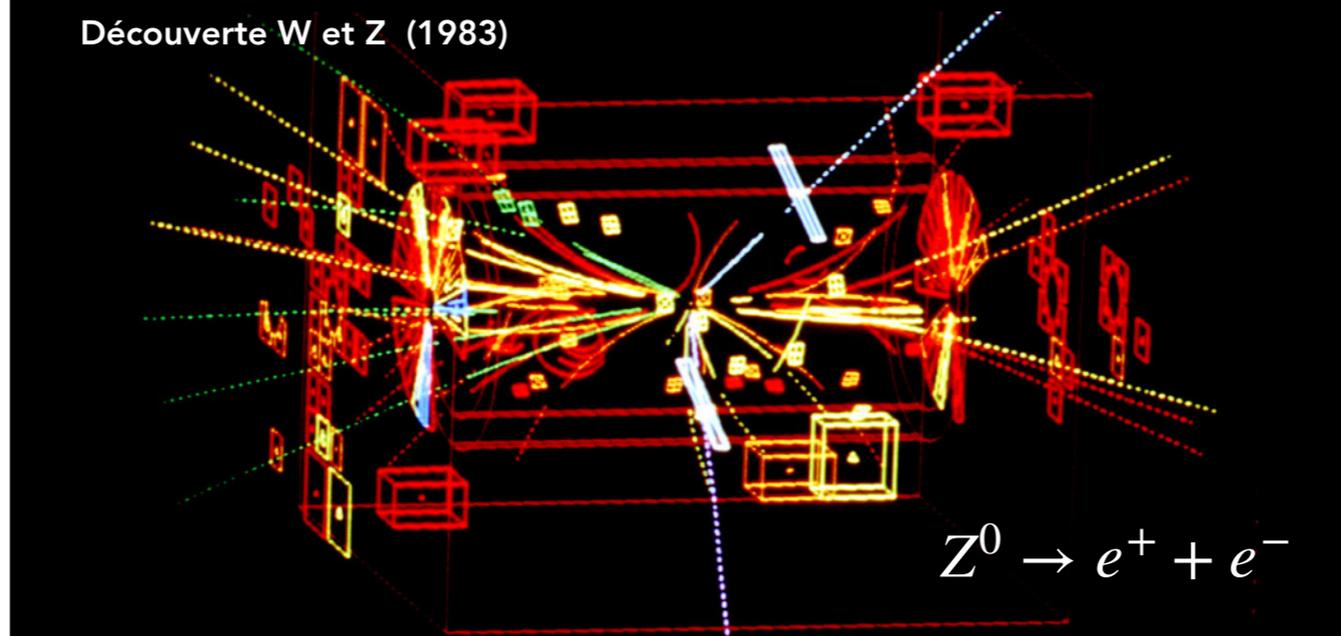
Tout est prêt en juillet 1981, les détecteurs enregistrent les collisions proton-anti proton 24h sur 24 et à la fin de 1982 environ un million d'événements intéressant est collecté. Le 21 janvier 1983, la découverte du  $W^+$  et du  $W^-$  est annoncée. UA-1 est le premier à observer 5 événements révélant leur signature, UA-2 confirme plus tard avec l'observation de 4 événements similaires.

Dans le courant du mois de mai, le troisième boson, le  $Z^0$  est lui aussi observé.

Avec l'accumulation par la suite de plus en plus de ces bosons, des mesures précises de leurs propriétés confirment les prédictions théoriques ainsi les masses des W et Z sont estimées à 80 GeV et 91 GeV respectivement.

# Interaction électrofaible

Découverte W et Z (1983)



Dans le courant du mois de mai, le CERN annonça la découverte du troisième boson intermédiaire, le  $Z^0$ .

## Interaction électrofaible

Découverte W et Z (1984)



Cette découverte vaudra à Carlo Rubbia et à Simon van der Meer, qui a contribué de façon décisive à la réalisation du projet, le prix Nobel de physique 1984. Mais surtout : la théorie électrofaible est empiriquement prouvée

# Les interactions

- ~~Gravitationnelle~~
- ✓ Électromagnétique  $U(1)$
- Forte
- ✓ Faible  $SU(2)$

Reste l'interaction forte.

# Interaction forte



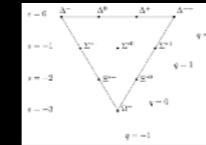
- 1935 - Hideki Yukawa :

échange d'un pion entre nucléons



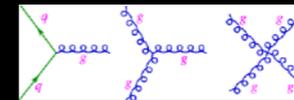
- 1960 - Murray Gell-Mann :

de l'ordre dans le zoo des particules aux quarks



- 1973 - David Politzer, Frank Wilczek & David Gross :

Chromodynamique Quantique



Vous vous rappelez qu'après la découverte du neutron en 1932 avec une masse très voisine de celle du proton, Yukawa avait proposé un modèle d'interaction, qu'on pensait être l'interaction forte, entre nucléons (terme générique pour neutron ou proton) qui supposait l'échange d'une particule alors inconnue, le pion. Elle fait apparaître une première symétrie simple : l'interaction devrait être invariante c'est-à-dire donner lieu au mêmes résultats si les rôles des neutrons et des protons étaient inversés. L'interaction forte est la même entre 2 protons qu'entre 2 neutrons ou entre un neutron et un proton. Ceci est confirmé expérimentalement en 1936.

En 1960, Murray Gell-Mann met de l'ordre dans le zoo des particules en invoquant un groupe de symétrie, appelé SU(3) et conjecture l'existence des quarks. C'est donc dans l'interaction entre quarks, seules particules porteuses de la charge de couleur que l'interaction forte s'exprime. Ceci entraîne l'existence d'une nouvelle symétrie : la force entre un quark rouge et un quark vert est la même qu'entre un quark bleu et un quark vert, celle entre deux quarks rouges est la même que celle entre deux quarks bleus etc...

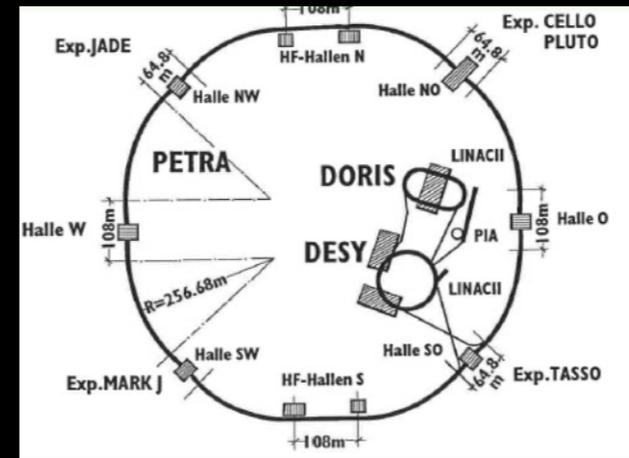
Cette invariance fixe les propriétés des champ quantique de force, le quantum en est le gluon. La théorie qui décrit les champs de quark, le champ de la force forte et leur interaction mutuelle est la chromodynamique quantique.

L'existence du gluon est nécessaire pour la théorie, reste à le trouver par l'expérience.

# Interaction forte

Découverte du gluon (1979)

- PETRA@DESY : l'accélérateur



Pour cela on va utiliser la même recette que celle appliquée par le CERN pour la découverte des bosons W et Z. Pour régler le cas du gluon, nous nous rendons en Allemagne, à Hambourg

L'accélérateur est un collisionneur d'électron et de positon, le Positron Electron Tandem Ring Accelerator (PETRA, un synchrotron de 2.3 km de circonférence) à Deutsche Synchrotron (DeSy) Hambourg. L'énergie disponible dans une collision est  $\sqrt{s} = 27\text{ GeV}$ .

# Interaction forte

## Découverte du gluon (1979)

- PETRA@DESY : l'accélérateur
- Des collaborations internationales

### Evidence for planar events in $e^+e^-$ annihilation at high energies

Brandelik, R.; Braunschweig, W.; Gähler, K.; Kadansky, V.; Lübelmeyer, K.; Mättig, P.; Martyn, H.-U.; Peise, G.; Rimkus, J.; Sander, H. G.; Schrittz, D.; Schultz von Dratzig, A.; Tinsse, D.; Weirath, W.; Boerner, H.; Fischer, H. M.; Hartrich, H.; Hiller, E.; Hillen, W.; Klop, G.; Kobach, W.; Leu, P.; Lohr, B.; Röh, P.; Rüchler, W.; Wacomayes, R.; Wenzel, N.; Wolstsch, M.; Büning, R.; Fohrmann, R.; Highland, D.; Hüttsch, H.; Joss, R.; Koch, W.; Kutz, U.; Kowalski, H.; Ladage, A.; Lüke, D.; Lynch, H. L.; Mikenberg, G.; Notz, D.; Pytki, J.; Raethmuler, R.; Schiwa, M.; Soding, R.; Wilk, B. H.; Wolf, G.; Holder, M.; Poetz, G.; Ringel, J.; Romer, O.; Rösch, R.; Schrüfer, P.; Birnie, D. M.; Dorman, P. J.; Downie, N. A.; Garbutt, D. A.; Jones, W. G.; Lloyd, S. L.; Pandoulas, D.; Pevsner, A.; Sedgbeer, J.; Yarker, S.; Youngman, C.; Barlow, R. J.; Cashmore, R. J.; Ringworth, J.; Ogg, M.; Salmon, G. L.; Bell, K. W.; Chirnovsky, W.; Foster, B.; Har, J. G.; Pseudoc, J.; Quenne, D. R.; Stenon, D. H.; Woodworth, P. L.; Eisenberg, Y.; Karshon, U.; Kogan, E.; Rewel, D.; Rowat, E.; Snedden, A.; Freeman, J.; Loomer, R.; Meyer, T.; Szu, Lan Wu; Zobernig, G.; Tasso Collaboration

Hadron jets produced in  $e^+e^-$  annihilation between 13 GeV and 31.6 GeV in c.m. at PETRA are analyzed. The transverse momentum of the jets is found to increase strongly with c.m. energy. The broadening of the jets is not uniform in azimuthal angle around the quark direction but tends to yield planar events with large and growing transverse momenta in the plane and smaller transverse momenta normal to the plane. The simple q overline{q} collinear jet picture is ruled out. The observation of planar events shows that there are three basic particles in the final state. Indeed, several events with three well-separated jets of hadrons are observed at the highest energies. This occurs naturally when the outgoing quark radiates a hard noncollinear gluon, i.e.,  $e^+e^- \rightarrow q \overline{q} g$  with the quarks and the gluons fragmenting into hadrons with limited transverse momenta.

Publication: Physics Letters B, Volume 86, Issue 2, p. 243-249.

Les 3 collaborations mises en place incluent une petite centaine de physiciens chacune.

## Interaction forte

### Découverte du gluon (1979)

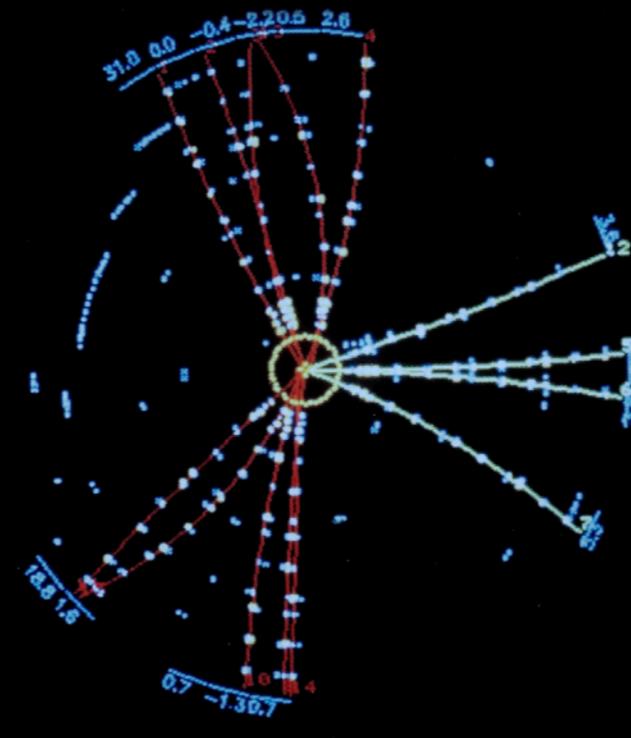
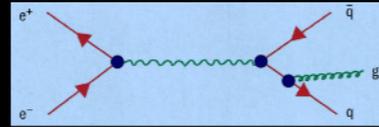
- PETRA@DESY : l'accélérateur
- Des collaborations internationales (TASSO, PLUTO, MARK-J)
- Construire des détecteurs géants : TASSO, PLUTO, MARK-J,

On y construit également d'imposants équipements expérimentaux pour détecter toutes les particules produites dans des collisions  $e^+e^-$



# Interaction forte

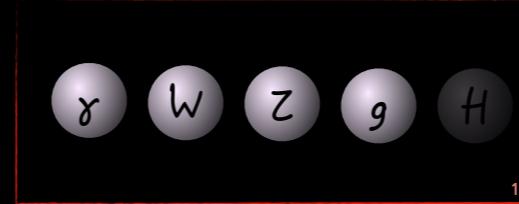
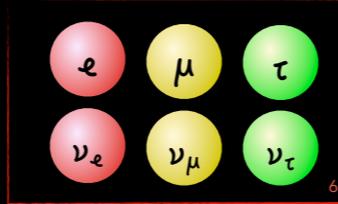
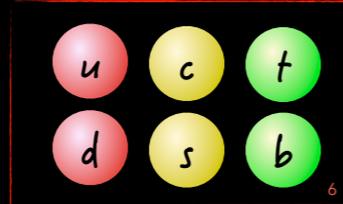
Découverte du gluon (1979)



En en 1979, un gluon se laisse « photographier ».

# Modèle Standard de la physique des particules

Une vision du monde subatomique



Il y a :

- des ~~particules~~ **champs** élémentaires (25)
- des interactions fondamentales (3)

réunies dans un formalisme mathématique : des symétries et des champs

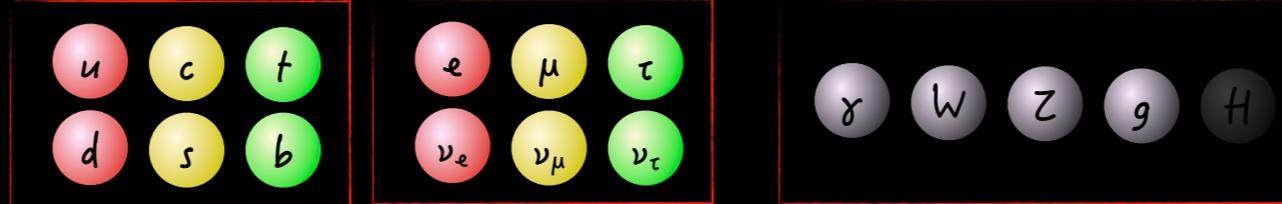
Nous disposons maintenant de tous les ingrédients pour construire un modèle qui décrit le comportement de toutes les particules élémentaires de matière soumises aux 3 interactions fondamentales, dites interactions nucléaires.

Avec un nombre limité de champs quantiques présents partout et à tout moment, des symétries caractérisant et la matière et les interactions et à condition bien sûr de parler couramment la langue mathématique, on peut construire un formalisme complet : le Modèle Standard de la Physique des Particules qu'on ne devrait plus appeler « de la Physique des Particules » mais des « Champs quantiques » qui sont dorénavant les constituants fondamentaux de la matière, les particules étant abaissées au statut d'excitations quantiques locales du champ correspondant.

Et si nous revenons pour un instant au cours précédent sur l'histoire de l'univers et de ces constituants, tout ce que nous savons dire c'est que dès sa naissance, l'univers incluait ces champs quantiques, présents en chaque point de l'espace-temps. Au fur et à mesure que l'espace s'étendait créant ainsi davantage d'espace-temps, les champs quantiques continuèrent à être présents en chaque point de l'espace-temps.

# Modèle Standard de la physique des particules

Une vision du monde subatomique



Les symétries imposent :

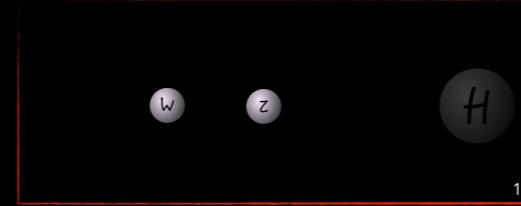
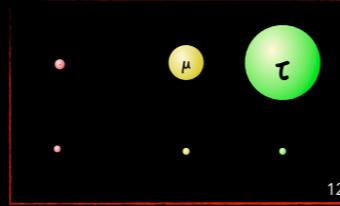
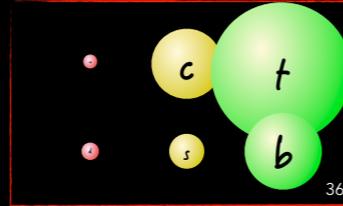
$$M_{u,d,c,s,t,b,e,\nu,\gamma,W,Z,g} = 0$$

Sommes-nous pour autant au bout de nos peines ? Pas encore, il reste un gros effort à fournir.

Les symétries sur lesquelles le MS a été construit impose que toutes les particules, les bosons aussi bien que les fermions doivent avoir une masse strictement nulle. Rappelez-vous du cours de la semaine dernière, l'Univers a été confronté à une telle situation pendant les premières pico secondes de son existence ( $t < t_0 + 10^{-12}s$ ) et tant qu'il y faisait encore très chaud ( $T > 10^{15}K$ ).

# Modèle Standard de la physique des particules

Des symétries brisées !



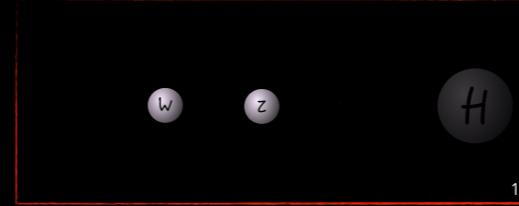
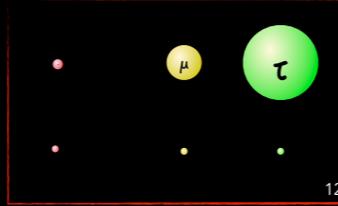
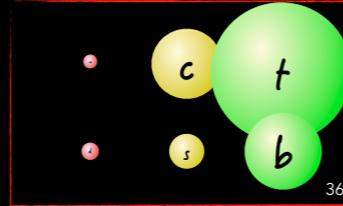
Le monde réel :

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

Or nous savons qu'un tel état est en pleine contradiction avec ce que nous savons de la masse des particules en particulier et de la masse de toute chose en général. A un moment de son histoire, l'Univers a vu le bel ordre chamboulé et quelque chose a fait que les particules ont acquis une masse dans un apparent désordre, à chaque particule sa masse. Ainsi le plus lourd des quarks est 57000 fois plus lourd que le plus léger des quarks et 330.000 fois plus lourd que l'électron !

# Modèle Standard de la physique des particules

Des symétries brisées !



1964 : Robert Brout, François Englert, Peter Higgs

- Dans son état initial, l'Univers obéit aux symétries du MS
- L'Univers choisit un état où ces symétries sont brisées
- Le champ de Higgs

Le MS serait-il faux, serait-il incapable de rendre compte du monde dans lequel nous vivons ?

Plutôt que d'abandonner le MS, 3 physiciens, Brout, Englert d'un côté et Higgs d'un autre côté, ont choisi de sauver le MS : ils considèrent que le MS est correct et qu'il faut rajouter quelque chose au modèle pour qu'il rende compte de la réalité. Ils imaginent que dans son état initial l'Univers obéissait bien aux principes de symétries énoncés dans le MS, mais que très rapidement l'univers a préféré s'installer dans un état, plus économique énergiquement parlant, où les symétries ne sont plus respectées, on dit que les symétries sont brisées.

Exemple du crayon, en équilibre sur sa pointe. C'est un état symétrique pour la rotation autour de son axe verticale. Mais c'est surtout un état instable, le crayon va vite tomber pour se trouver dans une position pointant dans une direction quelconque. Dans cet état le crayon ne respecte plus la symétrie de rotation précédente.

# Modèle Standard de la physique des particules

Des symétries brisées !



L'univers ne pouvant pas être réduit à un crayon, l'idée est d'introduire un nouveau champ qui imprègne tout l'univers le champ de Higgs dont l'état fondamental dans lequel vit l'univers n'est pas l'état symétrique du champ.

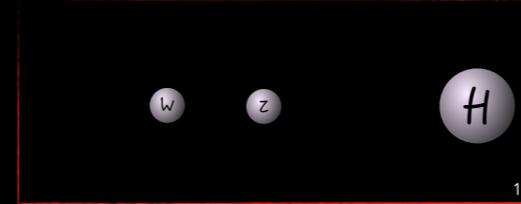
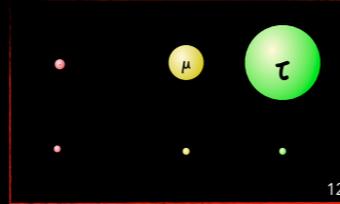
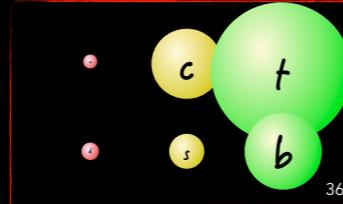
En passant cette brisure de symétrie distingue définitivement l'interaction EM et l'interaction faible auparavant réunit de façon non distinguable en une seule interaction, l'interaction électrofaible.

Cette brisure de symétrie aurait eut lieu au tout début de l'histoire de l'univers, lorsque la température de l'univers était de l'ordre de 1 million de milliards de K, quelques pico secondes après le début de l'histoire

Brisure spontanée de symétrie : l'état du vide choisit par le système ne partage pas la symétrie complète de la théorie dynamique. Potentiel en chapeau mexicain des états accessibles au système dont la hauteur mesure l'énergie. L'état du système est représenté par une bille contrainte à se déplacer à la surface du chapeau. Lorsque la température ambiante est suffisante, l'état d'équilibre du système, représenté par la la bille en équilibre au sommet du chapeau, possède une symétrie de rotation complète. Mais lorsque la température diminue, la bille roule vers le bas, jusqu'à un point d'équilibre choisi au hasard dans le fond du rebord, ce qui brise la symétrie de rotation initiale.

# Modèle Standard de la physique des particules

Des symétries brisées !



1964 : Robert Brout, François Englert, Peter Higgs

- Dans son état initial, l'Univers obéit aux symétries du MS
- L'Univers choisit un état où ces symétries sont brisées
- Le champ de BEH
- Tous les champs interagissent avec le champ de BEH

La solution est à la fois ontologique et législative : elle consiste, d'une part à postuler l'existence d'un champ quantique emplissant tout l'espace (ajout ontologique), d'autre part à décrire comment les particules élémentaires, effectivement sans masse, interagissent plus ou moins fortement avec ce champ, ce qui a pour effet de ralentir leur mouvement de la même façon que si elles avaient une masse (ce qui correspond à une nouvelle loi physique qui bouleverse notre façon d'associer particules et masse). Ainsi, la masse n'est plus une propriété intrinsèque de la matière mais une propriété secondaire acquise par les particules.

# Le Modèle standard

## Découverte du boson de Higgs

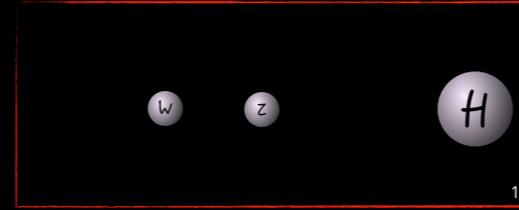
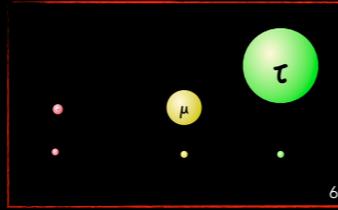
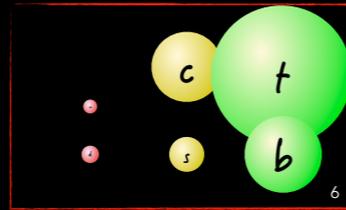
2010 : CERN



En plus de donner la masse aux particules, il reste une excitation possible du champ de Higgs et cette excitation est le fameux boson de Higgs découvert au CERN en 2010: Nous en parlerons lors du prochain cours.

# Le Modèle standard

Le modèle ultime ?



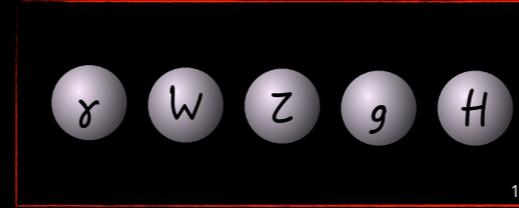
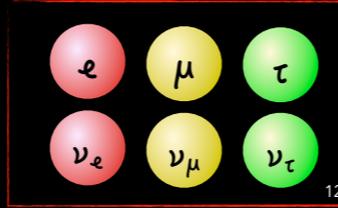
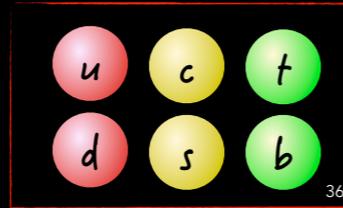
Un modèle empirique

- masse des quarks et leptons (9)
- constantes de couplage (3)
- Masse des neutrinos (7)
- .... = 18

Notre connaissance des particules fondamentales et de leur interactions est telle que nous pouvons expliquer tout ce qui se passe dans notre monde de tous les jours et en même temps nous ne savons rien expliquer. La théorie donne un ensemble de règles bien spécifiques pour calculer les forces entre divers quarks et leptons. Cependant le MS comporte beaucoup de caractéristiques non pas dictées par des principes fondamentaux, mais simplement déterminées par l'expérience. Le MS dépend de 18 paramètres dont la valeur est a priori choisie arbitrairement. Sans compter pourquoi 3 familles et 3 famille seulement de q et leptons Et ce n'est pas tout...

# Le Modèle standard

La réponse à toutes les questions ?



La brisure de symétrie électrofaible

- 3 familles ?
- 2 q et 1 lepton ?
- électron et neutrino ?
- Photon sans masse ?
- .....

- Comment se fait-il que les électrons et les neutrinos, de très proches parents selon théorie, soient si différents ?
- Pourquoi existe-il deux quarks et un lepton très léger ?
- Pourquoi la brisure de symétrie électrofaible a laissé l'une des composantes, celle du photon, sans masse ?

Cependant un autre réglage de l'un quelconque des paramètres changerait notre monde de façon dramatique, voire le rendrait impossible. Notre monde ne serait-il finalement pas le meilleur des mondes possibles comme le pensait Leibniz (Die beste aller möglichen Welten) ?

Tant que nous ne serons pas en mesure d'expliquer l'origine de ces paramètres, nous serons pas en mesure de dire que nous savons pourquoi le monde est tel qu'il est. L'arbitraire du choix des valeurs des paramètres est en fait une illusion, il reflète simplement notre ignorance.

Répondre à ces questions, et comprendre pourquoi l'univers est tel qu'il est, est le but de la physique des particules et pour répondre à ces questions il est nécessaire d'observer les phénomènes déclenchés à très grande énergie par des collisions de particules élémentaires.

## Le Modèle standard

La réponse à toutes les questions ?

Et la gravitation ?!

Il reste un gros problème, un problème d'unification. Le MS décrit 3 forces (EM, forte, faible) mais en laisse une de côté, la première connue, la gravitation. Non par distraction, mais à cause des formidables obstacles mathématiques qui s'opposent à sa description dans le même langage que les autres, celui de la théorie quantique des champs.

## Le Modèle standard

La réponse à toutes les questions ?

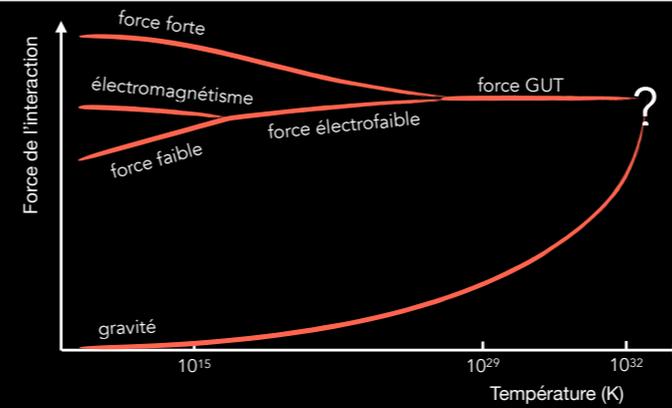
Et la gravitation ?!

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

<https://www.youtube.com/watch?v=f0e-Soo1qFO>

Pourquoi faut-il quantifier le champ gravitationnel ? En deux mots : voici la fameuse équation d'Einstein de la RG. Oublions les détails de cette équation et remarquons simplement que la partie à la gauche du signal égal représente le champ gravitationnel et la partie droite représente la matière et on parle ici de la matière ordinaire c'est-à-dire la matière non-quantique.

Or nous venons de voir durant ce cours que la matière est décrite est très bien décrite par une théorie quantique. Donc cette équation n'est qu'une approximation de la réalité et il faut la modifier. L'approximation est cependant suffisante pour les problèmes de tous les jours, simplement intellectuellement insatisfaisantes .... Ou lorsque on tente de raconter l'histoire de l'univers en deçà du mur de Planck (voir cours précédent) c'est-à dire lorsque l'interaction gravitationnelle qui agit sur la matière devient aussi forte que les 3 interactions nucléaires .



## Vers une interaction unique

Théorie du Tout

Quatre interactions pour expliquer tous les phénomènes physiques, c'est peu. Mais c'est encore trop pour les théoriciens en quête d'unité. Ils aimeraient réduire ce chiffre. Par exemple, les quatre interactions fondamentales seraient des aspects ou des niveaux différents d'une même réalité qu'on pourrait caractériser à un niveau plus profond - c'est-à-dire exprimer par une seule théorie dite « unitaire ».

Grande unification = EM + faible + Forte

Tout = + Gravité → théorie des cordes

Mai ça c'est une autre histoire ....

**S**i nous parvenons vraiment à découvrir une théorie unificatrice... Philosophes, scientifiques et personnes ordinaires, tous seront capables de prendre part à la discussion sur le pourquoi de notre existence et de notre univers. Et si nous trouvions un jour la réponse, ce serait le triomphe de la raison humaine, qui nous permettrait alors de connaître la pensée de Dieu.

Stephen Hawking dans *Une Brève Histoire du Temps*

Bigre ... Alors Dieu ne joue pas aux dés mais il pense. Et si c'était le cas c'est bien prétentieux de vouloir réduire la pensée de Dieu à une équation ! Serait-t-on alors au bout de nos peines ? Non, nous dit le philosophe des sciences Karl Popper : « Il ne peut y avoir d'explication qui n'ait besoin d'une explication plus approfondie. Il n'existe pas d'explication ultime. Toute explication peut être expliquée plus avant, par une théorie ou une conjecture d'un degré d'universalité supérieure. »

## Particle Physics Origin Story



"We Have No Idea"  
Book available now!  
[wehavenoidea.com](http://wehavenoidea.com)

Collectivement les 18 paramètres du MS nous donnent la recette qui a fait notre monde. Ils interviennent non seulement dans l'organisation du monde microscopique mais dictent les propriétés de notre monde familier. Les physiciens des particules construisent des accélérateurs géants et des détecteurs monumentaux non pour trouver le boson de Higgs ou les particules super symétriques mais parce que c'est la seule façon de comprendre pourquoi notre monde et notre univers sont ce qu'ils sont.

# HistoireS de Particules

Des histoireS ... vers l'Histoire

Yves Schutz

