

Physique des particules (2)

Romain Madar et Sébastien Descotes-Genon

*Laboratoire de Physique de Clermont-Ferrand,
CNRS & Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand*

*IJCLab, CNRS & Université Paris-Saclay, Orsay, et
Délégation Régionale Académique à la Recherche et à l'Innovation Grand Est, Nancy*

CERN French Teachers' Programme
24 octobre 2023



Préambule

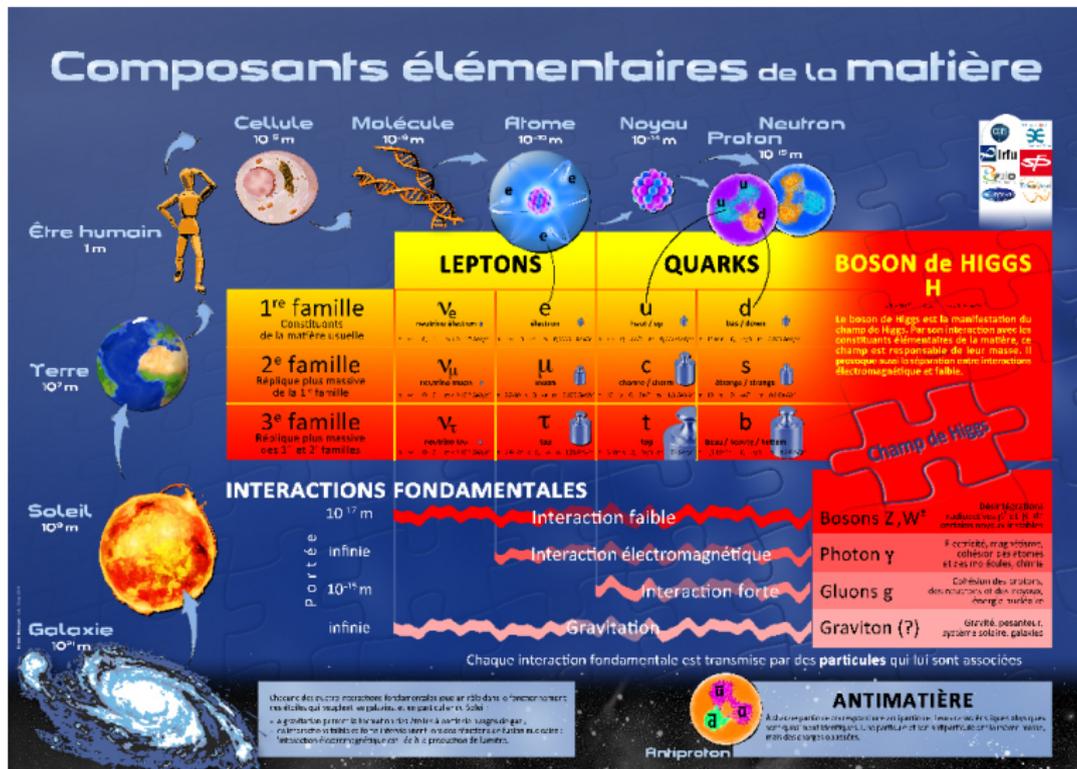
Parcours

- Thèse au CEA sur un collisionneur appelé Tevatron (collisionneur précédant au fonctionnement du LHC)
- Post-doctorat en Allemagne (Freiburg Im Breisgau), sur l'expérience ATLAS au LHC
- Aujourd'hui physicien des particules expérimentateur à Clermont-Ferrand, chargé de recherche au CNRS

Domaines d'expertise

- Physique du boson de Higgs (recherche d'abord au Tevatron, puis découverte au LHC)
- Physique du quark Top, particule la plus lourde connue actuellement (découverte de la production simultanée de 4 tops)
- Calorimétrie et traitement du signal associé (électronique, technique de reconstruction etc ...)

... à une autre, un siècle plus tard



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 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 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 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**, même masse, 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 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**, même masse, charges opposées
- particules lourdes instables, se désintégrant en part. 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 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**, même masse, charges opposées
- particules lourdes instables, se désintégrant en part. plus légères
- décrit par combinaison de relativité restreinte et de mécanique quantique, décrivant la création et l'annihilation de particules
- très bien testé aux collisionneurs (excellent accord th-exp)

Voir les constituants de la matière

“Voir” les particules élémentaires



- Voir, en science, c'est utiliser un outil plus ou moins complexe. . .
- Dont nous devons interpréter les signaux



“Voir” les particules élémentaires



- Voir, en science, c'est utiliser un outil plus ou moins complexe. . .
- Dont nous devons interpréter les signaux

- En physique des particules, il s'agit d'un détecteur
- Il peut identifier les particules et déterminer leurs propriétés (masse, charge, désintégrations. . .)
- Encore faut-il avoir des particules à observer !

Mesurer les particules



*Le CERN près de Genève avec
le LHC [Large Hadron Collider]*

Mesurer les particules

- un vrai periph' pour particules

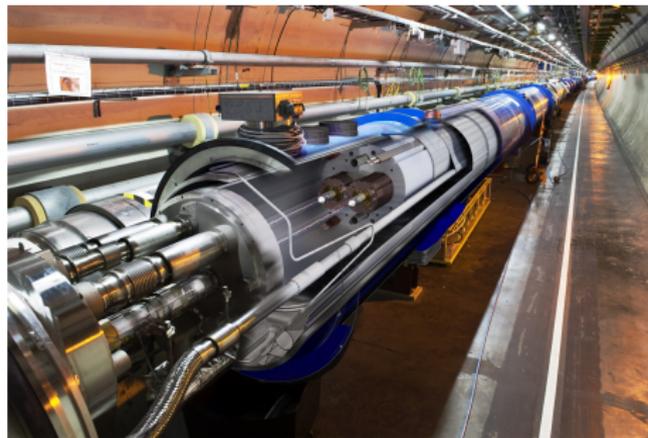


Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels

Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels

Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux

Mesurer les particules



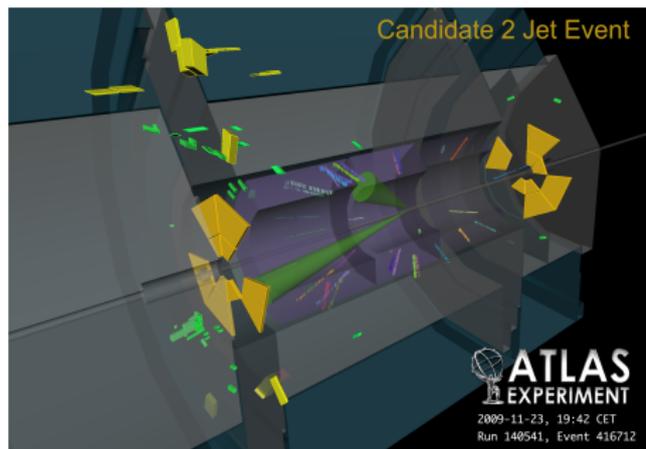
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

Mesurer les particules



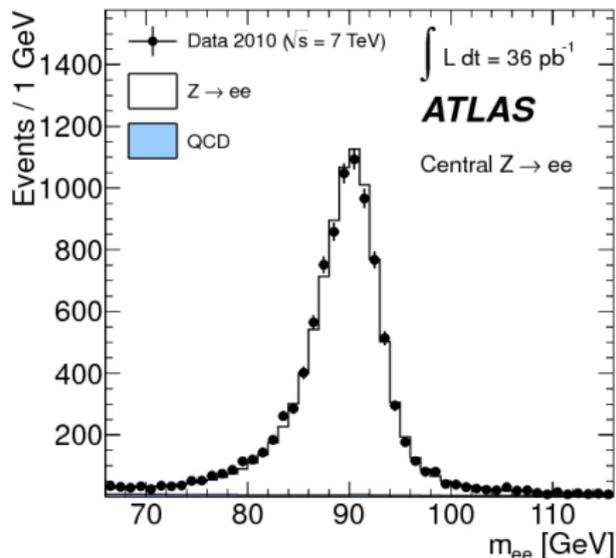
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

Mesurer les particules



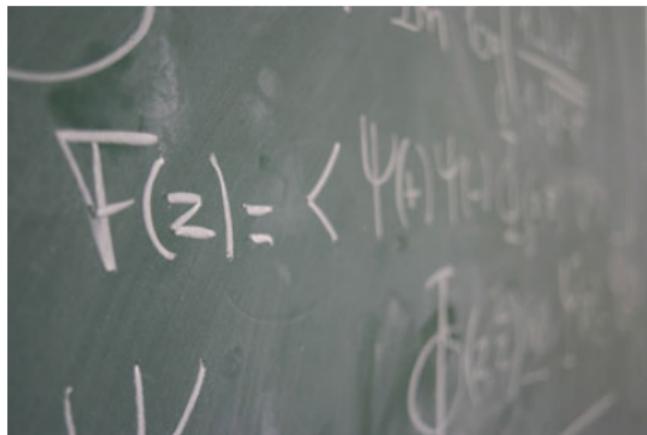
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

Mesurer les particules



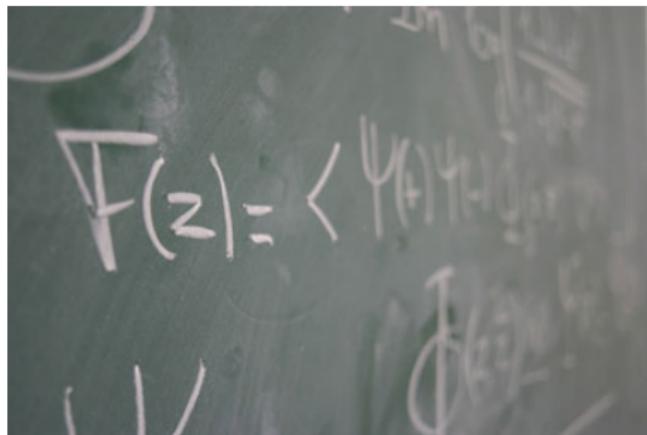
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision
- reste à interpréter ces données !

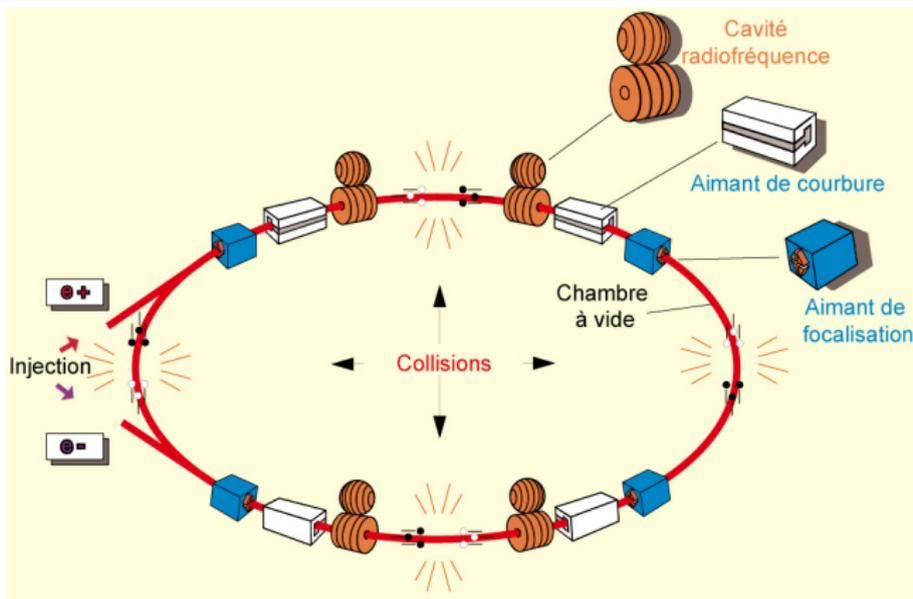
Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision
- reste à interpréter ces données !

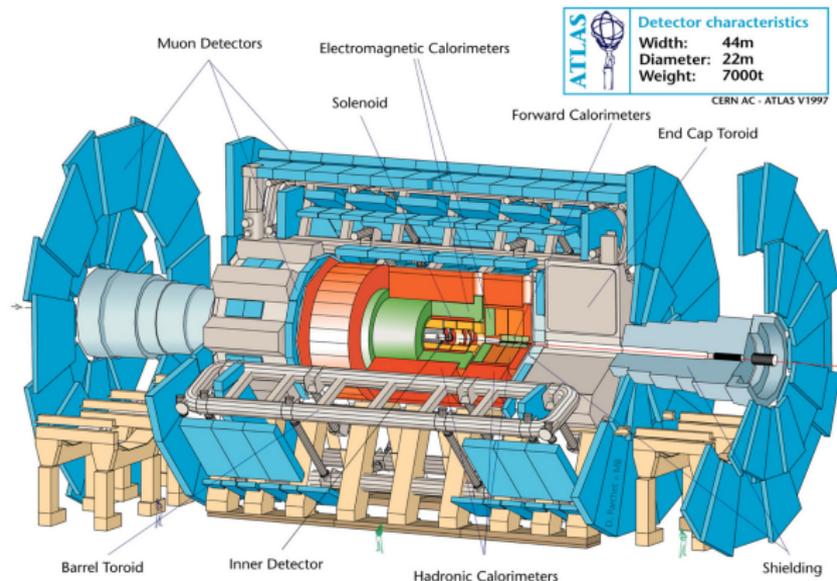
Exemple: ATLAS au LHC

Accélérer



- projectiles chargés (électron, proton) focalisés et gardés sur une trajectoire "circulaire" par \vec{B} (aimants dipolaires, quadrupolaires...)
- à chaque tour, gagnent de l'énergie par \vec{E} (cavités radiofréquence)
- mise en paquets séparés les uns des autres pour plus de collisions
- ici, principe illustré dans le cas du LEP (prédécesseur du LHC)

Détecter

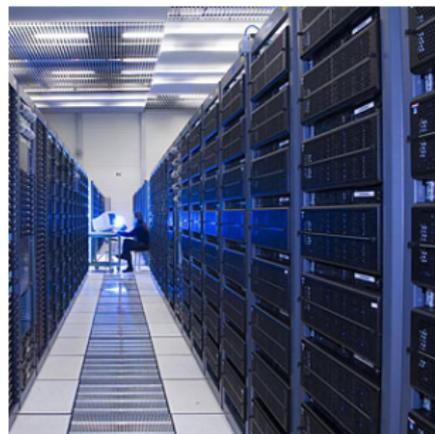
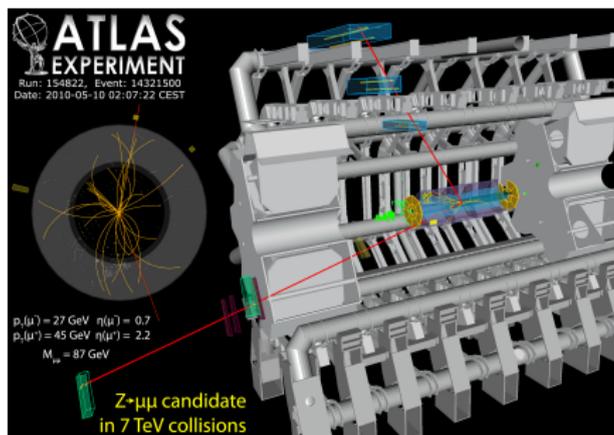


- Plusieurs couches, spécialisées selon le type de particules
- Liquide ou solide perturbé par le passage de particules
- Ionisation, d'où libération de charges électriques collectés. . .
- . . . amplifiés et échantillonnés électroniquement en signaux

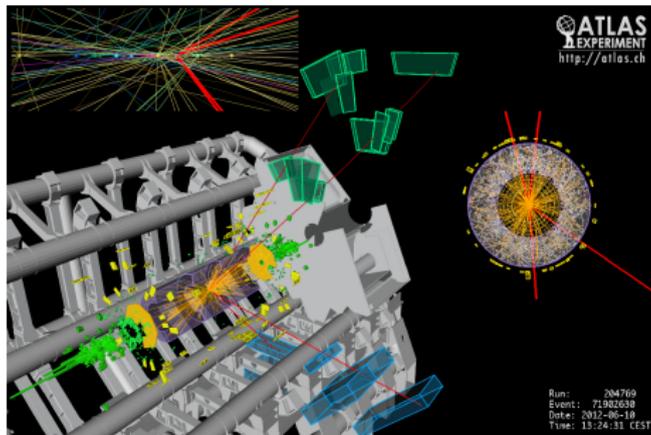
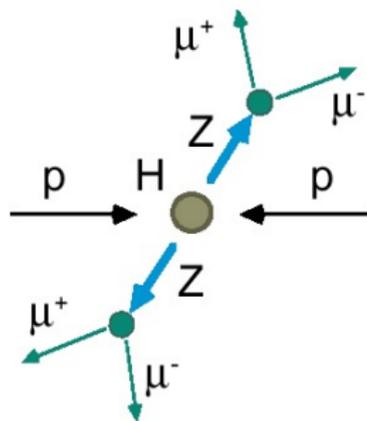
Enregistrer

Près de **600 millions** de collisions par seconde dans les détecteurs

- Informations converties en signaux par cartes électroniques
- Évènements intéressants (100 /s) enregistrés et analysés plus tard (prenant 100 mégaoctets/s)
- Fonctionnement en réseau au niveau des équipes, mais aussi des ordinateurs (connectés par une grille de calcul)

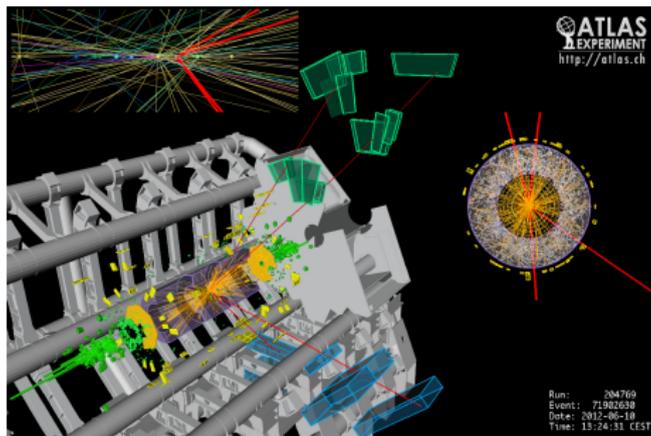
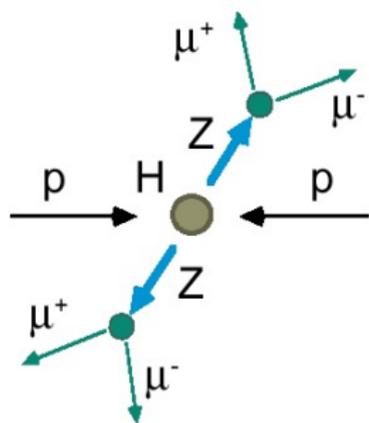


Analyser



- Des processus peu fréquents
- Particules créées étudiées via une cascade de désintégrations
- Reconstruction en suivant les trajectoires
- Lois de conservations (énergie-impulsion, charge électrique...)
- Certaines particules ne sont pas détectées (neutrinos...)
- Sélection des évènements pour éliminer bruits de fond

Analyser



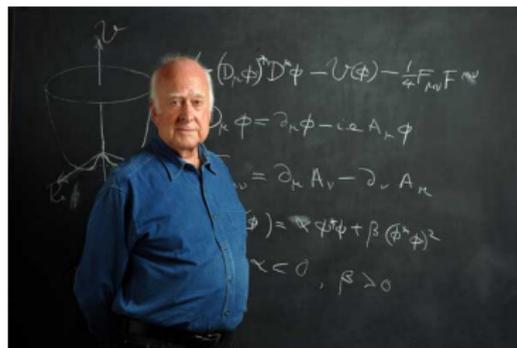
- Des processus peu fréquents
- Particules créées étudiées via une cascade de désintégrations
- Reconstruction en suivant les trajectoires
- Lois de conservations (énergie-impulsion, charge électrique...)
- Certaines particules ne sont pas détectées (neutrinos...)
- Sélection des évènements pour éliminer bruits de fond

Exemple: $H \rightarrow 2\gamma$ à ATLAS (2011-2012)

Interpréter

Spécialisation importante entre théoriciens et expérimentateurs

- Exp: chacun maîtrise un aspect d'un détecteur (big science)
- Théo: concepts mathématiques et physiques avancés



Chez les théoriciens

- Surtout moyens humains (petites équipes)
- Mais pas seulement papier crayon (beaucoup de résolution numérique par réseaux de PC et superordinateurs)
- Pas seulement interpréter, mais aussi proposer de nouvelles idées

Quelques nombres autour du LHC (1)

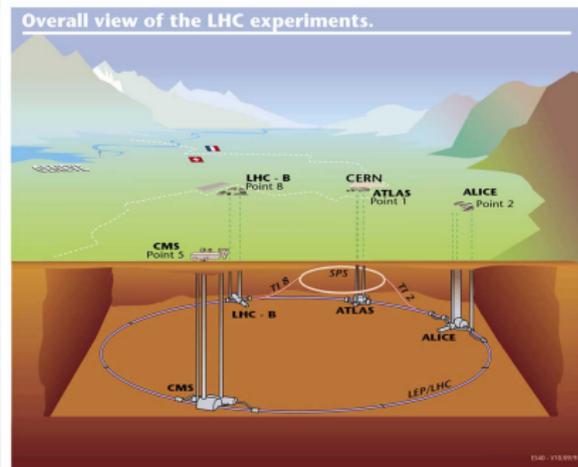
- Sur 27 km de circonférence, 2 faisceaux de protons
- déviés par plus de 1500 **aimants** (de 5 à 7m chacun)
- refroidis à -271°C (plus froid que l'espace !): **supraconducteurs**



L'énergie emmagasinée dans les **aimants** correspond à

- L'énergie cinétique d'un Airbus A380 voyageant à 700 km/h
- Elle suffirait à faire fondre plusieurs tonnes de cuivre

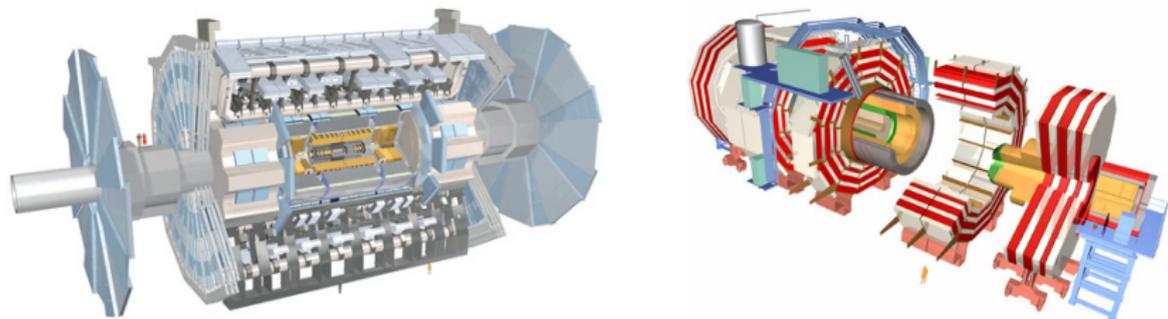
Quelques nombres autour du LHC (2)



Durant le run 2 (2015-2018)

- Environ 3000 paquets contenant chacun 100 milliards de protons
- Séparés de seulement 25 nanonescondes
- Chaque faisceau concentre l'énergie d'un TGV à 300 km/h
- 10 000 tours/s, un milliard de collisions/s, pendant 20h
- En faisceaux plus fins qu'un cheveu humain lors des collisions
- Les protons restants auront fait 4 fois la distance Terre-Neptune

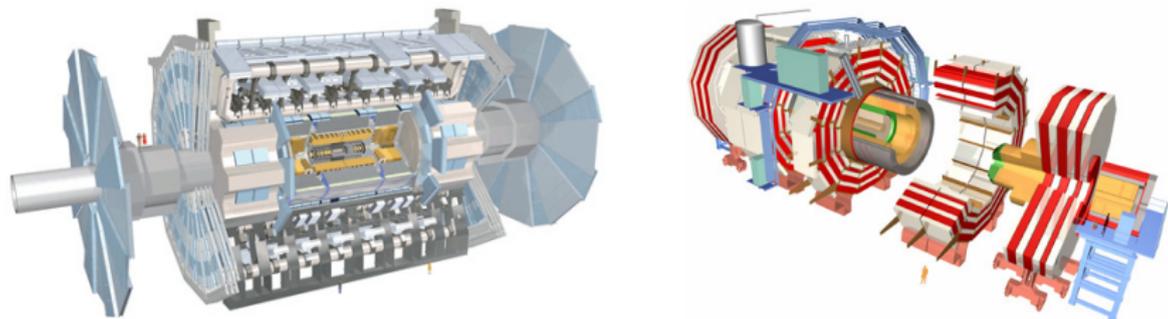
Quelques nombres autour du LHC (3)



ATLAS et CMS (2 des 4 expériences principales)

- Détecteurs “tout azimuth” en couches successives conçues pour détecter toutes les particules massives créées par collisions
- 46 m × 25 m × 25 m (ATLAS) et 21 m × 15 m × 15 m (CMS)
- 7000 tonnes (ATLAS) et 12500 tonnes (CMS) [\sim Tour Eiffel]

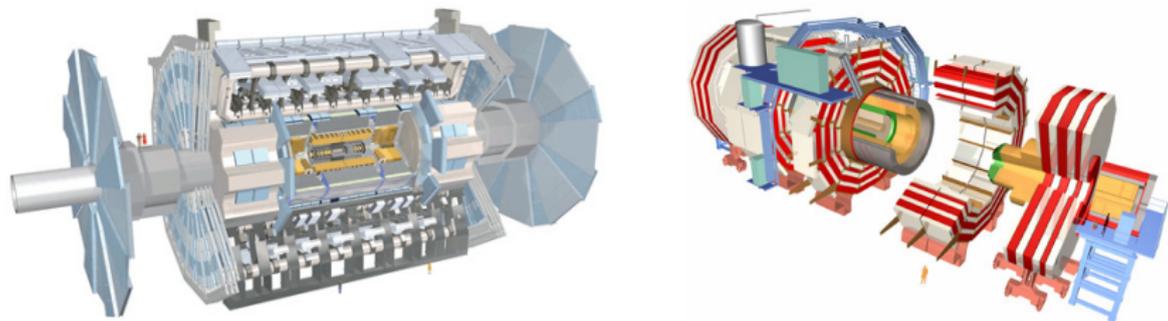
Quelques nombres autour du LHC (3)



ATLAS et CMS (2 des 4 expériences principales)

- Détecteurs “tout azimuth” en couches successives conçues pour détecter toutes les particules massives créées par collisions
- 46 m × 25 m × 25 m (ATLAS) et 21 m × 15 m × 15 m (CMS)
- 7000 tonnes (ATLAS) et 12500 tonnes (CMS) [\sim Tour Eiffel]
- Pour chacune, plusieurs milliers de scientifiques venant d'une quarantaine de pays, venant régulièrement sur le site du CERN
- Mais aussi beaucoup d'ingénieurs et de techniciens (cryogénie, électronique, informatique, topographie...)

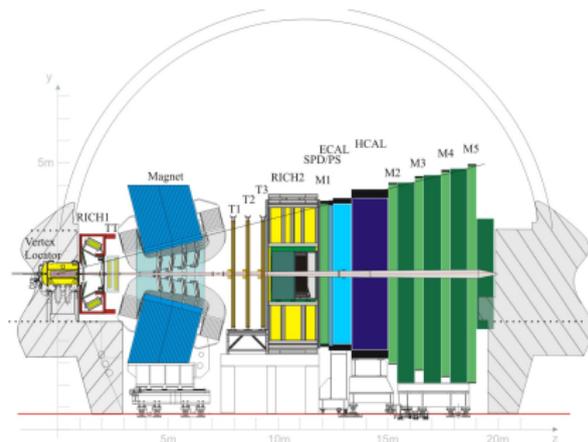
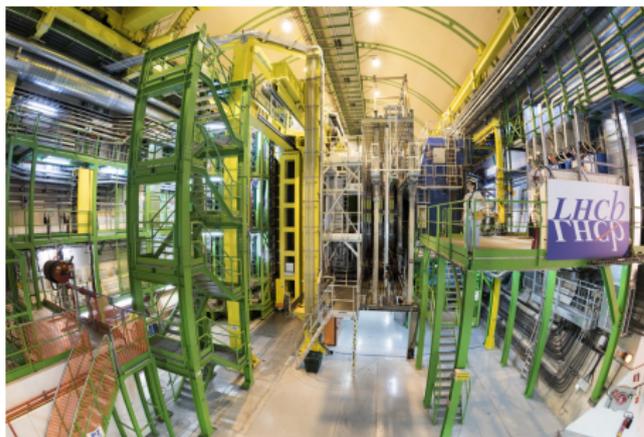
Quelques nombres autour du LHC (3)



ATLAS et CMS (2 des 4 expériences principales)

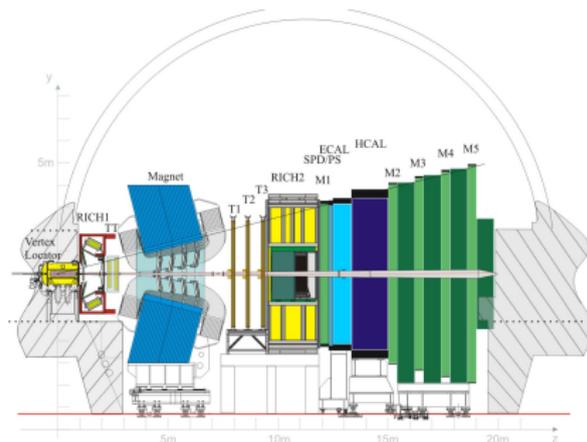
- Détecteurs “tout azimuth” en couches successives conçues pour détecter toutes les particules massives créées par collisions
- 46 m × 25 m × 25 m (ATLAS) et 21 m × 15 m × 15 m (CMS)
- 7000 tonnes (ATLAS) et 12500 tonnes (CMS) [\sim Tour Eiffel]
- Pour chacune, plusieurs milliers de scientifiques venant d'une quarantaine de pays, venant régulièrement sur le site du CERN
- Mais aussi beaucoup d'ingénieurs et de techniciens (cryogénie, électronique, informatique, topographie...)
- Long Shutdown (2018-2022) utilisé pour améliorer les détecteurs

Quelques nombres autour du LHC (4)



- Des milliers de milliards de paires de quarks b (et \bar{b}) au LHC / an
- LHCb enregistre et étudie désintégrations de ces quarks “beaux”
- Asymétrie entre particules et antiparticules, désintégrations “rares”, porte d’entrée vers la physique au-delà du Modèle Standard

Quelques nombres autour du LHC (4)



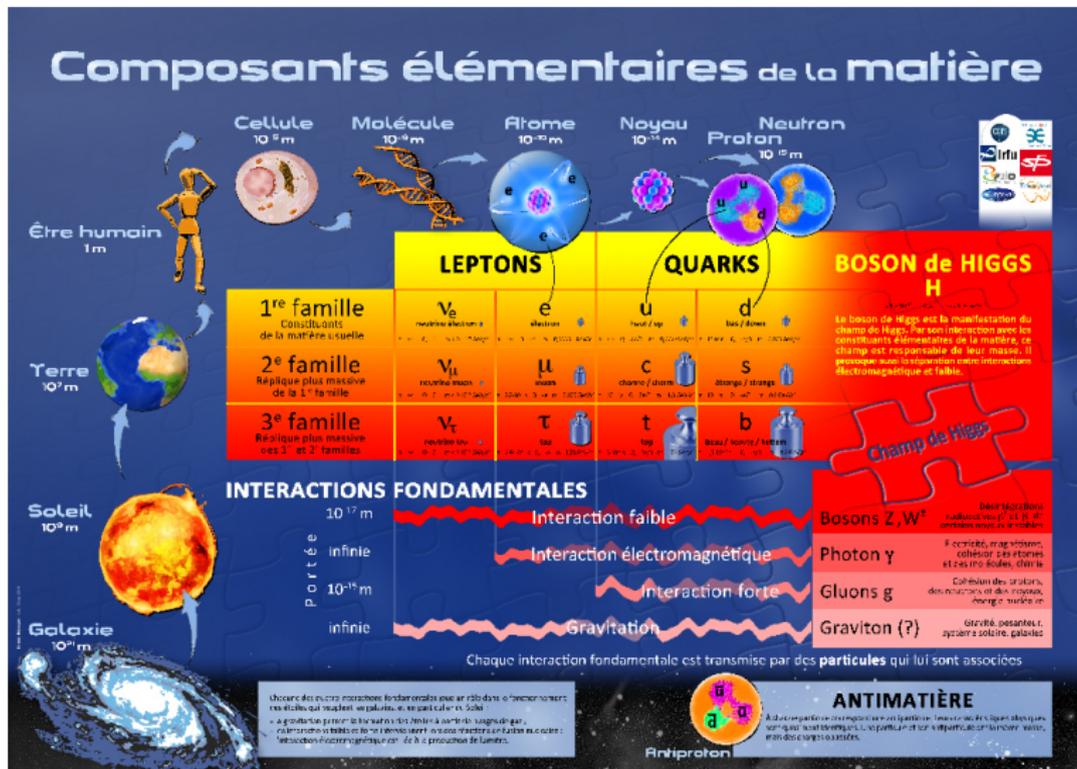
- Des milliers de milliards de paires de quarks b (et \bar{b}) au LHC / an
- LHCb enregistre et étudie désintégrations de ces quarks “beaux”
- Asymétrie entre particules et antiparticules, désintégrations “rares”, porte d’entrée vers la physique au-delà du Modèle Standard
- Spectromètre vers l’avant avec des détecteurs plans
- 5600 tonnes, 21 m x 10 m x 13 m, 100 m sous terre
- Près de 1600 collaborateurs de 20 pays, aux compétences variées

Des questions ?

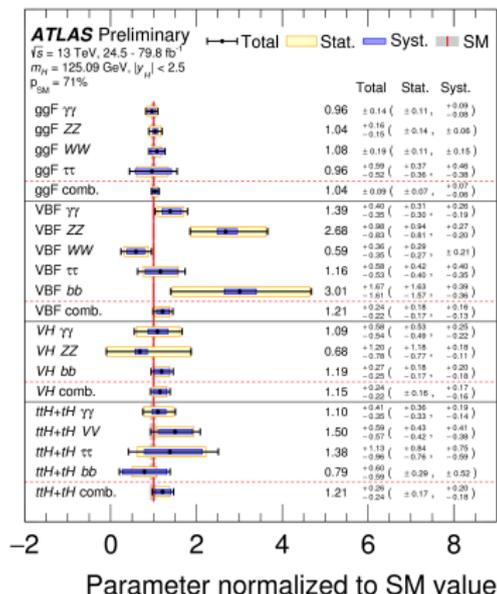
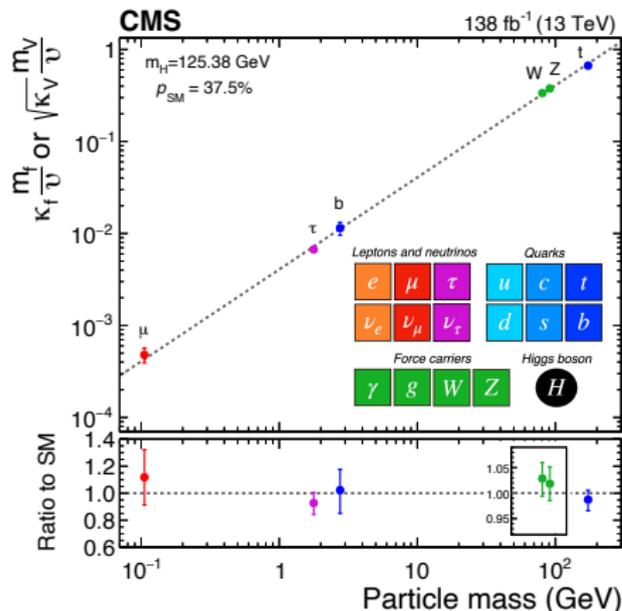


Quelques questions en suspens

Le Modèle Standard



Toujours en test pour le boson H

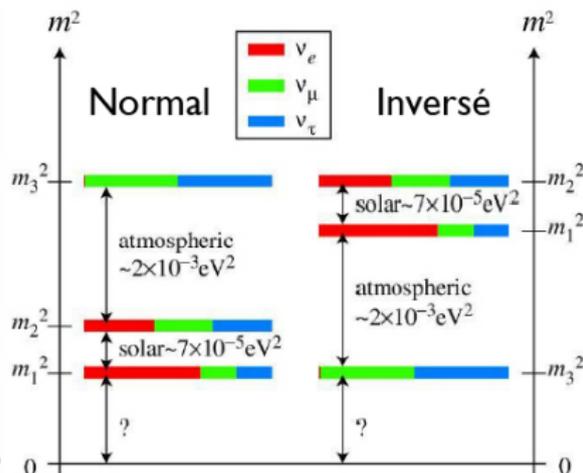
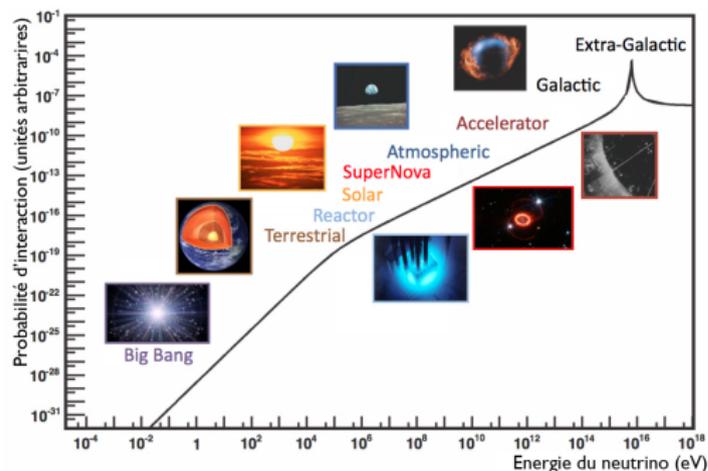


- Géométrie des désintégrations confirme H scalaire
- Couplages du boson H aux autres particules prop. à la masse
- Productions et désintégrations en accord avec Modèle Standard

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 y répondre

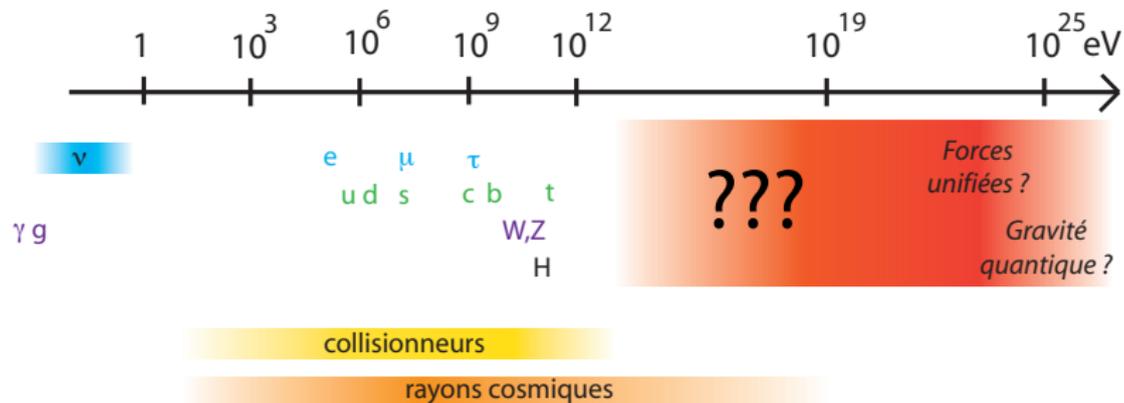


Les limites du Modèle Standard

Modèle Standard reproduit très bien l'expérience

mais pas parfaitement satisfaisant

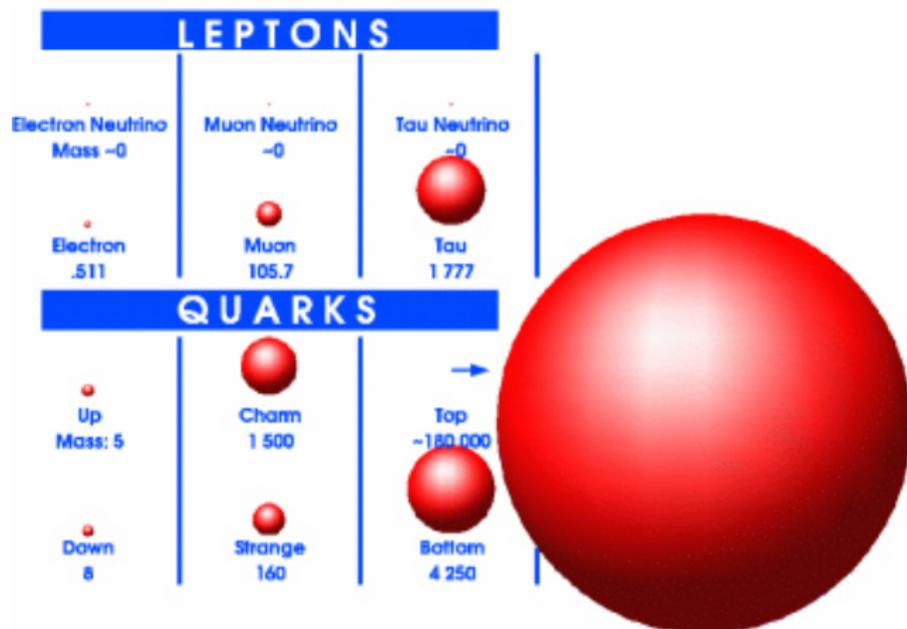
- Nombreux paramètres (19 !) fixés à des valeurs arbitraires
- Pourquoi trois familles, avec la même structure d'interactions ?
- Pourquoi trois interactions très différentes ? Et la gravitation ?



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 ?

De la masse oui, mais pas de toute la masse

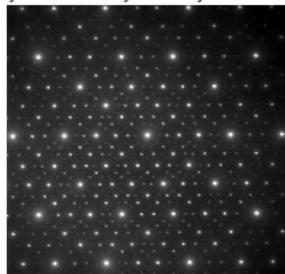
Boson de Higgs responsable de la masse des particules

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Champ de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

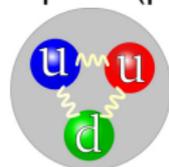
électron, muon, tau, neutrinos...



Masse = Higgs (100%)

Composite

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



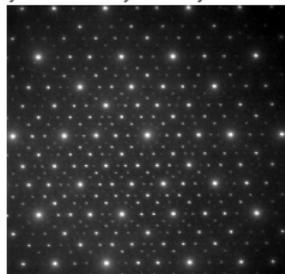
Masse des quarks (Higgs, $\sim 1\%$) + E
de "liaison" (inter. forte, $\sim 99\%$)

De la masse oui, mais pas de toute la masse

Champ de Higgs responsable de la masse des particules élémentaires

Élémentaire

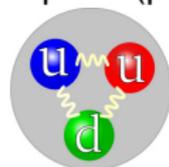
électron, muon, tau, neutrinos...



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)
- Proton: $M_p = 2m_u + m_d + 0.93 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2$ (99% du tout)

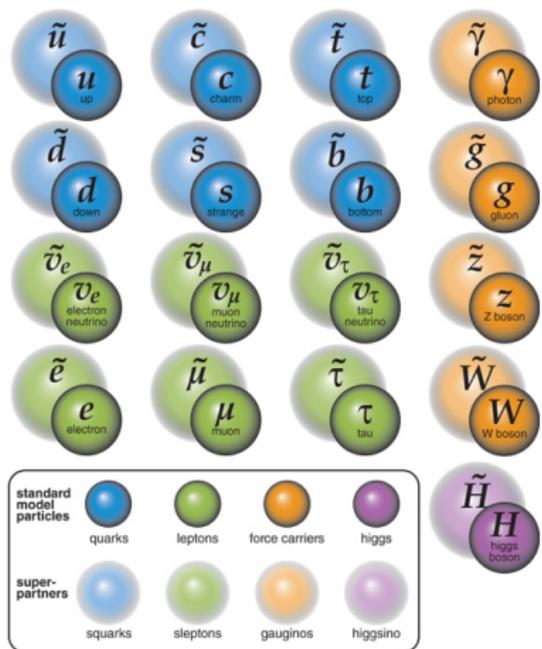
Expliquer la masse des particules composites est aussi un défi !

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 ?)...

Au-delà du Modèle Standard

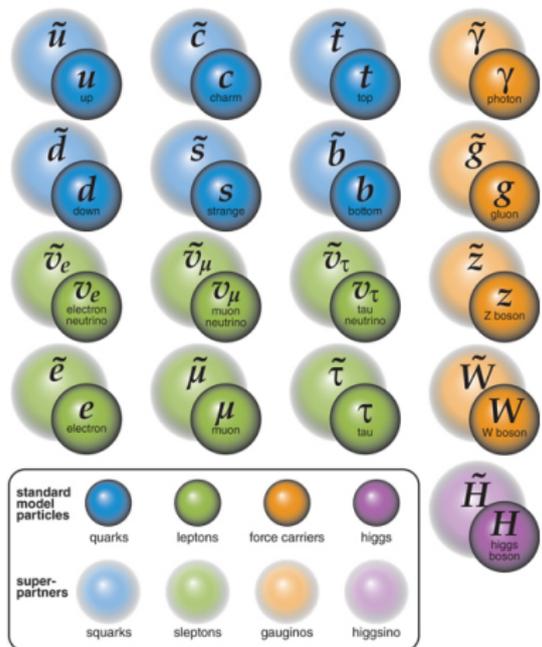
- De nouvelles symétries (limiter le nombre de paramètres ?),
- De nouvelles interactions (cadre plus cohérent ?),
- De nouvelles dimensions (accomoder la gravitation ?)...



- Vogue de la supersymétrie: un partenaire supersymétrique lourd pour chaque particule
- Actuellement, alternatives: leptoquarks, bosons supplémentaires. . .

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 ?)...

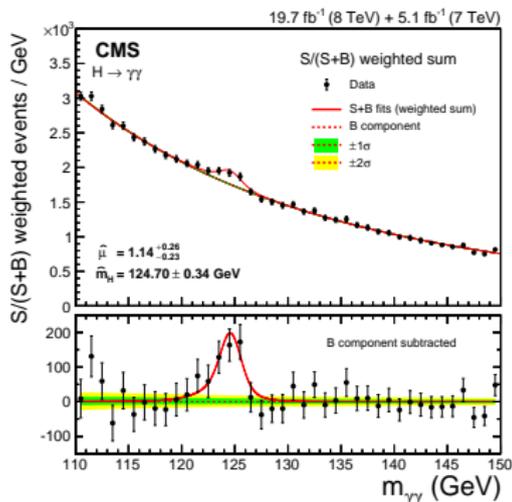


- Vogue de la supersymétrie: un partenaire supersymétrique lourd pour chaque particule
- Actuellement, alternatives: leptoquarks, bosons supplémentaires. . .
- Généralement des particules lourdes ou des interactions de courte portée
 - Ne pas être en désaccord avec obs. antérieures
 - Avoir des conséquences observables. . .

Deux voies pour la Nouvelle Physique

Relativiste $E = mc^2$

Preuve "directe" (ATLAS/CMS)

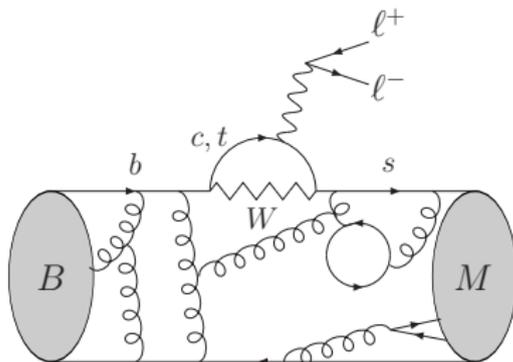


Collisions avec assez d'énergie pour produire des particules au-delà du Modèle Standard

Haute E /processus "fréquents"

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

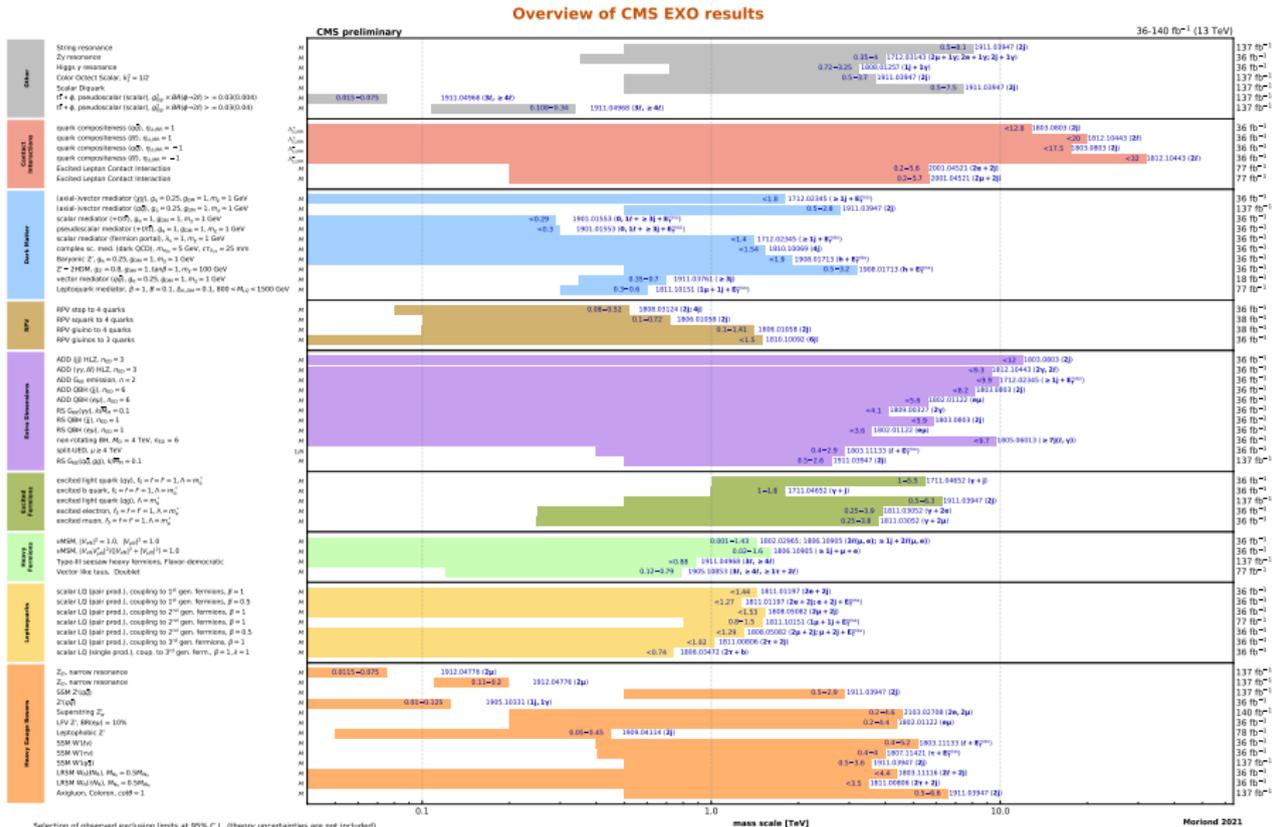
Preuve "indirecte" (LHCb, Belle-II)



Petites deviations venant d'états intermédiaires avec des particules lourdes

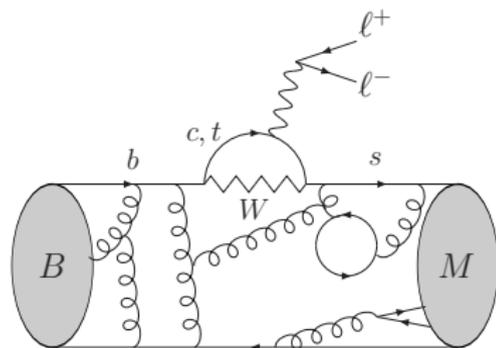
Basse E /processus "rares"

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



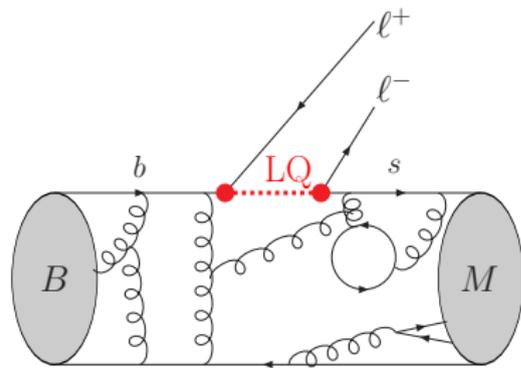
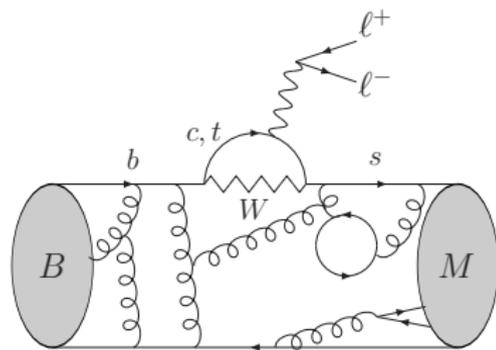
Voie quantique: des déviations qui s'accumulent

- 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...)
- Plus récemment, aussi des déviations pour $b \rightarrow s\nu\nu$ (Belle)



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...)
- Plus récemment, aussi des déviations pour $b \rightarrow s\nu\nu$ (Belle)
- Contributions supplémentaires causées par des particules intermédiaires au-delà du Modèle Standard ?



Etudiées en détail, tant expérimentalement que théoriquement

De nouveaux projets (sur accélérateurs)

En cours

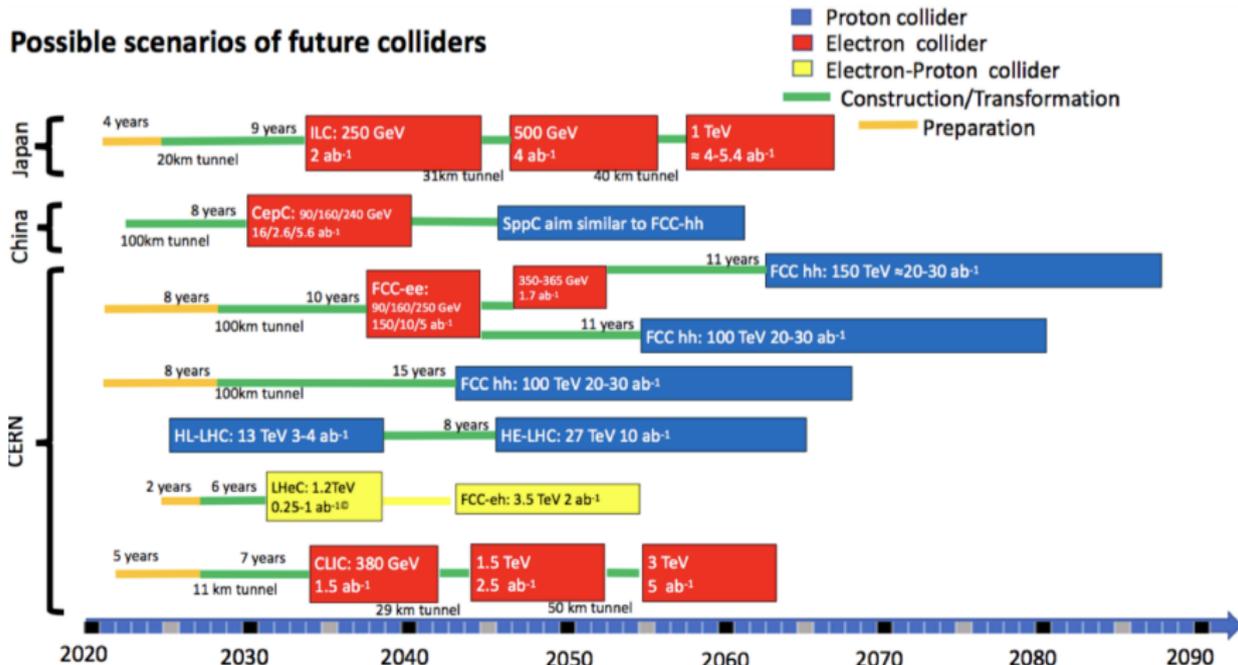
- LHC (CERN): toutes les particules du MS
- Belle II (Japon): quarks b et c
- KOTO (Japon), NA62 (CERN): quark s
- NOvA (USA), T2K (Japon): neutrinos

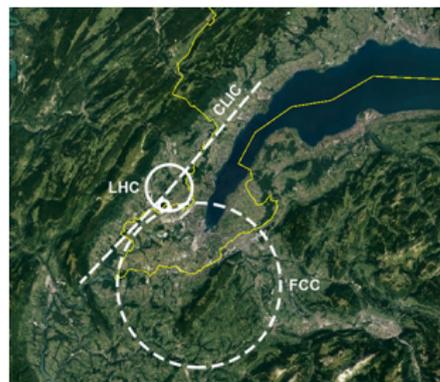
Futur (tous ne sont pas approuvés)

- HL-LHC (CERN): plus d'évènements
- CLIC (CERN), ILC (Japon): évènements plus propres
- CEPC (Chine) et FCC (CERN): désintégrations des bosons Z et H
- DUNE (USA): neutrinos

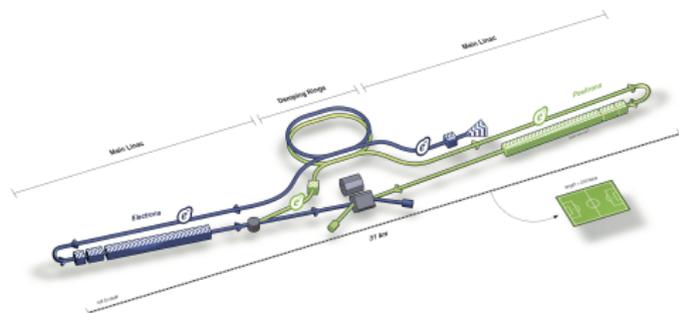
Un calendrier pour le futur

- Stratégie européenne de la physique des particules mise à jour
- HL-LHC en 2025+ : hte luminosité, 150 à 200 evts/croisement
- Upgrade significatif à faire pour la machine et les détecteurs





Future Circular Collider
(80 km circ)



International Linear Collider
(30 km long)

- Produire de grandes quantités de Z , H et autres particules du MS
- Collisions $e^+ e^-$ (et plus tard pp pour FCC)
- Conception différentes: collisionneur circulaire ou linéaire
- En cours de discussions internationales, scientifiques et politiques

Ou une idée nouvelle (collisionneurs à muon, accélérateurs linéaires à récupération d'énergie, accélération laser-plasma...)?

Connexions cosmiques

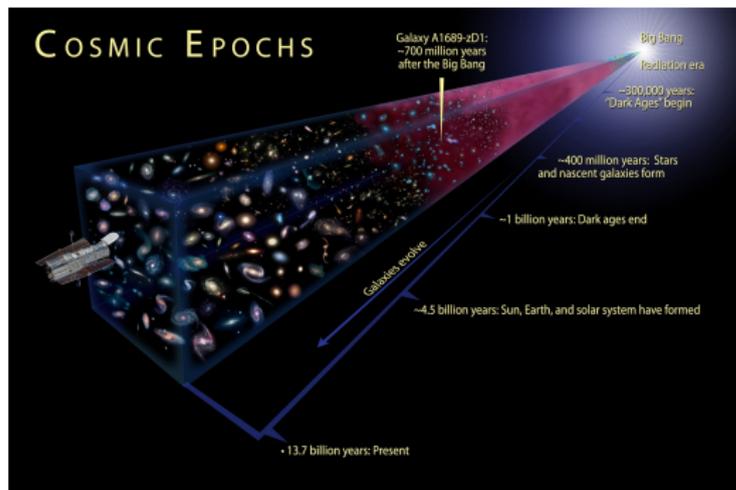
Dans les accélérateurs, étudier de nouvelles particules lourdes

- 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]

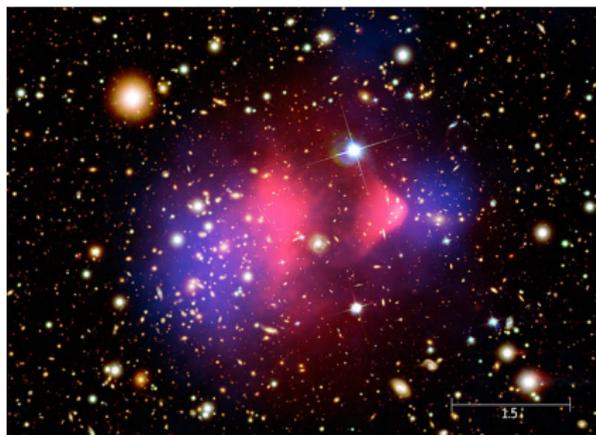
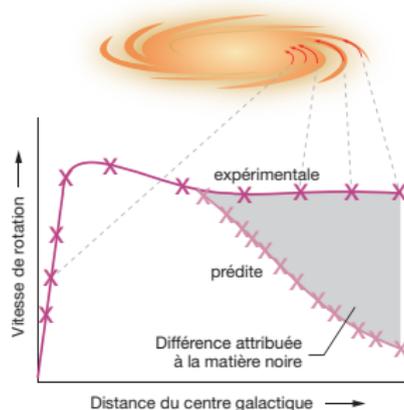


D'autres voies vers les très hautes énergies ?

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

⇒ Observation et non expérience (contrôle des conditions initiales)

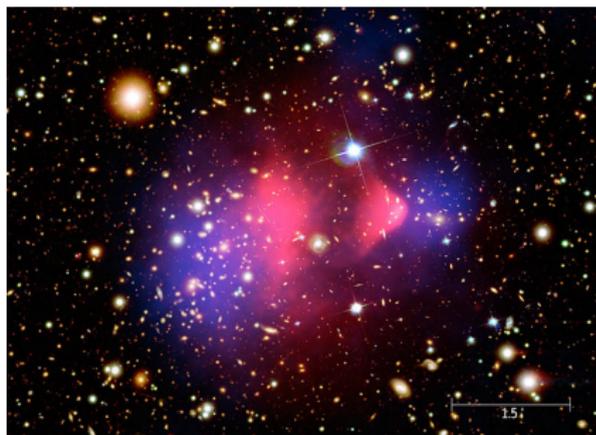
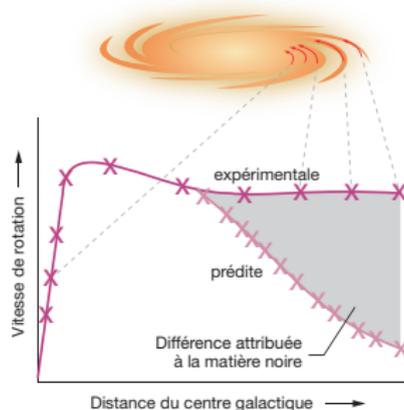
La matière noire



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



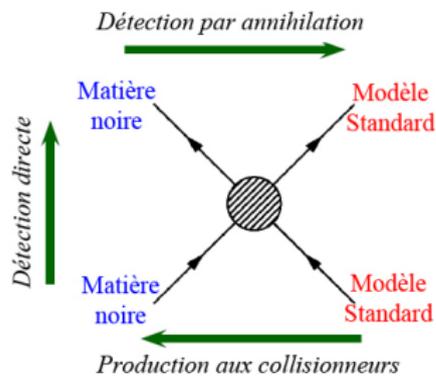
En se basant sur les lois de la gravitation, pas assez de matière visible

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

Matière "noire"

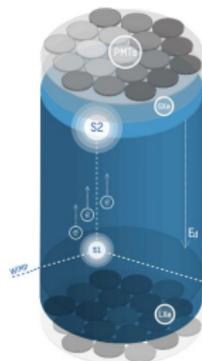
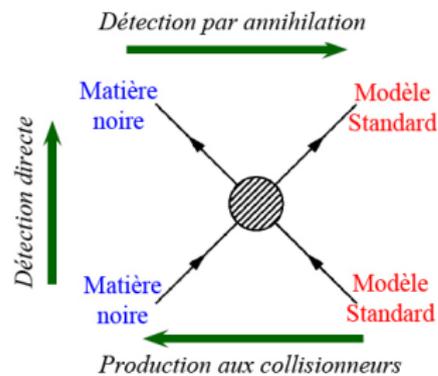
- lourde, stable, neutre, interagissant peu avec son environnement, hormis par interaction gravitationnelle (halos ? filaments ?)
- particule nouvelle χ , hors du Modèle Standard ?

Observer la matière noire



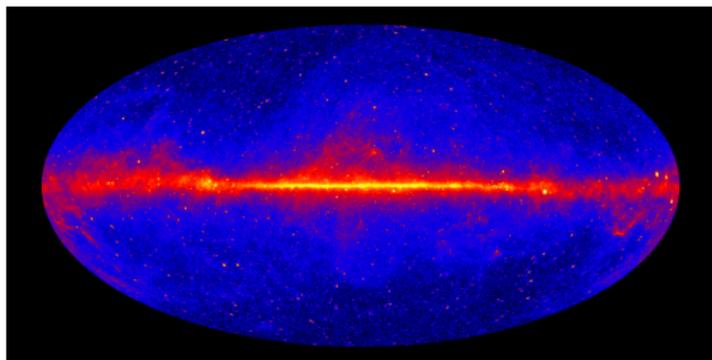
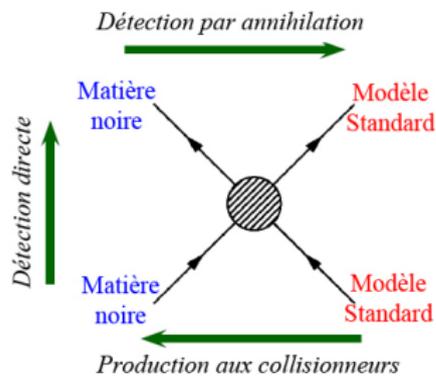
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)

Observer la matière noire



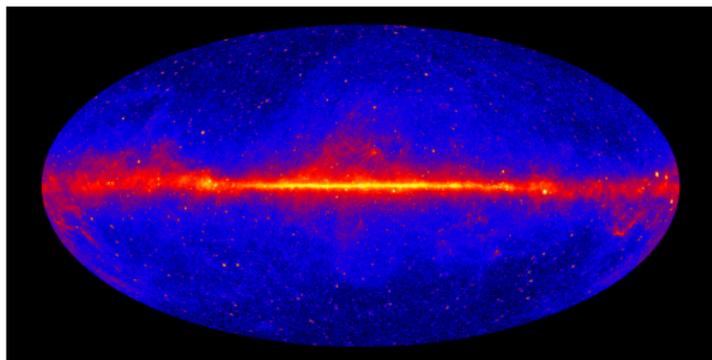
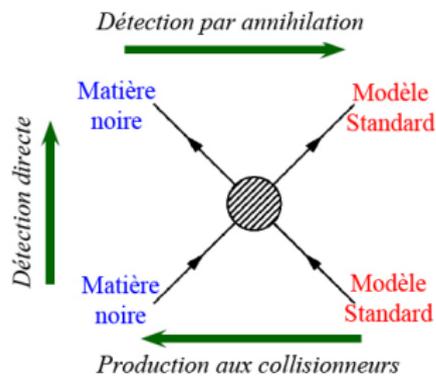
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)

Observer la matière noire



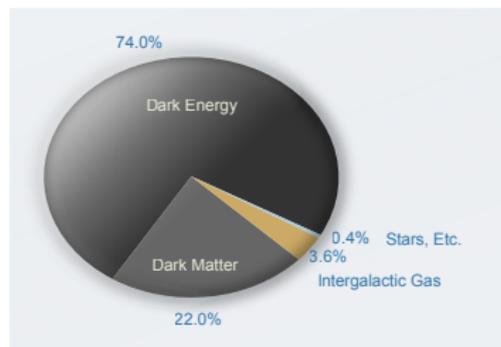
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- Voir son annihilation en observant le ciel
⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
⇒ excès de rayons cosmiques de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

Observer la matière noire



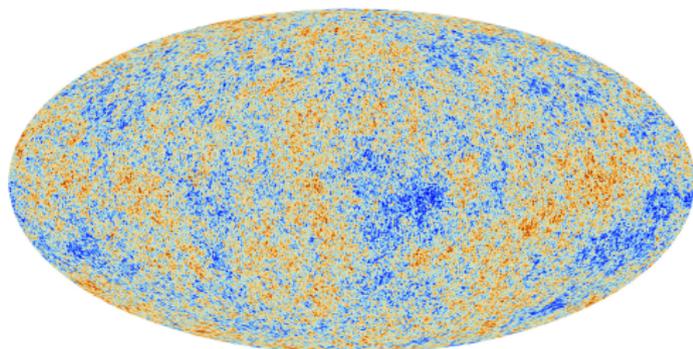
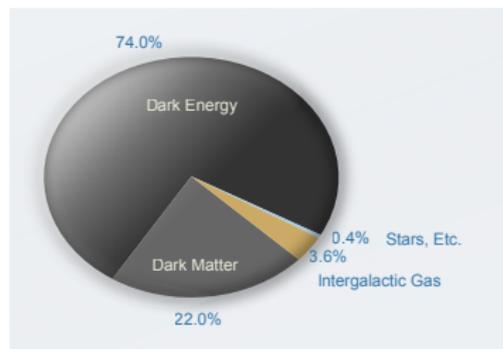
- La produire en accélérateur (si assez “légère”)
- La détecter lors de son passage sur Terre
⇒ interaction avec noyau $\chi + X \rightarrow \chi + X$ (recul du noyau)
- Voir son annihilation en observant le ciel
⇒ rayons gamma monochromatiques ($E_\gamma = M_\chi c^2$)
⇒ excès de rayons cosmiques de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

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

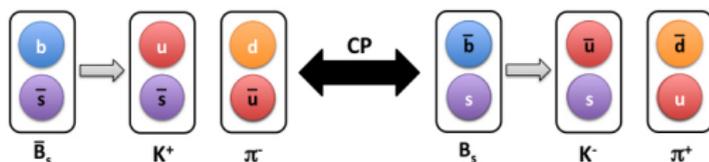


- Relativité Générale:
gravité \leftrightarrow courbure Univers \leftrightarrow contenu énergétique
- Trois composants (matière, rayonnement, énergie noire)
caractérisées par relation entre densité et pression
- Plusieurs indications pour l'énergie noire: accélération de l'expansion de l'Univers, ray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

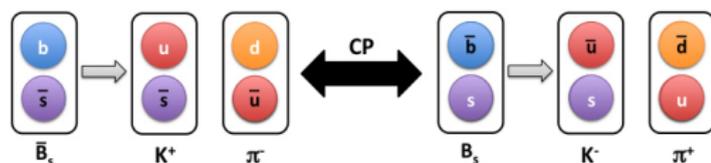


- Asymétries en accord avec Modèle Standard (interaction faible)

Asymétrie matière-antimatière

Collisionneurs

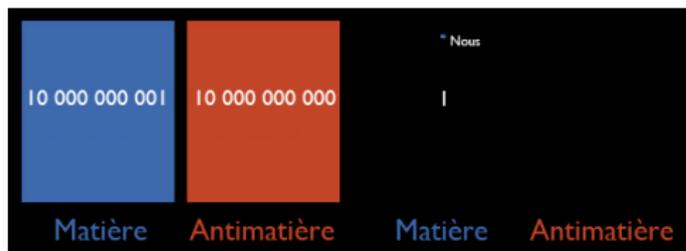
- Comparer probabilités désintégration particule et antiparticule



- Asymétries en accord avec Modèle Standard (interaction faible)

Cosmologie

- Big bang: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule
- Disparition de l'un au détriment de l'autre
- Asymétrie trop large pour Modèle Standard si on est parti d'un équilibre parfait entre particule et antiparticule



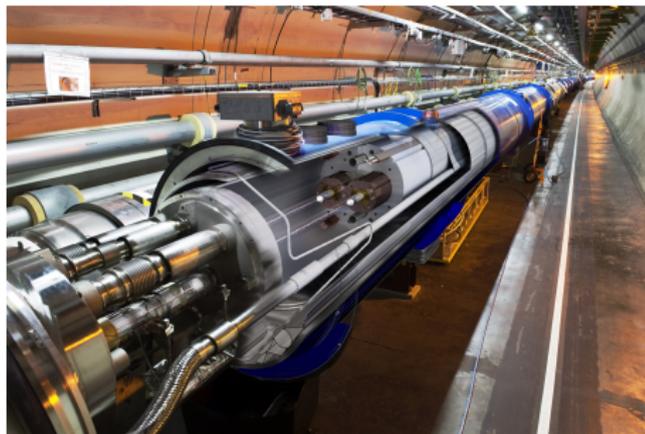
- Si petit déséquilibre initial, quelle serait la cause ?
- Ou nouveaux mécanismes d'asymétrie à E plus élevée?

Quelques expériences en cours

- Neutrinos: Icecube, KM3Net. . .
- Matière noire: Xenon, Darwin, LZ, PandaX. . .
- Astronomie γ : Fermi, Hess, Magic, Veritas, CTA. . .
- Astroparticules: AUGER, AMS. . .
- Ondes gravitationnelles: LIGO, Virgo, Kagra, Einstein Tel, Lisa. . .
- Grandes structures et énergie noire: DESI, Euclid. . .
- Fond diffus cosmologique et suite: LiteBird, CMB-S4, SKA. . .

Observations à haute énergie en physique de l'infiniment grand
qui nécessitent un travail théorique important
pour être reliés à la physique de l'infiniment petit

En 2023...



Plus d'informations sur le Modèle Standard et ses limites,
lors de la prochaine collecte de données du LHC,
pour les expérimentateurs comme pour les théoriciens !