

Le Modèle Standard

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

Laboratoire de Physique Théorique
CNRS & Université Paris-Sud 11, 91405 Orsay, France

Science à l'école, CPPM, 6 juin 2013



D'une démarche analytique...

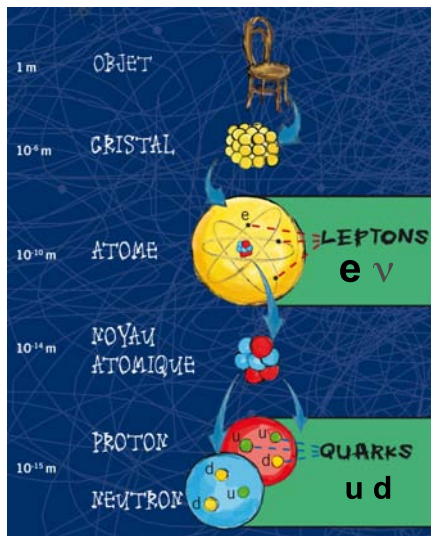
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Hf	59 Ta	60 W	61 Re	62 Os	63 Ir	64 Pt	65 Au	66 Hg	67 Tl	68 Pb	69 Bi	70 Po	71 At	72 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Unq														
				73 G	74 Pr	75 Nd	76 Pm	77 Sm	78 Eu	79 Gd	80 Tb	81 Dy	82 Ho	83 Er	84 Tm	85 Yb	86 Lu
				89 Th	90 Pa	91 U	92 Np	93 Pu	94 Am	95 Cm	96 Bk	97 Cf	98 Es	99 Fm	100 Md	101 No	102 Lw

... à une autre, un siècle plus tard

	I	II	III	
Quarks	u	c	t	γ
	d	s	b	g
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	e	μ	τ	W

3 générations

La matière ordinaire



	I	II	III	
Leptons	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	γ
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>	<i>g</i>
	ν_e	ν_μ	ν_τ	<i>Z</i>
	<i>e</i>	μ	τ	<i>W</i>
Quarks				Forces

3 générations

- Quarks: protons, neutrons
- Électrons: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives: $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ (15 min)

Les trois générations



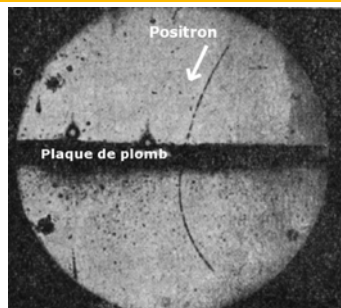
	I	II	III	
Quarks	u	c	t	γ
	d	s	b	g
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	e	μ	τ	W

3 générations

Forces

- Dans les rayons cosmiques ('30), puis accélérateurs de particules
- Copies de la première famille (charge électrique. . .) **sauf masses !**
top t 60 000 fois plus lourd que up u (\simeq atome d'or)
- Instables: t se désintègre en quelques 10^{-25} secondes
- Plusieurs voies de désintégrations:
 $t \rightarrow be^+\nu$ ($\simeq 100\%$), $t \rightarrow se^+\nu$ (0.15%), $t \rightarrow de^+\nu$ (6×10^{-5})...

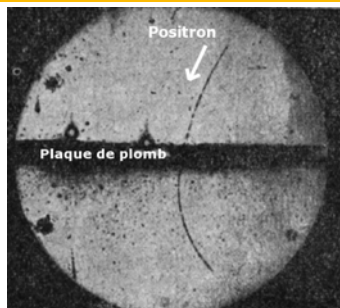
Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec \vec{B}
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec \vec{B}
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

Dirac (1928): équation pour décrire l'électron

- Mécanique Quantique + Relativité restreinte

$$E = p^2 / (2m_e) \rightarrow E^2 = p^2 c^2 + m_e^2 c^4$$

- Solution $E < 0$ vue comme **anti-particule**
- Permet l'équivalence Énergie ($E = 2m_e c^2$)
↔ Masse (paire particule/antiparticule)

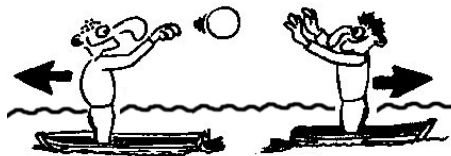


Les forces fondamentales

	I	II	III	
Quarks	u	c	t	γ
Quarks	d	s	b	g
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
Leptons	e	μ	τ	W

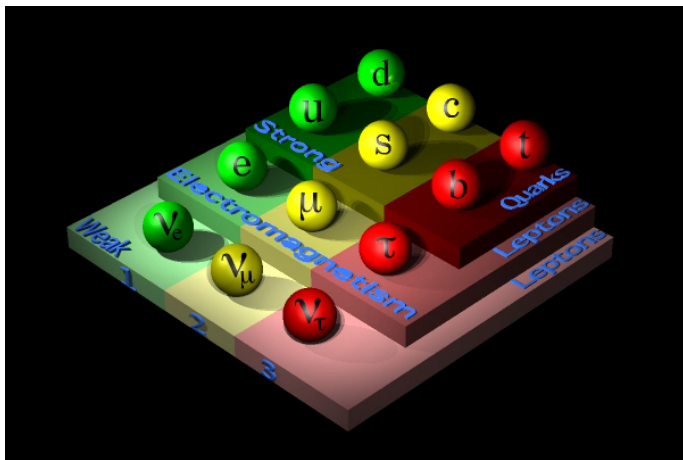
3 générations

Forces



- Gravitation
étoiles, galaxies... [10⁻⁴⁰]
 - Force faible (bosons W, Z)
radioactivité β [10⁻⁸]
 - Electromagnétisme (photon γ)
électricité, chimie... [10⁻²]
 - Force forte (gluons g)
cohésion des noyaux [1]
-
- 3 interactions sur 4 en termes d'échanges de particules (boson médiateurs)
 - gravitation négligeable [intensité relative au niveau subatomique]

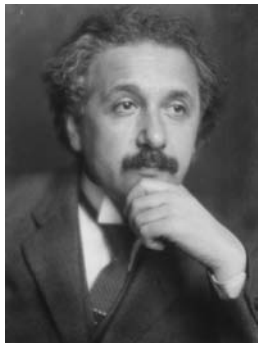
Des différences de sensibilités



- Faible : tout le monde
- Electromagnétique : tout le monde sauf les neutrinos
- Forte : seulement les quarks

Réconcilier deux célèbres adversaires

Albert Einstein



Relativité restreinte

(Poincaré, Lorentz...)

c vitesse de la lumière (v max)

objets rapides

Niels Bohr



Mécanique quantique

(Schrödinger, Heisenberg...)

h quantum d'action ($E \cdot t$ min)

temps courts

Ce qui fait le sel de la physique des particules !

La masse en physique des particules

- Toutes les particules: lien entre énergie, impulsion et vitesse

$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 = (Mc^2)^2 + (pc)^2$$

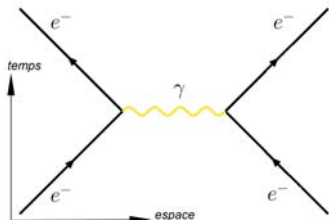
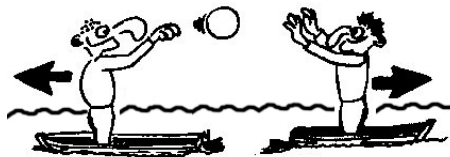
en particulier, coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée

La masse en physique des particules

- Toutes les particules: lien entre énergie, impulsion et vitesse

$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 = (Mc^2)^2 + (pc)^2$$

en particulier, coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée



- Particules d'interaction: portée de l'interaction $V(r) \propto e^{-Mr}/r$
 - Electromag. ($M_\gamma = 0$): Potentiel de Coulomb $1/r$ avec portée ∞
 - Faible ($M_{W,Z} \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$): Suppress. exponentielle avec portée subatomique ($r_0 = \hbar c/M = 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$), pas d'état lié

Ondes et particules

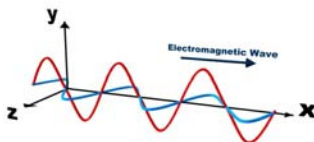


Mer

Vague (excitation)

$$e^{i(kx - \omega t)} \text{ with } \omega(k) = ck$$

Vitesse de propagation c



Champ électromagnétique

Onde e.m. monochromatique

= photon d'énergie précise

Vitesse de la lumière c

Ondes et particules

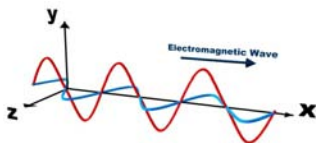


Mer

Vague (excitation)

$$e^{i(kx - \omega t)} \text{ with } \omega(k) = ck$$

Vitesse de propagation c



Champ électromagnétique

Onde e.m. monochromatique

= photon d'énergie précise

Vitesse de la lumière c

- Interaction électromagnétique par échange de photons "virtuels" ["ondes" avec $\omega(k) \neq ck$]

Ondes et particules

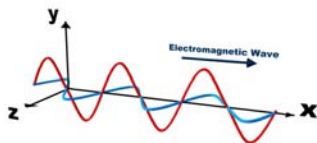


Mer

Vague (excitation)

$$e^{i(kx - \omega t)} \text{ with } \omega(k) = ck$$

Vitesse de propagation c



Champ électromagnétique

Onde e.m. monochromatique

= photon d'énergie précise

Vitesse de la lumière c

- Interaction électromagnétique par échange de photons "virtuels" ["ondes" avec $\omega(k) \neq ck$]
- A chaque particule son champ
 - les vagues (excitations) sont des particules
 - soit réelles (observables, $E^2 = (Mc^2)^2 + (pc)^2$)
 - soit virtuelles (intermédiaires de processus)

Ondes et particules

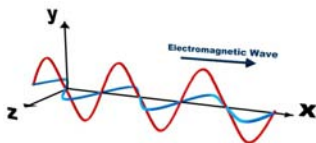


Mer

Vague (excitation)

$$e^{i(kx - \omega t)} \text{ with } \omega(k) = ck$$

Vitesse de propagation c

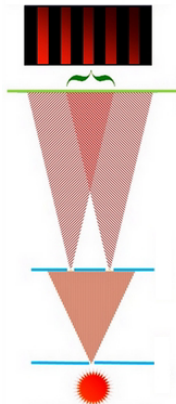


Champ électromagnétique

Onde e.m. monochromatique

= photon d'énergie précise

Vitesse de la lumière c



- Interaction électromagnétique par échange de photons "virtuels" ["ondes" avec $\omega(k) \neq ck$]
- A chaque particule son champ
 - les vagues (excitations) sont des particules
 - soit réelles (observables, $E^2 = (Mc^2)^2 + (pc)^2$)
 - soit virtuelles (intermédiaires de processus)

Ondes et particules

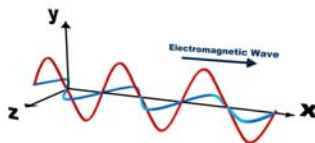


Mer

Vague (excitation)

$$e^{i(kx - \omega t)} \text{ with } \omega(k) = ck$$

Vitesse de propagation c



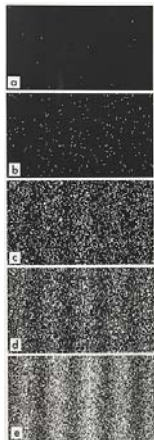
Champ électromagnétique

Onde e.m. monochromatique

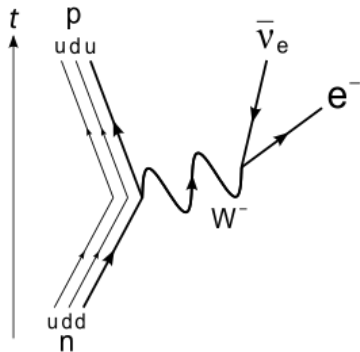
= photon d'énergie précise

Vitesse de la lumière c

- Interaction électromagnétique par échange de photons "virtuels" ["ondes" avec $\omega(k) \neq ck$]
- A chaque particule son champ
 - les vagues (excitations) sont des particules
 - soit réelles (observables, $E^2 = (Mc^2)^2 + (pc)^2$)
 - soit virtuelles (intermédiaires de processus)



Zoom sur l'interaction faible



	I	II	III	
Quarks	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	γ
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>	<i>g</i>
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	<i>Z</i>
	<i>e</i>	μ	τ	<i>W</i>
3 générations				Forces

- Portée très courte, pas d'état lié
- Désintégration, en particulier désintégration β
- ... via un boson W^\pm (virtuel) impliquant (u, d) et/ou (e, ν_e)
- ... ou leurs copies des autres familles
- Certains bosons médiateurs (W^\pm) chargés électriquement

Un drôle de mélange

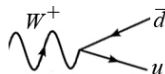
Principe de superposition: si $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ solutions acceptables,
solution plus générale $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, avec $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$

Un drôle de mélange

Principe de superposition: si $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ solutions acceptables, solution plus générale $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, avec $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$



$$Z^0 \rightarrow u\bar{u}, Z^0 \rightarrow d\bar{d}$$

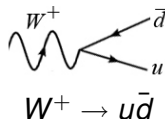
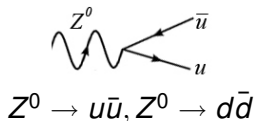


$$W^+ \rightarrow u\bar{d}$$

ou les deux autres familles, qui ont les mêmes propriétés...

Un drôle de mélange

Principe de superposition: si $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ solutions acceptables, solution plus générale $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, avec $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$



ou les deux autres familles, qui ont les mêmes propriétés...

En toute généralité $Z^0 \rightarrow d'\bar{d}'$ et $W^+ \rightarrow u'\bar{d}'$, avec d' combinaison linéaire des représentants des 3 familles (d, s, b)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}_{\text{interaction}} = V \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_{\text{propagation}} \quad V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

avec V matrice "de rotation" (unitaire)

pour conserver la normalisation des états

L'asymétrie entre matière et antimatière



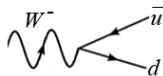
- Même rotation pour particule et antiparticule
⇒ la redéfinition s'élimine pour $Z^0 \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, c\bar{c}$
(idem pour γ et gluons)
- Mais pour $W^+ \rightarrow u\bar{d}$, la matrice V est bien là !
décrite par CKM, Cabibbo, Kobayashi, Maskawa

L'asymétrie entre matière et antimatière

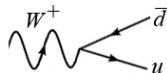


- Même rotation pour particule et antiparticule
⇒ la redéfinition s'élimine pour $Z^0 \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, c\bar{c}$
(idem pour γ et gluons)
- Mais pour $W^+ \rightarrow u\bar{d}$, la matrice V est bien là !
décrite par CKM, Cabibbo, Kobayashi, Maskawa

- V a une partie imaginaire, source d'asymétrie entre matière et antimatière (apparaît dans processus liés à l'interaction faible)



$$A(W^- \rightarrow \bar{u}d) \propto V_{ud},$$



$$A(W^+ \rightarrow u\bar{d}) \propto V_{ud}^*$$

Les neutrinos se mélangent eux aussi

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_{\text{interaction}} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}_{\text{propagation}}$$

U matrice décrite par **PMNS**,
Pontecorvo, **M**aki,
Nakagawa, **S**akata

Les neutrinos se mélangent eux aussi

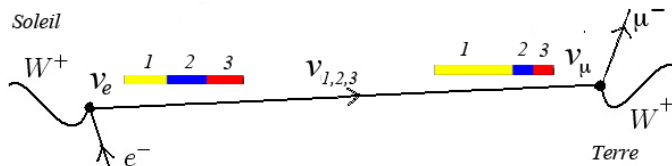
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_{\text{interaction}} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}_{\text{propagation}}$$

U matrice décrite par **PMNS**,
Pontecorvo, Maki,
Nakagawa, Sakata

Idem donc pour $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$, sauf que

- presque tous les quarks sont lourds et se désintègrent rapidement
- les neutrinos sont très légers et ne se désintègrent pas
- ν_e combinaison de 3 états ν_1, ν_2, ν_3 , de masses différentes, se propageant à des vitesses légèrement différentes
- la composition de l'état change sur de longues distances !

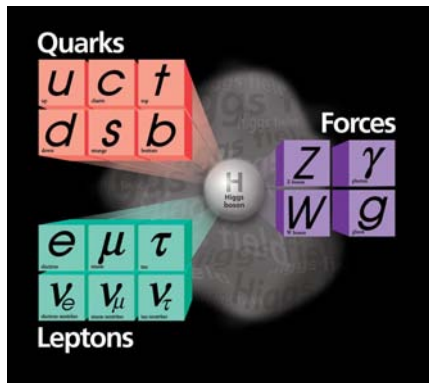
$|\nu_e\rangle \rightarrow c_e(L)|\nu_e\rangle + c_\mu(L)|\nu_\mu\rangle + c_\tau(L)|\nu_\tau\rangle$ **oscillation de neutrinos**



La dernière pièce du Modèle Standard

Vision actuelle de la physique des particules, très bien testée

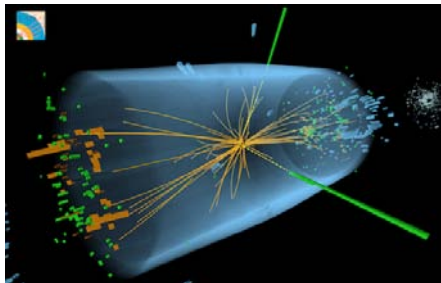
- depuis plus d'un siècle: électromagnétisme, électron, photon
- 1960-70: interaction forte, quarks
- 1990-2010: interaction faible, neutrinos



Un ingrédient
du Modèle Standard
encore à étudier

le boson de Higgs

- pour unifier forces électromagnétique et faible
- pour donner une masse aux particules



Une nouvelle particule a été observée. . .
et plus on l'étudie, plus elle ressemble au boson de Higgs !

De la masse oui, mais pas de toute la masse

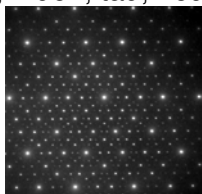
Boson de Higgs responsable de la masse des particules

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

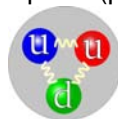
électron, muon, tau, neutrinos. . .



Masse = Higgs (100%)

Composite

3 quarks (proton, neutron. . .)
ou quark+antiquark (pion, kaon. . .)



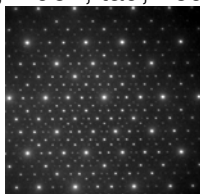
Masse des quarks (Higgs, $\sim 1\%$) +
E de "liaison" (inter. forte, $\sim 99\%$)

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Boson de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

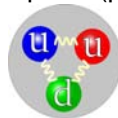
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

3 quarks (proton, neutron...)
ou quark+antiquark (pion, kaon...)



Masse des quarks (Higgs, $\sim 1\%$) +
E de "liaison" (inter. forte, $\sim 99\%$)

Energie de liaison : $M_{\text{composite}} = \sum m_{\text{constituants}} - E_{\text{liaison}}$

- Atome: $M_H = m_p + m_e - 13.6 \text{ eV}/c^2$ (1/100 000 000 du tout)
- Noyau: $M_D = m_p + m_n - 2.2 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$ (1/1000 du tout)
- Quark: $M_p = 2m_u + m_d + 0.93 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2$ (99% du tout)

Le mécanisme de Higgs

Propagation de la lumière dans un milieu

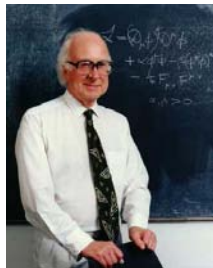
- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement !



Le mécanisme de Higgs

Propagation de la lumière dans un milieu

- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement !



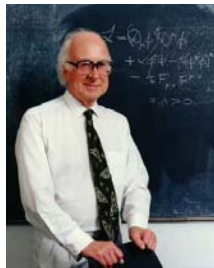
Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique): $m = 0$ pour toutes les particules
- Milieu (champ de Higgs) qui interagit et les "freine" plus ou moins
- ... ce qui les rend (pour nous) plus ou moins massives

Le mécanisme de Higgs

Propagation de la lumière dans un milieu

- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution du paradoxe: l'interaction de la lumière avec son environnement !

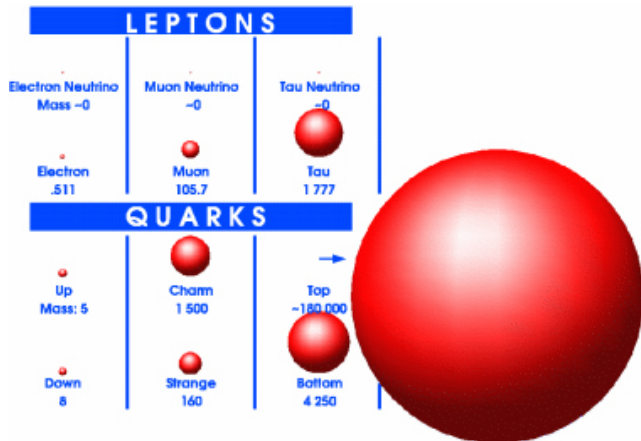


Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique): $m = 0$ pour toutes les particules
- Milieu (champ de Higgs) qui interagit et les "freine" plus ou moins
- ... ce qui les rend (pour nous) plus ou moins massives

Témoin de ce Mécanisme de Higgs dans le Modèle Standard :
une particule, le boson de Higgs (excitation du champ de Higgs)

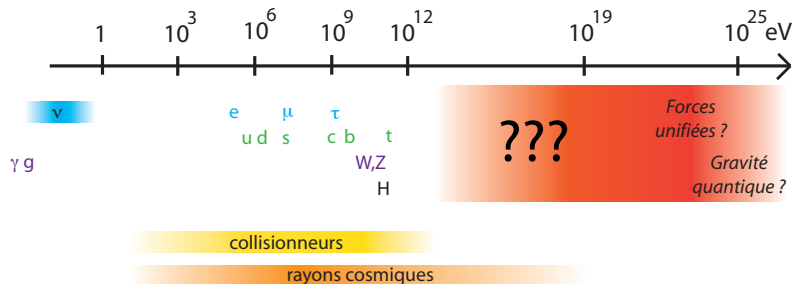
Des masses très hierarchiques



- Masses/interaction avec champ de Higgs a priori arbitraires
- Prennent des valeurs très différentes : pourquoi ?

Au-delà du Modèle Standard

- Masse et propriétés du boson de Higgs en parfait accord avec les attentes basées sur les expériences antérieures
- Chaque montée en énergie a donné lieu à des découvertes: sous-structure, nouvelle interaction, nouvelles particules



Modèle Standard très efficace, mais pas parfaitement satisfaisant

- Nombreux paramètres (19 !) fixés à des valeurs arbitraires
- Pourquoi trois familles, avec la même structure d'interactions ?
- Pourquoi trois interactions très différentes ? Et la gravitation ?

De nouveaux alliés

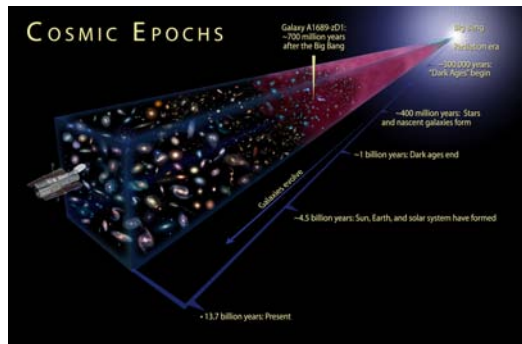
Dans les accélérateurs, produire de nouvelles particules

- production directe particule-antiparticule ($E = 2m_{\chi}c^2$) [haute E]
- processus avec ces particules comme intermédiaires [basse E]

De nouveaux alliés

Dans les accélérateurs, produire de nouvelles particules

- production directe particule-antiparticule ($E = 2m_X c^2$) [haute E]
- processus avec ces particules comme intermédiaires [basse E]



D'autres voies vers les très hautes énergies ?

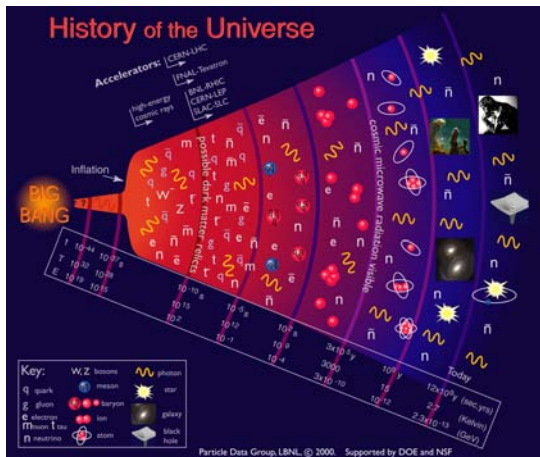
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

De nouveaux alliés

Dans les accélérateurs, produire de nouvelles particules

- production directe particule-antiparticule ($E = 2m_X c^2$) [haute E]
- processus avec ces particules comme intermédiaires [basse E]



D'autres voies vers les très hautes énergies ?

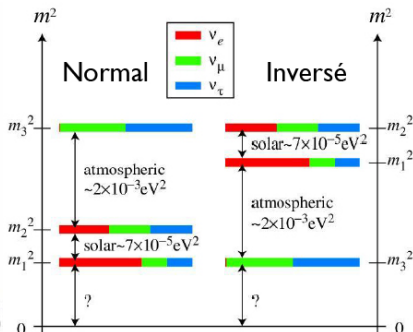
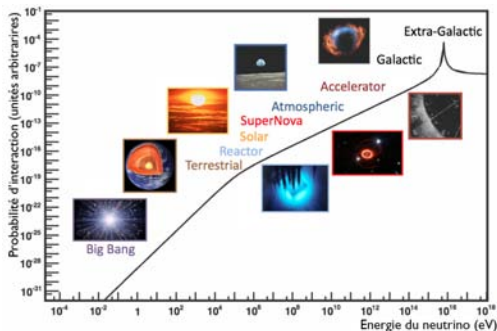
- phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
- histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

Neutrinos

Particules très mal connues du Modèle Standard

- Neutrinos venant de supernovae, Soleil, rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère, réacteurs nucléaires, accélérateurs
- Oscillation de neutrinos avec différents L : différences de masse très faibles, paramètres de mélange
- Echelle de masse ? Propre antiparticule ? Plus de 3 neutrinos ?



L'asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec matrice CKM



L'asymétrie matière-antimatière

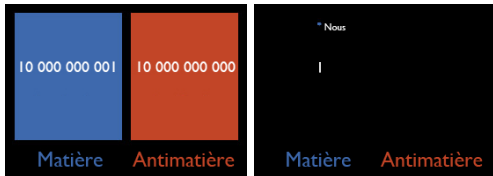
Collisionneurs

- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec matrice CKM



Cosmologie

- Big bang: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie beaucoup trop large pour CKM !



L'asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- Asymétries en accord avec matrice CKM

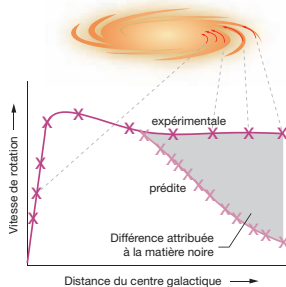


Cosmologie

- Big bang: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie beaucoup trop large pour CKM !

Nouveaux mécanismes d'asymétrie à des énergies plus élevées ?
[entre quarks et antiquarks, entre neutrinos et antineutrinos]

Matière noire et nouvelle physique



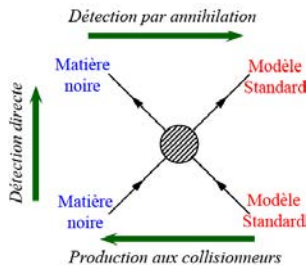
En se basant sur les lois de la gravitation, pas assez de matière visible

- Pour expliquer la dynamique des grandes structures (galaxies. . .)
- Pour décrire l'évolution de l'Univers (ray. de fond cosmologique)

Matière "noire"

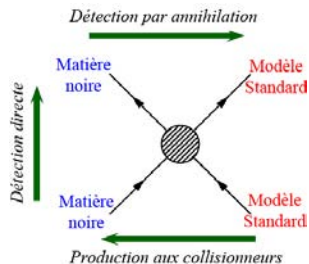
- lourde, stable, neutre, interagissant peu avec son environnement, hormis par interaction gravitationnelle (halos ? filaments ?)
- particule nouvelle χ , hors du Modèle Standard ?

Observer la matière noire



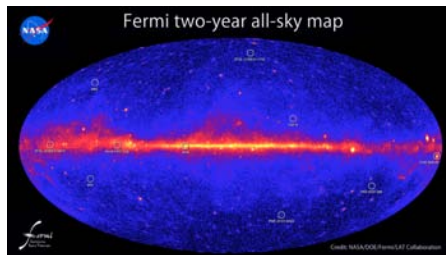
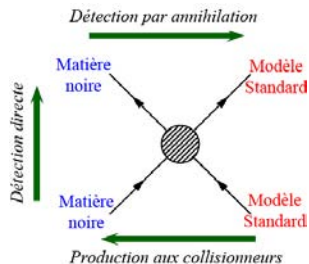
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)

Observer la matière noire



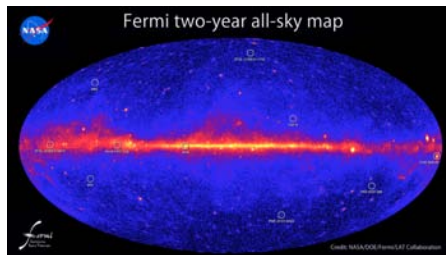
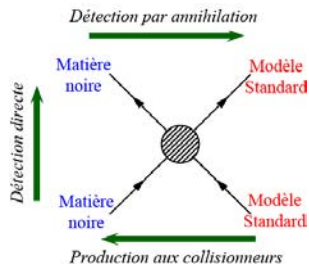
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)

Observer la matière noire



- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
 - ⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- Voir son annihilation en observant le ciel
 - ⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
 - ⇒ excès de rayons cosmiques de haute énergie

Observer la matière noire

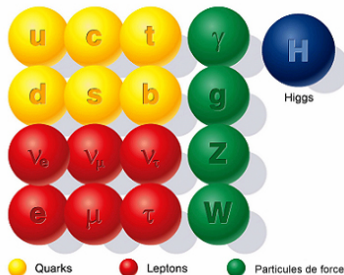


- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
 - ⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- Voir son annihilation en observant le ciel
 - ⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
 - ⇒ excès de rayons cosmiques de haute énergie
- Détecter sa présence par observations astronomiques
 - ⇒ déformation d’images par lentilles gravitationnelles

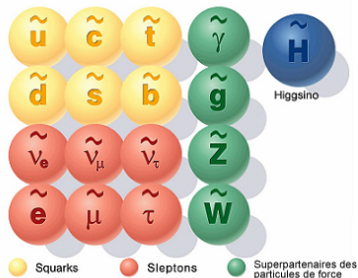
Au-delà du Modèle Standard

- De nouvelles symétries (limiter le nombre de paramètres ?),
- De nouvelles interactions (cadre plus cohérent ?),
- De nouvelles dimensions (accomoder la gravitation ?)...

Particules du Modèle Standard

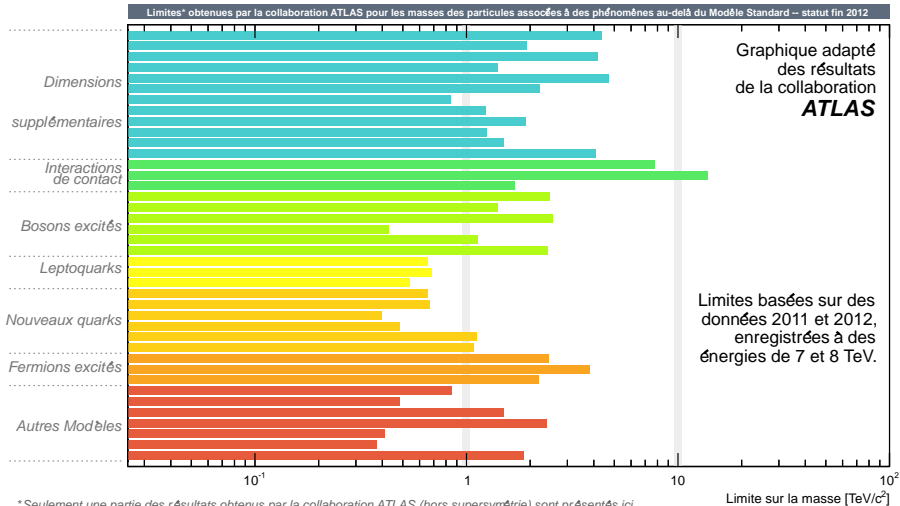


Particules supersymétriques



- Ne pas être en désaccord avec les observations antérieures
- Avoir des conséquences observables...

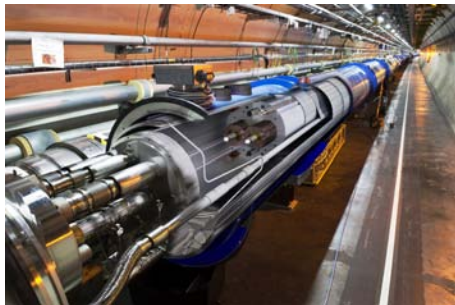
Ne rien voir, c'est déjà apprendre quelque chose



* Seulement une partie des résultats obtenus par la collaboration ATLAS (hors supersymétrie) sont présentés ici.

- Chercher des paires de nouvelles particules-antiparticules
- Collisions au LHC 8 → 14 TeV en 2014 – de nouvelles particules ?

En conclusion



Une partie des réponses se trouvera certainement au CERN,
pour les expérimentateurs comme pour les théoriciens !

Élémentaire



<http://elementaire.lal.in2p3.fr/>

Passeport pour les deux infinis



<http://www.passeport2i.fr/>