

# Physique des particules (3)

Sébastien Descotes-Genon and Stéphane Monteil

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

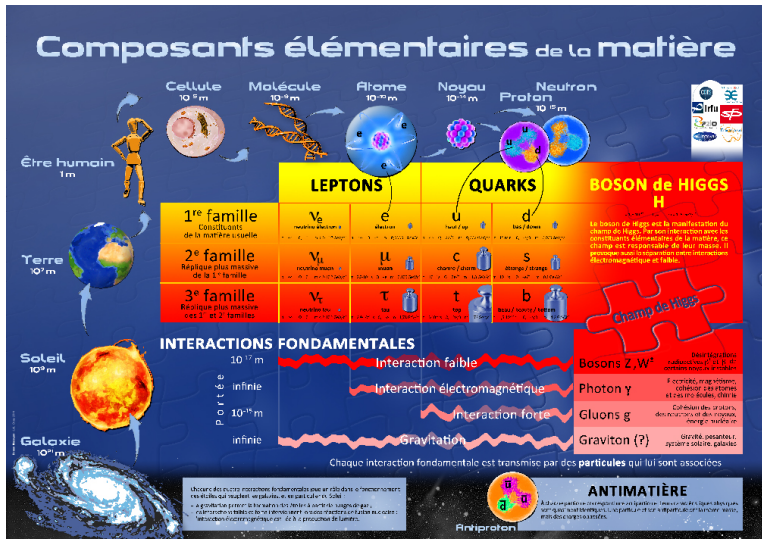
Laboratoire de Physique Théorique  
CNRS & Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Orsay

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

French Teacher Programme, CERN 23/10/18



# Le Modèle Standard



# Le Modèle Standard

- ▶ **3 familles** de fermions (spin  $1/2$ ) de masse croissante
  - ▶ 1 lepton chargé ( $e, \mu, \tau$ , 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 ( $e, \mu, \tau$ , 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 ( $e, \mu, \tau$ , 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 ( $e, \mu, \tau$ , 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

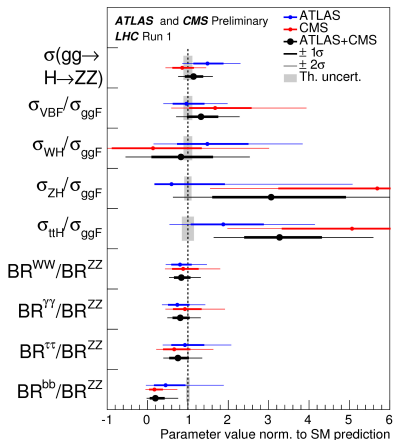
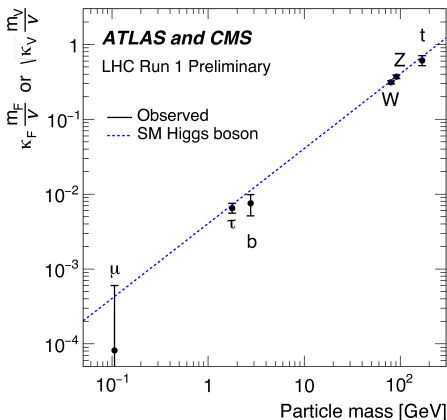
- ▶ **3 familles** de fermions (spin  $1/2$ ) de masse croissante
  - ▶ 1 lepton chargé ( $e, \mu, \tau$ , charge électrique  $-1$ )
  - ▶ 1 lepton neutre (neutrinos, charge  $0$ )
  - ▶ 1 quark de charge  $+2/3$
  - ▶ 1 quark de charge  $-1/3$
- ▶ **3 interactions** transportées par bosons médiateurs (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 ( $e, \mu, \tau$ , 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 $H$

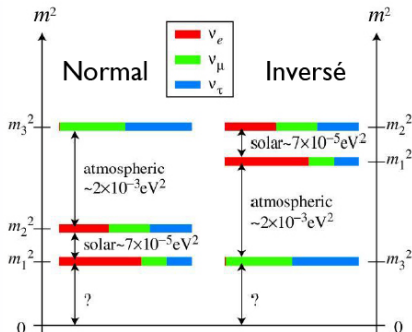
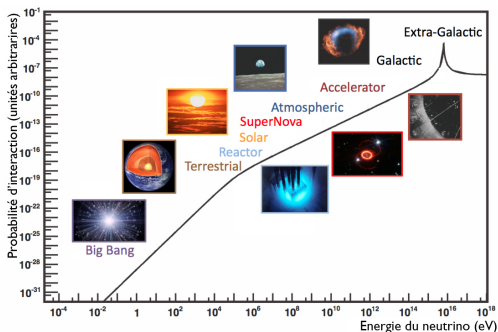


- ▶ Géométrie des désintégrations confirme  $H$  scalaire
- ▶ Couplages du boson  $H$  aux autres particules prop. à la masse
- ▶ Production ( $\sigma$ ) et désintégration ( $Br$ ) OK

# Toujours en test pour les neutrinos

## Particules encore mal connues du Modèle Standard

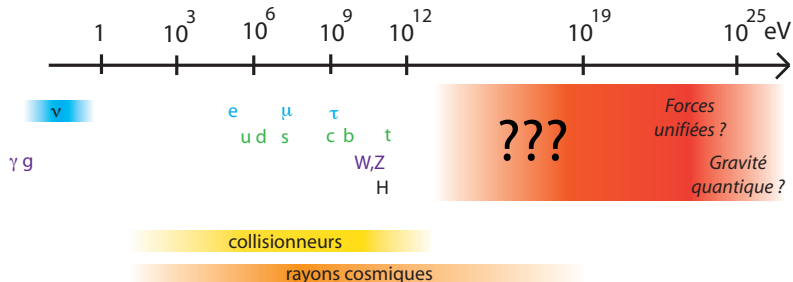
- ▶ Neutrinos venant de supernovae, Soleil, rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère, réacteurs nucléaires, accélérateurs
- ▶ Masse des neutrinos ? Sont-ils leurs propres antiparticules ? Asymétrie entre particule et antiparticule ? Y a-t-il plus de 3  $\nu$  ?
- ▶ De nombreuses expériences en cours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

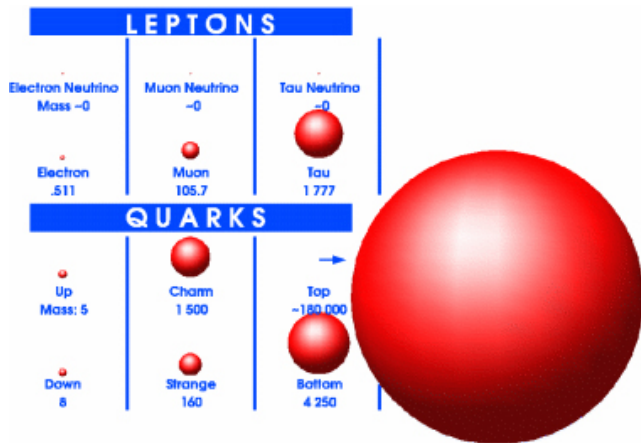
- ▶ Nombreux paramètres (19 !) fixés à des valeurs arbitraires
- ▶ Pourquoi trois familles, avec la même structure d'interactions ?
- ▶ Pourquoi trois interactions très différentes ? Et la gravitation ?



Chaque montée en énergie a donné lieu à des découvertes:

sous-structure, nouvelle interaction, nouvelles particules

# L'énigme de la masse

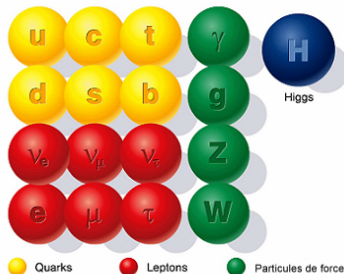


- ▶ Masses viennent de l'interaction avec champ de Higgs
- ▶ Prennent des valeurs très différentes : pourquoi ?

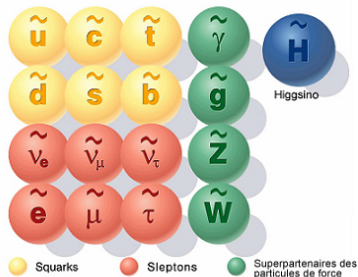
# Au-delà du Modèle Standard

- ▶ 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

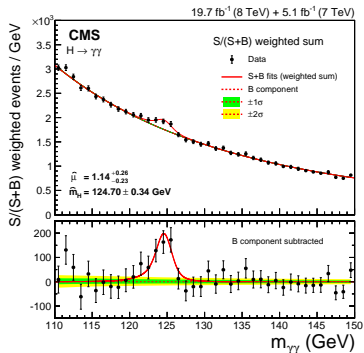


- ▶ Ne pas être en désaccord avec les observations antérieures
- ▶ Avoir des conséquences observables...

# Deux voies pour la Nouvelle Physique

Relativiste  $E = mc^2$

Preuve "directe" (ATLAS/CMS)

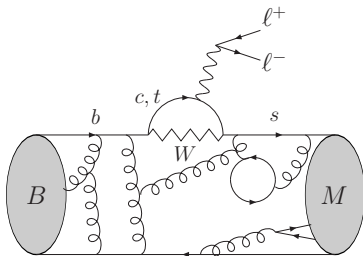


Collisions avec assez d'énergie pour produire des particules au-delà du Modèle Standard

Haute  $E$ /processus "fréquents"

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

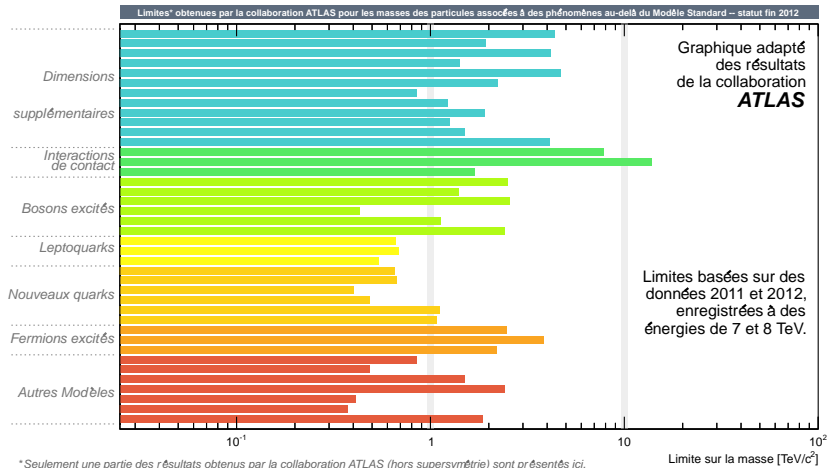
Preuve "indirecte" (LHCb, Belle-II)



Petites deviations venant d'états intermédiaires avec des particules lourdes

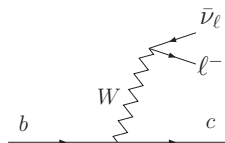
Basse  $E$ /processus "rares"

# 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

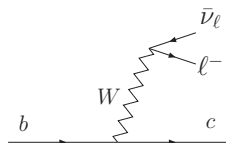


**Désintégration** d'un quark en un autre, plus léger (de saveur différente)

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



# Voie quantique: des désintégrations rares

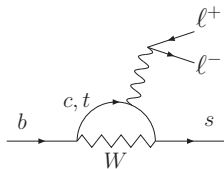


**Désintégration** d'un quark en un autre, plus léger (de saveur différente)

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

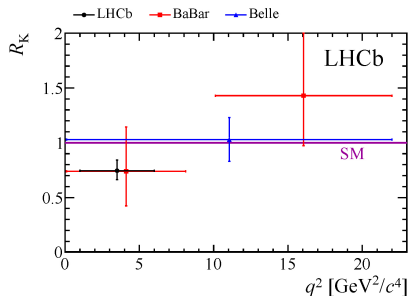
D'autres désintégrations plus **rare**s

- ▶  $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$  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

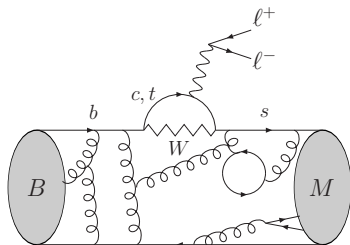
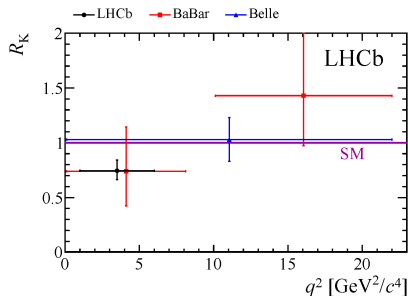
- ▶ Depuis  $\simeq 2010$ , étude des désintégrations  $b \rightarrow s\ell\ell$  et  $b \rightarrow c\ell\nu$  ( $\ell = e, \mu, \tau$ ), avec **déviations** face au MS (Babar, Belle, LHCb...)



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

# Voie quantique: des déviations qui s'accumulent

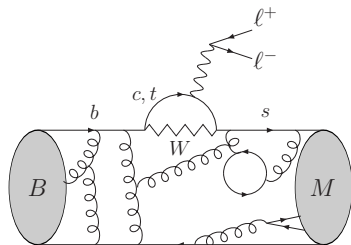
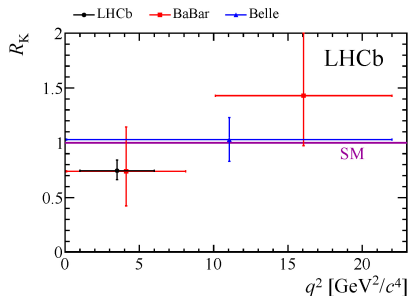
- ▶ Depuis  $\simeq 2010$ , étude des désintégrations  $b \rightarrow s\ell\ell$  et  $b \rightarrow c\ell\nu$  ( $\ell = e, \mu, \tau$ ), avec **déviations** face au MS (Babar, Belle, LHCb...)



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

# Connexions cosmiques

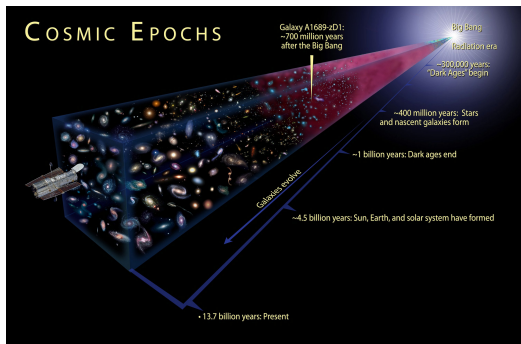
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- ▶ 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  $E$ ]

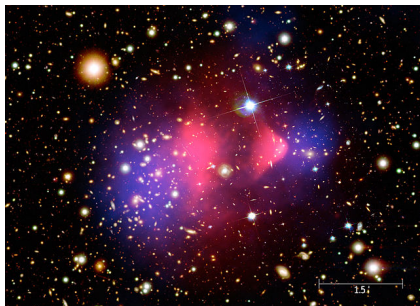
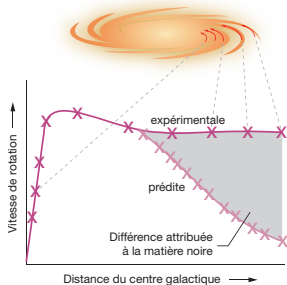


D'autres voies vers les très hautes énergies ?

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

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

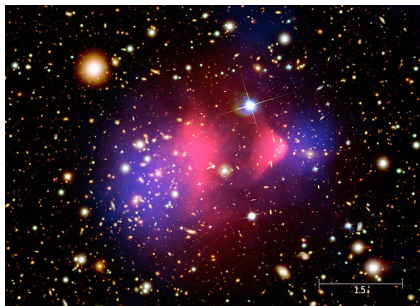
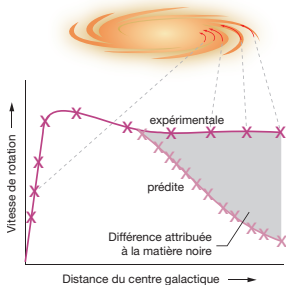
# La matière noire



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

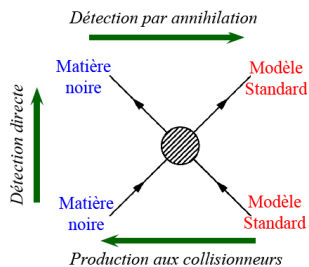
- ▶ Pour expliquer la dynamique des grandes structures (galaxies. . .)
- ▶ Pour décrire l'évolution de l'Univers (ray. de fond cosmologique)

## Matière "noire"

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

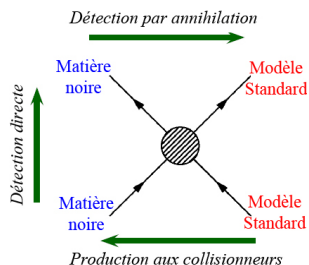


# Observer la matière noire



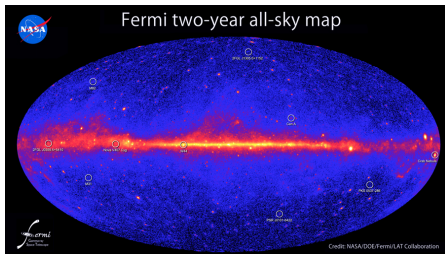
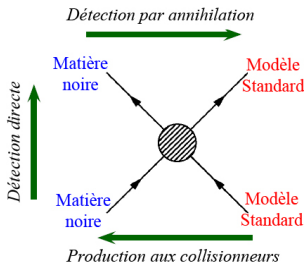
- ▶ La produire en accélérateur (si assez "légère")

# Observer la matière noire



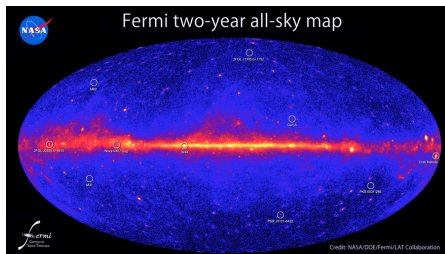
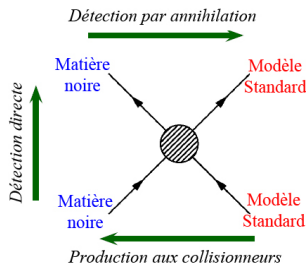
- ▶ La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- ▶ La détecter lors de son passage sur Terre  
⇒ interaction avec noyau  $\chi + X \rightarrow \chi + X$  (recul du noyau)

# Observer la matière noire



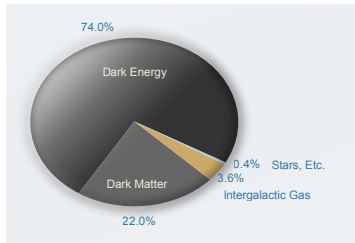
- ▶ La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- ▶ La détecter lors de son passage sur Terre  
⇒ interaction avec noyau  $\chi + X \rightarrow \chi + X$  (recul du noyau)
- ▶ Voir son annihilation en observant le ciel  
⇒ rayons gamma monochromatiques ( $E_\gamma = M_\chi c^2$ )  
⇒ excès de rayons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

# Observer la matière noire



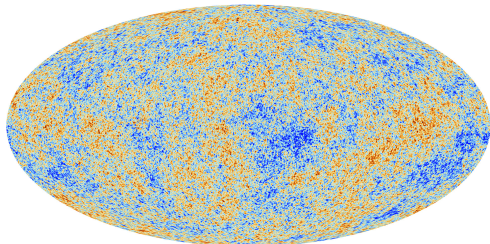
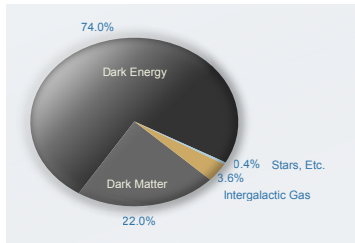
- ▶ La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- ▶ La détecter lors de son passage sur Terre  
⇒ interaction avec noyau  $\chi + X \rightarrow \chi + X$  (recul du noyau)
- ▶ Voir son annihilation en observant le ciel  
⇒ rayons gamma monochromatiques ( $E_\gamma = M_\chi c^2$ )  
⇒ excès de rayons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

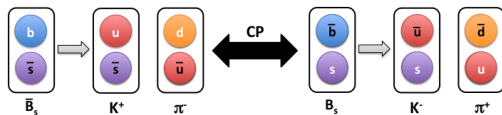


- ▶ Relativité Générale:  
gravité  $\leftrightarrow$  courbure Univers  $\leftrightarrow$  contenu énergétique
- ▶ Trois composants (matière, rayonnement, énergie noire) caractérisées par relation entre densité et pression
- ▶ Plusieurs indications pour l'énergie noire: accélération de l'expansion de 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

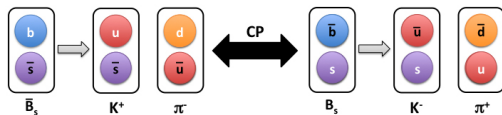
- ▶ Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule
- ▶ Asymétries en accord avec Modèle Standard, dues à interaction faible



# Asymétrie matière-antimatière

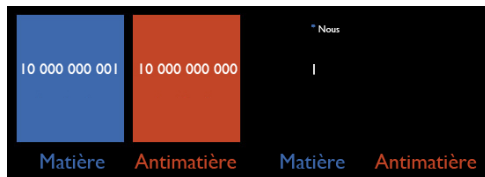
## Collisionneurs

- ▶ 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 !

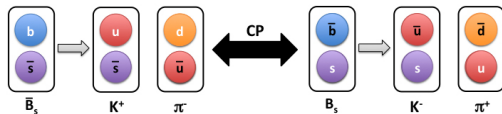




# Asymétrie matière-antimatière

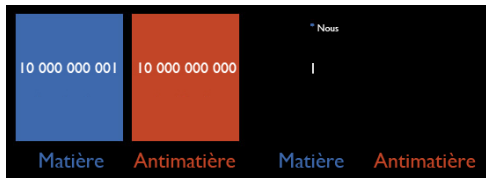
## Collisionneurs

- ▶ 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 ?