

Physique des particules (3)

Sébastien Descotes-Genon and Stéphane Monteil

descotes@th.u-psud.fr, monteil@in2p3.fr

Laboratoire de Physique Théorique
CNRS & Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Orsay

Laboratoire de Physique de Clermont,
IN2P3-CNRS, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand

French Teacher Programme, CERN 23/10/18



Le Modèle Standard

- ▶ **3 familles** de fermions (spin $1/2$) de masse croissante
 - ▶ 1 lepton chargé (e, μ, τ , charge électrique -1)
 - ▶ 1 lepton neutre (neutrinos, charge 0)
 - ▶ 1 quark de charge $+2/3$
 - ▶ 1 quark de charge $-1/3$

Le Modèle Standard

- ▶ **3 familles** de fermions (spin $1/2$) de masse croissante
 - ▶ 1 lepton chargé (e, μ, τ , charge électrique -1)
 - ▶ 1 lepton neutre (neutrinos, charge 0)
 - ▶ 1 quark de charge $+2/3$
 - ▶ 1 quark de charge $-1/3$
- ▶ **3 interactions** transportées par bosons médiateurs (spin 1)
 - ▶ électromagnétisme (photon) : toutes part. chargée électriquement
 - ▶ interaction forte (gluons) : tous les quarks
 - ▶ interaction faible (bosons W^\pm et Z) : toutes les particules, sauf gluons

Le Modèle Standard

- ▶ **3 familles** de fermions (spin $1/2$) de masse croissante
 - ▶ 1 lepton chargé (e, μ, τ , charge électrique -1)
 - ▶ 1 lepton neutre (neutrinos, charge 0)
 - ▶ 1 quark de charge $+2/3$
 - ▶ 1 quark de charge $-1/3$
- ▶ **3 interactions** transportées par bosons médiateurs (spin 1)
 - ▶ électromagnétisme (photon) : toutes part. chargée électriquement
 - ▶ interaction forte (gluons) : tous les quarks
 - ▶ interaction faible (bosons W^\pm et Z) : toutes les particules, sauf gluons
- ▶ **1 boson H** (spin 0) témoin du mécanisme de Higgs, séparant électromagnétisme/faible et donnant masse aux particules élém.

Le Modèle Standard

- ▶ **3 familles** de fermions (spin $1/2$) de masse croissante
 - ▶ 1 lepton chargé (e, μ, τ , charge électrique -1)
 - ▶ 1 lepton neutre (neutrinos, charge 0)
 - ▶ 1 quark de charge $+2/3$
 - ▶ 1 quark de charge $-1/3$
- ▶ **3 interactions** transportées par bosons médiateurs (spin 1)
 - ▶ électromagnétisme (photon) : toutes part. chargée électriquement
 - ▶ interaction forte (gluons) : tous les quarks
 - ▶ interaction faible (bosons W^\pm et Z) : toutes les particules, sauf gluons
- ▶ **1 boson H** (spin 0) témoin du mécanisme de Higgs, séparant électromagnétisme/faible et donnant masse aux particules élém.
- ▶ à chaque particule, **antiparticule** de même masse et charges opposées

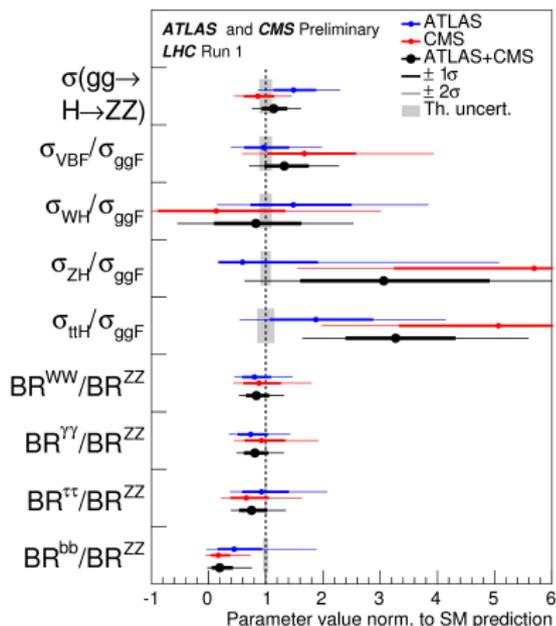
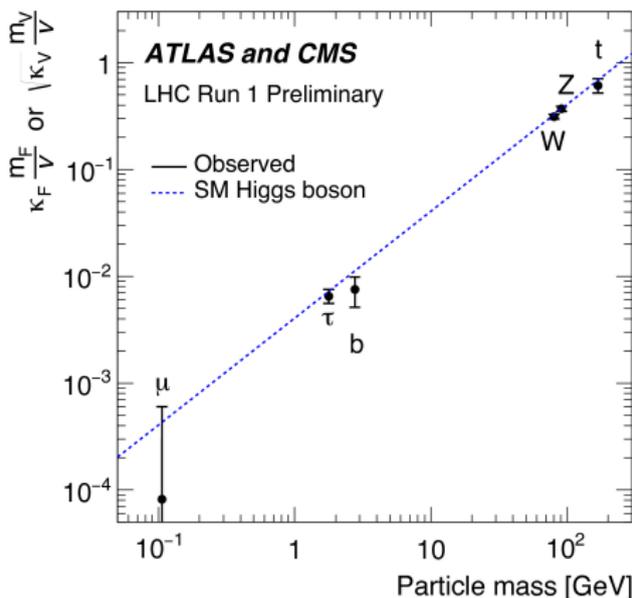
Le Modèle Standard

- ▶ **3 familles** de fermions (spin $1/2$) de masse croissante
 - ▶ 1 lepton chargé (e, μ, τ , charge électrique -1)
 - ▶ 1 lepton neutre (neutrinos, charge 0)
 - ▶ 1 quark de charge $+2/3$
 - ▶ 1 quark de charge $-1/3$
- ▶ **3 interactions** transportées par bosons médiateurs (spin 1)
 - ▶ électromagnétisme (photon) : toutes part. chargée électriquement
 - ▶ interaction forte (gluons) : tous les quarks
 - ▶ interaction faible (bosons W^\pm et Z) : toutes les particules, sauf gluons
- ▶ **1 boson H** (spin 0) témoin du mécanisme de Higgs, séparant électromagnétisme/faible et donnant masse aux particules élém.
- ▶ à chaque particule, **antiparticule** de même masse et charges opposées
- ▶ particules lourdes instables, se désintégrant en particules plus légères
- ▶ décrit par combinaison de relativité restreinte et de mécanique quantique, décrivant la création et l'annihilation de particules

Le Modèle Standard

- ▶ **3 familles** de fermions (spin $1/2$) de masse croissante
 - ▶ 1 lepton chargé (e, μ, τ , charge électrique -1)
 - ▶ 1 lepton neutre (neutrinos, charge 0)
 - ▶ 1 quark de charge $+2/3$
 - ▶ 1 quark de charge $-1/3$
- ▶ **3 interactions** transportées par bosons médiateurs (spin 1)
 - ▶ électromagnétisme (photon) : toutes part. chargée électriquement
 - ▶ interaction forte (gluons) : tous les quarks
 - ▶ interaction faible (bosons W^\pm et Z) : toutes les particules, sauf gluons
- ▶ **1 boson H** (spin 0) témoin du mécanisme de Higgs, séparant électromagnétisme/faible et donnant masse aux particules élém.
- ▶ à chaque particule, **antiparticule** de même masse et charges opposées
- ▶ particules lourdes instables, se désintégrant en particules plus légères
- ▶ décrit par combinaison de relativité restreinte et de mécanique quantique, décrivant la création et l'annihilation de particules
- ▶ très bien testé jusqu'à présent en collisionneurs (excellent accord théorie-expérience)

Toujours en test pour le boson H

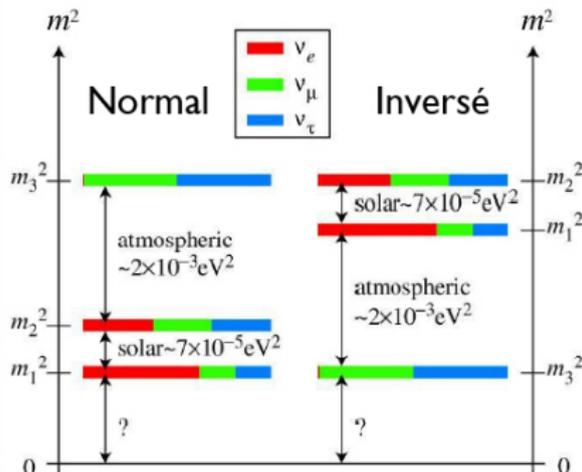
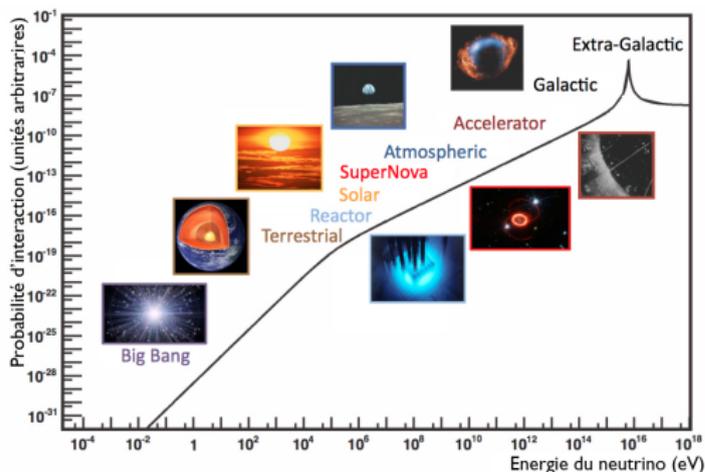


- ▶ Géométrie des désintégrations confirme H scalaire
- ▶ Couplages du boson H aux autres particules prop. à la masse
- ▶ Production (σ) et désintégration (Br) OK

Toujours en test pour les neutrinos

Particules encore mal connues du Modèle Standard

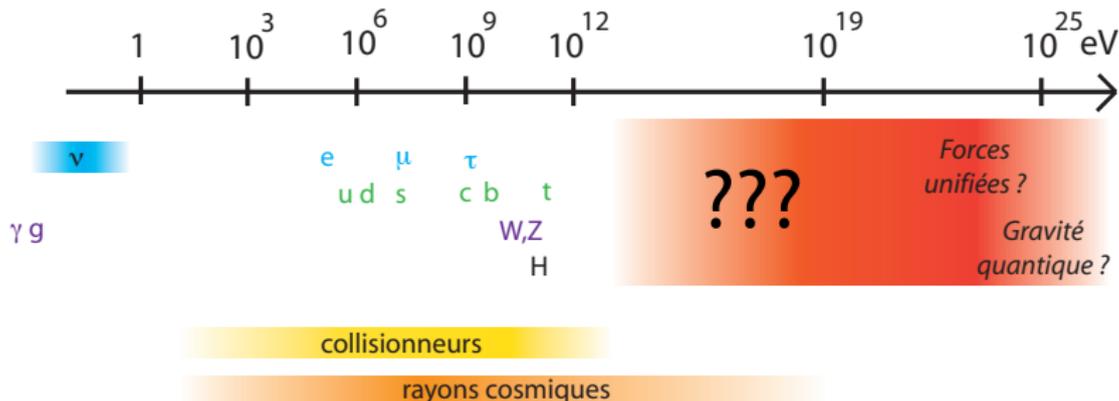
- ▶ Neutrinos venant de supernovae, Soleil, rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère, réacteurs nucléaires, accélérateurs
- ▶ Masse des neutrinos ? Sont-ils leurs propres antiparticules ? Asymétrie entre particule et antiparticule ? Y a-t-il plus de 3 ν ?
- ▶ De nombreuses expériences en cours pour répondre à ces questions



Les limites du Modèle Standard

Modèle Standard reproduit très bien l'expérience (y compris pour le boson H), mais pas parfaitement satisfaisant

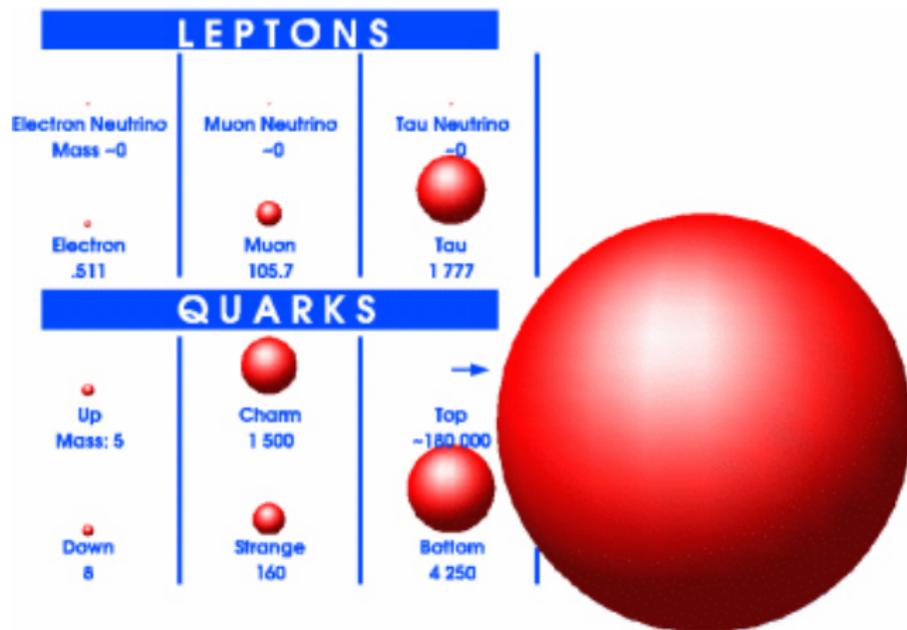
- ▶ Nombreux paramètres (19 !) fixés à des valeurs arbitraires
- ▶ Pourquoi trois familles, avec la même structure d'interactions ?
- ▶ Pourquoi trois interactions très différentes ? Et la gravitation ?



Chaque montée en énergie a donné lieu à des découvertes:

sous-structure, nouvelle interaction, nouvelles particules

L'énigme de la masse

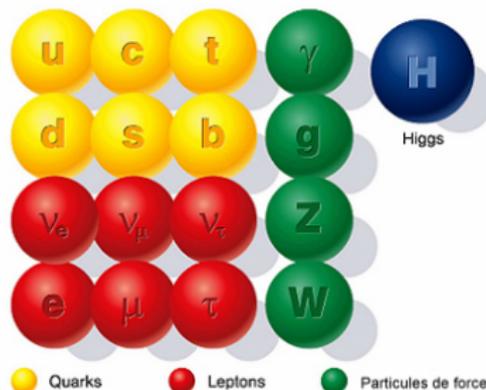


- ▶ Masses viennent de l'interaction avec champ de Higgs
- ▶ Prennent des valeurs très différentes : pourquoi ?

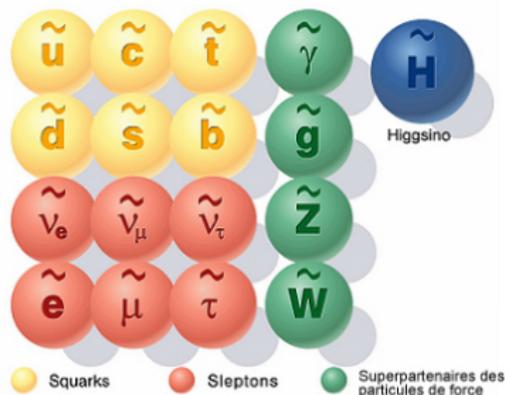
Au-delà du Modèle Standard

- ▶ 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

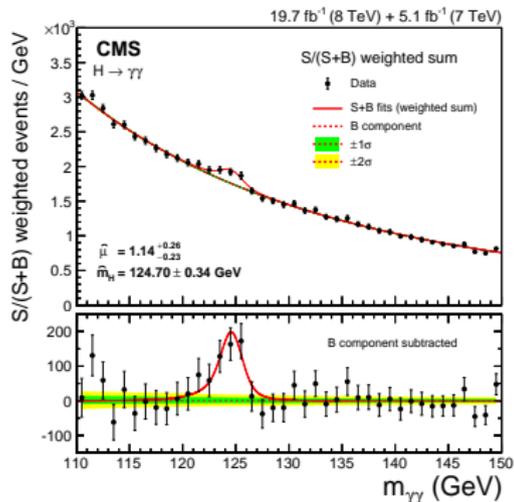


- ▶ Ne pas être en désaccord avec les observations antérieures
- ▶ Avoir des conséquences observables...

Deux voies pour la Nouvelle Physique

Relativiste $E = mc^2$

Preuve "directe" (ATLAS/CMS)

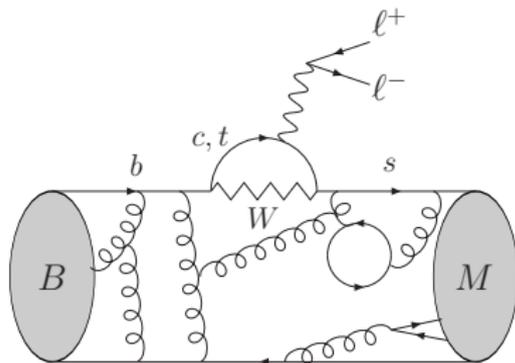


Collisions avec assez d'énergie pour produire des particules au-delà du Modèle Standard

Haute E /processus "fréquents"

Quantique: $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

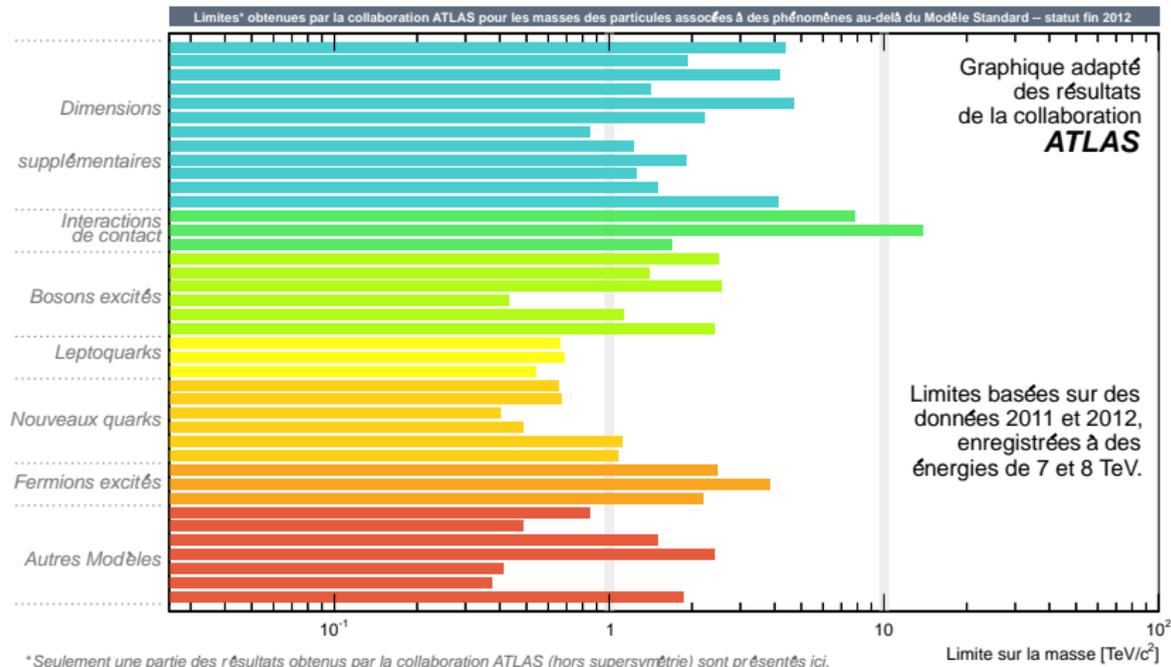
Preuve "indirecte" (LHCb, Belle-II)



Petites deviations venant d'états intermédiaires avec des particules lourdes

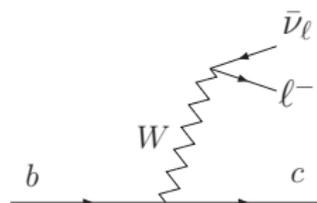
Basse E /processus "rares"

Voie relativiste: ne rien voir, c'est quelque chose !



- ▶ Collisions au LHC 8 2011-2012 → 13 TeV à l'heure actuelle
- ▶ Mieux mesurer les propriétés des particules du Modèle Standard (top, boson H , bosons W et Z)
- ▶ Chercher (les effets) de part massives (pic de masse, E manquante)

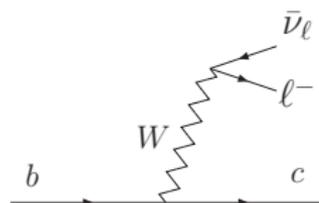
Voie quantique: des désintégrations rares



Désintégration d'un quark en un autre, plus léger (de saveur différente)

- ▶ interaction faible via un boson W
- ▶ $d \rightarrow ue^- \bar{\nu}_e$ (désintégration β du n)
- ▶ aussi autres familles $b \rightarrow ce^- \bar{\nu}_e$
- ▶ 2 quarks de **charges électriques** \neq

Voie quantique: des désintégrations rares

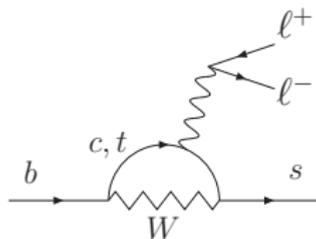


Désintégration d'un quark en un autre, plus léger (de saveur différente)

- ▶ interaction faible via un boson W
- ▶ $d \rightarrow ue^- \bar{\nu}_e$ (désintégration β du n)
- ▶ aussi autres familles $b \rightarrow ce^- \bar{\nu}_e$
- ▶ 2 quarks de **charges électriques** \neq

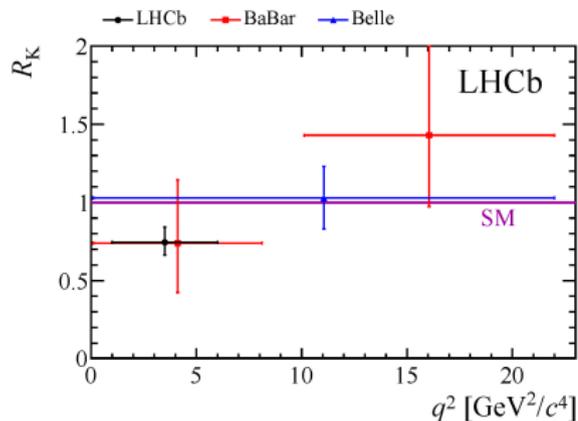
D'autres désintégrations plus **rare**s

- ▶ $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ ou $b \rightarrow se^+e^-$ ($\ell = e, \mu$)
- ▶ **même charge électrique** des 2 quarks
- ▶ états intermédiaires compliqués, lourds, accessibles grâce à Mécanique Quantique
- ▶ compétition entre particules du Modèle Standard et nouvelle physique ?
- ▶ difficile: interact forte, faible, em + NP (?)



Voie quantique: des déviations qui s'accroissent

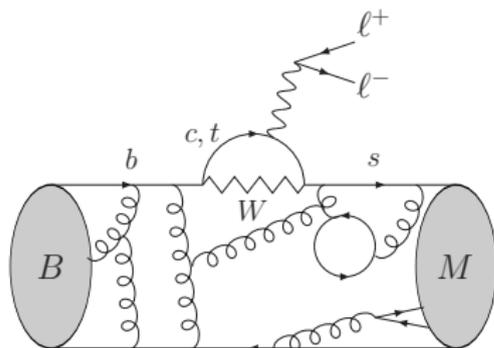
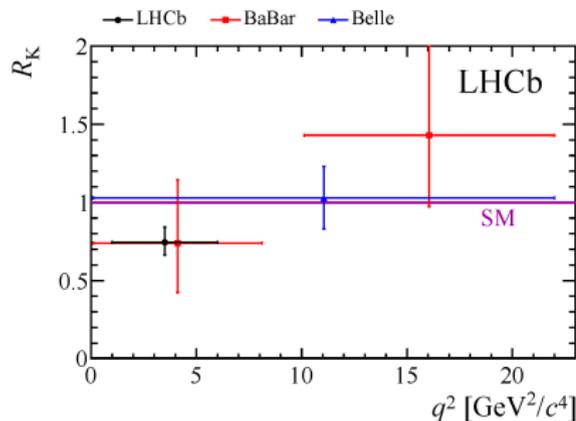
- ▶ Depuis $\simeq 2010$, étude des désintégrations $b \rightarrow s\ell\ell$ et $b \rightarrow c\ell\nu$ ($\ell = e, \mu, \tau$), avec **déviations** face au MS (Babar, Belle, LHCb...)



- ▶ Par ex, $B \rightarrow K\mu\mu$ et $B \rightarrow Kee$ différentes proba de désintégration

Voie quantique: des déviations qui s'accumulent

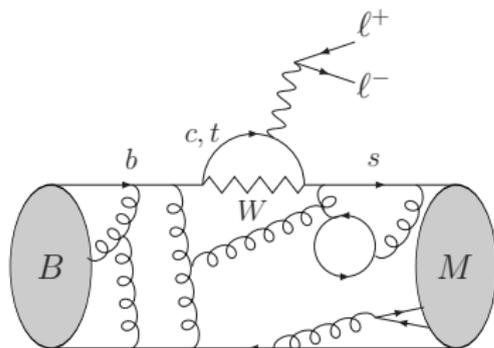
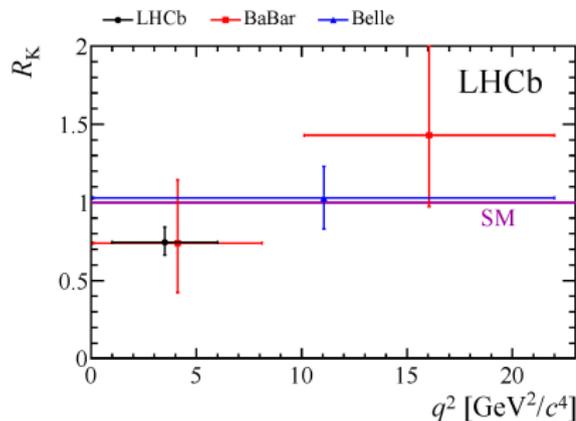
- ▶ Depuis $\simeq 2010$, étude des désintégrations $b \rightarrow s\ell\ell$ et $b \rightarrow c\ell\nu$ ($\ell = e, \mu, \tau$), avec **déviations** face au MS (Babar, Belle, LHCb...)



- ▶ Par ex, $B \rightarrow K\mu\mu$ et $B \rightarrow Kee$ différentes proba de désintégration
- ▶ Modèle Standard: e et μ même sensibilité aux 3 interactions (slt masses \neq), et partie QCD identique, donc même proba !

Voie quantique: des déviations qui s'accumulent

- ▶ Depuis $\simeq 2010$, étude des désintégrations $b \rightarrow s\ell\ell$ et $b \rightarrow c\ell\nu$ ($\ell = e, \mu, \tau$), avec **déviations** face au MS (Babar, Belle, LHCb...)



- ▶ Par ex, $B \rightarrow K\mu\mu$ et $B \rightarrow Kee$ différentes proba de désintégration
- ▶ Modèle Standard: e et μ même sensibilité aux 3 interactions (slt masses \neq), et partie QCD identique, donc même proba !
- ▶ Problèmes similaires avec τ versus e, μ pour $b \rightarrow c\ell\nu$
- ▶ Actuellement étudiées attentivement pour comprendre et confirmer cette **violation de l'universalité leptonique**

Connexions cosmiques

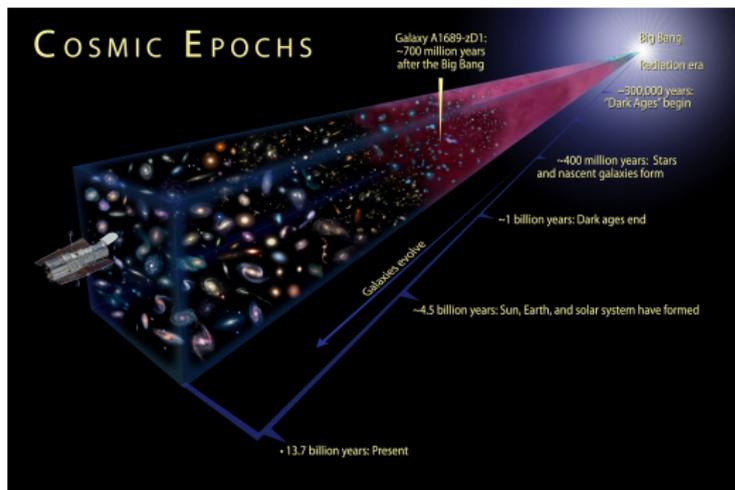
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- ▶ production directe particule-antiparticule ($E = 2m_{\chi}c^2$) [haute E]
- ▶ effets indirects dans des processus déjà étudiés [basse E]

Connexions cosmiques

Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- ▶ production directe particule-antiparticule ($E = 2m_{\chi}c^2$) [haute E]
- ▶ effets indirects dans des processus déjà étudiés [basse E]

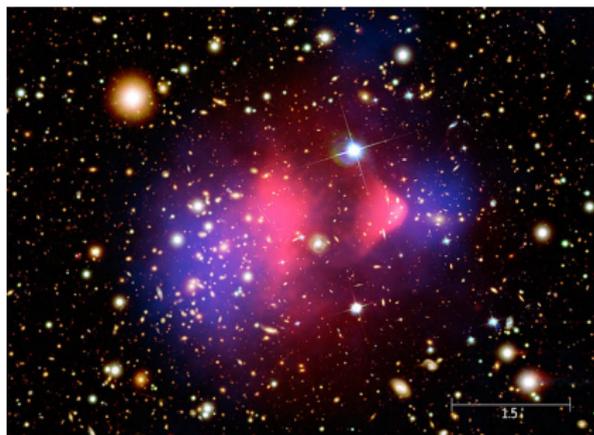
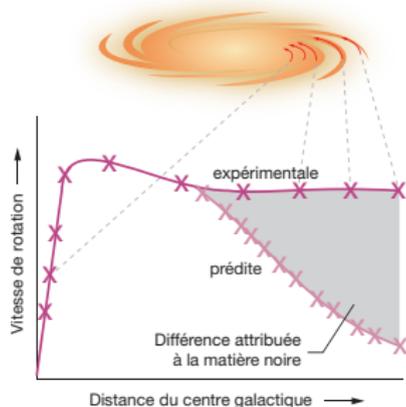


D'autres voies vers les très hautes énergies ?

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

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

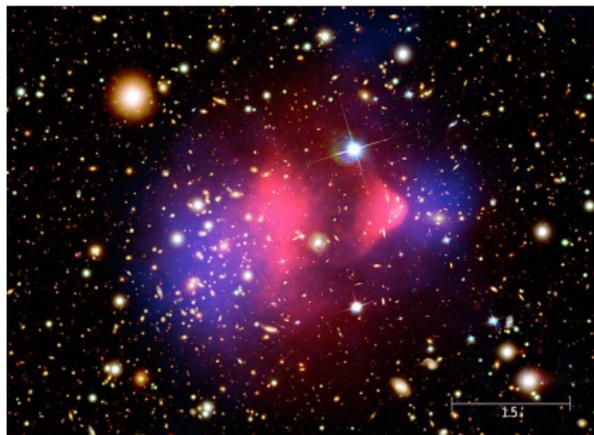
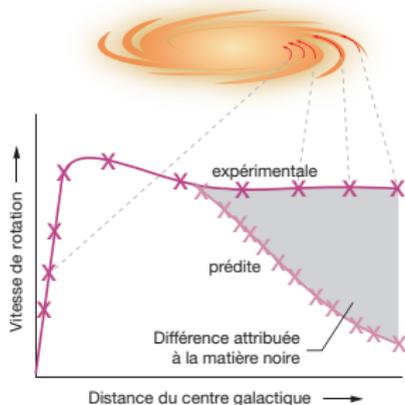
La matière noire



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)

La matière noire



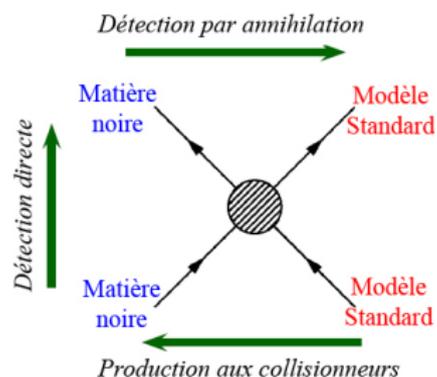
En se basant sur les lois de la gravitation, pas assez de matière visible

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

Matière "noire"

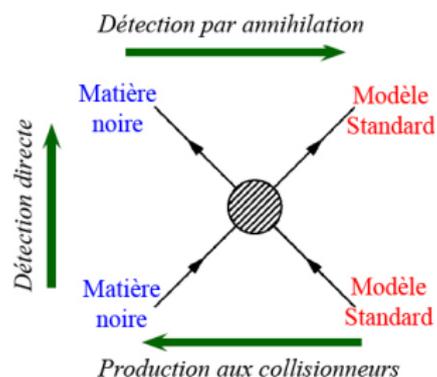
- ▶ lourde, stable, neutre, interagissant peu avec son environnement, hormis par interaction gravitationnelle (halos ? filaments ?)
- ▶ particule nouvelle χ , hors du Modèle Standard ?

Observer la matière noire



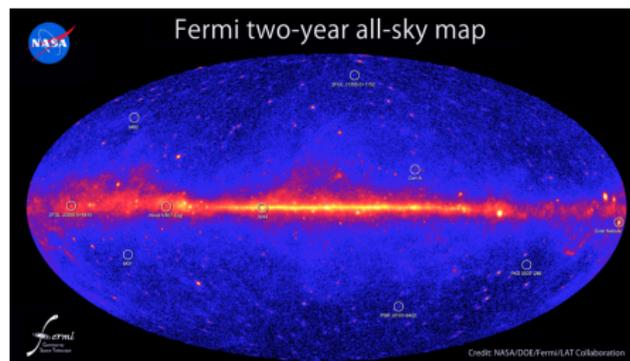
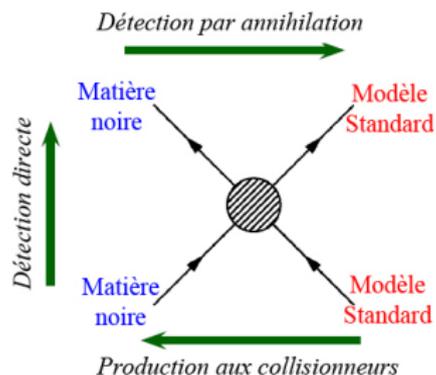
- ▶ La produire en accélérateur (si assez “légère”)

Observer la matière noire



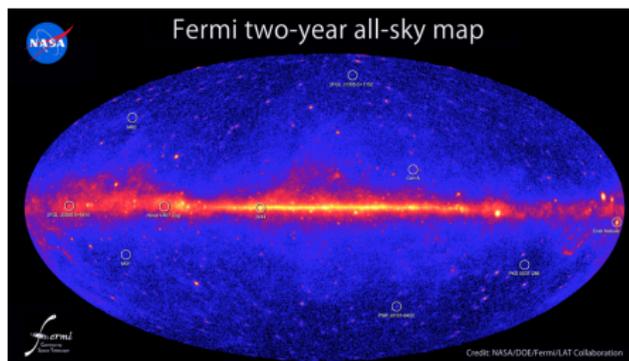
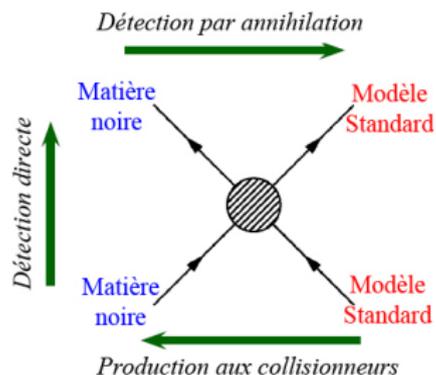
- ▶ La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- ▶ La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)

Observer la matière noire



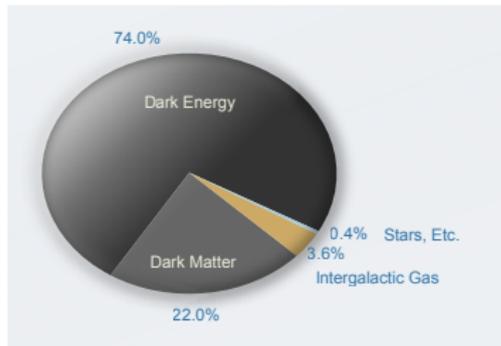
- ▶ La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- ▶ La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- ▶ Voir son annihilation en observant le ciel
⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
⇒ excès de rayons cosmiques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

Observer la matière noire



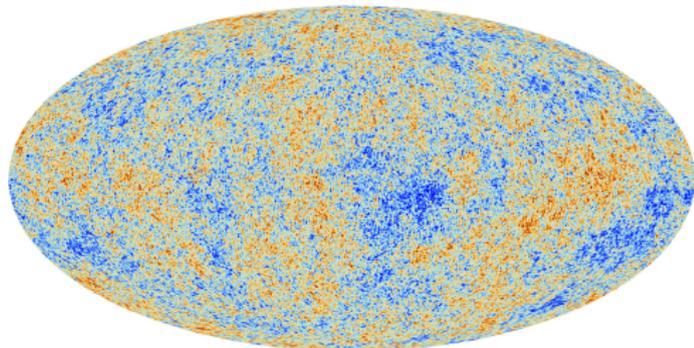
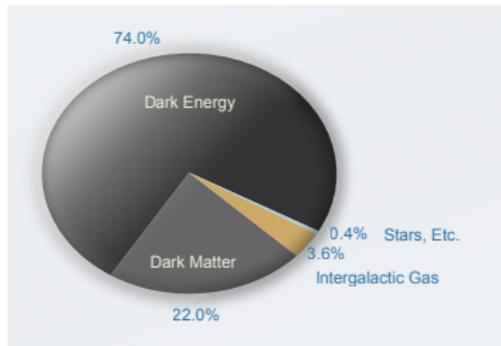
- ▶ La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- ▶ La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- ▶ Voir son annihilation en observant le ciel
⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
⇒ excès de rayons cosmiques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

L'énergie noire



- ▶ Relativité Générale:
gravité \leftrightarrow courbure Univers \leftrightarrow contenu énergétique
- ▶ Trois composants (matière, rayonnement, énergie noire) caractérisées par relation entre densité et pression

L'énergie noire

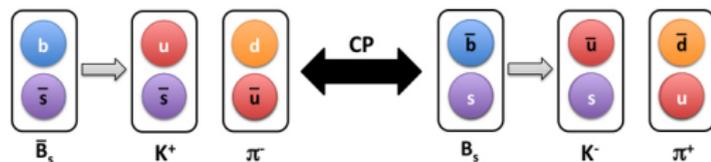


- ▶ Relativité Générale:
gravité \leftrightarrow courbure Univers \leftrightarrow contenu énergétique
- ▶ Trois composants (matière, rayonnement, énergie noire) caractérisées par relation entre densité et pression
- ▶ Plusieurs indications pour l'énergie noire: accélération de l'expansion de l'Univers, ray fond cosmologique, grandes structures
- ▶ "Pure" Relativité Générale: pas de contrepartie en physique des particules (espace-temps plat, pas de gravité)

Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

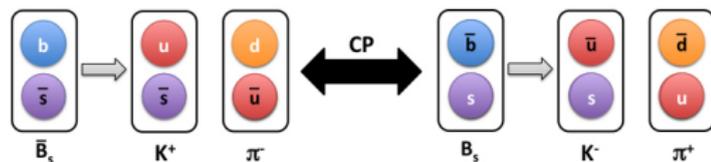
- ▶ Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- ▶ Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



Asymétrie matière-antimatière

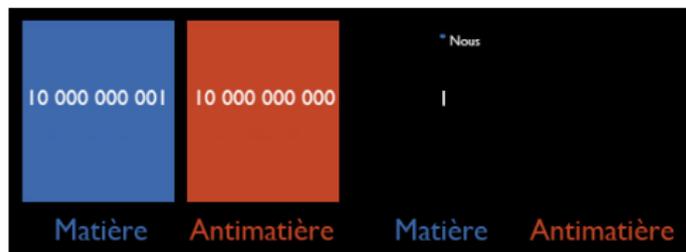
Collisionneurs

- ▶ Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- ▶ Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



Cosmologie

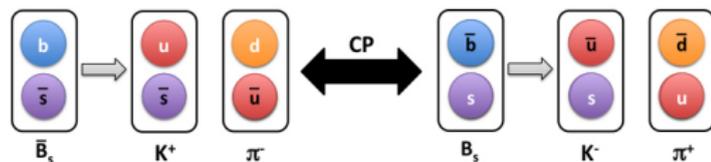
- ▶ Big bang: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule
- ▶ Disparition de l'un au détriment de l'autre
- ▶ Asymétrie bien trop large pour Modèle Standard !



Asymétrie matière-antimatière

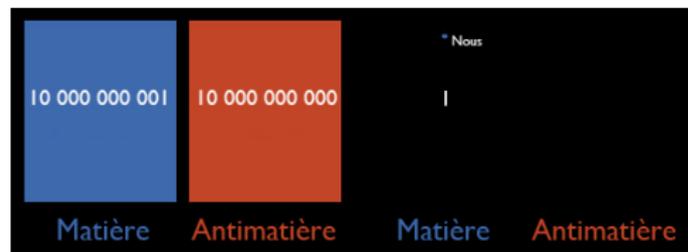
Collisionneurs

- ▶ Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- ▶ Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



Cosmologie

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



Nouveaux mécanismes d'asymétrie à des énergies plus élevées ?

Comment tester toutes ces idées
en utilisant les outils
de la physique des particules ?