

Pourquoi un boson de Higgs?

Michel Davier
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
IN2P3/CNRS et Université Paris-Sud
Académie des Sciences

Marseille Villa Méditerranée 28 mai 2014

Vers l'infiniment petit: la structure de la matière

taille en mètres



Avancées des connaissances

- atomes 10^{-10} m fin 19ème siècle
- noyaux 10^{-14} m ~1910
- proton, neutron 10^{-15} m ~1930
- quarks, leptons $< 10^{-18}$ m ~1970

La physique des particules étudie les constituants les plus fondamentaux de la matière:

les quarks et les leptons sont les particules les plus élémentaires

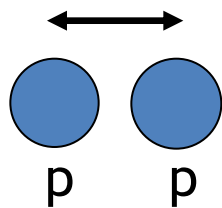
Les quatre interactions fondamentales

Un autre aspect de la physique des particules est l'étude des **forces fondamentales** (comment les particules interagissent entre elles)

Il existe des **PARTICULES ASSOCIÉES** aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z^0, W^+, W^-
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des noyaux. GLUON

10^{-15} m



exemple: 2 protons dans un noyau

10^{-40}

← négligeable au niveau microscopique

10^{-8}

description quantique:
particule ↔ onde ↔ champ

10^{-2}

photon ↔ champ électromagnétique

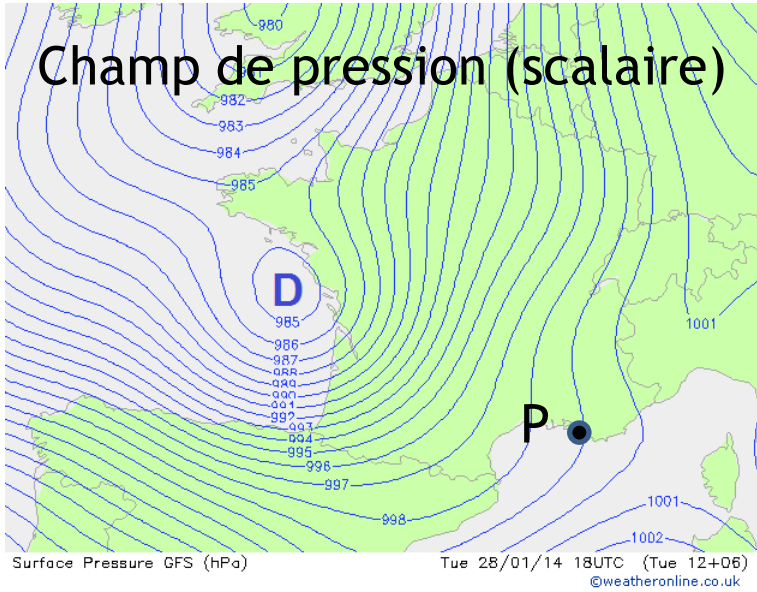
interaction: échange de particules

1

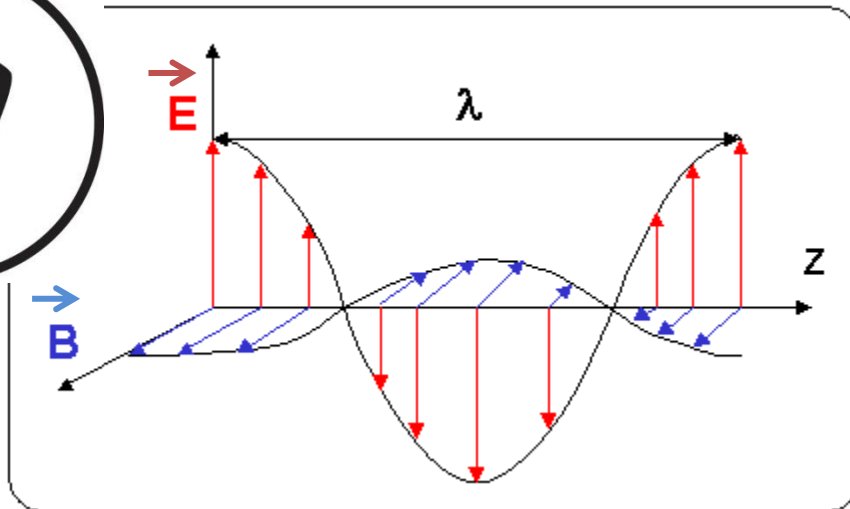
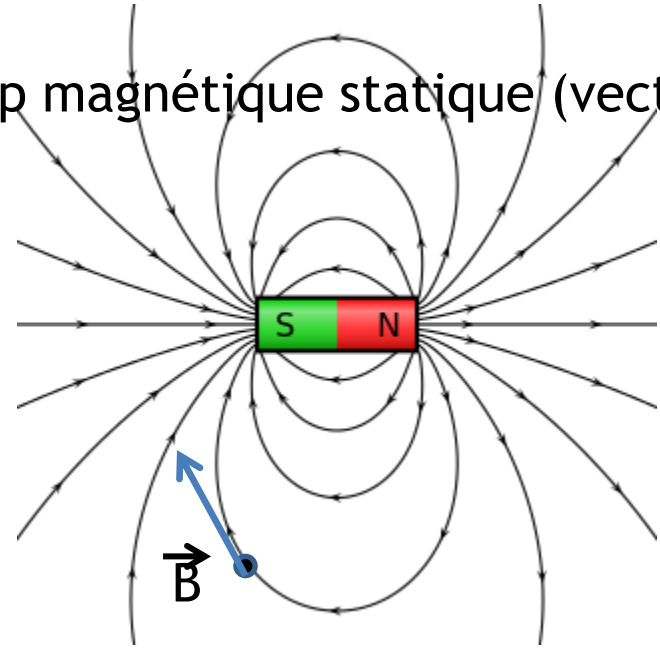
intensité relative

Champs

Champ de pression (scalaire)

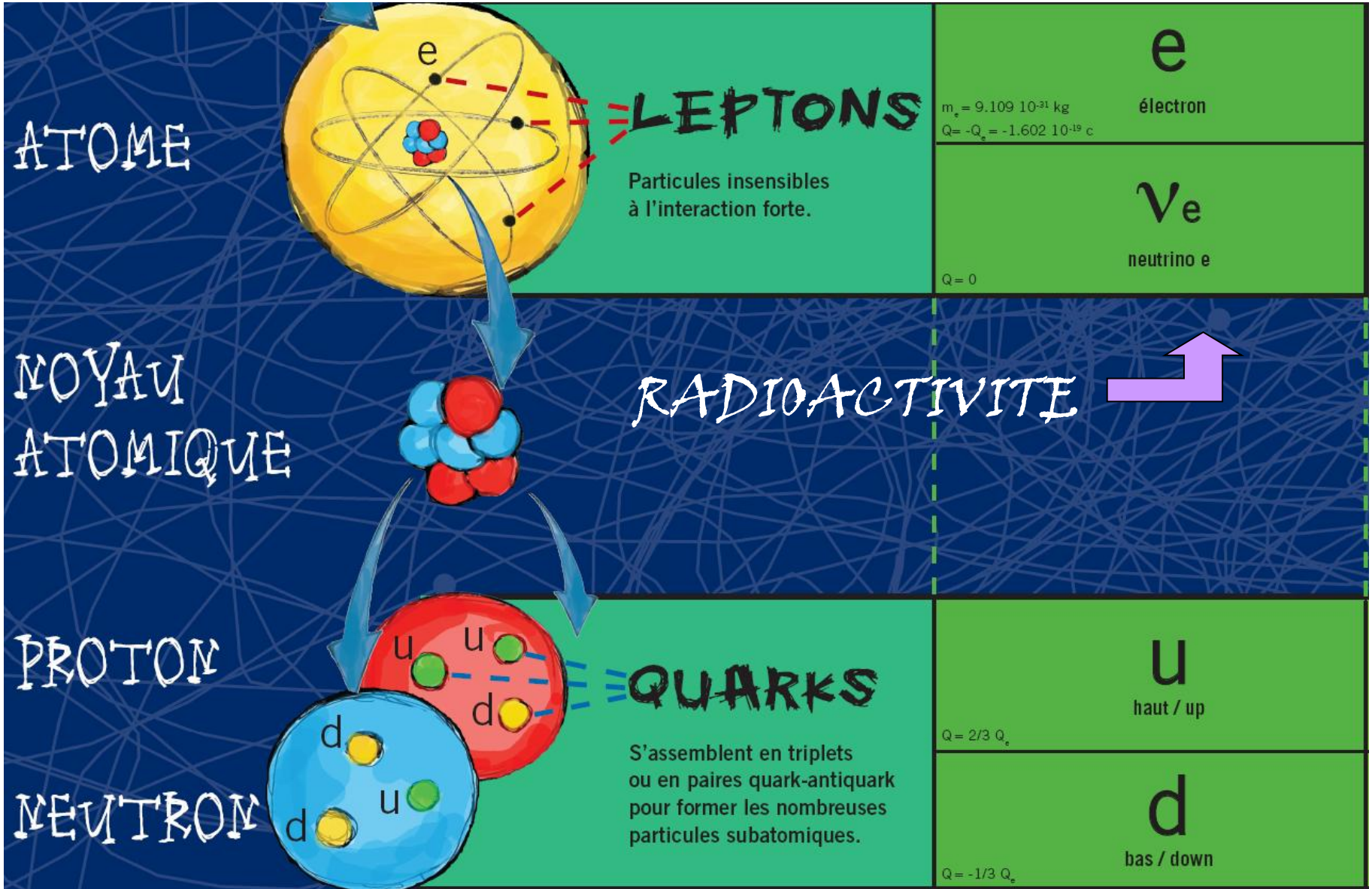


Champ magnétique statique (vectoriel)



Champ électromagnétique oscillant et se propageant
= onde électromagnétique

Les constituants fondamentaux: leptons et quarks

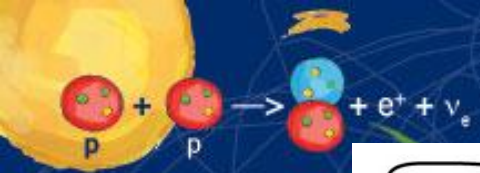


Trois familles de leptons et de quarks

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
<p>Les membres de la 1^{re} famille composent l'ensemble de la matière ordinaire (protons, neutrons, atomes...).</p>	<p>Réplique plus massive et instable de la 1^{re} famille. Le muon est ainsi 200 fois plus lourd que l'électron.</p>	<p>Réplique encore plus massive et instable de la 1^{re} famille. Le lepton τ est ainsi 3600 fois plus lourd que l'électron.</p>
<p>e électron</p> <p>$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg $Q = -Q_e = -1.602 \cdot 10^{-19}$ C</p>	<p>μ muon</p> <p>$Q = -Q_e$</p>	<p>τ tau</p> <p>$Q = -Q_e$</p>
<p>ν_e neutrino e</p> <p>$Q = 0$</p>	<p>ν_μ neutrino muon</p> <p>$Q = 0$</p>	<p>ν_τ neutrino tau</p> <p>$Q = 0$</p>
<p>u haut / up</p> <p>$Q = 2/3 Q_e$</p>	<p>c charme / charm</p> <p>$Q = 2/3 Q_e$</p>	<p>t top</p> <p>$Q = 2/3 Q_e$</p>
<p>d bas / down</p> <p>$Q = -1/3 Q_e$</p>	<p>s étrange/strange</p> <p>$Q = -1/3 Q_e$</p>	<p>b beau/beauty/bottom</p> <p>$Q = -1/3 Q_e$</p>

Particules et antiparticules

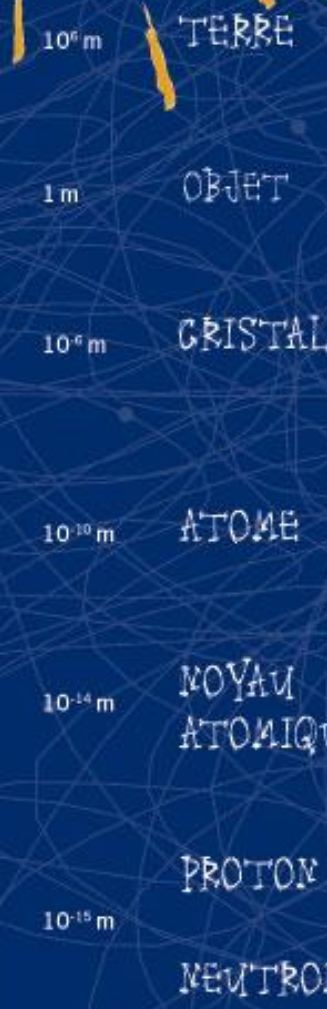
- à chaque particule est associée une anti-particule
- de même masse
- de charge électrique opposée
- électron e^- et positon e^+
- quarks et anti-quarks



Composants élémentaires de la matière

Les interactions fondamentales

BOSONS S=1
Il existe des PARTICULES ASSOCIÉES aux interactions fondamentales permettant leur propagation.



Spin S

	1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
LEPTONS Particules insensibles à l'interaction forte.	e électron $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $g = 0$	μ muon $m_\mu = 1.88 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $q_\mu = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $g = 0$	τ tau $m_\tau = 1.777 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $q_\tau = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $g = 0$
	ν_e neutrino e $m = 0$	ν_μ neutrino muon $m = 0$	ν_τ neutrino tau $m = 0$
QUARKS S'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques.	u haut / up $m_u = 2.2 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $q_u = +2/3 \cdot e$	c charm / charme $m_c = 1.27 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $q_c = +2/3 \cdot e$	t top $m_t = 1.73 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ $q_t = +2/3 \cdot e$
	d bas / down $m_d = 1.8 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $q_d = -1/3 \cdot e$	s strange / étrange $m_s = 1.1 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $q_s = -1/3 \cdot e$	b beau / beauty / bottom $m_b = 4.18 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $q_b = -1/3 \cdot e$

FERMIONS S=1/2

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON ?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z^0, W^+, W^-
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des noyaux. GLUON

ANTI-MATIÈRE



À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

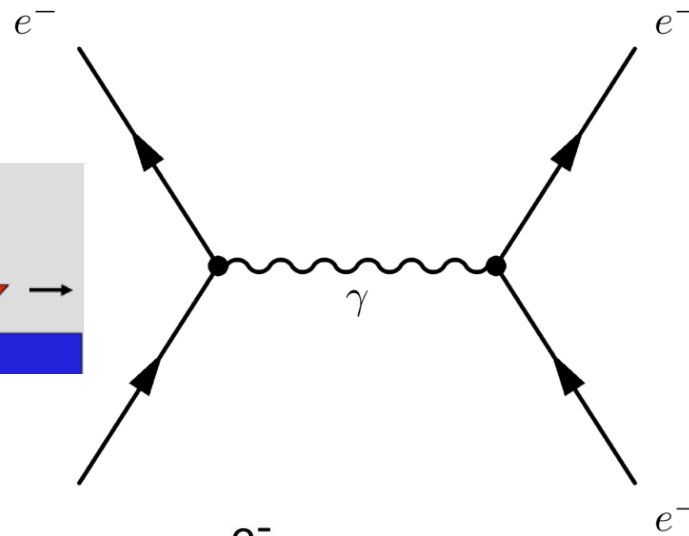
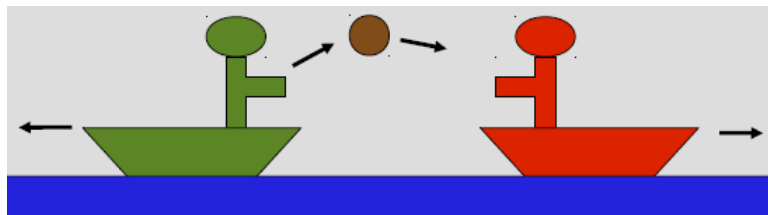
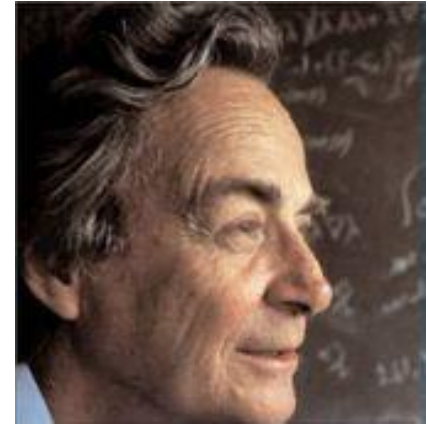
Les 4 forces fondamentales sont indispensables au fonctionnement de soleil (et des étoiles) :

- formation de l'atome causée par la gravitation ;
- réactions de fusion nucléaire avec l'interaction faible et forte ;
- production de lumière : interaction électromagnétique.

Les 4 particules de la première famille sont présentes dans le soleil qui envoie sur la terre un flux intense de photons et de neutrinos.

L'électrodynamique quantique

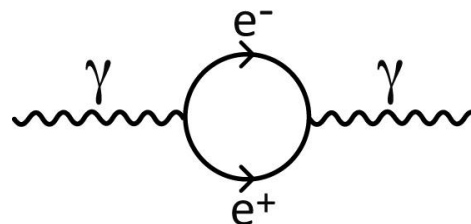
- particules (e^-) et antiparticules (e^+) (Dirac)
- échange de photons “virtuels”: émission/absorption
- diagrammes de Feynman: visualisation + outil de calcul



↑ temps
diffusion $e^- e^-$

→ temps
annihilation $e^- e^+$

- polarisation du vide



Création/absorption de paires
particule-antiparticule

Théories de jauge

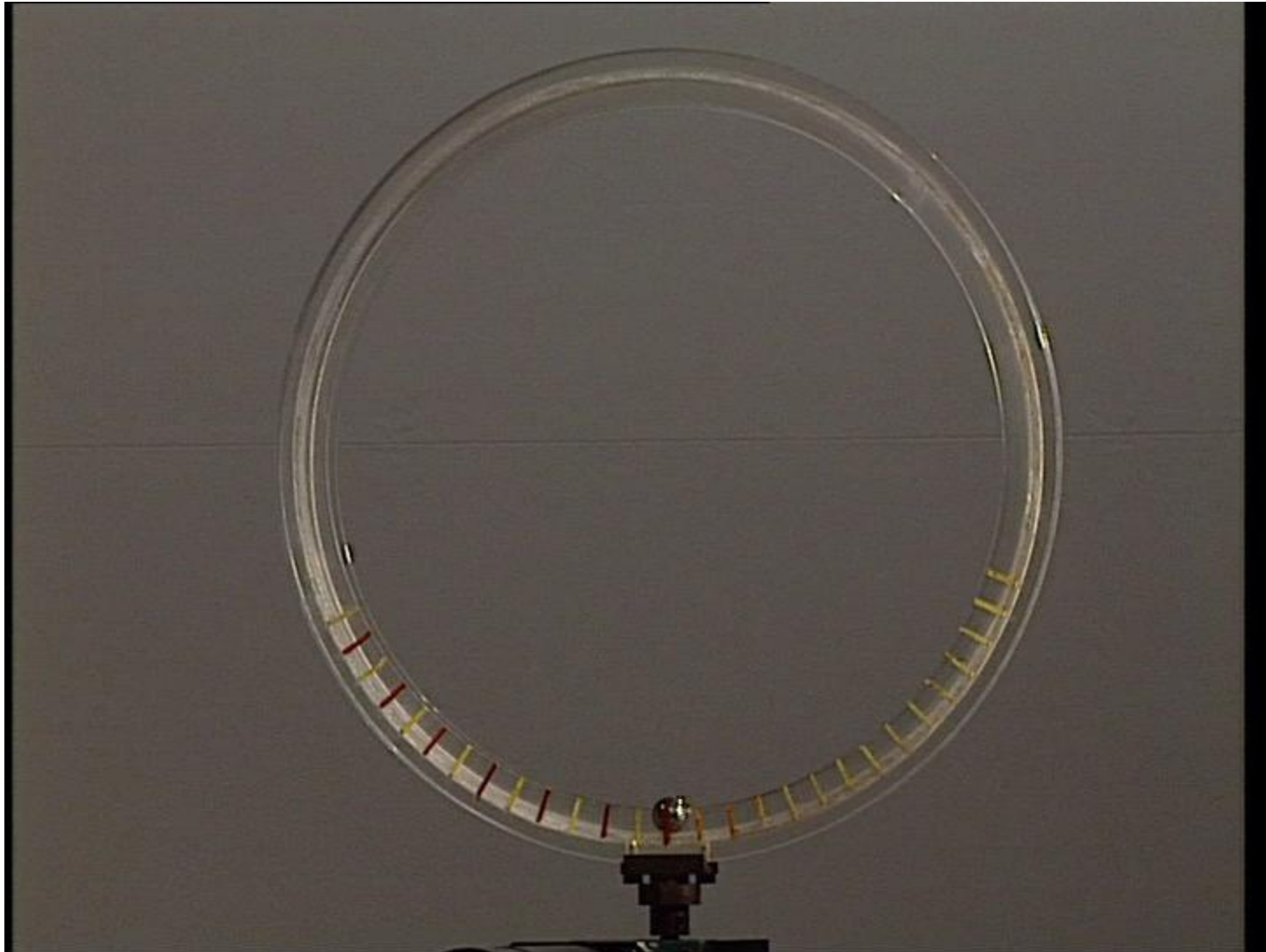
- Les 3 interactions sont décrites par des théories de jauge
- Cela signifie que leur description physique reste invariante lorsqu'on effectue certaines transformations géométriques (rotations)
- Cette invariance de jauge est liée à des symétries de la théorie
- Les symétries ont un rôle omniprésent en physique
- L'invariance de jauge de l'électrodynamique se manifeste par des propriétés importantes:
 - Potentiel électrique défini à une constante près (différence de potentiel)
 - Le photon a une masse nulle (il se déplace dans le vide à la vitesse de la lumière c)

Les bosons de l'interaction faible

- Comme pour l'électrodynamique quantique l'invariance de jauge d'une interaction (=force) exige une **masse nulle** pour le boson échangé **dans cette interaction**
- **Les bosons W, Z de l'interaction faible ont été découverts au CERN en 1983: ils sont très lourds** (80 et 91 GeV*, environ 100 fois la masse d'un proton, comme on pouvait s'y attendre dans le cadre d'une théorie unifiée électrofaible
- **CONTRADICTION**: la grande masse observée des bosons W et Z n'est pas compréhensible dans le cadre d'une théorie de jauge de l'interaction faible
- Comment garder le principe de l'invariance de jauge dans ces conditions?
- La solution: introduire le concept de **brisure spontanée de symétrie (BSS)**

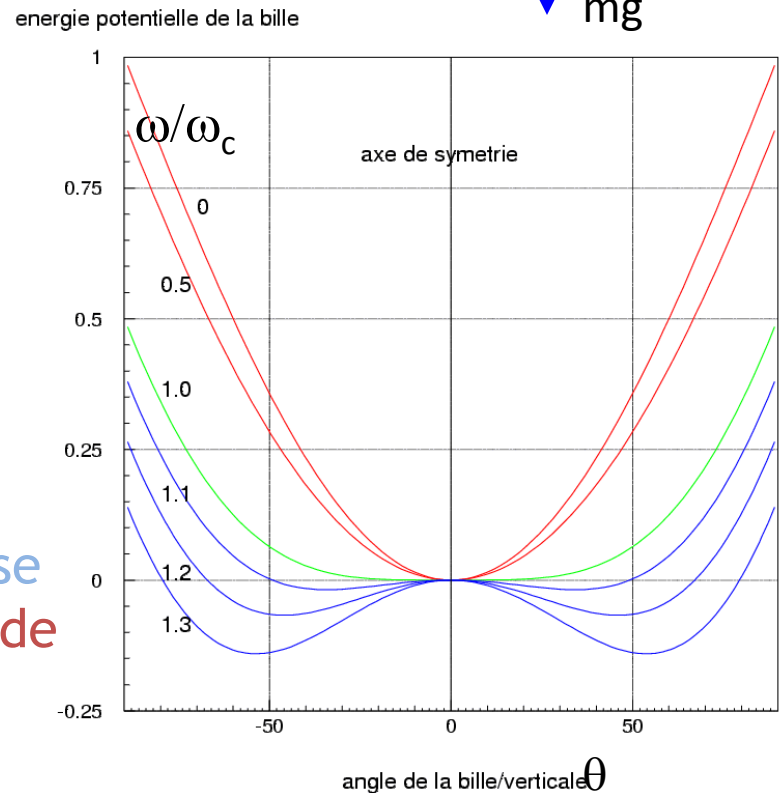
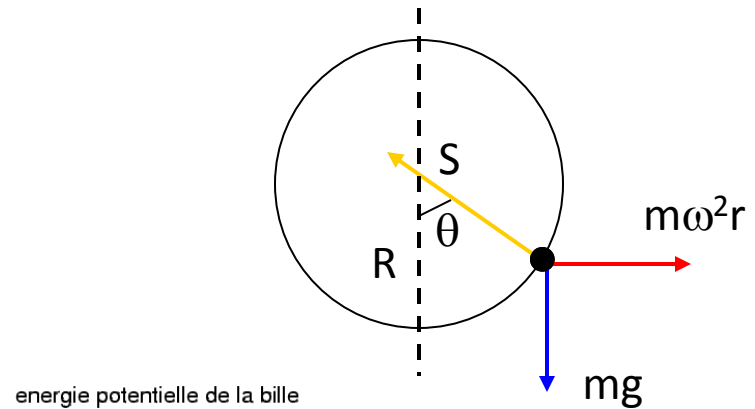
* eV: unité d'énergie ou de masse ($E=mc^2$) 1 GeV= 10^9 eV

Un système mécanique simple avec BSS: expérience



Un système mécanique simple avec BSS: théorie

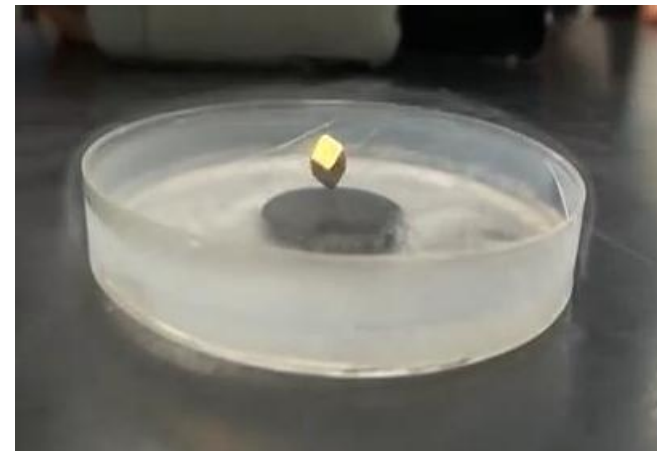
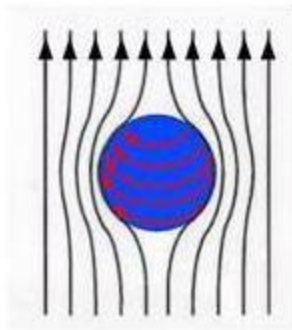
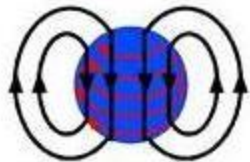
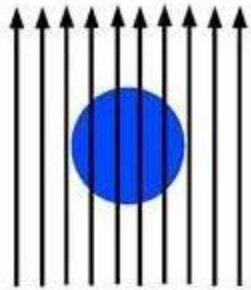
- calcul simple: équilibre de la bille
- vitesse angulaire de rotation ω
⇒ vitesse critique ω_c
- si $\omega < \omega_c$: bille sur l'axe de symétrie
- si $\omega > \omega_c$: 2 positions stables
la bille doit "choisir" l'une des deux
⇒ **brisure spontanée de symétrie**
- le changement de comportement à $\omega = \omega_c$ s'appelle une **transition de phase**
(exemple: point d'ébullition d'un liquide
phase liquide → phase gazeuse)



La BSS dans des systèmes plus complexes

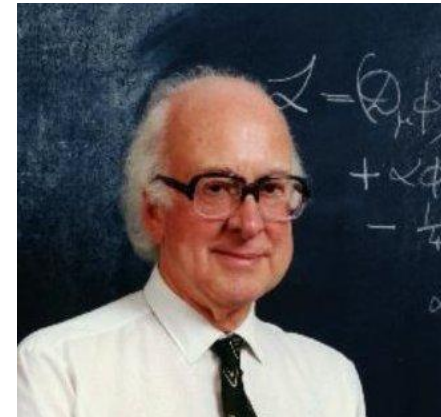
exemple de la supraconductivité

- transition de phase dans un métal en abaissant la température $< T_{\text{critique}}$
- état normal \rightarrow état supraconducteur (résistance électrique nulle)
- apparition d'une masse au photon dans le métal sous l'effet d'un champ créé par des paires d'électrons \Rightarrow brisure de la symétrie de jauge de l'électromagnétisme
- Ceci se manifeste par l'effet Meissner (non-pénétration d'un champ B à l'intérieur du métal)



Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

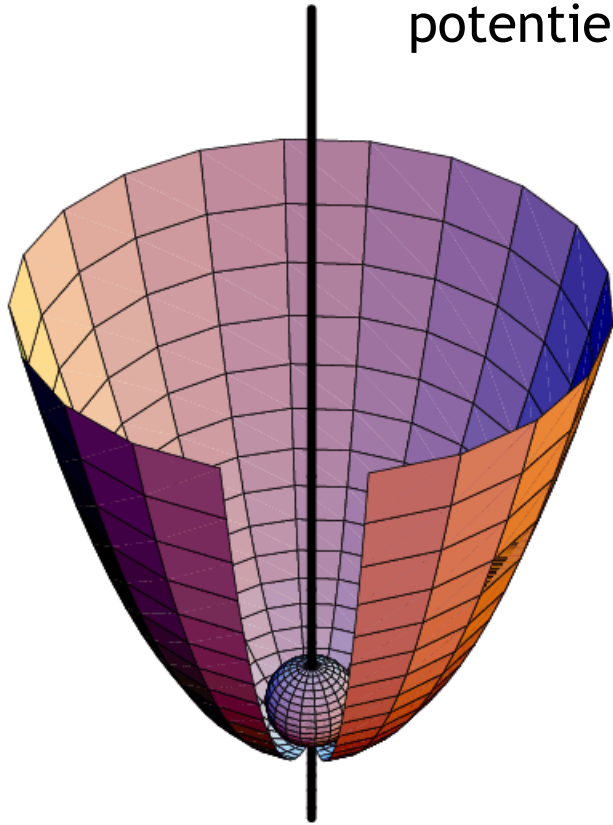
- Comme pour la supraconductivité, dans les théories de jauge, la BSS s'effectue par l'introduction d'un **champ** (F. Englert et R. Brout, P. Higgs, 1964) dont l'effet est de donner une masse aux **bosons W et Z**



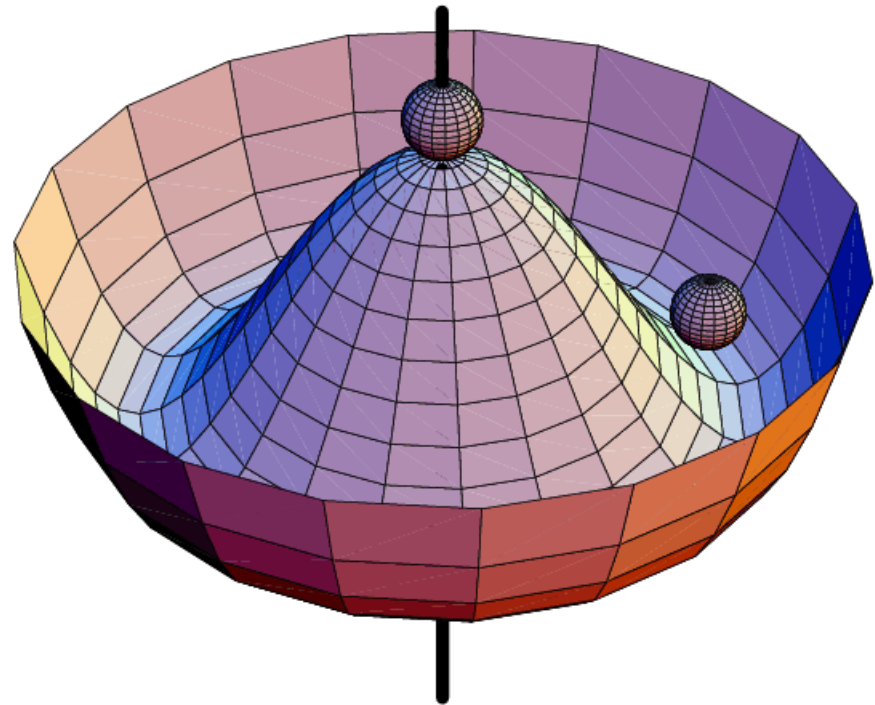
- le champ de Higgs déplace le minimum d'énergie et brise la symétrie de jauge (énergie potentielle analogue à celui de notre exemple mécanique simple)
- il subsiste un vestige de cette brisure: **l'existence d'une particule de spin 0, appelée boson de Higgs**

Potentiel induisant la brisure spontanée de symétrie

billes pour visualiser les champs
potentiel créé par le champ de Brout-Englert-Higgs



symétrie



après brisure de symétrie

Scénario de l'acquisition des masses

- Le **champ de Higgs remplit tout l'espace**
- Dans l'univers primordial très chaud toutes les particules ont une **masse nulle**, en particulier les bosons de jauge
⇒ la symétrie de jauge est respectée
- L'univers se refroidit $T \downarrow$
- Une transition de phase à $\sim T_{EW}$ (10^{-10} s après le big bang) déplace l'univers vers un état où la symétrie est brisée (cf. anneau tournant)
- Cette “expérience” ne s'est produite qu'une fois! (?)
- Les particules interagissent avec ce champ ce qui ralentit leur mouvement : **vitesse < c, donc l'effet d'une masse**
- L'action du champ de Higgs est l'équivalent d'une sorte de viscosité du vide

La masse

- L'acquisition des masses lors de la transition de phase électrofaible est la conséquence de l'existence du champ de Higgs
- Mais attention! Ceci ne s'applique qu'aux masses des particules élémentaires (leptons et quarks)
- La masse des objets macroscopiques provient à 99% de **l'énergie de confinement des quarks** dans les protons/neutrons des noyaux
- Néanmoins il s'agit d'un **mécanisme crucial pour l'histoire de l'univers** (et la nôtre!):
- Si les quarks et les électrons n'avaient pas de masse, il n'y aurait pas d'atomes stables, donc pas de matière, ni de vie...
- Ne pas confondre acquisition des masses et création des particules!

Le Modèle Standard

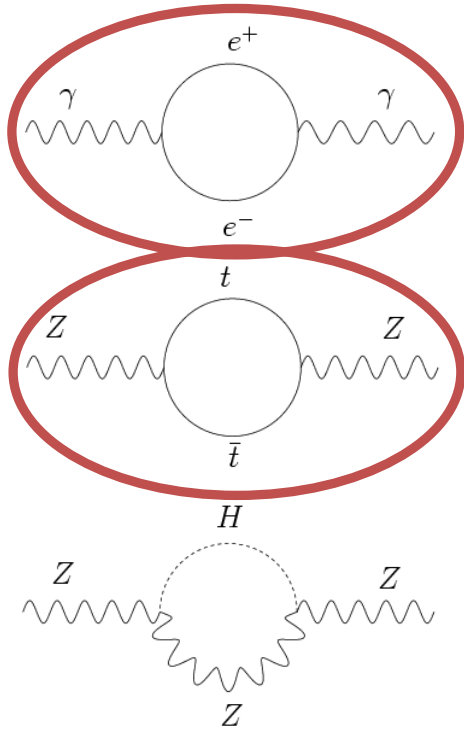
- le mécanisme de Higgs-Brout-Englert (1964) a permis d'édifier la **théorie électrofaible**, unification des interactions électromagnétique et faible (S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg: Nobel 1979)
- les bosons W et Z acquièrent des **masses qui sont calculables et vérifiées par l'expérience** (C. Rubbia, S. van der Meer: Nobel 1984)
- les calculs peuvent être effectués à un grand niveau de précision (G. 't Hooft, M. Veltman: Nobel 1999) , comme pour l'électrodynamique quantique
- même si le mécanisme de Higgs permet d'expliquer la génération de la masse des particules, toutes les valeurs de masse, y compris celle du boson H de Higgs, restent **des paramètres arbitraires, non prédits par la théorie**

Tests de précision du Modèle Standard

le LEP au CERN
27 km circonférence

1989-2001: collisions électron-positon de 90 à 210 GeV

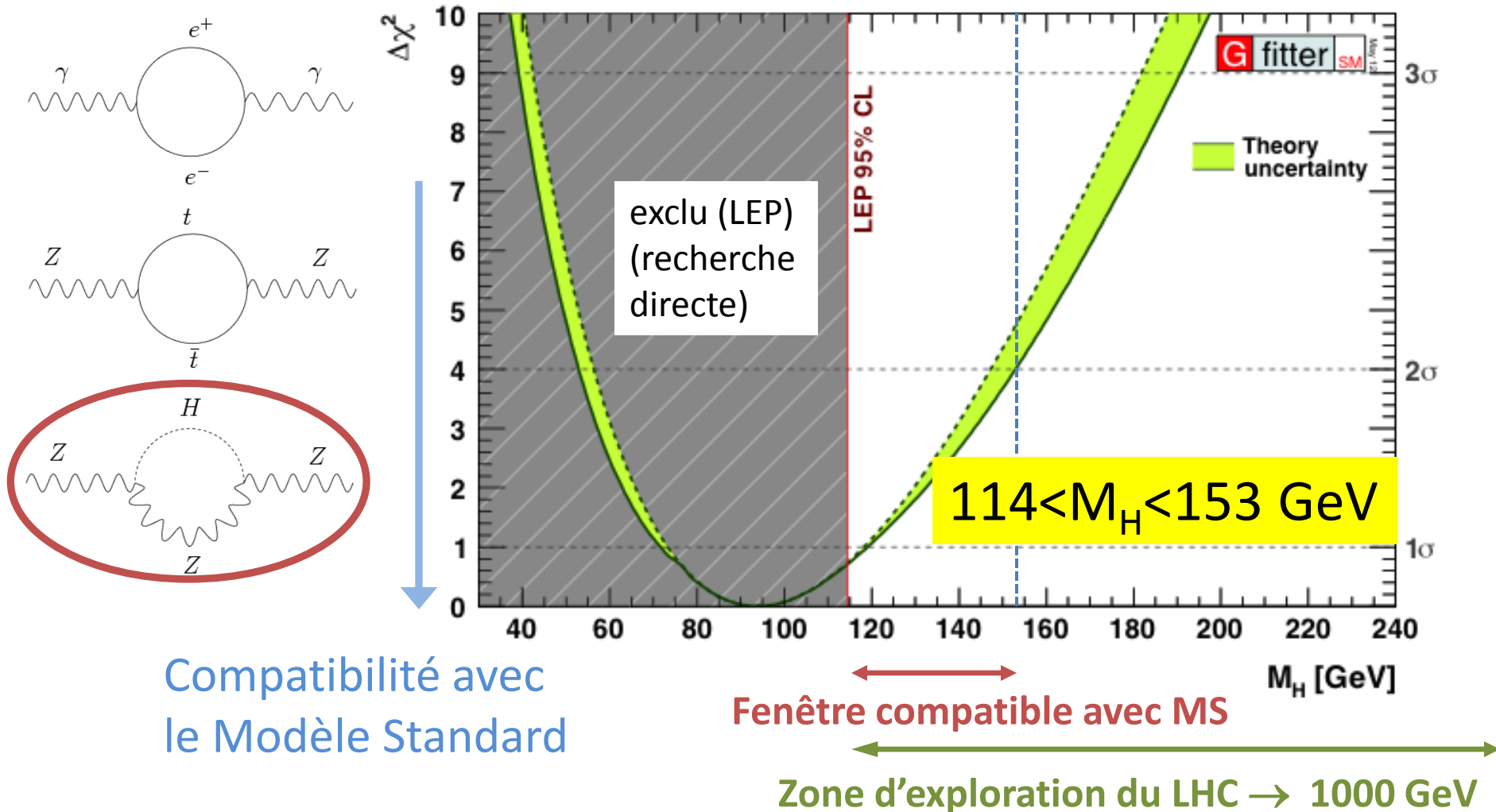
Mesures de précision et fluctuations du vide électrofaible : prédiction de la masse du quark top

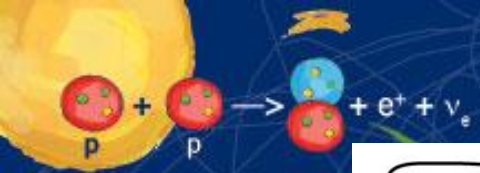


- Les mesures de précision avec LEP (masses du W et du Z, couplages entre le Z et les fermions) et le Modèle Standard permettent d'accéder aux propriétés de particules non encore découvertes (trop lourdes)
- Ces particules modifient l'interaction (mesurée et calculée) entre les bosons de jauge et les fermions (polarisation du vide)
- Ainsi la propagation du boson Z est affectée par des paires quark top–antiquark top
- 1990-93: détermination indirecte de la masse du top
 $m_t = (172 \pm 23) \text{ GeV}$ LEP/CERN indirect
- 1994: découverte du quark top
 $m_t = (176 \pm 16) \text{ GeV}$ Tevatron/Fermilab
- Magnifique succès du Modèle Standard (prédictif)

Mesures de précision et fluctuations du vide électrofaible : prédiction de la masse du boson de Higgs

La même méthode peut être appliquée pour déterminer indirectement la masse du boson de Higgs





10^6 m TERRE

1 m OBJET

10^8 m CRISTAL

10^{10} m ATOME

10^{-14} m NOYAU ATOMIQUE

PROTON

NEUTRON

ANTI-MATIÈRE



Spin S

Composants élémentaires de la matière

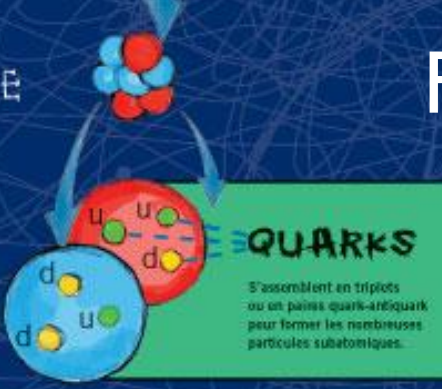
Les interactions fondamentales

Il existe des PARTICULES ASSOCIÉES aux interactions fondamentales primaires de propagation. **BOSONS S=1**



1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
Les membres de la 1 ^{re} famille composent l'élément de la matière ordinaire (protons, neutrons, atomes...)	Fait que c'est matière et énergie de la 1 ^{re} famille. Le rayon est de 222 fois plus grand que l'électron.	Fait que c'est matière et énergie de la 2 ^e famille de la 2 ^e famille. Le rayon est 401 à 402 000 fois plus grand que l'électron.
e électron	μ muon	τ tau
ν_e neutrino e	ν_μ neutrino muon	ν_τ neutrino tau

FERMIONS S=1/2



u haut / up	c charm / charme	t top
d bas / down	s strange / étrange	b beau / beauty / bottom

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON ?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z⁰, W⁺, W⁻
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des noyaux. GLUON

BOSON de HIGGS S=0

À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

Trouver le boson de Higgs...

- Le Modèle Standard décrit un ensemble impressionnant des phénomènes et les tests expérimentaux sont tous passés avec succès
- La construction de la théorie unifiée électrofaible est basée sur le mécanisme de brisure de symétrie conduisant à l'existence d'un nouveau type de particule: le boson de Higgs
- Trouver ce boson était donc un objectif majeur depuis 50 ans. Si c'est bien le boson de Higgs du Modèle Standard sa masse doit être comprise entre 114 et 153 GeV
- D'où l'importance capitale de cette découverte qui va vous être contée