

The background of the slide is a complex visualization of particle tracks. It features a central point from which hundreds of thin, golden-yellow lines radiate outwards, resembling a starburst or a particle collision event. Interspersed among these lines are several thick, dark red or brownish cylindrical shapes, which likely represent detector components or specific particle paths. The overall color palette is dark blue/black, providing a high-contrast background for the golden and red elements.

Physique des particules

French Language Teacher Programme 2024
CERN, 20-25/10/2024

Nazila Mahmoudi
Université Lyon 1 / IP2I

Préambule

Théoricienne en physique des particules

Professeure à l'Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL / IP2I)

Membre senior de l'Institut Universitaire de France

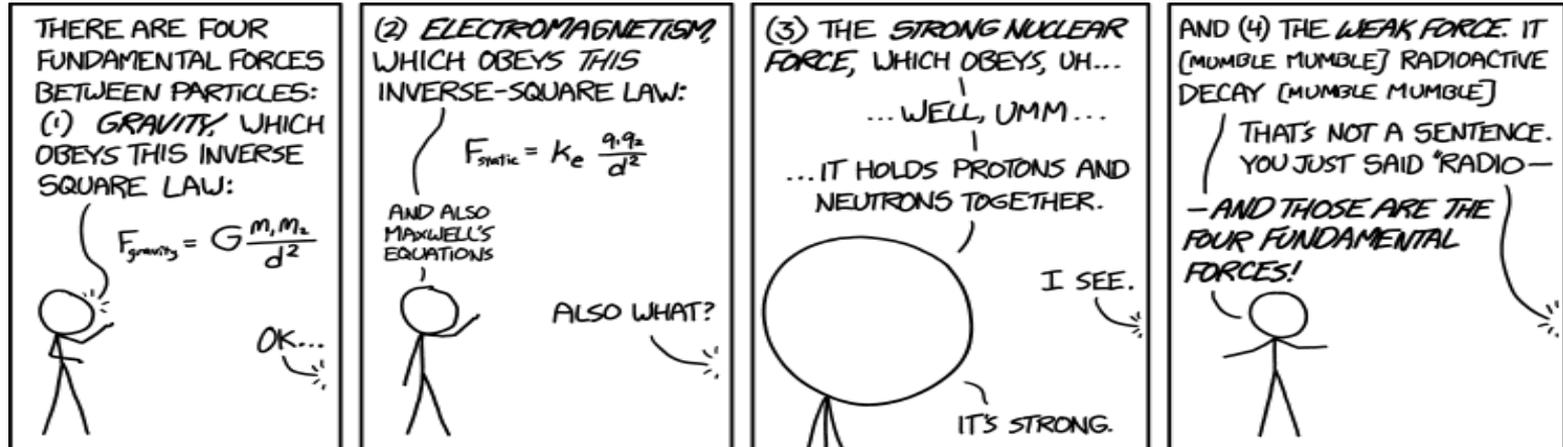
- Thèse au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique (LAPTh)
- Attaché temporaire d'enseignement et de recherche à l'UCBL
- Postdoctoral researcher au Canada
- Chercheur en Suede
- Maîtresse de Conférences, Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand)
- Mutation de l'Université Blaise Pascal vers l'UCBL (en 2014)

De quoi le monde est-il fait ?

Questions fondamentales :

Quels sont les constituants fondamentaux de la matière ?

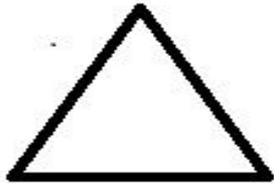
Quelles sont leurs interactions ?



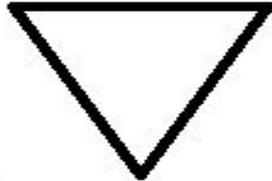
xkcd.com

Vision Antique

La philosophie naturelle
décrivait le monde avec les 4 éléments :



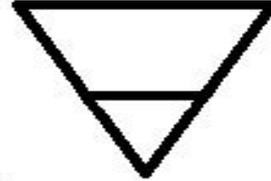
FEU



EAU



AIR



TERRE



Tableau de Mendeleïev

Avec Mandeleïev, nous avons compris que la matière a une structure organisée qui peut être rassemblée dans le tableau périodique des éléments.

Tableau périodique des éléments chimiques

Annotations in the table:

- nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
- numéro atomique
- symbole chimique
- masse atomique relative (de celle de l'isotope le plus stable)
- [CIAAW Atomic Weights 2013 - rev. 2015]

Legend:

- Métaux: Alkali, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métaux
- Non métaux: Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés
- primordial
- synthétique

- Proposée par Mendeleïev en 1869
- Basée sur les résultats expérimentaux de l'époque
- Avec de nombreux emplacements vides (remplis depuis !)
- Heuristique, sans connaître la structure électronique des atomes

Physique des particules

La physique des particules cherche à aller encore plus loin et à **sonder les constituants des atomes et des noyaux !**

Aujourd'hui, notre description du monde est basée sur le **Modèle Standard**.

Réponses actuelles

| | | | | | |
|----------------|---|---|--|--|----------------------------|
| masse → | =2.3 MeV/c ² | =1.275 GeV/c ² | =173.07 GeV/c ² | 0 | =126 GeV/c ² |
| charge → | 2/3 | 2/3 | 2/3 | 0 | 0 |
| spin → | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 0 |
| | u up | c charm | t top | g gluon | H boson de Higgs |
| QUARKS | =4.8 MeV/c ² | =95 MeV/c ² | =4.18 GeV/c ² | 0 | |
| | -1/3 | -1/3 | -1/3 | 0 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | d down | s strange | b bottom | γ photon | |
| | 0.511 MeV/c ² | 105.7 MeV/c ² | 1.777 GeV/c ² | 91.2 GeV/c ² | |
| | -1 | -1 | -1 | 0 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | e électron | μ muon | τ tau | Z⁰ boson Z ⁰ | |
| LEPTONS | <2.2 eV/c ² | <0.17 MeV/c ² | <15.5 MeV/c ² | 80.4 GeV/c ² | |
| | 0 | 0 | 0 | ±1 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | ν_e neutrino électronique | ν_μ neutrino muonique | ν_τ neutrino tauique | W[±] boson W [±] | |
| | | | | | BOSONS DE JAUGE |

Obtenu étape par étape par une série d'expériences en physique atomique, nucléaire, rayons cosmiques et enfin physique des particules

Construction théorique

Nécessité d'avoir un cadre théorique pour avoir la possibilité de faire des calculs et des prédictions

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{Interactions des quanta de jauge} \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R\sigma^\mu iD_\mu \nu_R + (\text{h.c.}) && \text{Dynamique des leptons} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R\bar{M}^e\bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R\bar{M}^\nu\phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] && \text{Masse des leptons} \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R\sigma^\mu iD_\mu d_R + (\text{h.c.}) && \text{Dynamique quarks} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R\bar{M}^d\bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] - \frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R\bar{M}^u\phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] && \text{Masse des quarks} \\
 & +(\overline{D_\mu\phi})D^\mu\phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/2v^2.
 \end{aligned}$$

Masse du boson de Higgs et sa dynamique, où $m_h=125$ GeV

Un peu d'histoire...

Fin du 19e siècle : les scientifiques essaient de comprendre **ce qui constitue les éléments chimiques** et **l'électromagnétisme**.

1873 : électromagnétisme de **Maxwell**
unification de l'électricité et du magnétisme



Il s'agit de la première unification de deux théories complexes : l'électricité et le magnétisme.

Cette unification a conduit à la découverte des **ondes électromagnétiques**, qui sont le point de départ de la physique des particules.

James Clerk Maxwell (1831-1879), physicien britannique

Particule d'électricité

1874 : théorie de l'électron de **Stoney**, particule d'électricité



Stoney a essayé de décrire le mouvement des charges électriques dans les métaux avec une particule d'électricité fondamentale, qu'il a appelée **électron**.

Cette intuition repose sur :

- Électrolyse et lois de Faraday : Stoney s'est particulièrement intéressé aux lois de Faraday sur l'électrolyse, qui décrivent la relation entre la quantité de charge électrique passée dans une solution et la quantité de substance chimique décomposée à l'électrode.
- Calculs théoriques

George Johnstone Stoney (1826 – 1911), physicien irlandais

Rayons X



1895 : découverte des rayons X par **Röntgen**

Röntgen menait des expériences sur les tubes à vide dans son laboratoire à l'Université de Wurtzbourg.

En travaillant avec un tube cathodique recouvert de carton noir, il remarque que, lorsqu'il allume le tube, une plaque recouverte d'une substance fluorescente, située à quelques mètres, émet une lueur verte. Cela semble impossible, car la lumière visible du tube ne peut pas passer à travers le carton opaque.

Intrigué, Röntgen comprend qu'il s'agit d'un type de rayonnement inconnu, capable de traverser des matériaux opaques. Il l'appelle temporairement **rayons X**, car leur nature exacte est inconnue.

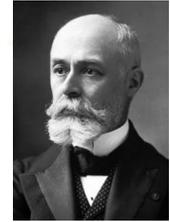
Très vite, les rayons X trouvent une application médicale

Röntgen est récompensé en **1901** par le prix Nobel de physique



Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923), physicien allemand

La radioactivité



1896 : découverte de la radioactivité de l'uranium par **Becquerel**

Henri Becquerel a découvert la radioactivité de l'uranium en réalisant que ce dernier émettait un rayonnement mystérieux qui pouvait impressionner des plaques photographiques, même sans exposition à la lumière. Cette découverte, qui fut initialement un accident causé par un mauvais temps, a révélé la propriété intrinsèque de certains éléments d'émettre des rayonnements sans stimulation extérieure, et a jeté les bases de la physique nucléaire.

Le prix Nobel de physique est décerné à Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie en **1903**



Henri Becquerel (1852 – 1908), Physicien français

A la découverte des atomes

1897 : découverte de l'électron par **J.J.Thomson** et modèle de l'atome neutre

Une série d'expériences sur les rayons cathodiques :

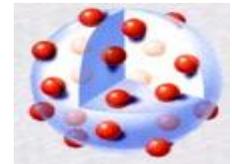
Première expérience: Il conclut que la charge négative ne peut pas être séparée des rayons.

Deuxième expérience: indique que la charge des rayons cathodiques est négative.

Troisième expérience: Thomson détermine le rapport de la charge à la masse (e/m) des rayons cathodiques en mesurant leur déviation sous l'influence du champ magnétique ainsi que de leur énergie cinétique. Il calcule un e/m mille fois plus élevé que le rapport analogue pour un ion hydrogène (H^+), ce qui suggère que les rayons cathodiques contiennent des particules soit très légères soit très hautement chargées.

La même année, il énonce son **modèle de l'atome**, le modèle du "pain aux raisins"

Densité de charge positive au milieu de laquelle se trouvent des électrons ponctuels chargés négativement



Prix Nobel de physique de **1906**

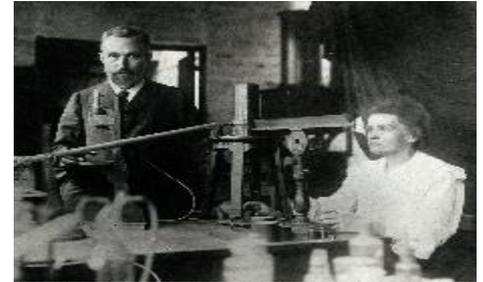
Joseph John Thomson (1856 - 1940), physicien britannique

séparation des éléments radioactifs

1898 : séparation des éléments radioactifs par **Marie et Pierre Curie**

A la suite des travaux d'Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrirent le **polonium** et le **radium**, deux éléments radioactifs inconnus, présents dans le minerai d'uranium.

Pour ces travaux, ces trois scientifiques ont partagé le prix Nobel de physique en 1903.



1899 : Plusieurs scientifiques montrent l'existence de deux types de rayonnements émis par l'uranium. Rutherford les nommera rayons **alpha** et **béta**

1900 : Paul Villard identifie un troisième type de radioactivité : le rayonnement gamma

Marie Skłodowska-Curie (1867 – 1934), physicienne et chimiste polonaise
Pierre Curie (1859 – 1906), physicien français

Les premiers quanta

1900 : spectre de **Planck** et quantification du rayonnement

Planck cherchait à expliquer **le rayonnement du corps noir**, un problème majeur en physique à l'époque. Les théories classiques ne parvenaient pas à décrire correctement l'intensité du rayonnement émis à différentes fréquences, menant à ce qu'on appelait la **catastrophe ultraviolette** (prédiction incorrecte d'une intensité infinie à haute fréquence).

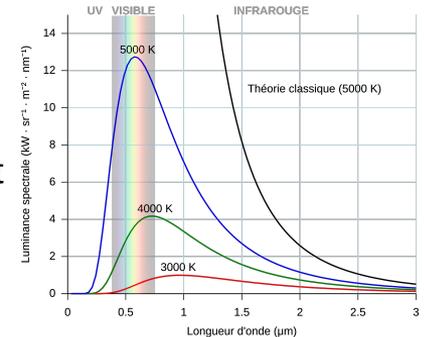
La loi de Planck :

Planck a résolu ce problème en introduisant l'idée révolutionnaire que **l'énergie n'est pas émise de manière continue, mais par paquets discrets d'énergie appelés quanta**. L'énergie d'un quantum est proportionnelle à la fréquence du rayonnement, selon la relation :

$$E = h \nu$$

où E est l'énergie du quantum, h est la constante de Planck, et ν est la fréquence de la radiation.

Le spectre de Planck marque le début de la physique quantique et explique correctement le rayonnement du corps noir à toutes les fréquences, en introduisant l'idée que l'énergie est quantifiée.



Max Planck (1858 – 1947), physicien allemand

L'année d'Einstein !

1905 : une série d'articles par **Einstein** qui ont transformé la physique !

Le quantum de lumière (nommé photon en 1926)

→ la base de la mécanique quantique

Dualité onde-corpuscule de la lumière

→ La lumière se comporte à la fois comme une onde et comme un flux de particules, plus précisément un flux de photons.

La manifestation ondulatoire ou particulaire dépend des conditions expérimentales.

La construction de relativité restreinte d'Einstein

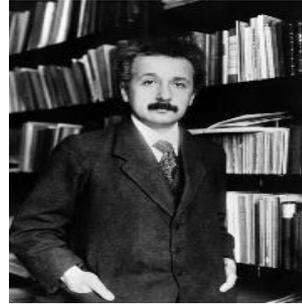
→ la base de toute la dynamique de la physique des particules

→ la fameuse équivalence entre masse et énergie

Description quantitative du mouvement brownien

→ description mathématique du mouvement aléatoire

Prix Nobel de
1921 pour l'effet
photoélectrique



Albert Einstein (1879 – 1955), physicien d'origine allemande

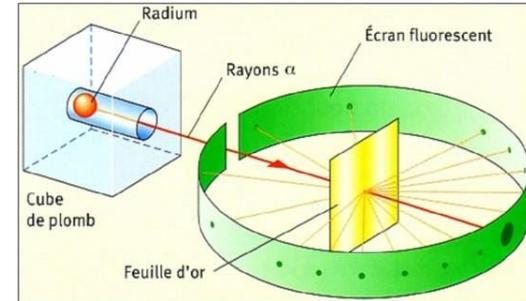
Expérience de Rutherford

1909 : expérience de **Rutherford**, réalisée par **Geiger** et **Marsden**



Bombarder une feuille d'or avec des particules en plaçant un écran de détection tout autour de la feuille d'or

L'expérience montre que la plupart des particules traversent la feuille d'or sans déviation !



1911 : Rutherford conclut à l'**existence du noyau**

→ une découverte fondamentale !

Ernest Rutherford (1871 – 1937), physicien et chimiste néo-zélandais

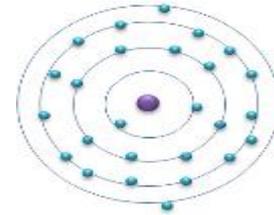
Hans Geiger (1882 – 1945), physicien allemand

Ernest Marsden (1889 – 1970), physicien néo-zélandais

Premiers modèles nucléaires

1913 : théorie de la structure atomique basée sur des hypothèses quantiques

À l'aide des résultats de Rutherford, **Bohr** a élaboré le premier modèle atomique qui ressemble à ce que nous connaissons aujourd'hui, avec un noyau chargé et des électrons sur des orbites quantifiées.



Prix Nobel de physique de 1922



Niels Henrik David Bohr (1885 – 1962), physicien danois

Théorème de Noether

1918 : théorème de **Noether**

- fait le lien entre les lois de conservation et l'invariance du lagrangien sous certaines symétries
- la base théorique de la physique des particules



Parcours pas facile : parmi le millier d'étudiants de l'université, elles ne sont que deux femmes !

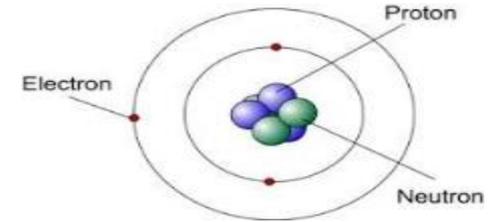
Pour assister à ses cours, elle doit demander auparavant l'autorisation écrite de chaque professeur. Elle décroche malgré tout son doctorat en mathématiques en 1907.

Emmy Noether (1882 – 1935), mathématicienne allemande

Premiers modèles nucléaires

1919 : preuve de l'existence du proton par **Rutherford**
(toujours par la même expérience)

→ Existence d'une structure à l'intérieur du noyau



1921 : **Chadwick** propose l'existence d'une force nucléaire
qui maintient les protons et les neutrons ensemble dans le noyau
(c'est lui qui prouve l'existence du neutron en 1932)

James Chadwick (1891 – 1974), physicien britannique

Physique corpusculaire



Dans les années 20, il y a eu des avancées majeures dans le développement de la physique corpusculaire et ondulatoire.

1923 : **Compton** et la nature particulière des rayons X



1924 : **de Broglie** et les propriétés ondulatoires des particules de matière



1925 : Principe d'exclusion de **Pauli**



1925 : Conservation de l'énergie et la masse dans les processus atomiques par **Bothe** et **Geiger**



Arthur Holly Compton (1892 – 1962), physicien américain

Louis Victor de Broglie (1892 – 1987), mathématicien et physicien français

Wolfgang Ernst Pauli (1900 – 1958), physicien autrichien

Walther Bothe (1891 – 1957), physicien, mathématicien et chimiste allemand

Mécanique quantique

Le développement de la mécanique quantique s'accélère !

1926 : mécanique ondulatoire de **Schrödinger**



Idée : les particules peuvent être décrites non seulement comme des objets ponctuels, mais aussi comme des ondes. La fonction d'onde, notée ψ , représentant l'état quantique d'une particule.

L'équation de Schrödinger, qui est une équation différentielle, relie la fonction d'onde à l'énergie et au potentiel de la particule.

La solution de cette équation permet de déterminer la probabilité de trouver une particule dans une région donnée de l'espace.

Prix Nobel de physique de 1933



Erwin Schrödinger (1887 – 1961), physicien autrichien

Que des probabilités !

1926 : interprétation probabiliste de la mécanique quantique par **Born**



- la fonction d'onde ψ , décrite dans la mécanique ondulatoire de Schrödinger, ne représente pas directement la position d'une particule, mais plutôt la probabilité de la trouver à un endroit donné.
Plus précisément, le carré du module de la fonction d'onde, $|\psi(x)|^2$, donne la densité de probabilité de présence d'une particule en un point de l'espace.
- Idée révolutionnaire : la mécanique quantique ne fournit que des prédictions probabilistes !

Prix Nobel de physique de 1954



Max Born (1882 – 1970), physicien et mathématicien allemand

Interaction faible

1927 : Découverte de la désintégration β

Un noyau instable émet un électron (ou un positron) et un antineutrino (ou un neutrino) pour se transformer en un autre élément.

→ Les noyaux atomiques pouvaient se transformer en émettant des particules

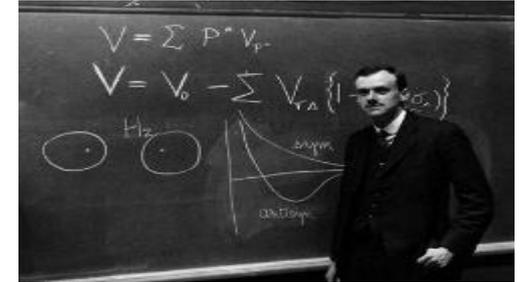
Problème : la conservation de l'énergie et du moment en physique classique

Interaction faible

1928 : **Dirac** et équation d'onde relativiste pour l'électron

But : unifier la mécanique quantique et la relativité restreinte pour les particules de spin 1/2, comme l'électron.

Contrairement à l'équation de Schrödinger, l'équation de Dirac tient compte des effets relativistes à haute vitesse.



Prix Nobel de physique de 1933



L'une des grandes réussites : prédiction de l'existence de l'**antimatière**.

→ Les solutions de l'équation comportaient non seulement des états d'énergie positive, mais aussi des états d'énergie négative, interprétés plus tard comme correspondant à des particules de charge opposée (positrons).

Paul Dirac (1902 – 1984), mathématicien et physicien britannique

Interaction faible

1930 : Hypothèse de **Pauli** de l'existence d'un neutrino invisible, pour interpréter l'apparente disparition de l'énergie dans la désintégration β .

Problème : on s'attendait à ce que la désintégration β soit similaire à d'autres processus de désintégration radioactive, où les produits émis ont des énergies bien définies (discrètes). Cependant, dans la désintégration β , les électrons (ou positrons) émis ne montraient pas un pic d'énergie fixe, mais plutôt un spectre continu allant de zéro jusqu'à une valeur maximale.

Solution : le neutrino emporte une partie de l'énergie et du moment dans la désintégration β , expliquant ainsi pourquoi l'électron observé n'a qu'une fraction de l'énergie totale libérée.



Wolfgang Ernst Pauli (1900 – 1958), physicien autrichien

La lettre de Pauli

Zurich, le 4 décembre 1930

Chers dames et messieurs radioactifs,

Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la « mauvaise » statistique des noyaux N et Li-6 et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres, de spin obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons*. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0,01 de la masse du proton. Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante.....

J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagne, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, Monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts ». Dorénavant on doit discuter sérieusement toute voie d'issue. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement je ne pourrai être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.

Votre serviteur le plus dévoué,

W. Pauli.

NB : Le nom de neutrino a été proposé par Fermi quand le « neutron » plus lourd fut découvert par Chadwick.

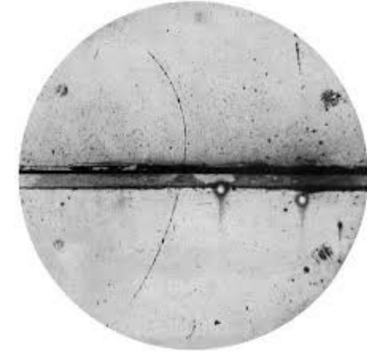
Interaction faible

1930 : Notion de particules élémentaires
comme constituants fondamentaux de la nature

1931 : Découverte du positron par **Anderson**
lors d'expériences sur les rayons cosmiques

En étudiant les traces laissées par ces particules dans une chambre à brouillard placée dans un champ magnétique, Anderson observe des trajectoires courbes caractéristiques de particules chargées positivement, mais avec la même masse que l'électron.

→ confirmation de la prédiction de Dirac en 1928



Prix Nobel de physique de 1936



Carl David Anderson (1905 – 1991), physicien américain

Interaction faible

1932 : Découverte du neutron par Chadwick

En bombardant du **béryllium** avec des particules alpha, il observe qu'une radiation très pénétrante est émise. En analysant ses résultats, Chadwick conclut qu'il s'agit d'une nouvelle particule : le **neutron**

Cette découverte résolvait plusieurs énigmes dans la structure atomique, en particulier la masse des noyaux atomiques, qui ne pouvait pas être expliquée par les seuls protons.

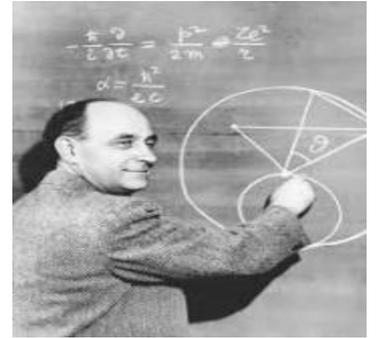
Le neutron a joué un rôle clé dans le développement de la physique nucléaire et la compréhension des forces qui maintiennent les noyaux atomiques ensemble.

Prix Nobel de physique de  1935

Interaction faible

1933/34 : Théorie de Fermi de la désintégration β (interaction faible).

- Première théorie prédictive de la désintégration β
- un modèle mathématique qui explique comment un neutron se transforme en proton en émettant un électron et un neutrino



Fermi a introduit l'idée d'une nouvelle force fondamentale, **interaction faible**, qui gouverne ce processus.

Prix Nobel de physique de 1938



Enrico Fermi (1901 – 1954), physicien italien

Interaction forte

Les années suivantes ont vu beaucoup de progrès sur l'interaction forte.

1935 : Yukawa et l'hypothèse des mésons, médiateurs de la force nucléaire forte

Prix Nobel de physique de



1937 : Découverte du muon dans le rayonnement cosmique

1938 : La loi de conservation du nombre baryonique

[défini comme le nombre de baryons (comme les protons et les neutrons) moins le nombre d'antibaryons]

Hideki Yukawa (1907 – 1981), physicien japonais

Interaction forte

1946/1947 : Découverte du pion prédit en 1935 par Powell

(dans les rayons cosmiques)



1946/1950 : Théorie de l'électrodynamique quantique (QED)

(Tomonaga, Schwinger et Feynman)



1948 : Production artificielle du pion par Alvarez et ses collègues



Cecil Frank Powell (1903 – 1969), physicien britannique
Sin-Itiro Tomonaga (1906 – 1979), physicien japonais
Julian Seymour Schwinger (1918 – 1994), physicien américain
Richard Phillips Feynman (1918 – 1988), physicien américain
Luis Walter Alvarez (1911 – 1988), physicien américain

L'étrangeté et les états excités

1949 : Découverte du kaon chargé

1950 : Découverte du pion neutre

1951 : Découverte de particules étranges, et introduction du nombre quantique « étrangeté », conservé par les interactions fortes et électromagnétiques.

1952 : Découverte du Δ (état excité du nucléon).

1954 : Théorie de jauge non-abélienne de Yang et Mills.



Chen-Ning Franklin Yang (1922 –), physicien chinois
Robert L. Mills (1927 – 1999), physicien américain

Vers le Modèle Standard

1955 : Découverte de l'antiproton par **Chamberlain** et **Segrè**
première antiparticule non élémentaire



1956 : **Lee** et **Yang** : prédiction de la **violation de parité** dans l'interaction faible

Jusqu'alors, on croyait que les lois de la physique étaient les mêmes si l'on inversait les coordonnées spatiales (symétrie miroir ou parité) pour toutes les forces.



Lee et Yang suggérèrent, à partir d'une analyse théorique, que cette symétrie pourrait ne pas s'appliquer à l'interaction faible, responsable des désintégrations β .

Owen Chamberlain (1920 – 2006), physicien américain
Emilio Gino Segrè (1905 – 1989), physicien italien
Tsung-Dao Lee (1926 – 2024), physicien américano-chinois

Violation de la parité

1956 : Découverte de la violation de la parité dans le ^{60}Co par **Wu**

→ utilisation du cobalt-60, un isotope radioactif qui se désintègre par désintégration β , émettant des électrons.

→ orienter les noyaux de cobalt-60 dans un champ magnétique pour polariser l'échantillon, ce qui signifie que les spins des noyaux étaient alignés dans une direction précise.

Elle a ensuite mesuré la distribution des électrons émis lors de la désintégration. Selon la symétrie de parité, on aurait dû observer une distribution uniforme des électrons, peu importe l'orientation des spins des noyaux.

Cependant, Wu a trouvé que les électrons étaient émis préférentiellement dans une direction spécifique, violant ainsi la symétrie de parité.



Chien-Shiung Wu (1912 – 1997), physicienne sino-américaine

La première femme institutrice au département de physique de l'université de Princeton

Naissance du Modèle Standard

1960/1970 : Découverte d'une centaine de particules « élémentaires »



1961 : **Gell-Mann** propose $SU(3)$ pour représenter toutes ces particules



1962 : Découverte des deux neutrinos muonique et électronique

1964 : Existence des quarks up, down et étrange postulée par **Gell-Mann** et **Zweig**

1964 : Découverte de la violation de CP dans les oscillations de kaons par **Cronin**, **Fitch**, **Christenson** et **Turlay**



1965 : Introduction du nombre quantique de la couleur

Murray Gell-Mann (1929 – 2019), physicien américain

Naissance du Modèle Standard

1964 : Mécanisme de Higgs par **Brout, Englert, Higgs** 2013
Et aussi **Hagen, Guralnik, Kibble**



1967 : **Glashow, Salam et Weinberg** :
Unification des forces électromagnétiques et faibles
Prédiction de l'existence des bosons lourds



1970 : Prédiction de l'existence du quark charme par **Glashow, Iliopoulos et Maiani**

1973 : Énoncé de la théorie des interactions fortes entre particules colorées (QCD)
Prédiction de l'existence des **gluons**. Liberté asymptotique. Matrice CKM



Confirmations du Modèle Standard

1974 : Découverte de particules contenant un quark charme à Stanford et Brookhaven

1976 : Découverte d'un troisième lepton chargé, le tau par Martin Perl  1995

1976 : Découverte du méson charmé D et confirmation de l'existence du quark charme

1978 : Découverte d'un cinquième quark, le bottom, à Fermilab.

1979 : Mise en évidence d'un gluon à DESY.

Confirmations du Modèle Standard

1983 : Découverte du Z et du W au CERN

1990 : Etude de la désintégration du Z au LEP (CERN) montrant que 3 types de neutrinos légers existent

1995 : Découverte d'un sixième quark, le top, au Tevatron

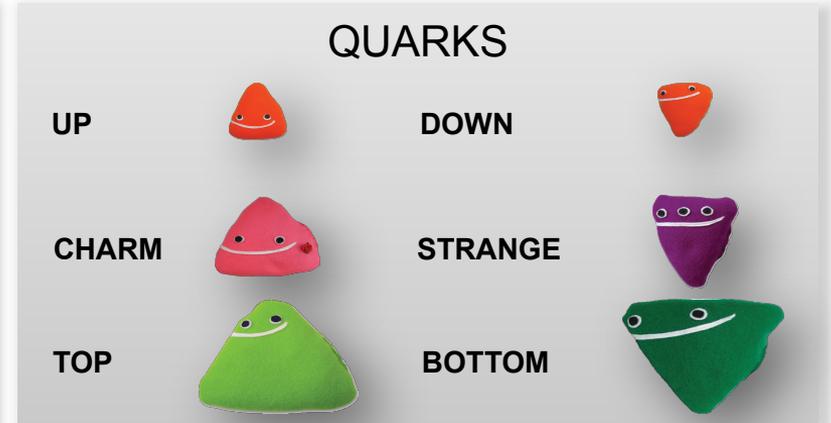
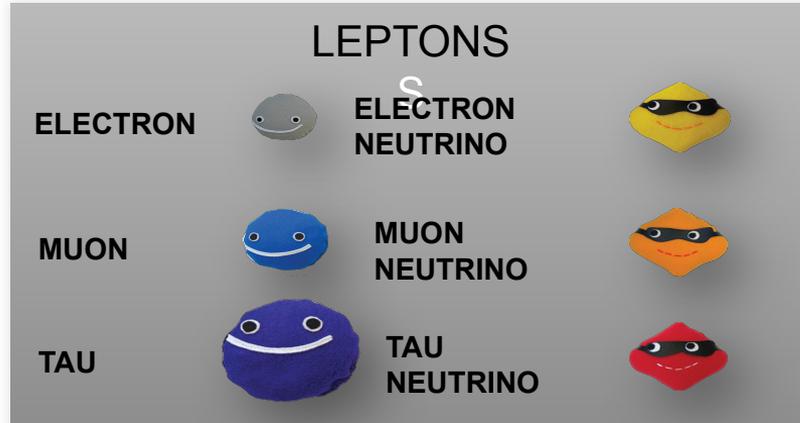
1998 : Preuve de l'existence de neutrinos de masse non-nulle à Super-Kamiokande

2000 : Découverte du neutrino tau au Tevatron

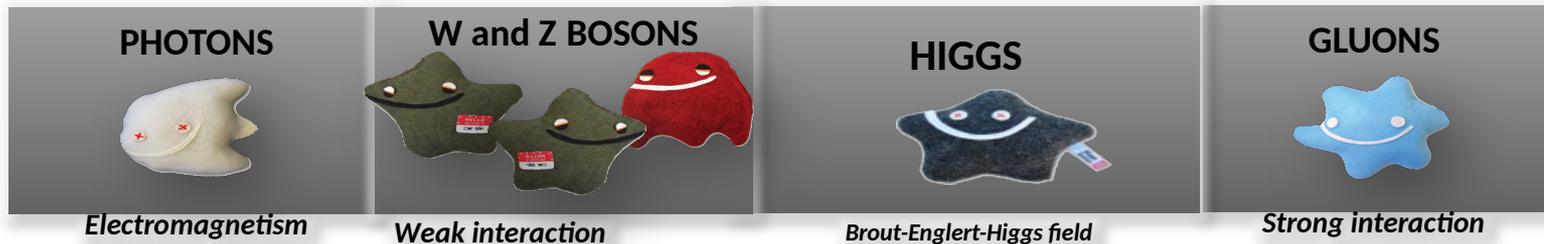
2012 : Découverte du boson de Higgs aux expériences ATLAS et CMS du LHC

Le Modèle Standard

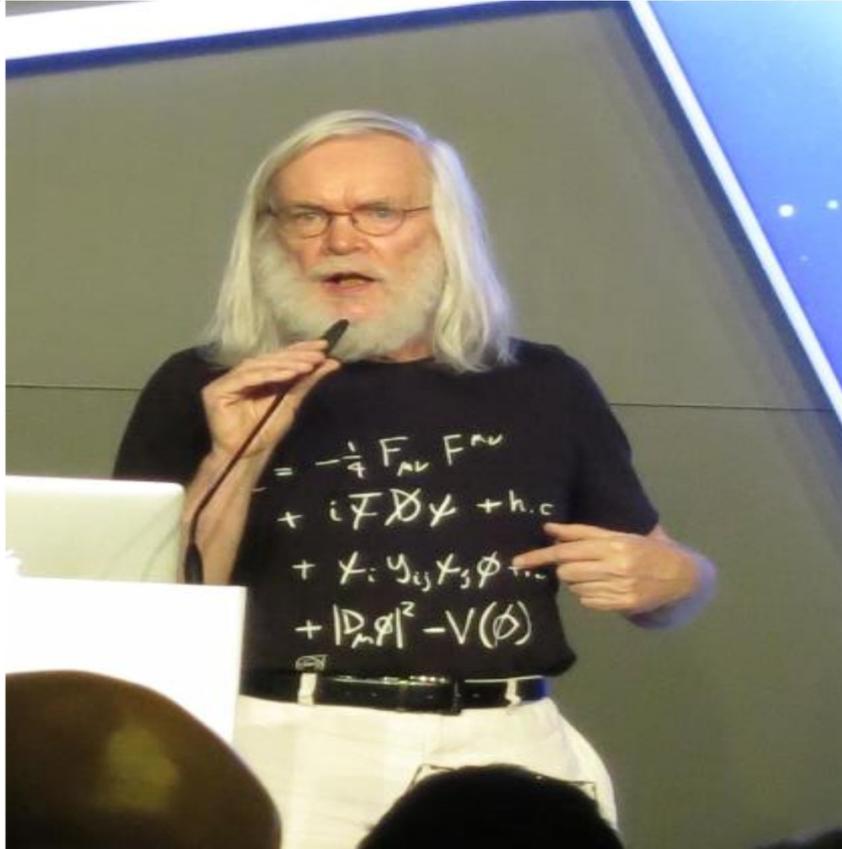
1. Les fermions



2. Les bosons



Le Modèle Standard



Lagrangien du Modèle Standard
(et John Ellis !!)

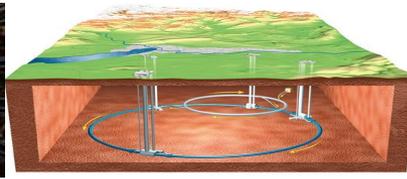
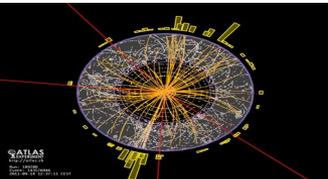


CERN

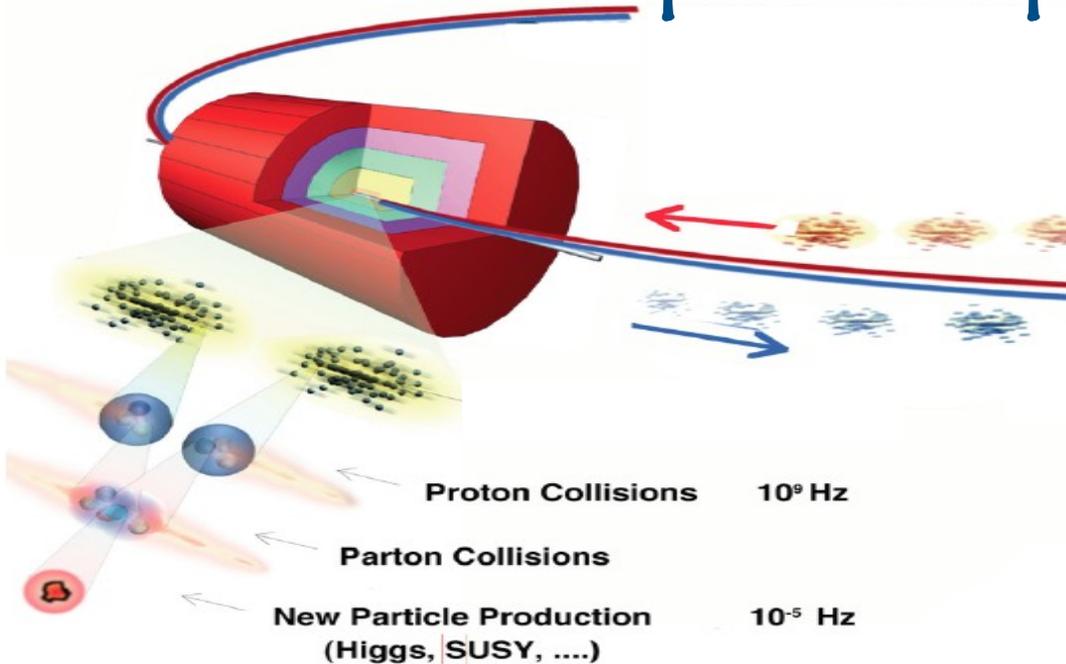
- **Laboratoire Européen pour la Physique des Particules**
- Plus de 10000 scientifiques de 99 nationalités différentes
- Financé par les pays européens
- Plusieurs autres pays participent à de nombreux projets
Canada, Etats-Unis, Japon, Israël, Inde, Pakistan, etc...



**J'ai visité le plus grand accélérateur de particules
du monde !**
<https://www.youtube.com/watch?v=mFilSnstW8U>



Collisions proton-proton au LHC



En 2012

| | |
|---------------|---|
| Proton-Proton | 1000 bunch/beam |
| Protons/bunch | $1.6 \cdot 10^{11}$ |
| Beam energy | 4 TeV (4×10^{12} eV) |
| Luminosity | $7 \cdot 10^{33}$ cm ⁻² s ⁻¹ (peak) |
| Crossing rate | 20 MHz |

Event rate:

$$N = L \times \sigma \text{ (pp)} \approx 7 \cdot 10^8 \text{ interactions/s (peak L)}$$

Mostly soft (low p_T) events

Every week $\sim 1 \text{ fb}^{-1} \sim 10^{14}$ interactions

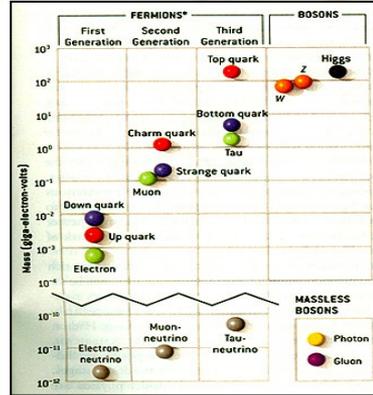


Le collisionneur LHC et ses détecteurs

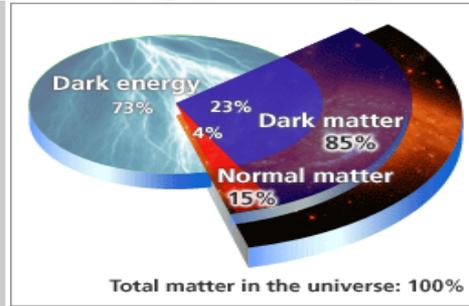


Les questions du LHC

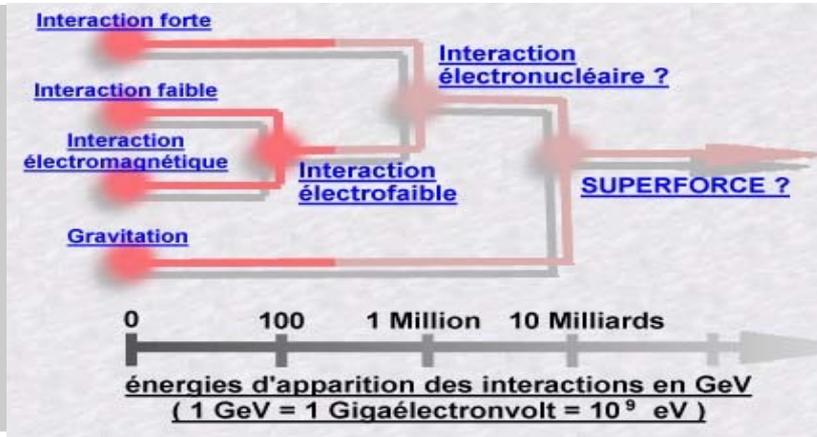
D'où provient la masse des particules élémentaires ?



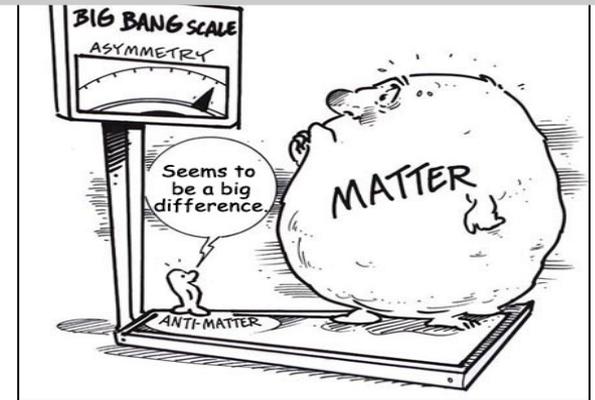
Qu'est-ce que la matière noire/énergie noire constituant la majeure partie de l'Univers ?



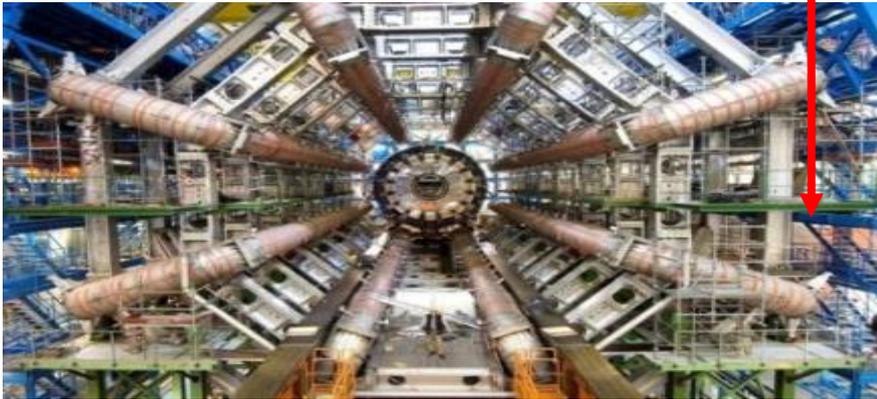
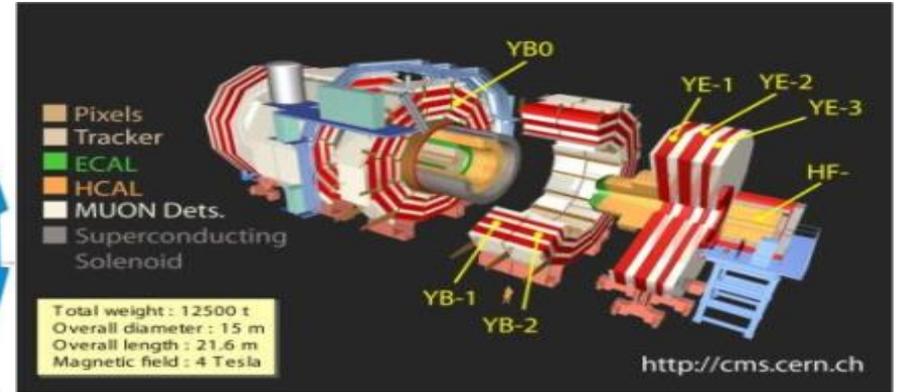
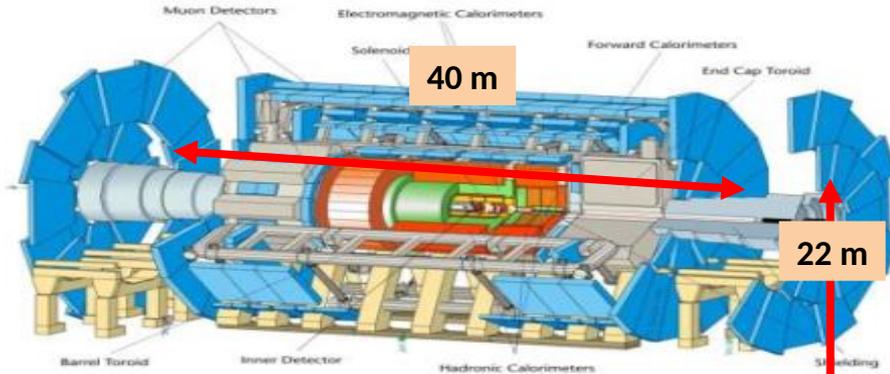
Y avait-il unification des 4 forces fondamentales lors des premiers instants de l'Univers ?



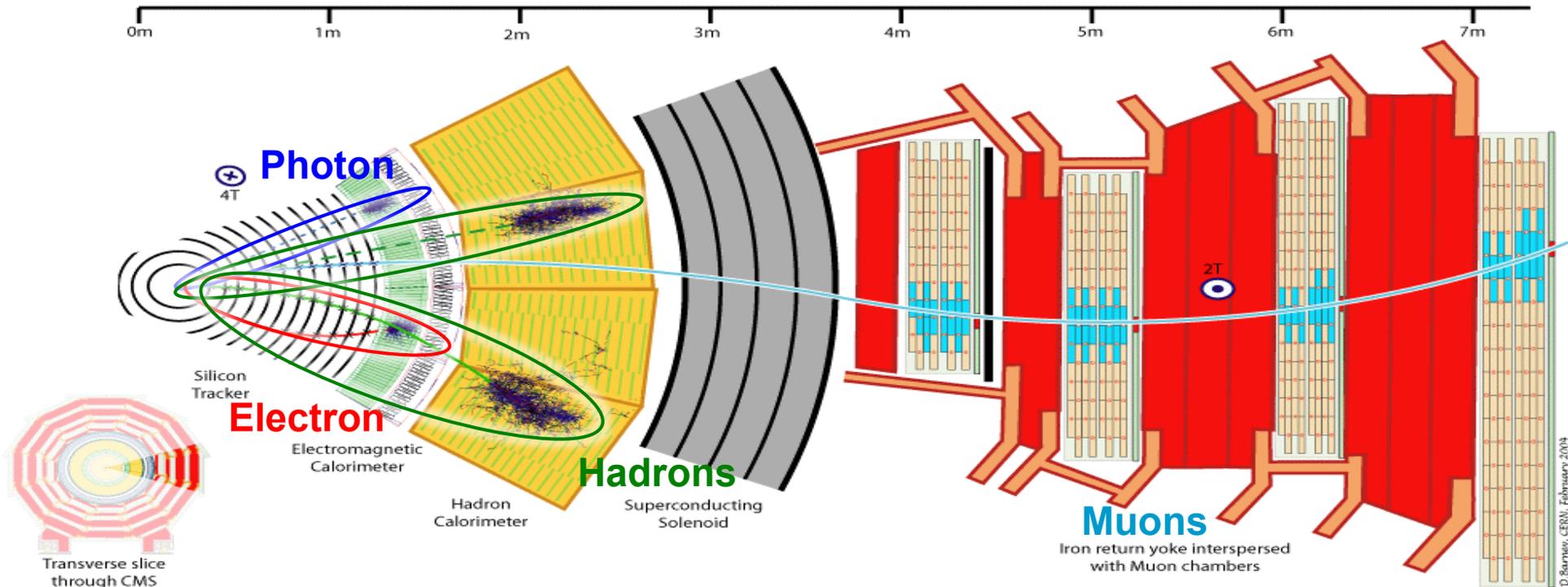
Pourquoi la Nature privilégie la matière à l'antimatière ?



Des détecteurs géants



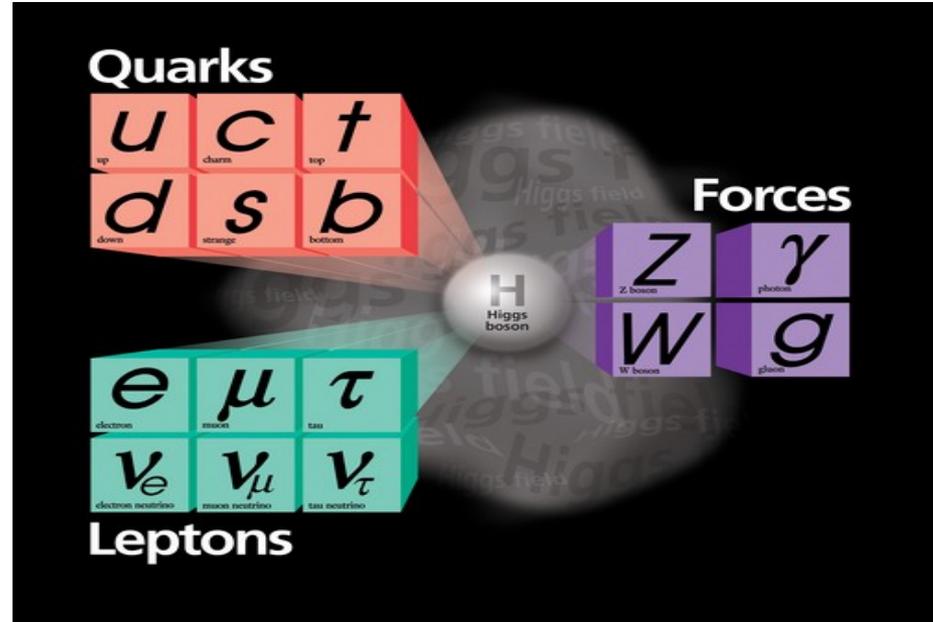
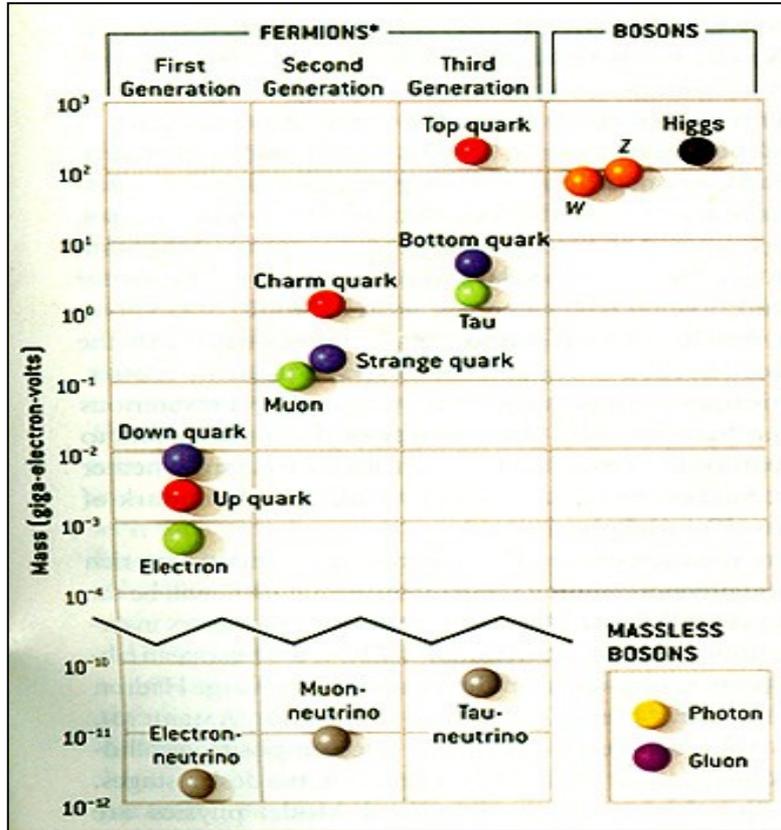
Différentes couches de détection pour différentes fonctions



Collisions proton-proton au LHC

[Cliquez ici pour voir la vidéo](#)

Pourquoi les particules élémentaires ont-elles des masses différentes ?

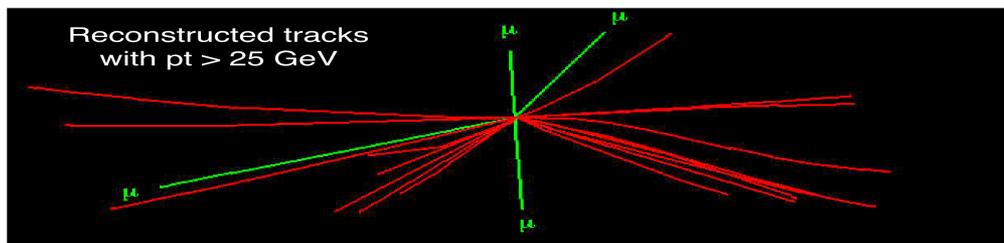
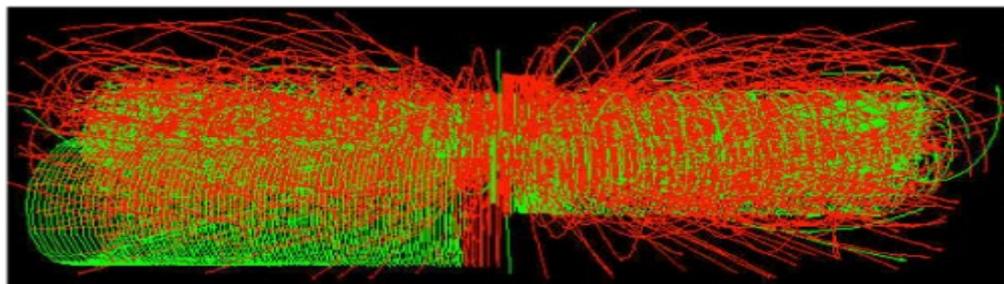


... parce qu'elles interagissent différemment avec le boson de Higgs

La recherche du boson de Higgs au LHC

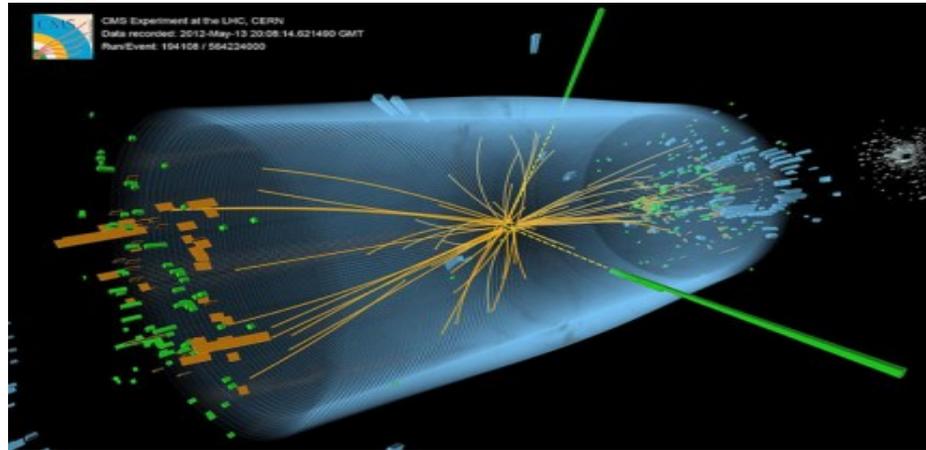
1 boson de Higgs attendu pour
1,000,000,000,000 évènements !!

Le problème classique de l'aiguille dans la botte de foin !

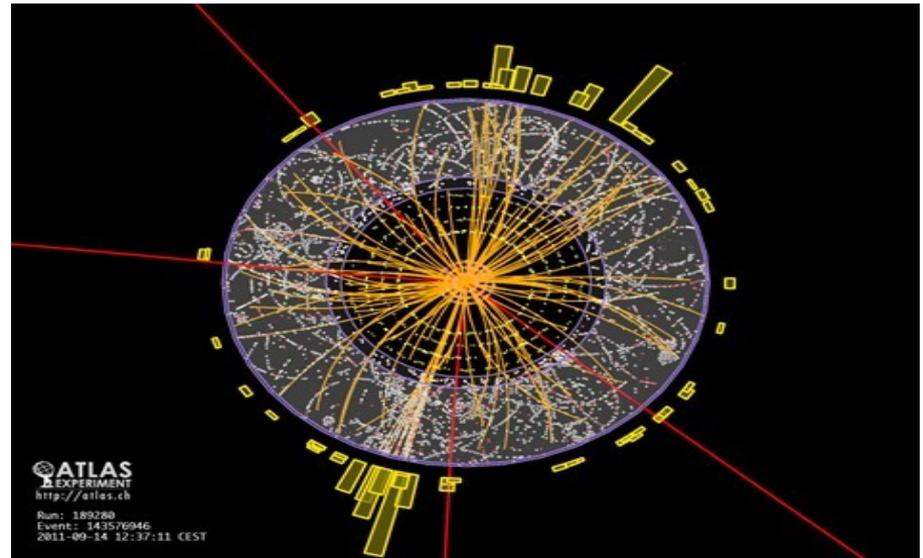


Visualisation de boson de Higgs dans les détecteurs

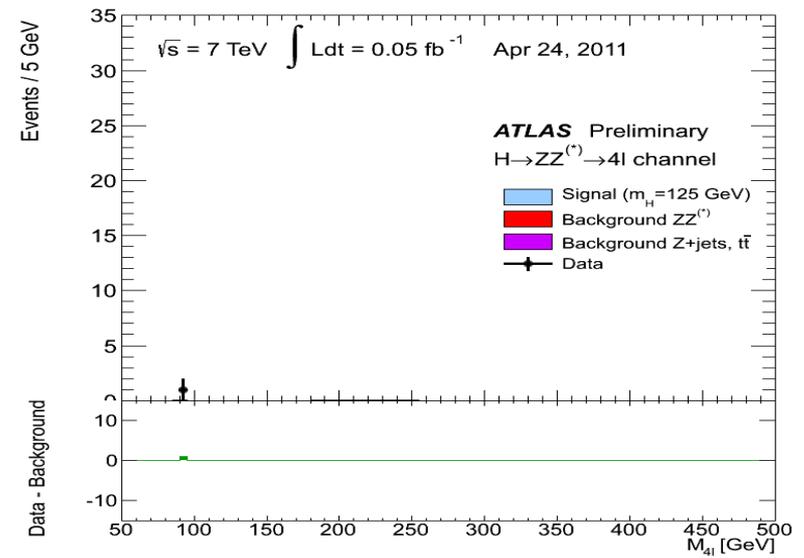
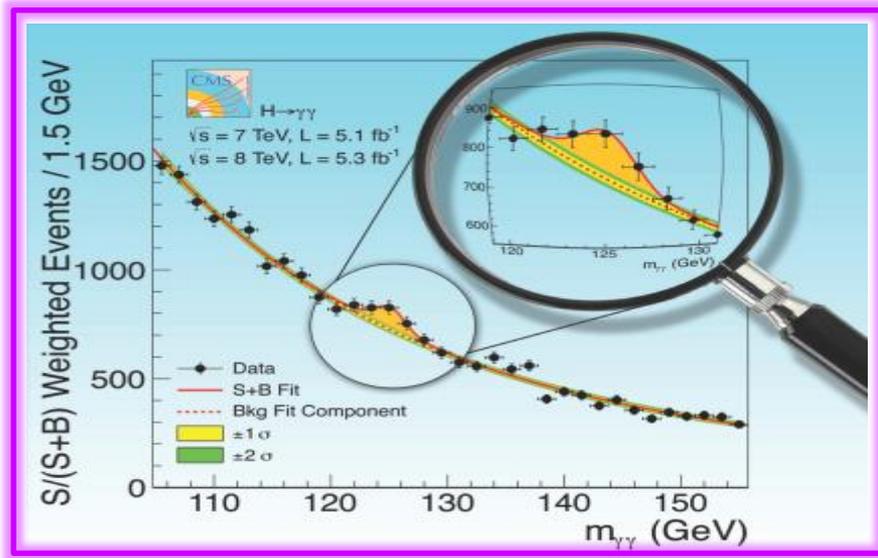
Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$ dans CMS



Candidat $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ dans ATLAS



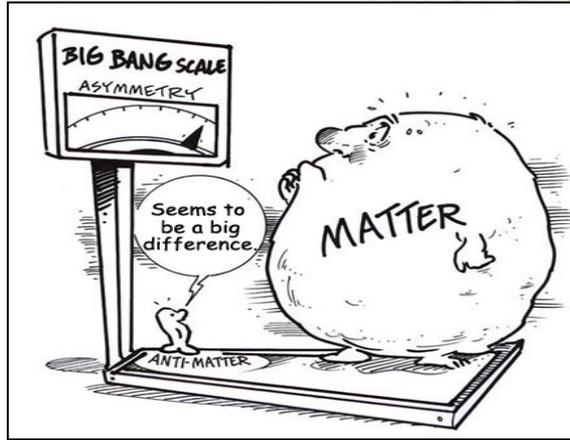
4 juillet 2012 : annonce de la découverte



4 juillet 2012 : Exultation !



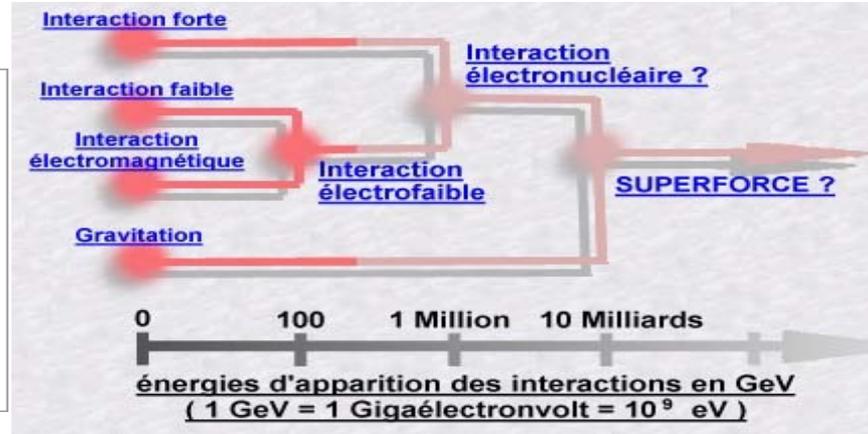
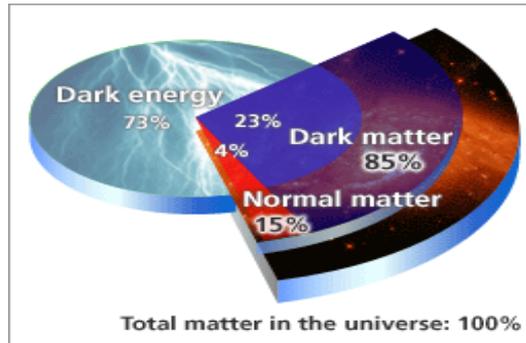
Au-delà du Higgs, d'autres questions



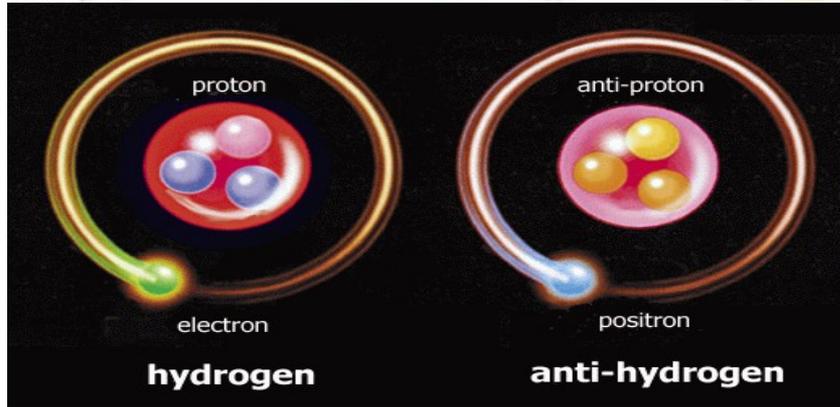
Quelles sont les propriétés de l'anti-matière ?
Pourquoi la Nature préfère-t-elle la matière à l'anti-matière ?

Les 4 forces de la Nature étaient-elles unifiées au début de l'Univers ?

De quoi la matière noire et l'énergie noire sont-elles faites ?



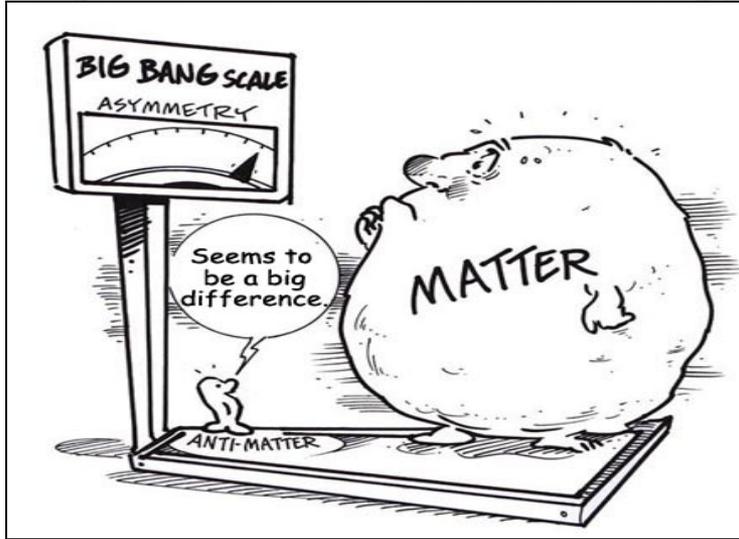
Etude des propriétés de l'anti-matière au CERN



**Expériences au CERN
pour mesurer la gravité
de l'anti-matière directement**



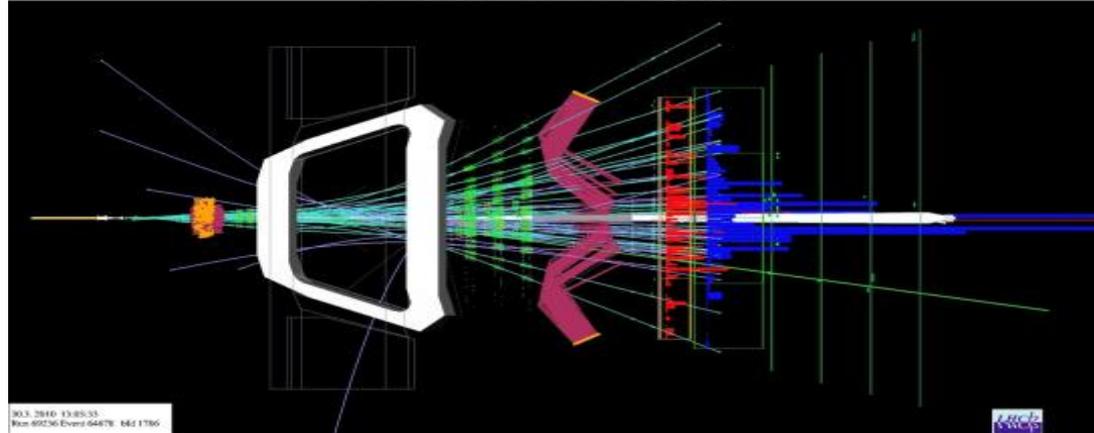
Pourquoi la matière prédomine-t-elle sur l'anti-matière ?



Les expériences du LHC effectuent des mesures d'asymétries dans les interactions faibles des quarks susceptibles d'expliquer l'absence d'anti-matière



LHCb Event Display

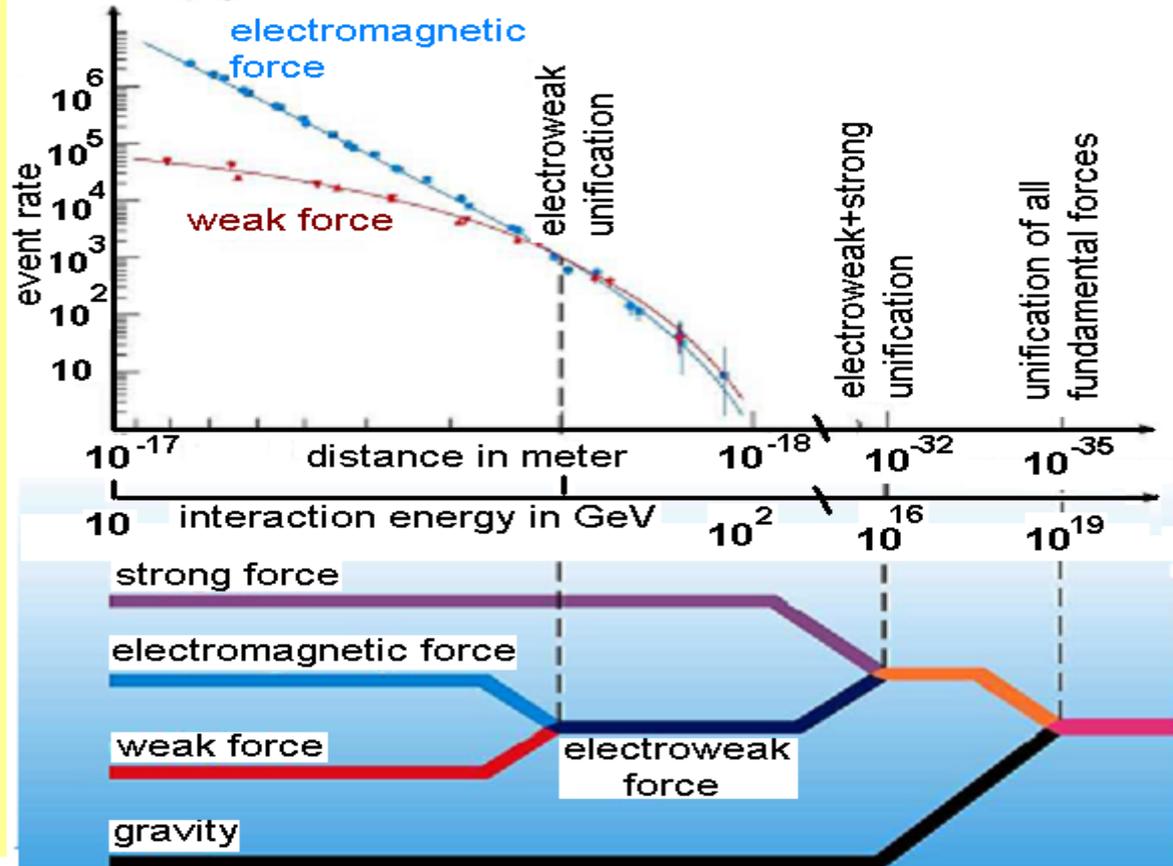
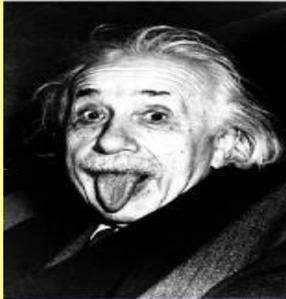


Unification des forces ?

Existe-t-il une simplicité sous-jacente derrière les phénomènes bien différents de la Nature ?

Einstein rêvait de parvenir à une description *unifiée*

Mais il échoua à unifier gravitation et électromagnétisme



Emmy Noether



1882-1935

Symétrie : le système
est inchangé après

Quantité conservée :

Symétries et lois de
conservations doivent
être reliées !

Cette idée est la base de toute
la physique moderne !

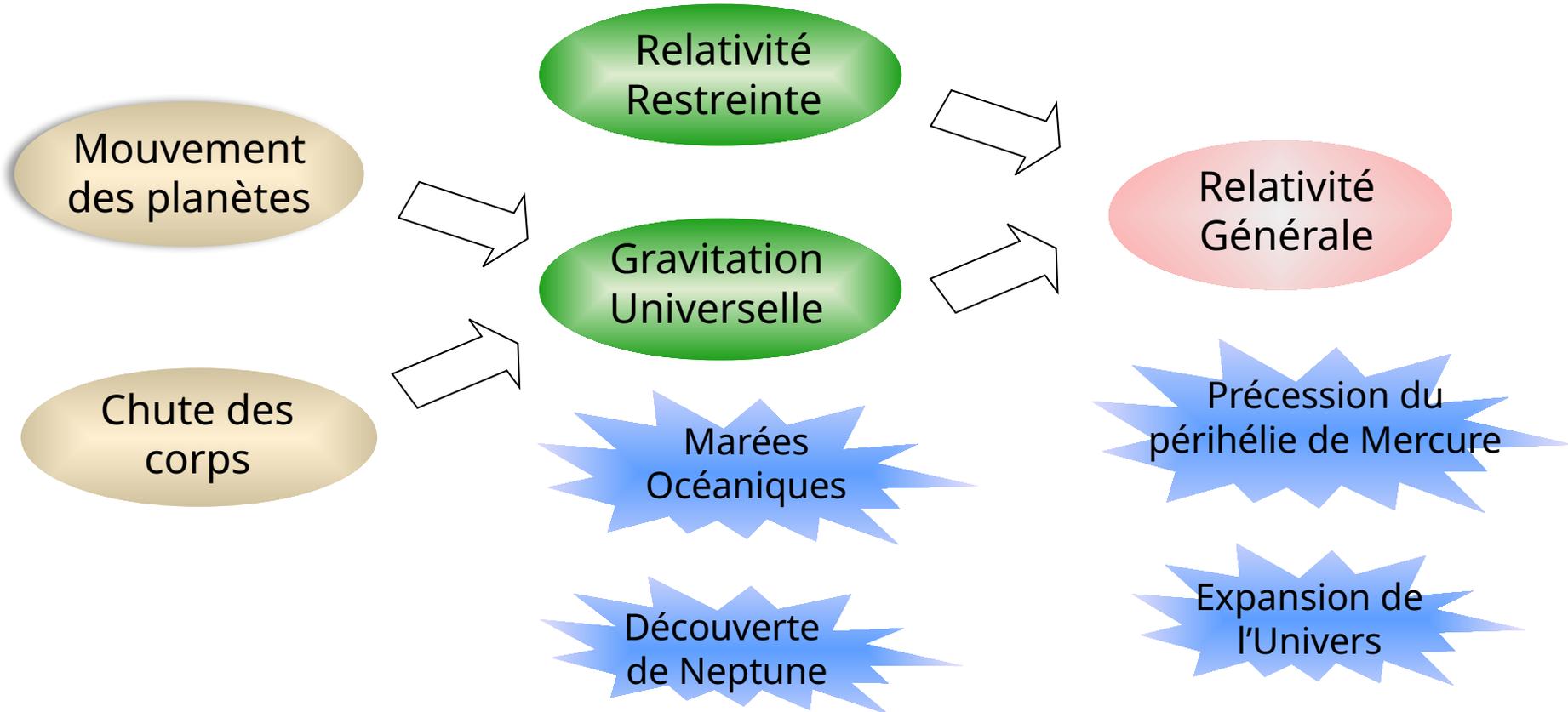
Symétrie de jauge et Physique

La physique des particules est actuellement basée sur *trois* “**symétries de jauge**”, donnant naissance à l’**électromagnétisme** et les **interactions nucléaires faible et forte**

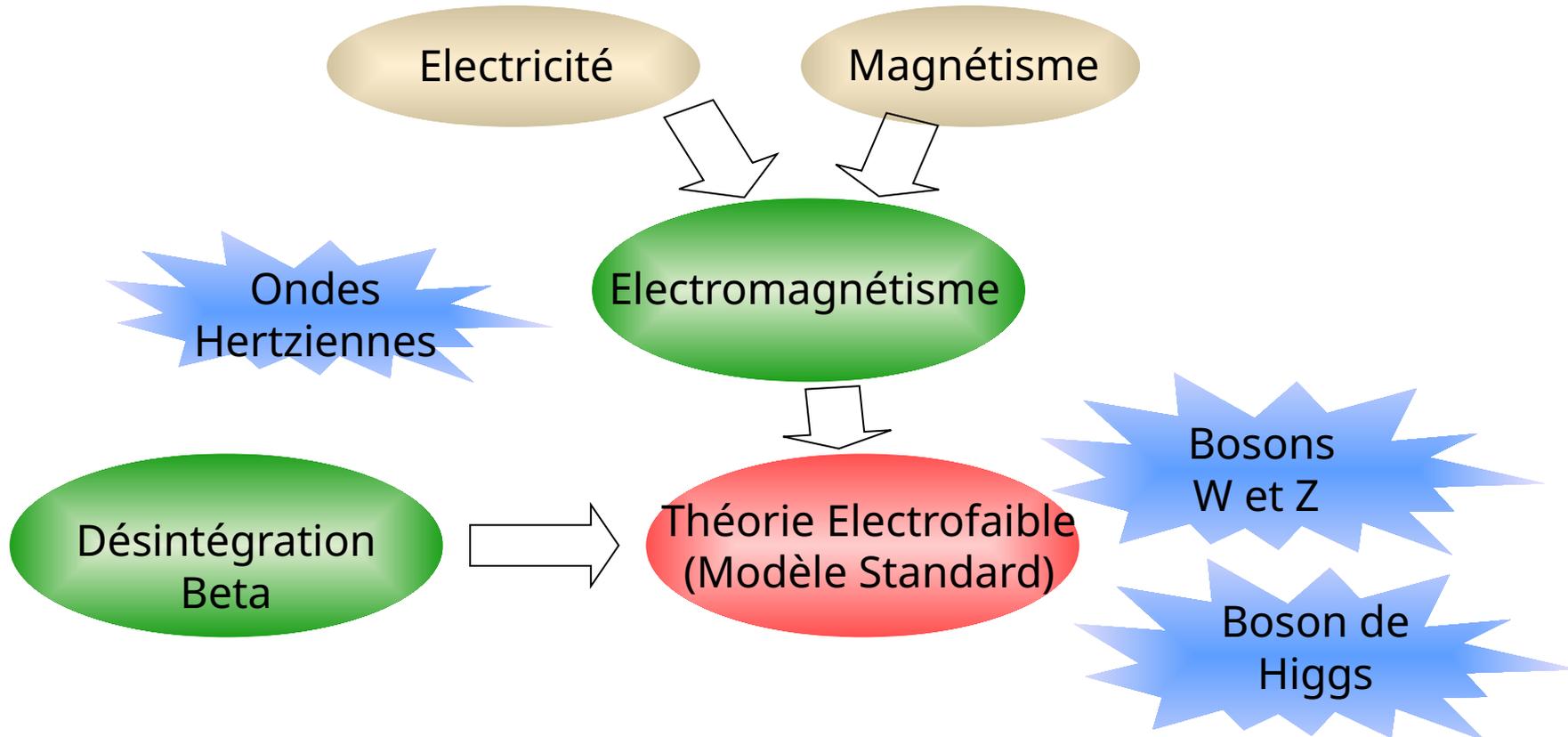
Symétrie de jauge = symétrie par rapport à une transformation qui peut s’appliquer indépendamment en chaque point de l’espace

Chacune de ces symétries correspond à une quantité conservée (charge électrique, “saveur”, “couleur”) et permet d’expliquer les propriétés des particules qui lui sont liées

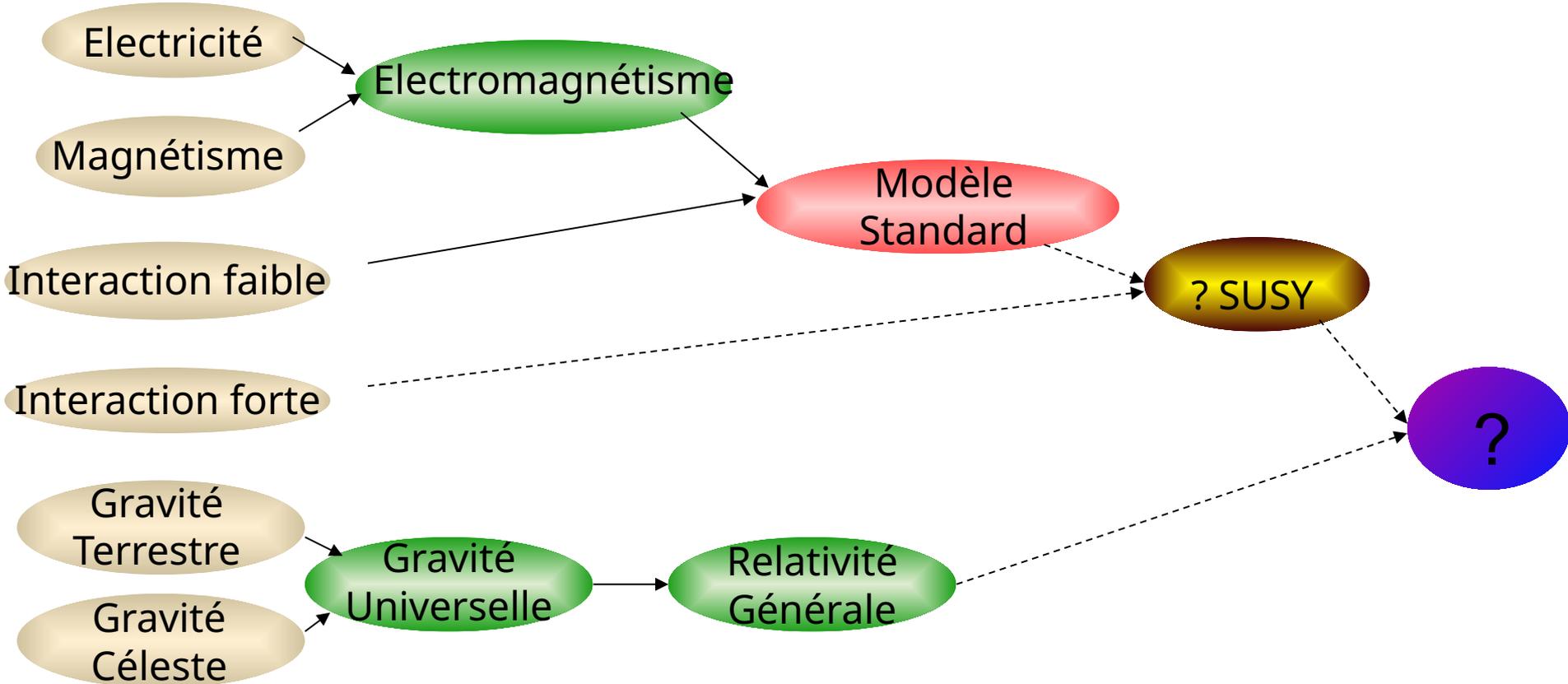
Unification



Unification



Unification



Unification : Supersymétrie ?

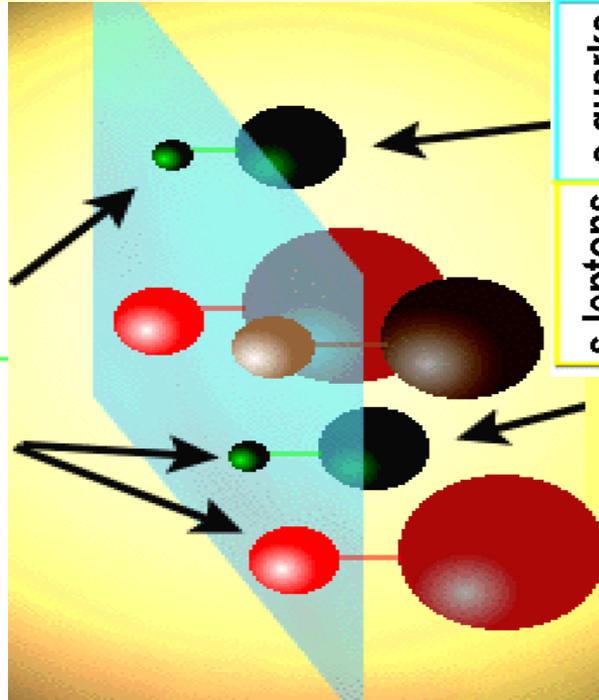
La Supersymétrie (SUSY) unifie la matière avec les forces

Chaque particule ordinaire a une particule supersymétrique partenaire

Particules ordinaires

| | | | | |
|---------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| Leptons | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | Z Z boson |
| | e electron | μ muon | τ tau | W W boson |
| Quarks | u up | c charm | t top | γ photon |
| | d down | s strange | b bottom | g gluon |

I II III



| | | | | |
|-----------|-----------------|-------------------|--------------------|----------|
| s-leptons | $\tilde{\nu}_e$ | $\tilde{\nu}_\mu$ | $\tilde{\nu}_\tau$ | gauginos |
| | \tilde{e} | $\tilde{\mu}$ | $\tilde{\tau}$ | |
| s-quarks | \tilde{u} | \tilde{c} | \tilde{t} | |
| | \tilde{d} | \tilde{s} | \tilde{b} | |
| | \tilde{g} | \tilde{Z} | \tilde{W} | |

Particules SUSY

La matière noire constituée de nouvelles particules ?

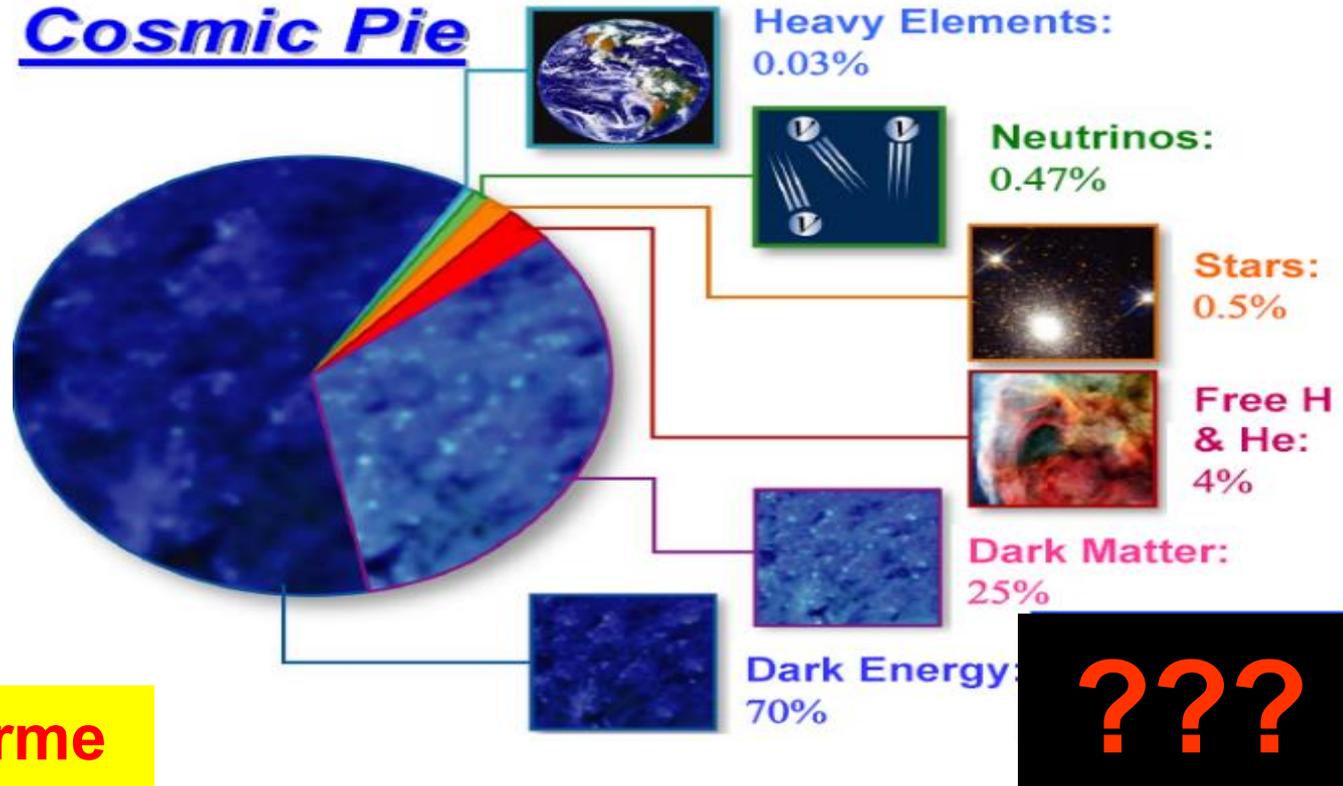
Répartition Matière/Energie dans l'Univers:

- 5% Matière connue
- 25% Matière noire
- 70% Energie noire

Quantité de matière noire et énergie noire mesurée par des observations astrophysiques et cosmologiques

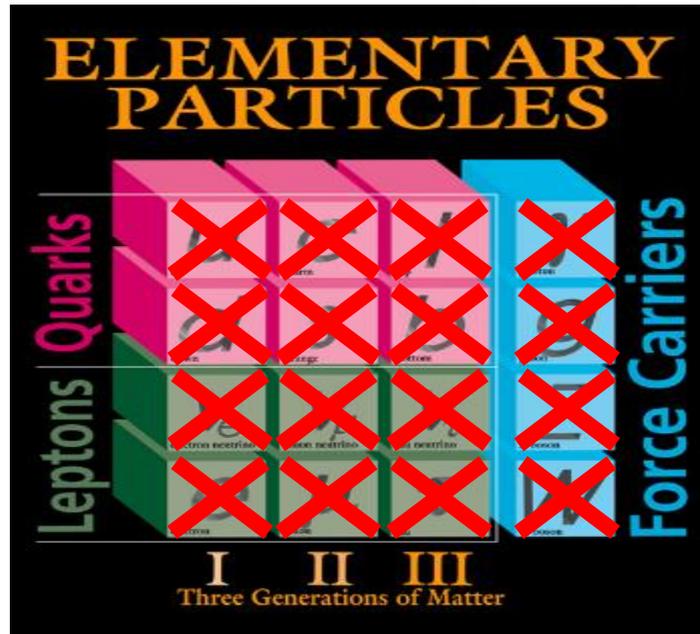
95% de ce qui forme l'Univers est inconnu

Cosmic Pie



Evidence de Nouvelle Physique ?

Une théorie plus fondamentale est nécessaire pour répondre aux questions du Modèle Standard



Propriétés connues de la matière noire :

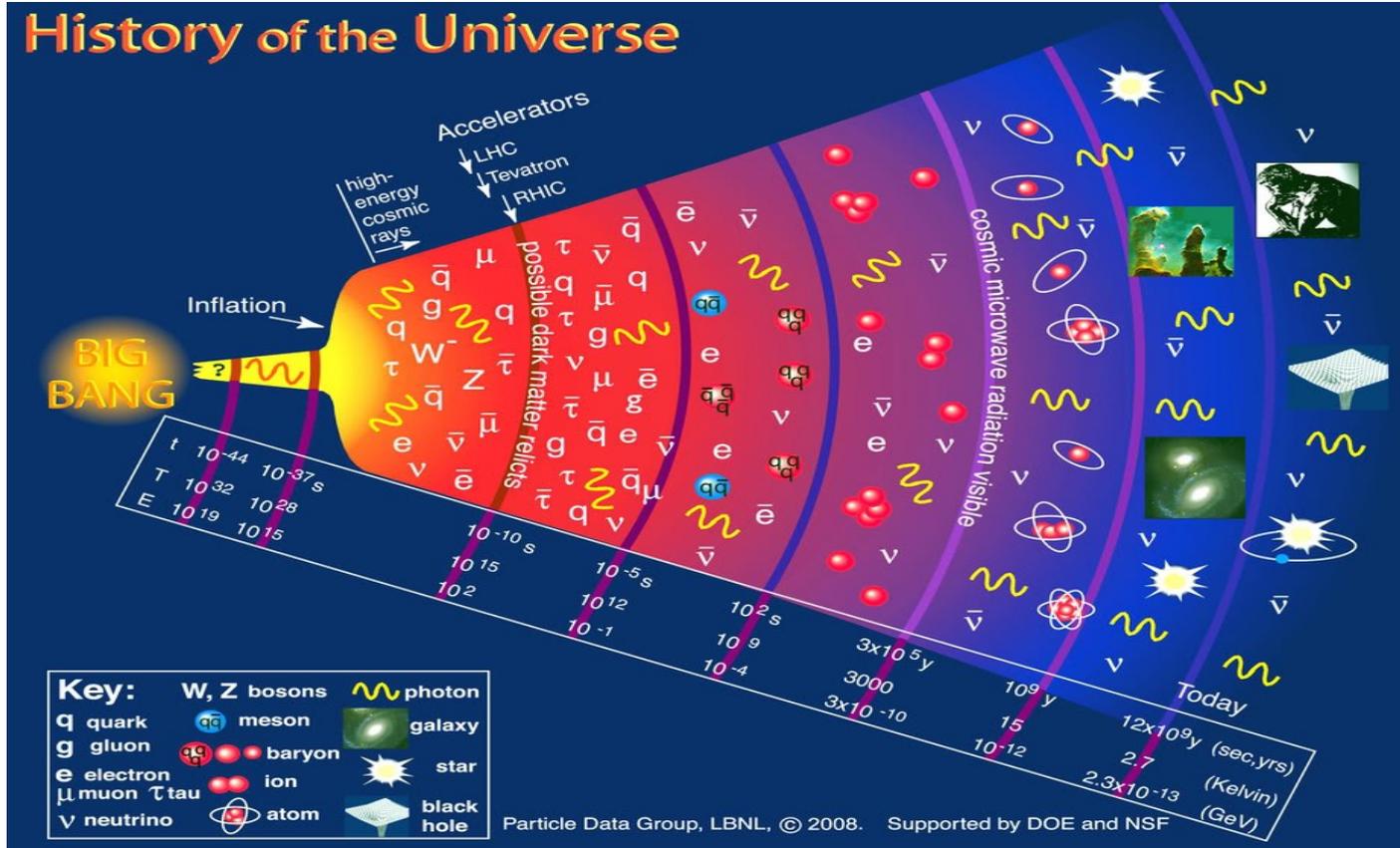
Stable

Froide (= lente)

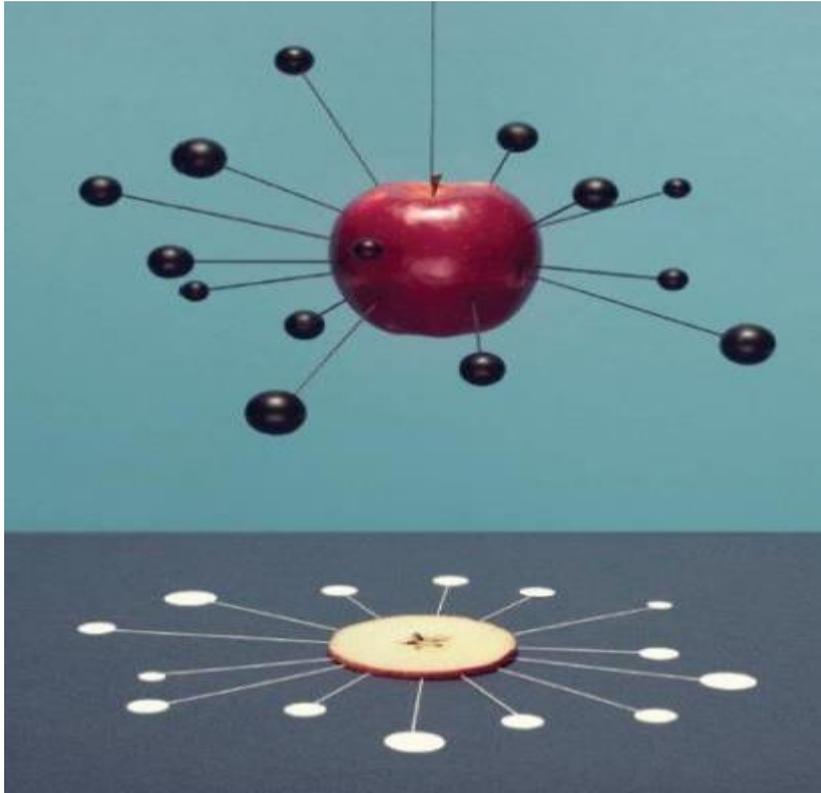
Non-baryonique

Evidence pour de la physique au-delà du
Modèle Standard

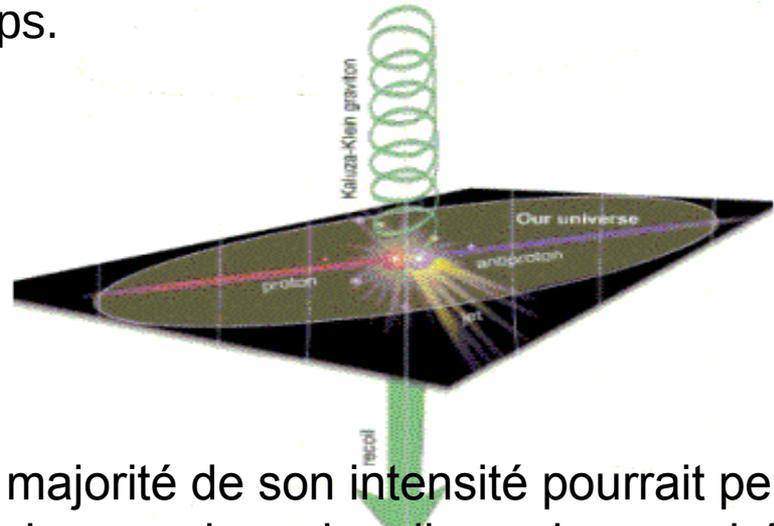
Petite histoire de l'énergie, matière, espace et temps



Pourquoi la gravité est-elle si faible ?



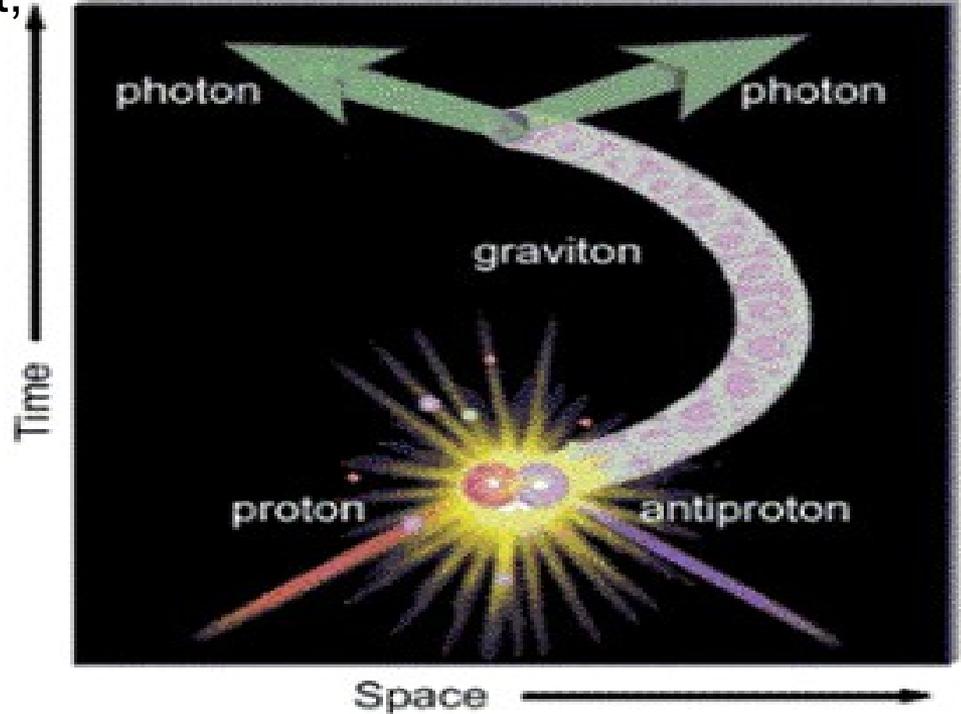
Une réponse possible est que la gravité peut se propager dans des dimensions supplémentaires cachées et que nous ne voyons que sa projection sur notre espace-temps.



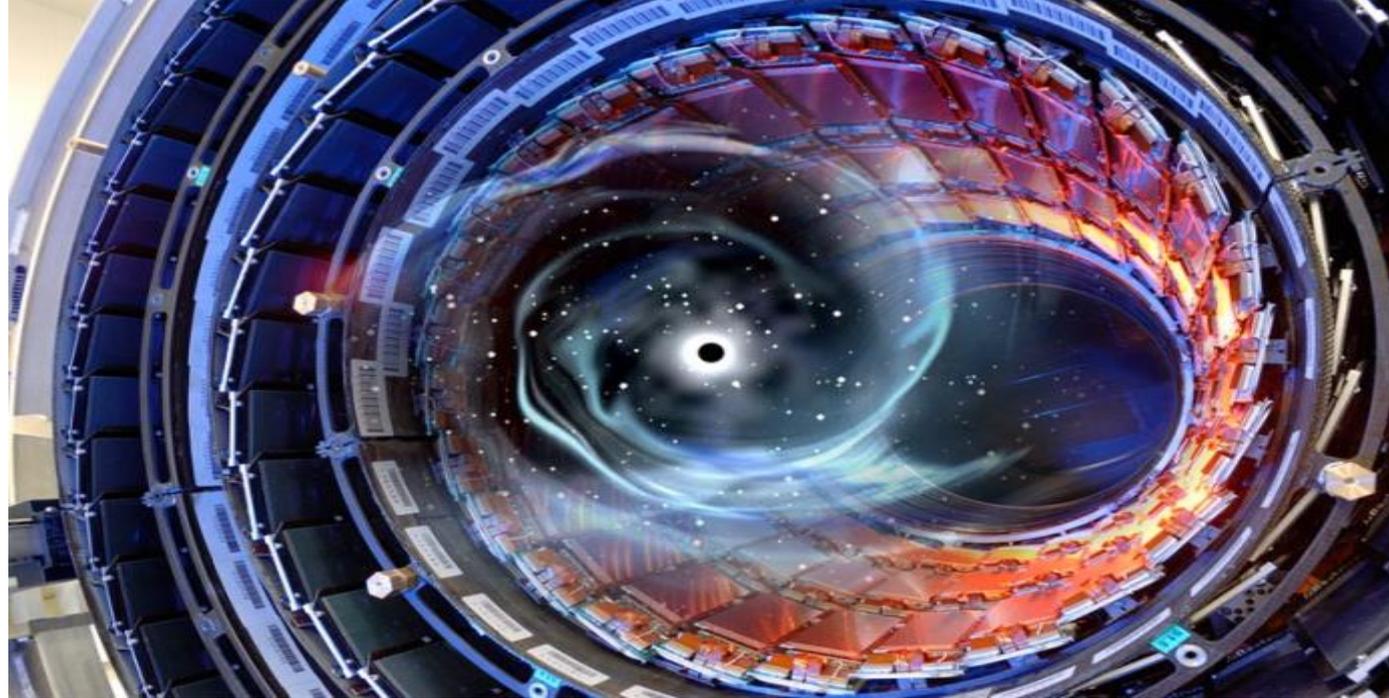
La majorité de son intensité pourrait peut-être s'échapper dans des dimensions cachées...

Dimensions cachées et gravitons

Si des dimensions cachées existent, une nouvelle particule appelée graviton de Kaluza-Klein pourrait être détectée au LHC



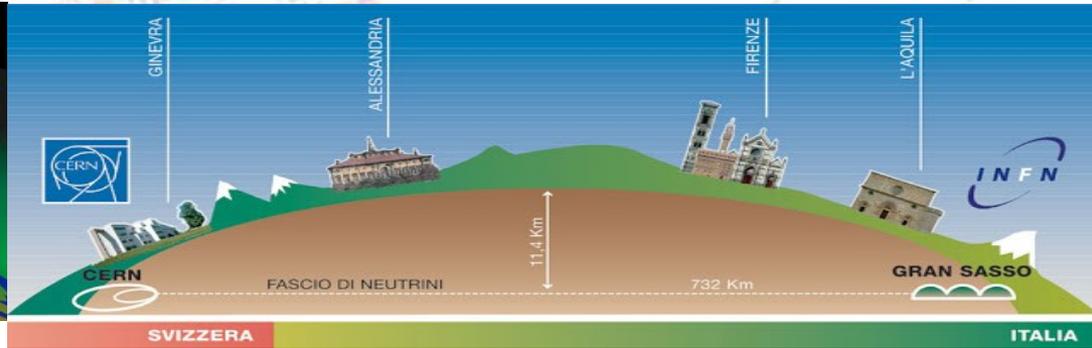
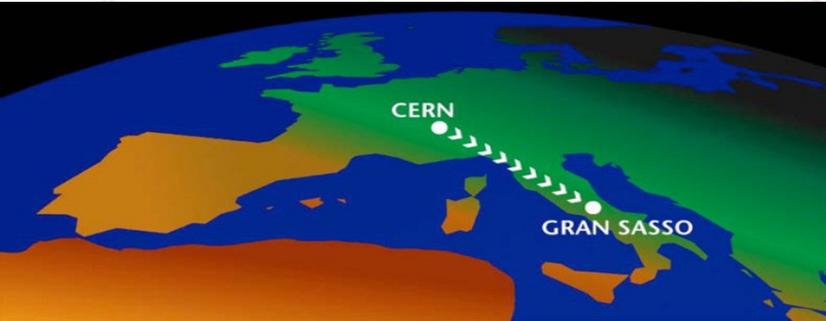
Dimensions cachées et micro-trous noirs



Découvrir des micro trous noirs au LHC pourrait indiquer l'existence de dimensions cachées

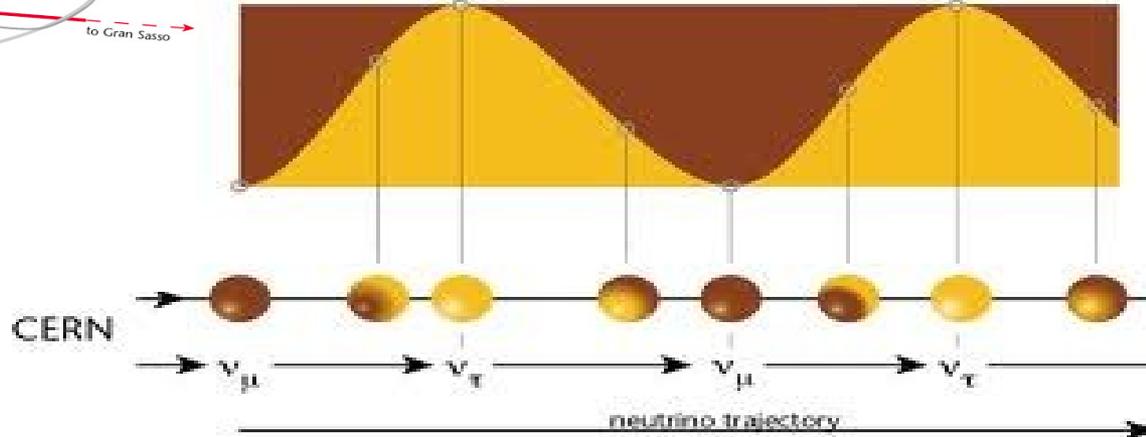
Les micro trous noirs se désintègrent en particules conventionnelles dès qu'ils sont créés dans les collisions

CNGS: faisceau de neutrinos du CERN au Gran Sasso



- PS : Proton Synchrotron
- SPS : Super Proton Synchrotron
- LHC : Large Hadron Collider

Neutrino oscillations



Bien plus à découvrir...

Terra
incognita



Nouvelles forces...



Nouvelles particules...

