

Limitations du Modèle Standard Physique auprès et hors accélérateurs

Elisabeth Petit
CPPM



École de la Physique au Détecteur
Fréjus, 24-29 novembre 2024



NUCLÉAIRE
& PARTICULES

Limitations du Modèle Standard

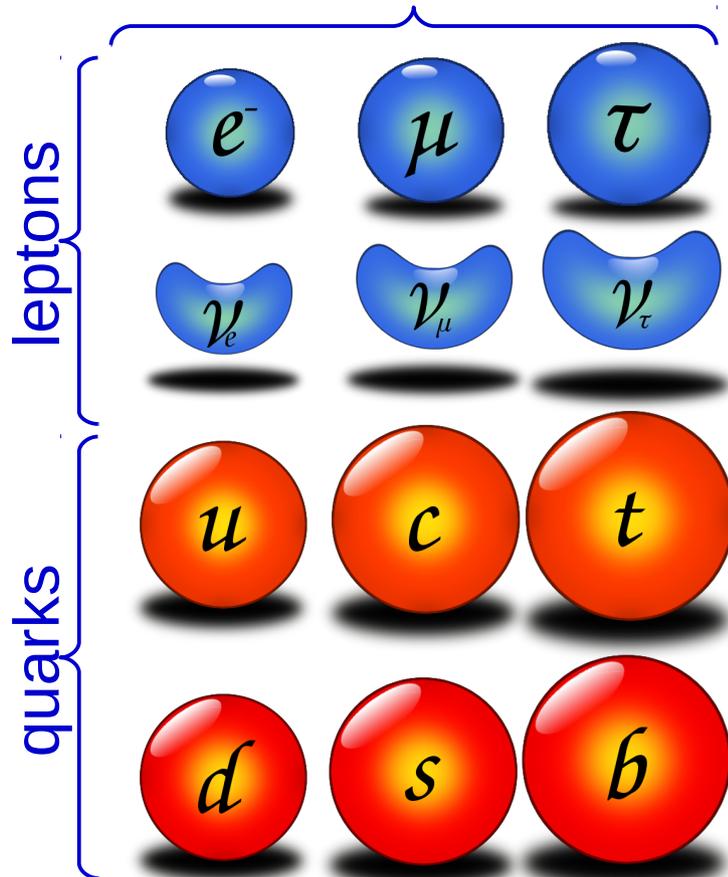
Physique des particules hors-accélérateurs

Physique des particules auprès des accélérateurs

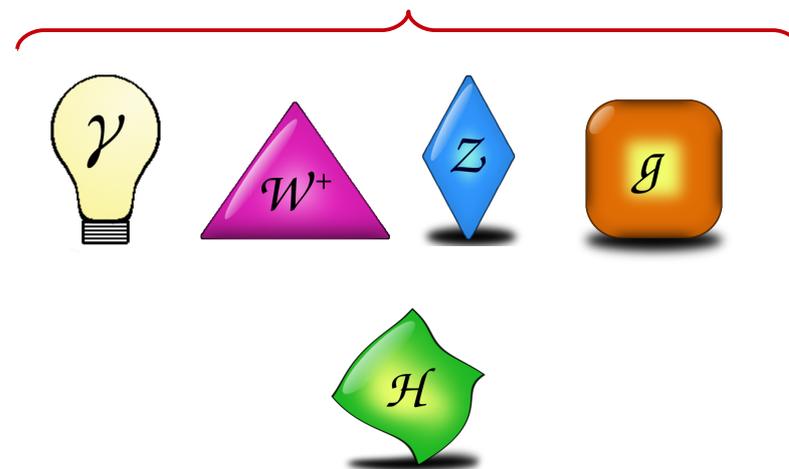
Modèle Standard de la physique des particules

- ◆ Théorie physique qui décrit les **particules élémentaires** (les plus petits constituants de l'univers) et leurs **interactions**
 - constituants *élémentaires* : “particules” sans structure interne
 - *interactions* : les forces qui s'exercent entre ces composants élémentaires

fermions



bosons



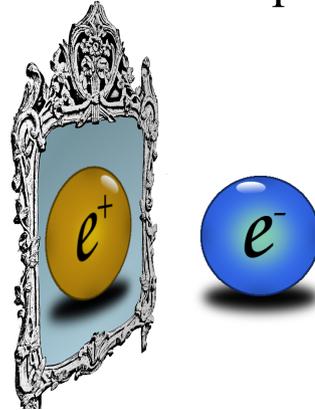
- ◆ Très bien vérifié avec une grande précision

Limitations du Modèle Standard

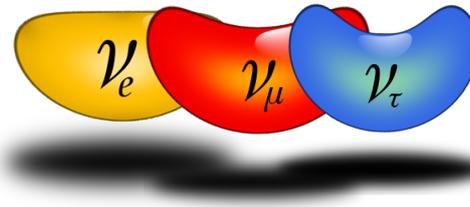
- ◆ Il existe des **signes concrets** de physique au-delà du SM :
 - absence d'antimatière dans l'univers
 - masses des neutrinos
 - matière noire
- ◆ Caractéristiques **intrigantes (problèmes ?)** du SM :
 - hiérarchie des masses et saveurs
 - unification des forces à grande échelle ?
 - absence de violation de CP dans les interactions fortes
- ◆ Il y a **peu d'évidence** de nouvelle physique :
 - anomalie des saveurs dans les décroissances semileptoniques des mésons B
 - déviation de $\mu(g-2)$

Signes concrets de nouvelle physique

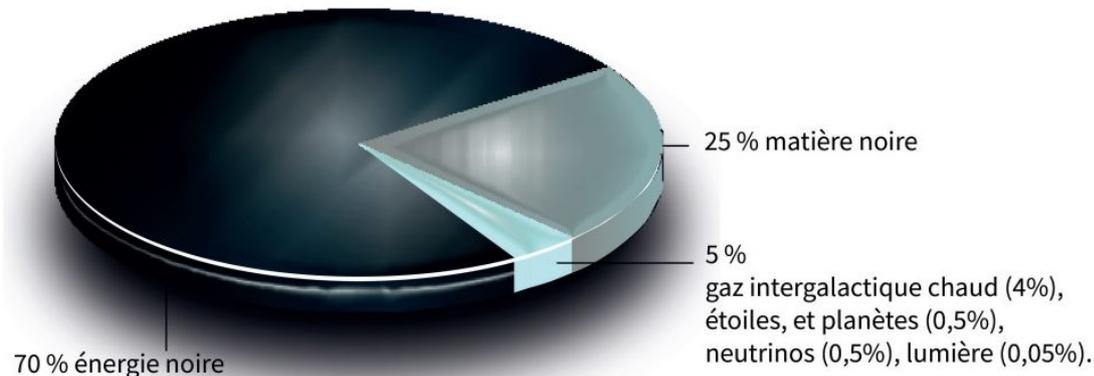
- ◆ Pourquoi y a-t-il une petite différence entre la matière et l'antimatière ?
 - un millionième de fois plus de matière que d'antimatière au début de l'univers



- ◆ Physique du **neutrino**
 - est-il sa propre anti-particule ?
 - pourquoi a-t-il une masse ?



- ◆ Matière noire CONTENU DE L'UNIVERS AUJOURD'HUI

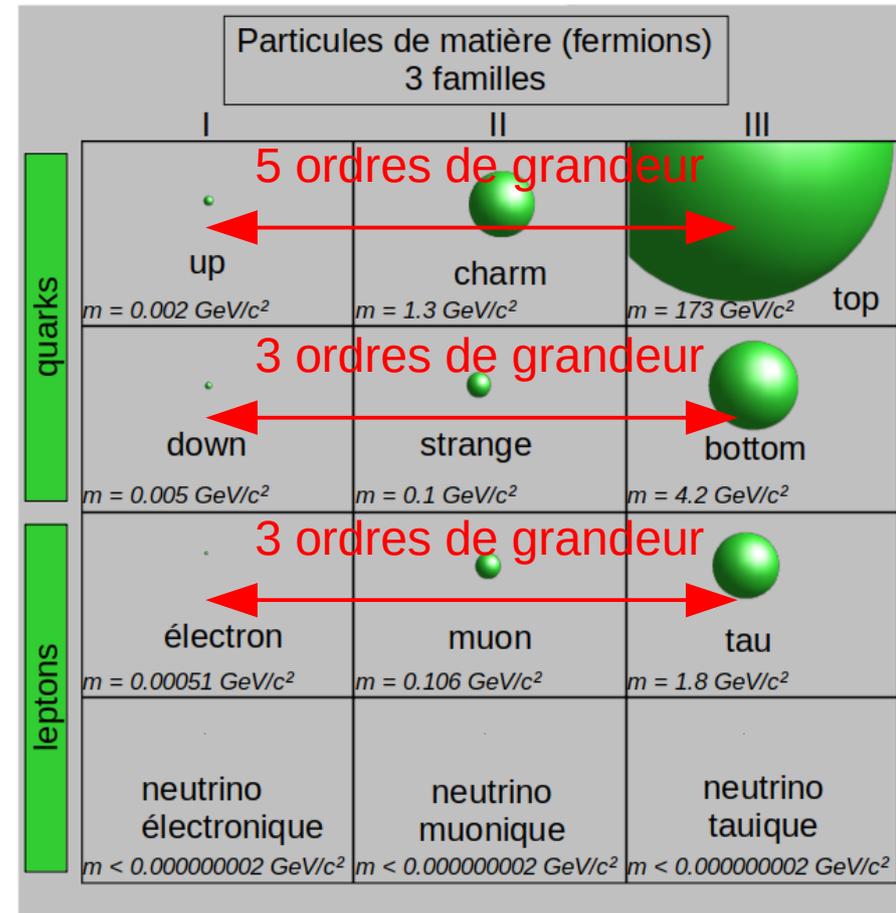
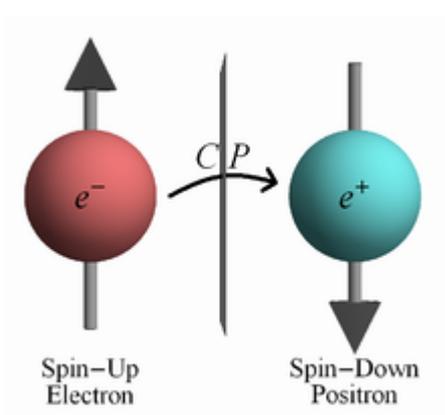


“Problèmes” du Modèle Standard (1)

- ◆ Pourquoi trois familles, avec des masses si différentes ?



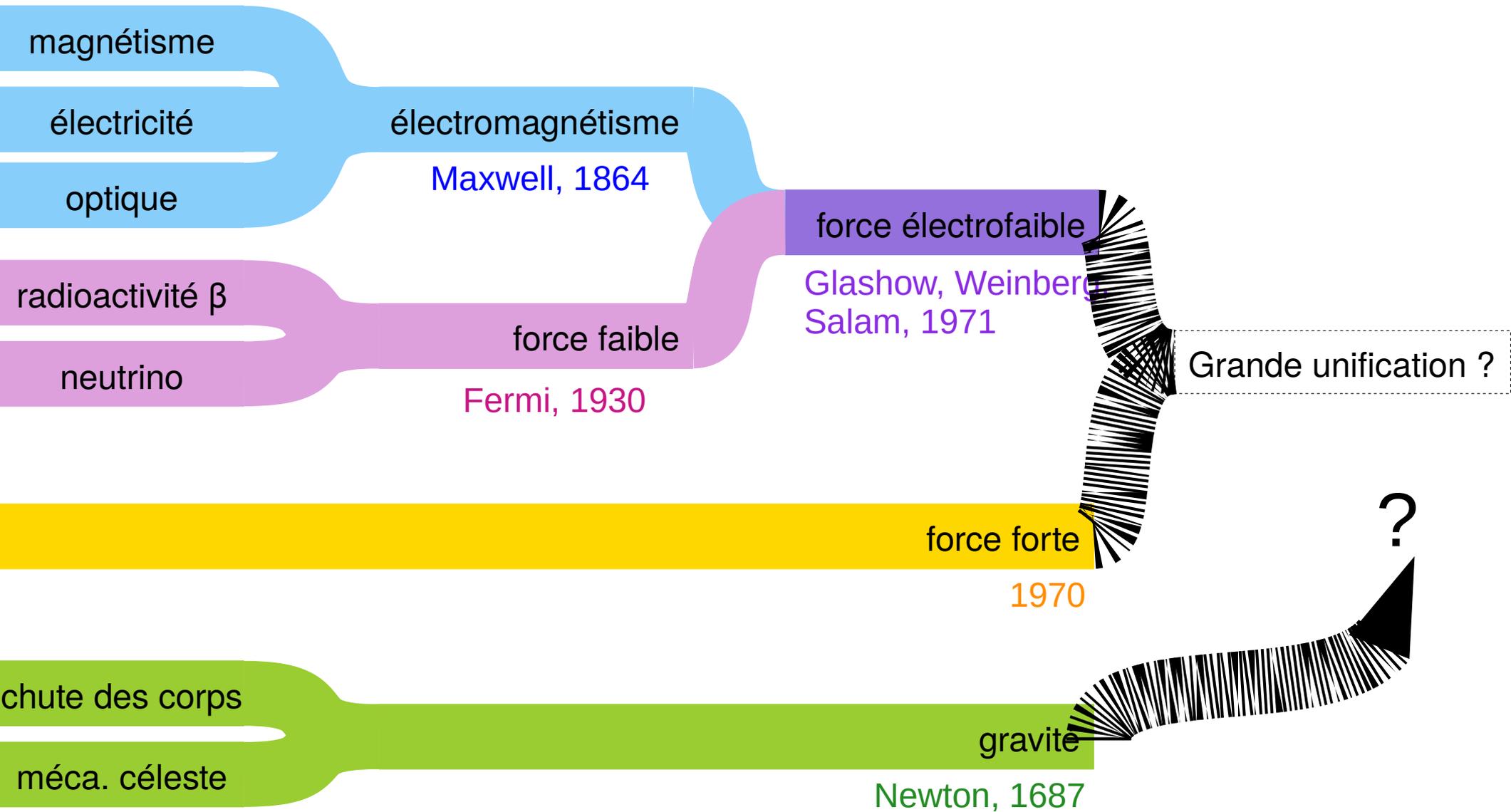
- ◆ Absence de violation de la symétrie CP par l'interaction forte ?



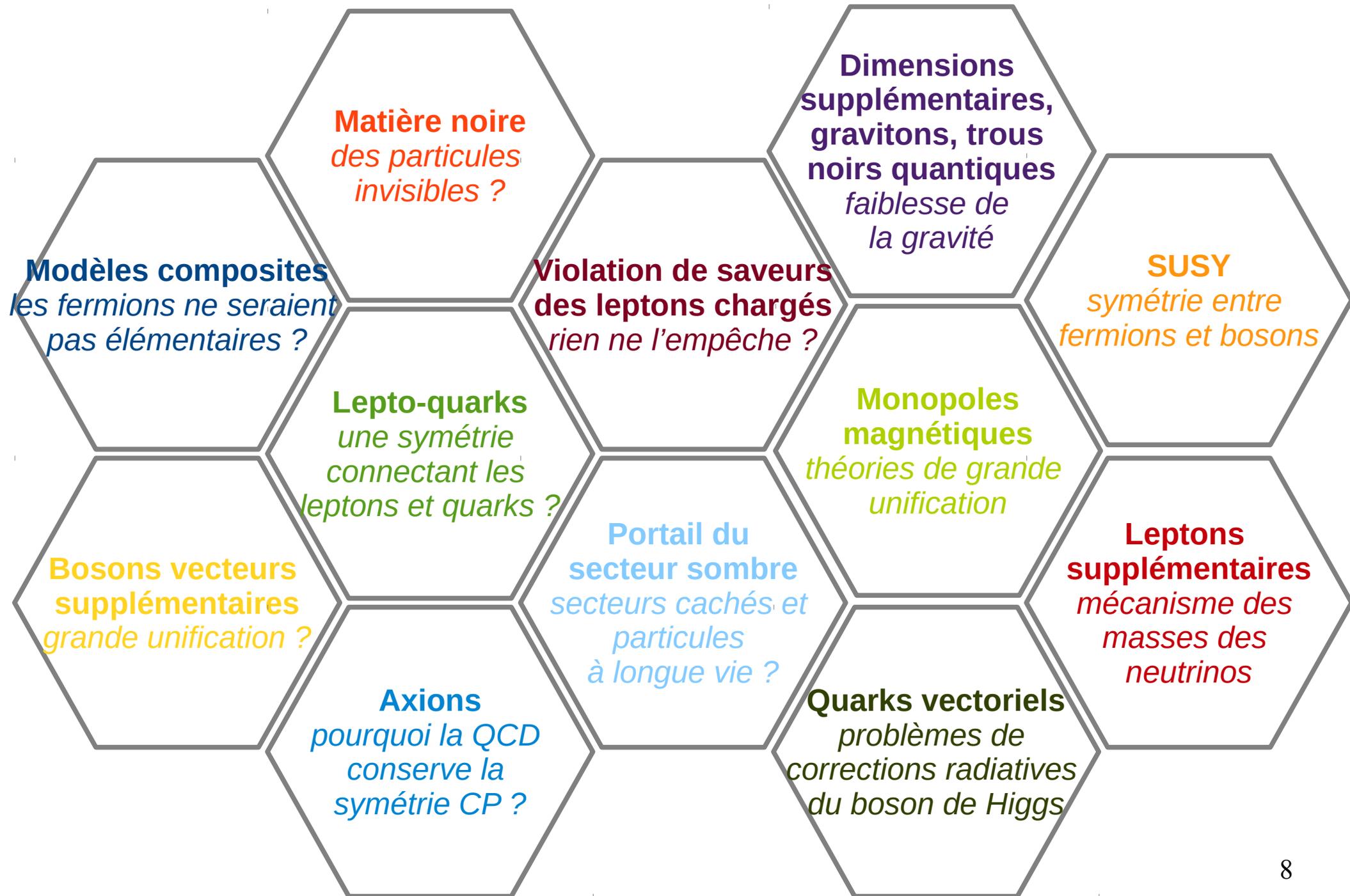
10

“Problèmes” du Modèle Standard (2)

◆ Pourra-t-on unifier toutes les interactions ?



Quelle nouvelle physique ?



Évidences expérimentales de nouvelle physique ?

◆ Violation de “l’universalité leptonique” ?

- SM: les leptons (électrons, muons, taus) se comportent de façon identique
- déviation à la théorie mesurée dans $b \rightarrow sl\ell$ (écart-type de $\sim 3\sigma$)

Modèle Standard

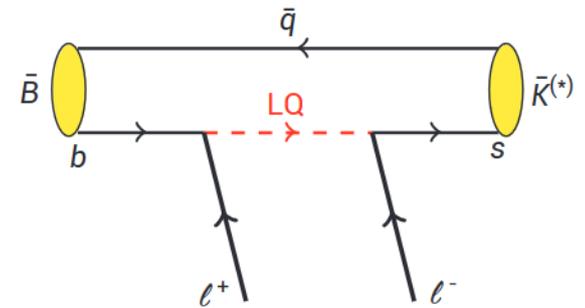
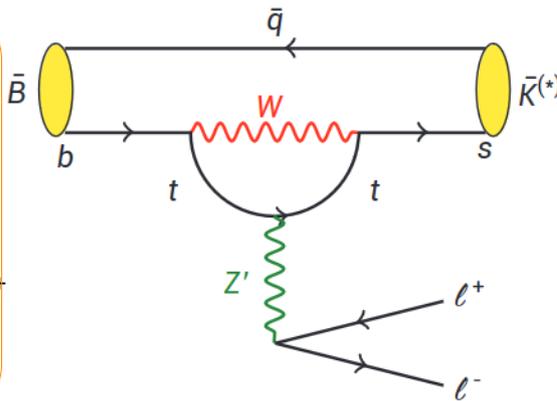
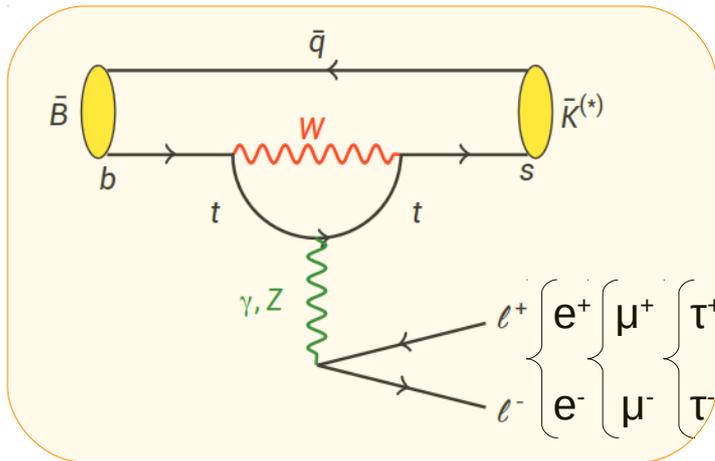


Image :
Reflet de la physique n°66

◆ Moment magnétique anomal du muon ($g-2$)

- effet du champ magnétique sur les particules subatomiques chargées

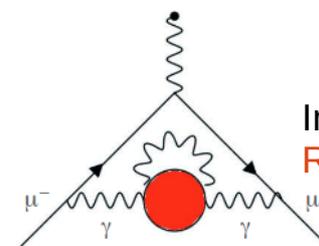
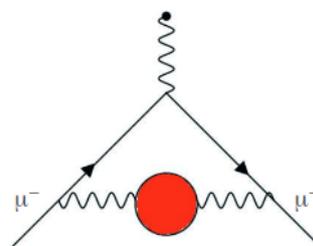
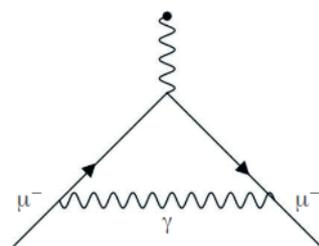
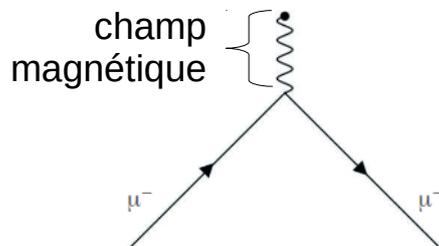


Image :
Reflet de la physique n°79

- suivant les calculs, écart-type de 5.1σ ou 1.7σ entre la mesure et la prédiction théorique

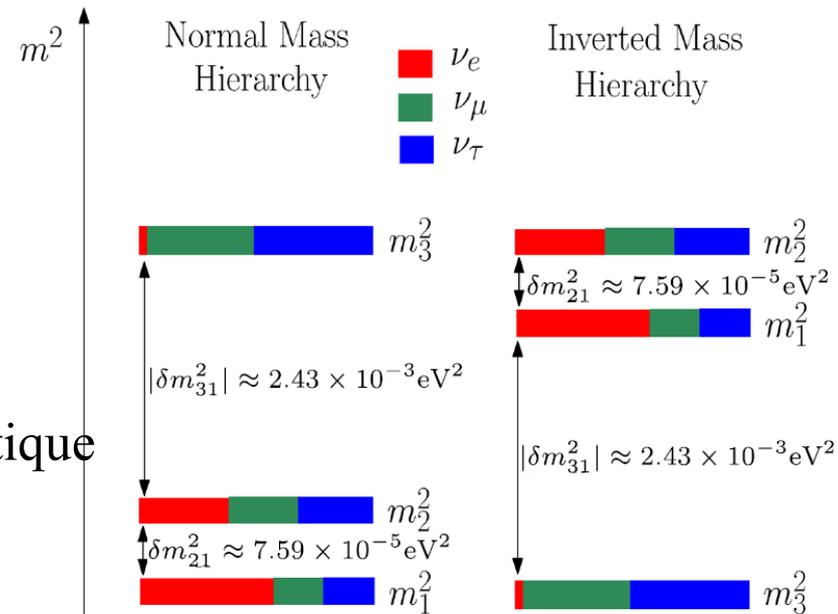
Limitations du Modèle Standard

Physique des particules hors-accélérateurs (neutrinos et matière noire)

Physique des particules auprès des accélérateurs

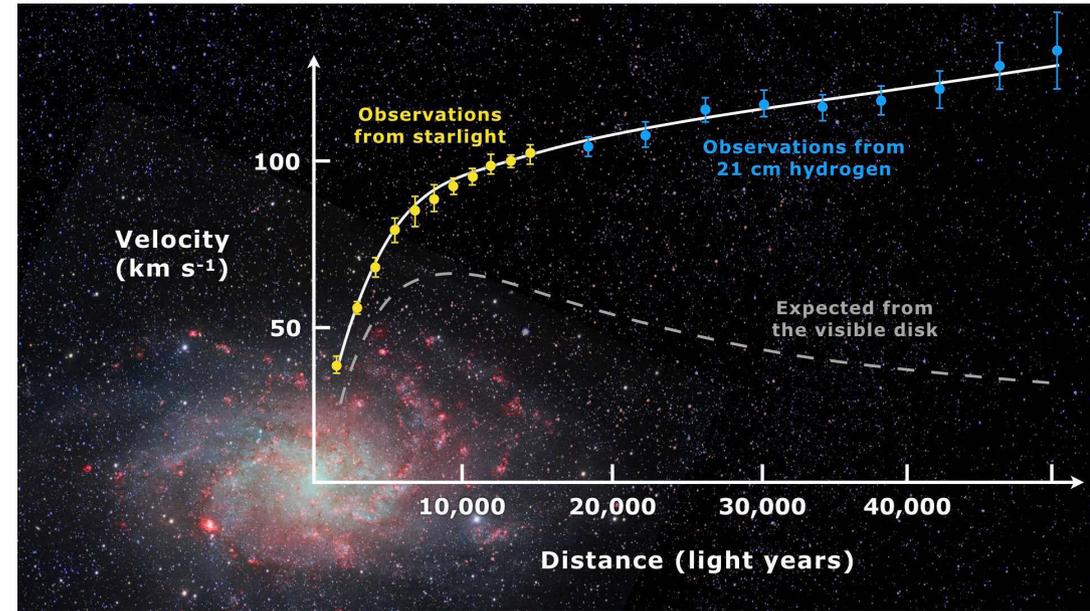
Les neutrinos

- ◆ Particule n'interagissant avec la matière que par **interaction faible**
- ◆ **Oscillations** des neutrinos :
 - ν_e provenant du soleil moins nombreux que prévu
 - problème depuis les années 1960 jusqu'en 2001
 - les neutrinos seraient en fait la **superposition** quantique de **trois états**
 - “angles de mélange” maintenant bien mesurés
 - on ne connaît toujours pas la hiérarchie des masses des neutrinos
 - phénomène observé maintenant pour tous les neutrinos ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ en 2010, $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ en 2011)
- ◆ **Masse nulle** d'après le Modèle Standard
 - mais on sait qu'elle est non nulle à cause des oscillations
 - mesures : < 0.3 eV
- ◆ Le neutrino pourrait être sa **propre anti-particule**



La Matière Noire

- ◆ Initialement postulée pour expliquer les vitesses de rotation des galaxies
 - mais beaucoup d'autres preuves
- ◆ Nouvelle particule inconnue ?
 - massive
 - neutre (ne brille pas)
 - ni trop chaude, ni trop froide
 - interagit très très faiblement (ni avec elle-même ni avec la matière ordinaire)
 - stable ou à très longue durée de vie



◆ Candidats

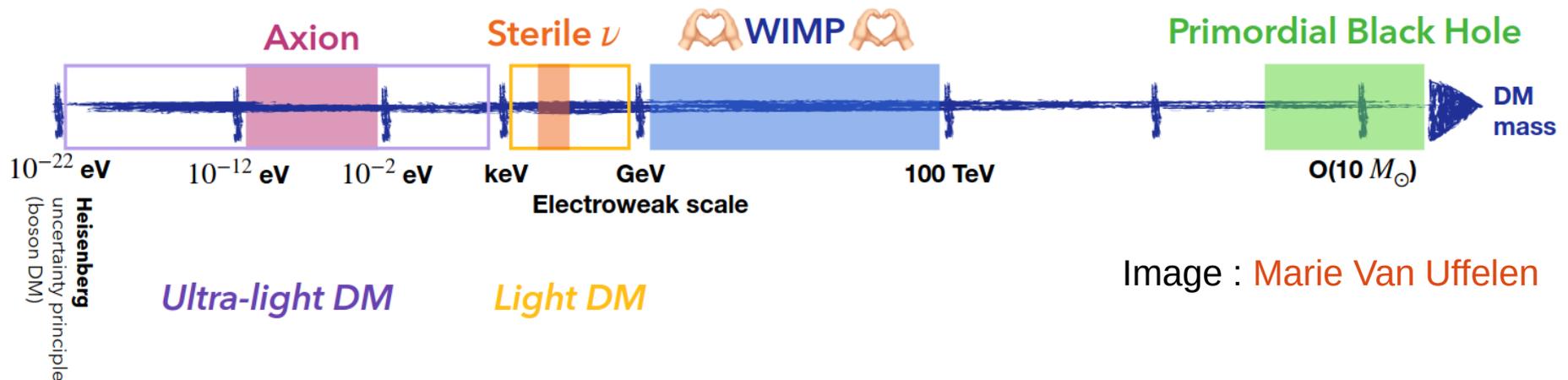
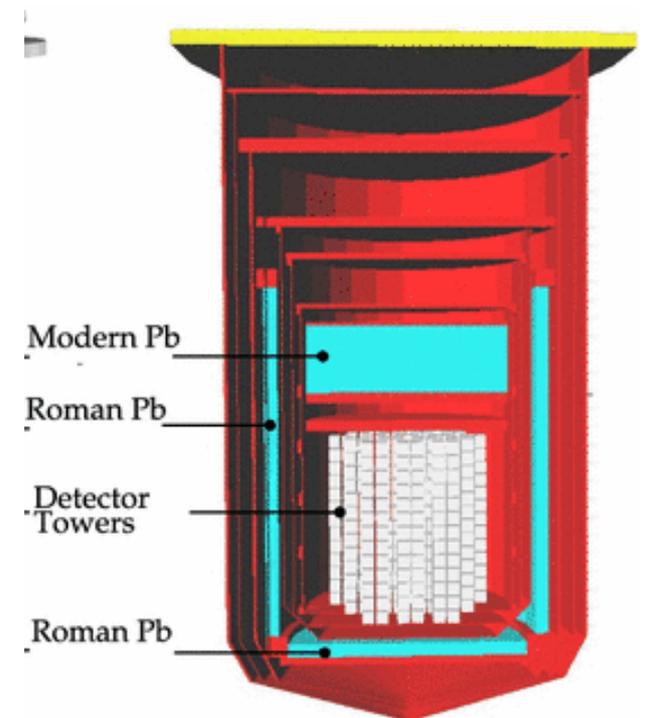
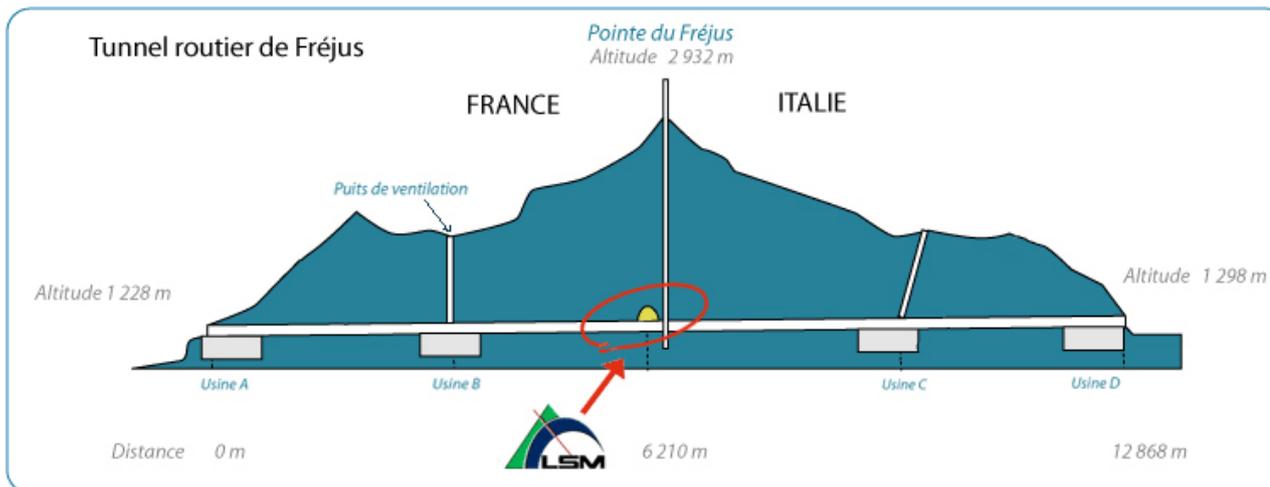


Image : Marie Van Uffelen

- ◆ Autre solution : changer les équations

Recherche des neutrinos/matière noire

- ◆ Interactions très rares (signal très faible)
- ◆ Bruit de fond important provenant principalement du rayonnement cosmique
 - il faut se débarrasser des particules les plus pénétrantes (les muons)
 - pour cela, on enterre les expériences et on blinde les détecteurs
- ◆ Aussi bruit de fond radioactif environnant
 - matériaux utilisés (plomb, argon, colles, etc)
 - radon



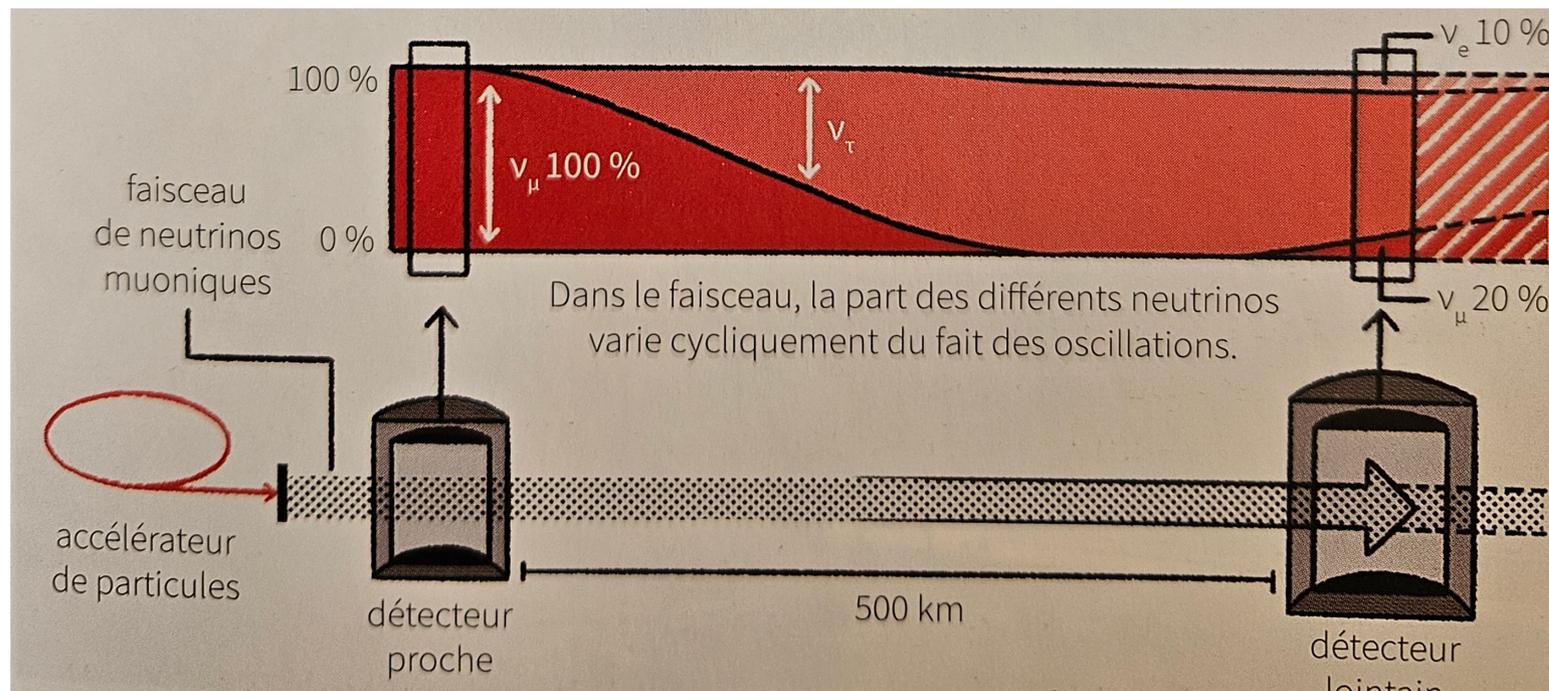
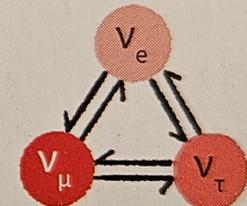
Oscillations des neutrinos

- ◆ **Oscillations** des neutrinos :
 - les neutrinos sont la **superposition** quantique de **trois états**
- ◆ **Observation** à l'aide :
 - d'une **source** de neutrinos
 - réacteur nucléaire pour ν_e
 - faisceau d'accélérateur pour ν_μ
 - un **détecteur proche** pour connaître le taux initial
 - un **détecteur lointain** pour connaître les taux finaux

3 saveurs de neutrinos...

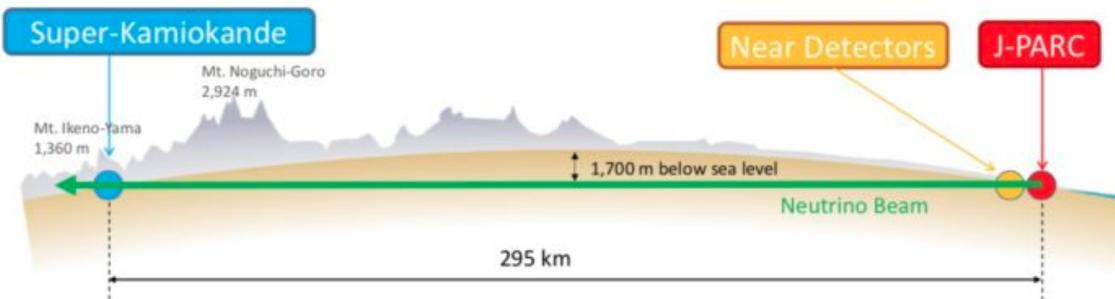
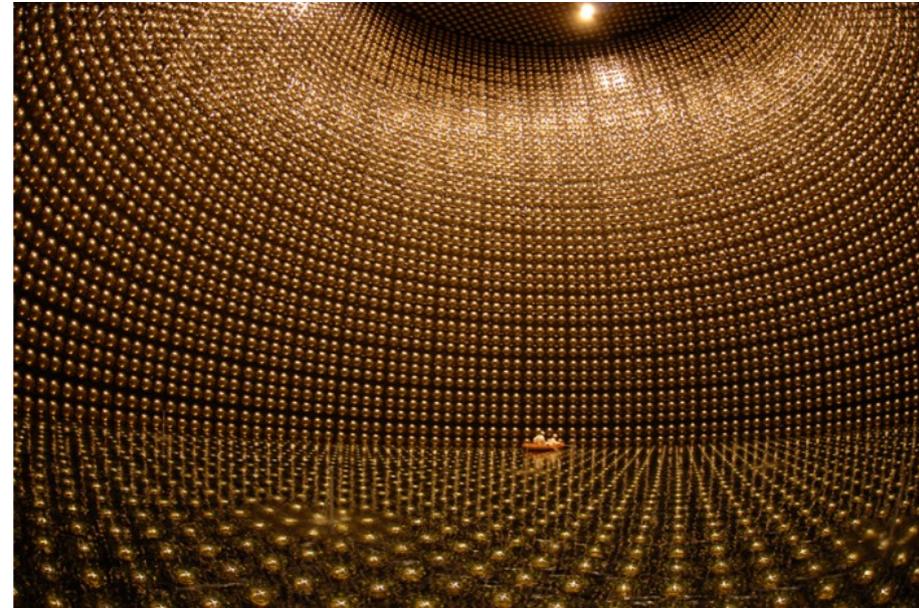
- neutrinos électroniques (ν_e)
- neutrinos tauïques (ν_τ)
- neutrinos muoniques (ν_μ)

...et 6 oscillations possibles...



T2K (Tokai To Kamioka)

- ◆ Expérience SuperKamiokande (1996)
 - 50000 t d'eau
 - 11000 photomultiplicateurs
- ◆ Faisceau de neutrinos par accélérateur



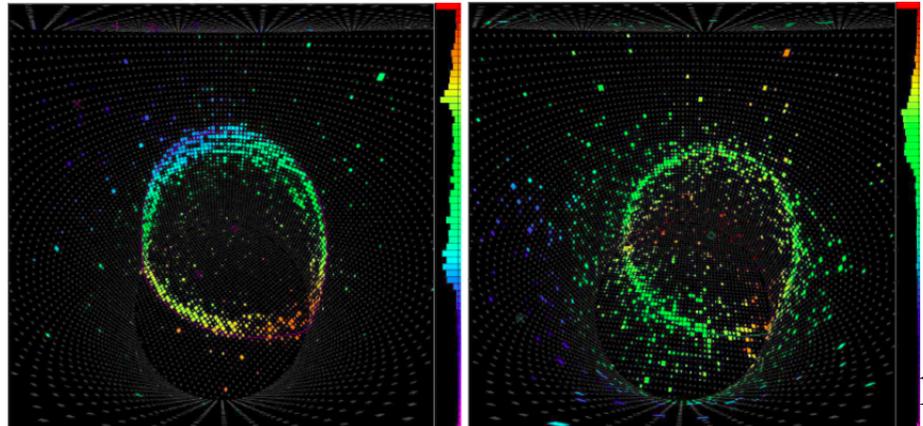
- ◆ Le neutrino va (parfois) interagir avec un noyau d'oxygène de l'eau
- ◆ L'électron ou le muon créé va émettre un rayonnement Cherenkov
 - flash de lumière lorsqu'une particule chargée va plus vite que la vitesse de la lumière dans un milieu di-électrique
 - émis dans un cône centré sur la trajectoire, d'ouverture angulaire θ

- ◆ T2K : depuis 2010
- ◆ Hyper-Kamiokande :
20 fois + grand, 2027

$$\cos \theta = \frac{c}{v n}$$

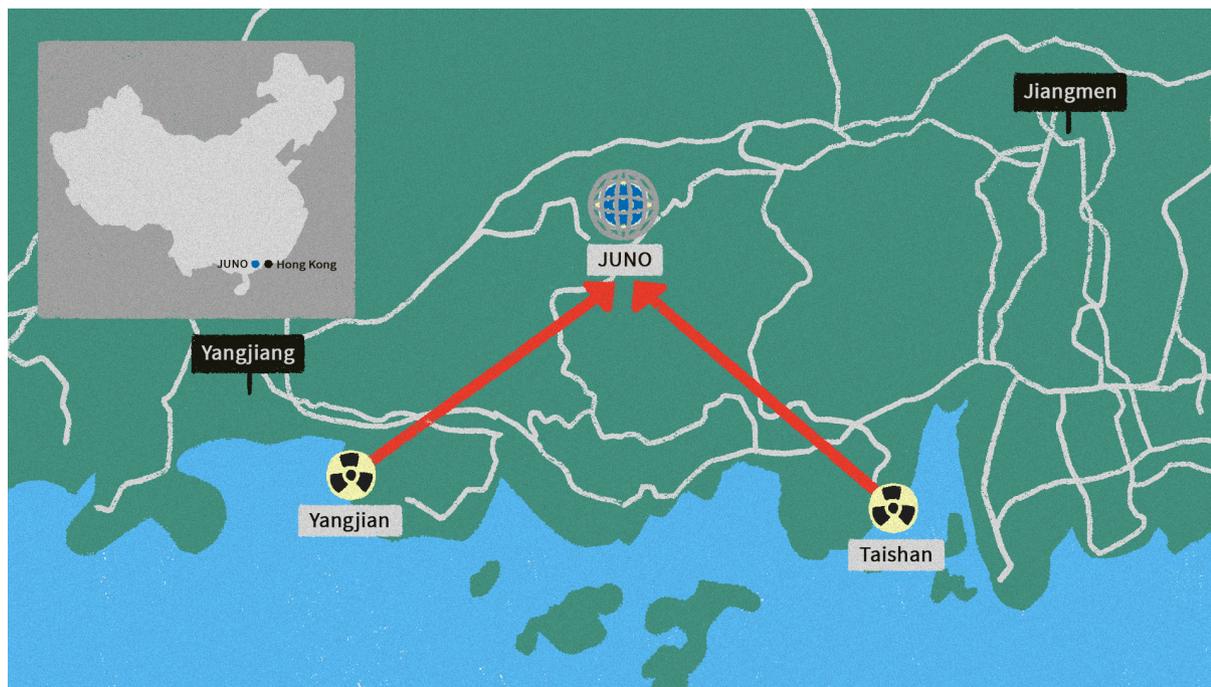
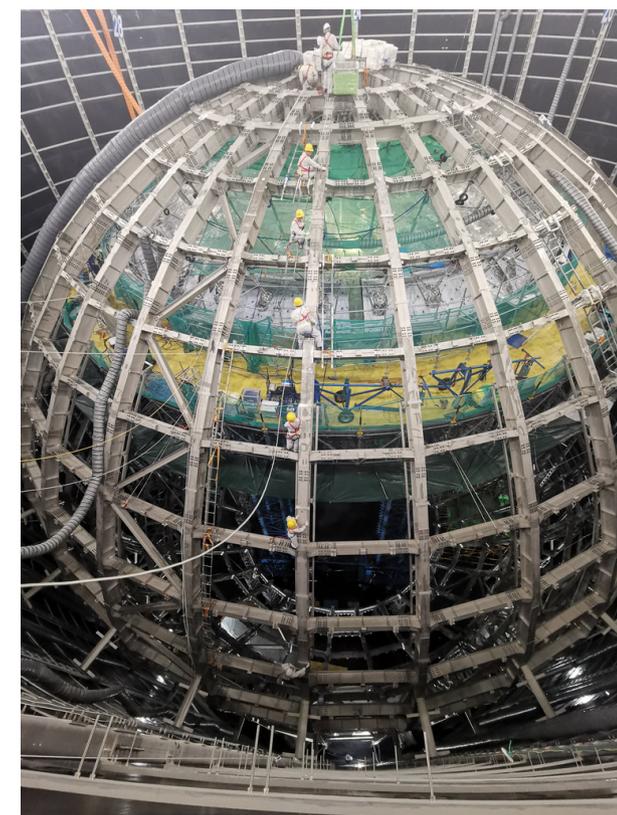
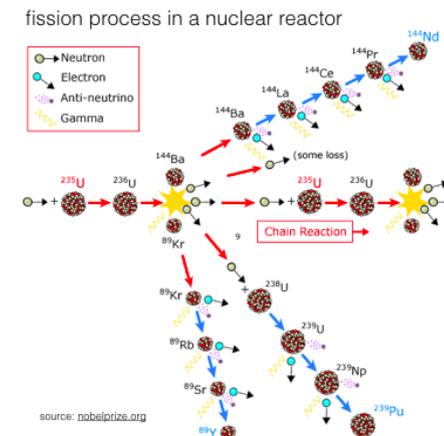
muon

électron



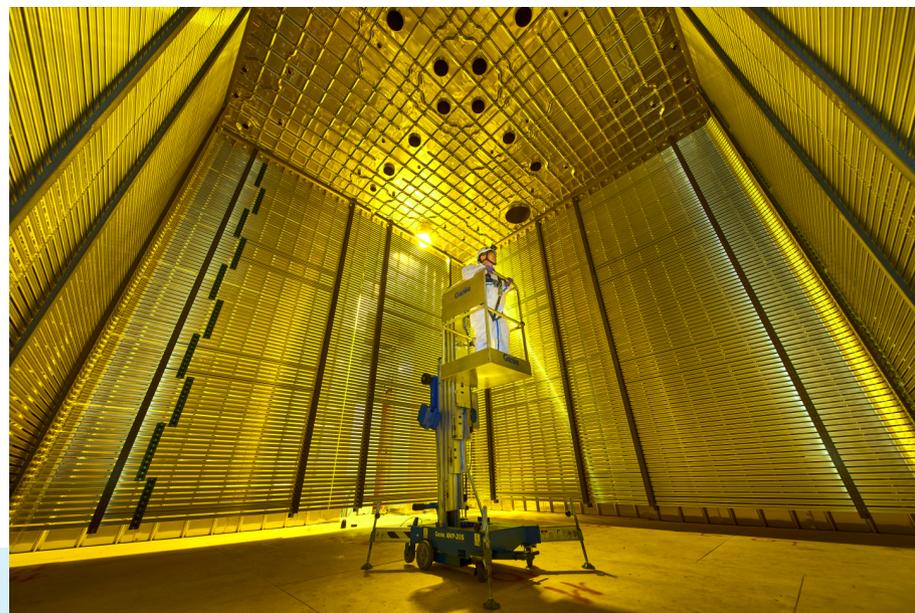
JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory)

- ◆ Détecteur d'antineutrinos émis par les **réacteurs nucléaires**
- ◆ But : ordre des masses des neutrinos + oscillation
- ◆ Sphère transparente de 35.4 m de diamètre
 - remplie de 20 000 tonnes de liquide scintillant
 - 42 000 photo-multiplicateurs répartis tout autour
 - enterré à 700 m de profondeur
- ◆ Mise en service prévue en 2025

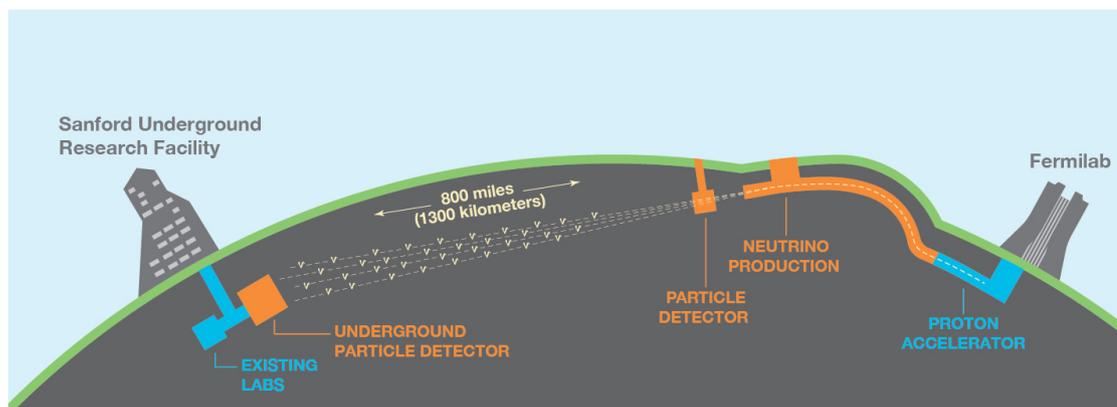


DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)

- ◆ Détecteur de neutrinos issus de faisceaux
- ◆ But : l'origine, la nature, les masses et le mélange des neutrinos
- ◆ Faisceau de (anti)neutrinos muoniques produit par accélérateur au Fermilab (Chicago) et orienté vers le détecteur lointain de DUNE



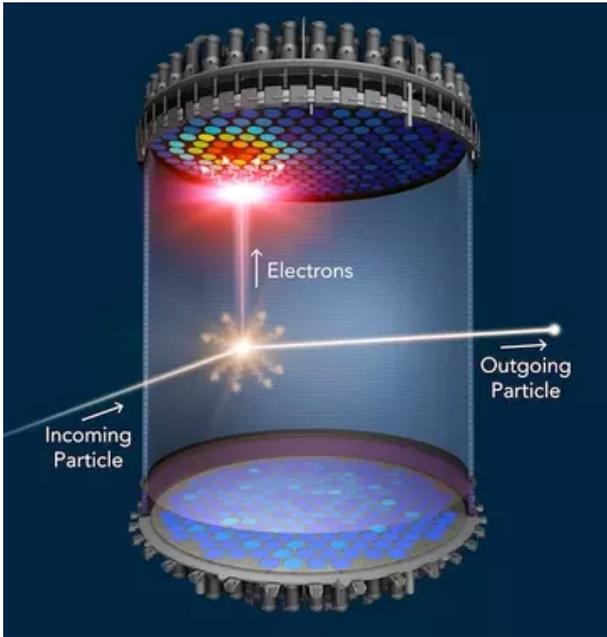
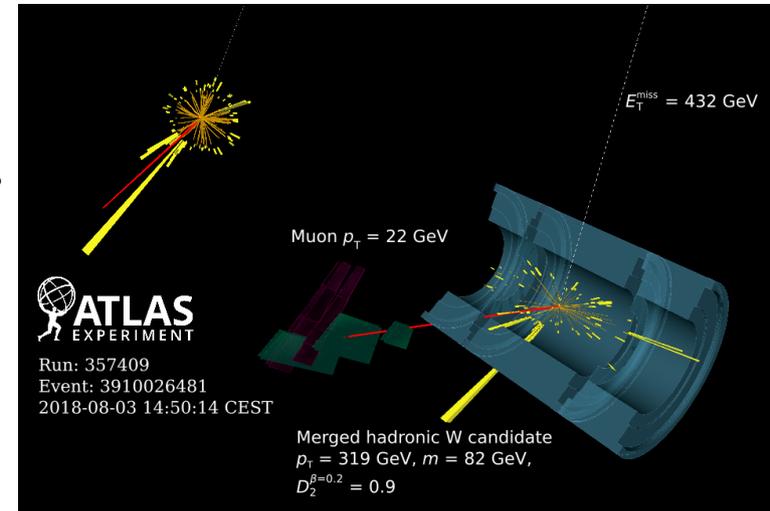
Cryostat de Proto-Dune (1/20ème de Dune)



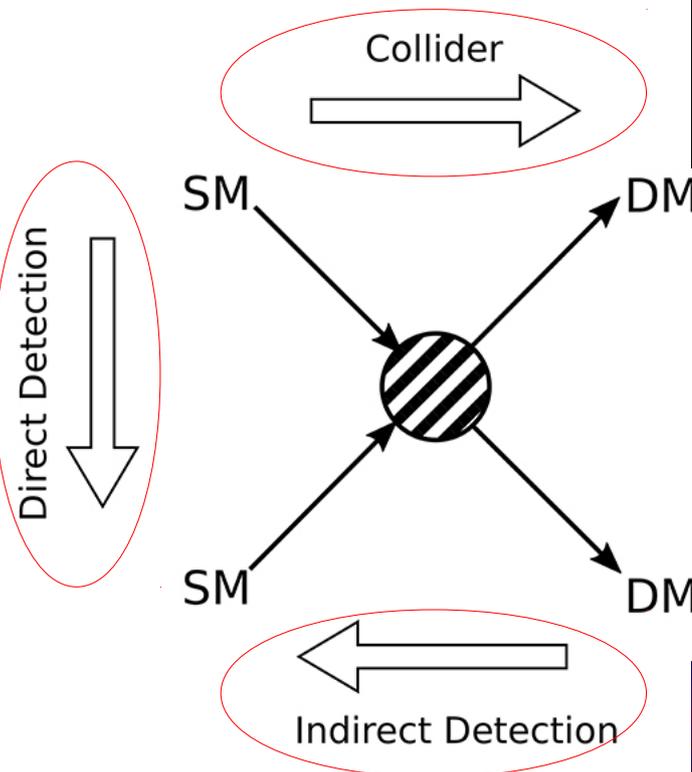
- ◆ Quatre modules de détection
 - chaque module contient 17 kt d'argon liquide et est instrumenté en chambre à projection temporelle (TPC) afin d'étudier finement les interactions des neutrinos avec l'argon
- ◆ Démarrage prévu vers 2030

Méthodes de détection de la matière noire (DM)

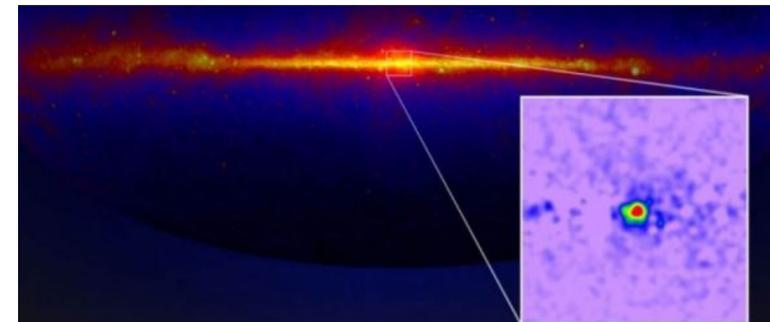
Une particule de DM est créée par un collisionneur. Elle s'échappe du détecteur, créant un déficit d'énergie



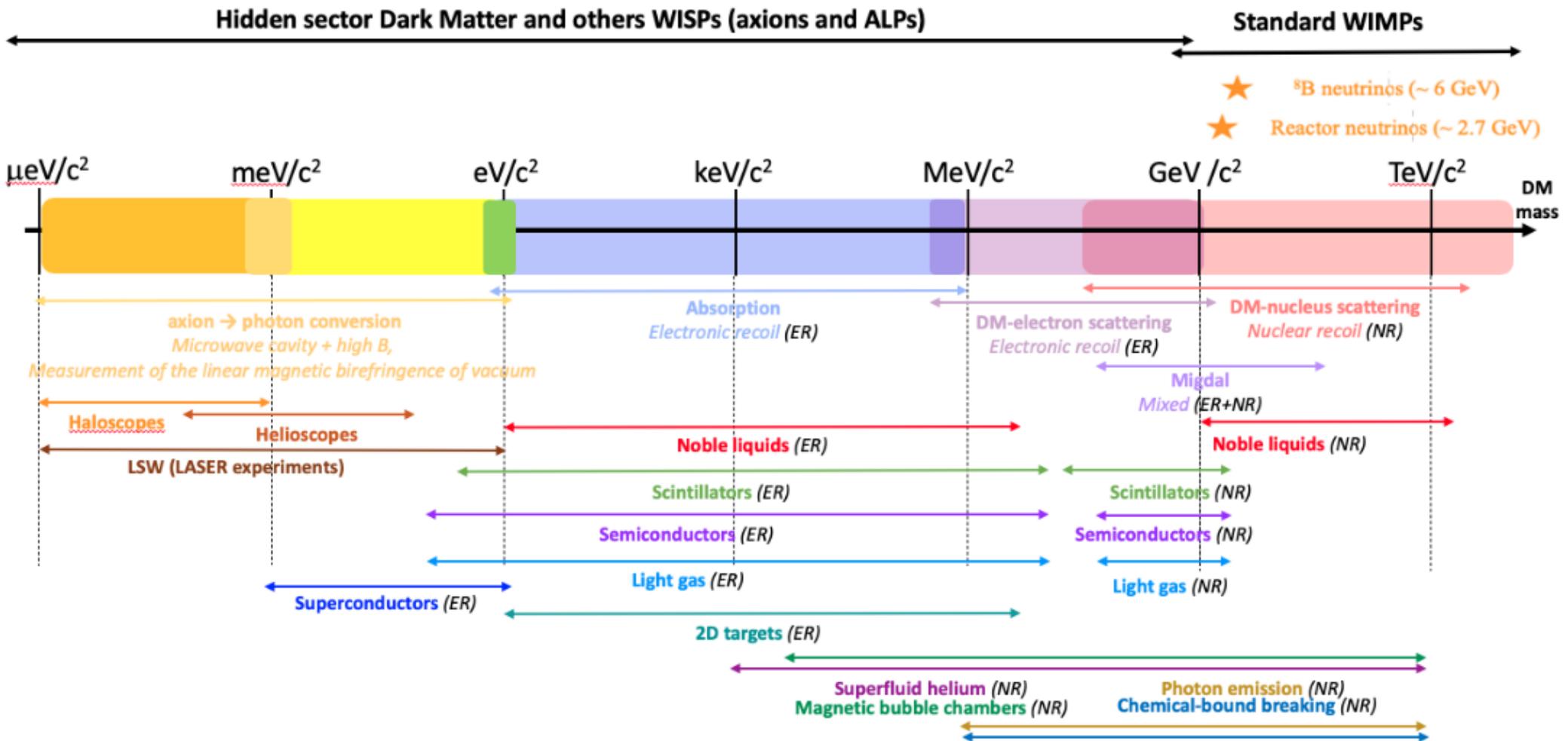
En passant à travers le halo de matière noire, une particule de DM peut taper dans un atome. On mesure le recul de cet atome.



Deux particules de DM s'annihilent, ou une particule de DM se désintègre, en matière ordinaire (photons γ , rayons cosmiques, neutrinos)

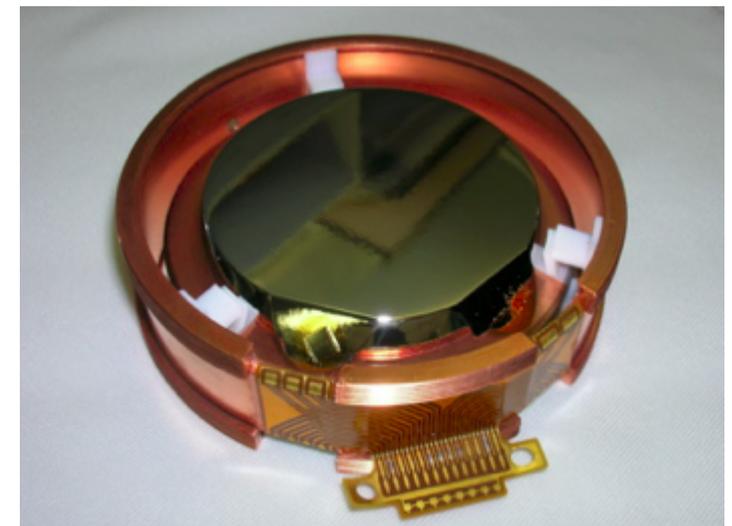
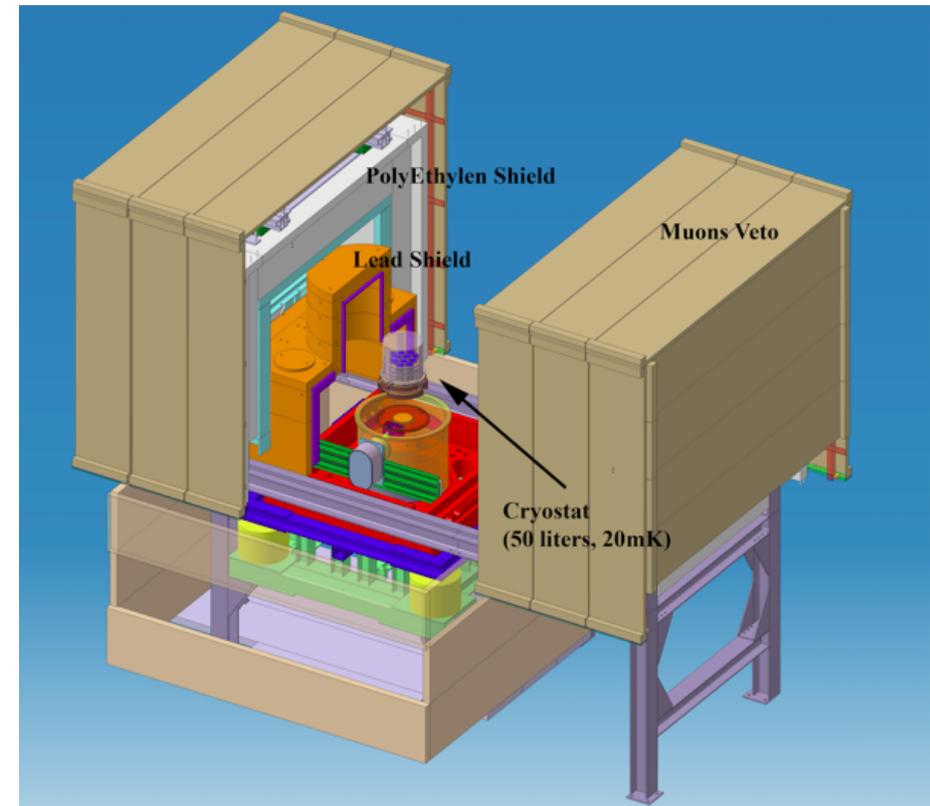


Détection directe de matière noire



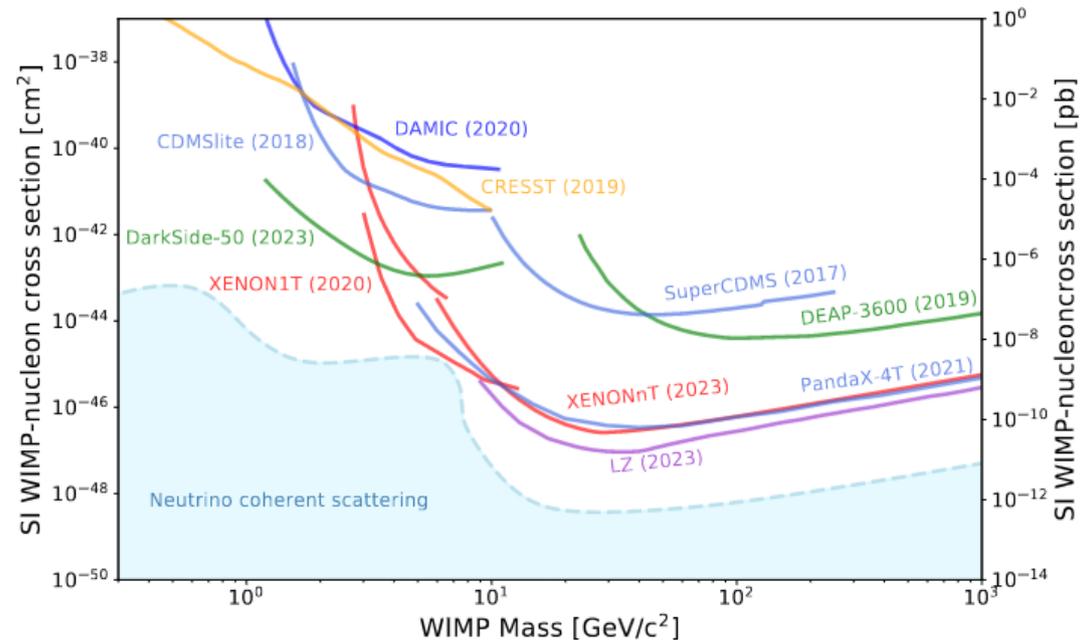
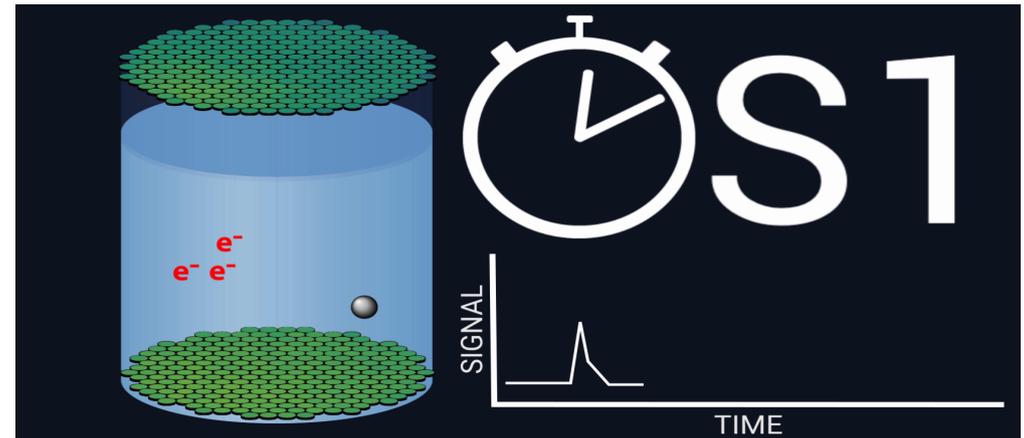
EDELWEISS

- ◆ Recherche directe de matière noire
- ◆ Cherche à mesurer la chaleur produite par les chocs dans des détecteurs germanium refroidis à 20 mK, et aussi à identifier les charges issues de ceux-ci
- ◆ Dans le tunnel de Modane (1700m de roche) + 40 t de plomb et de polyéthylène
- ◆ Les détecteurs sont des **bolomètres** constitués de cristaux de germanium hyper-purs, recouverts d'électrodes et sur lesquels est collée une thermistance en germanium dopé, sensible à des variations de températures subites de moins de 1 mK
- ◆ Depuis les années 1990



Recherche directe avec gaz nobles

- ◆ Recherche directe de matière noire
- ◆ Chambre à projection temporelle (TPC) à double phase
 - peut mesurer indépendamment la lumière et les signaux de particules chargées \Rightarrow reconstruction de la position et de l'énergie, identification des particules
- ◆ Plusieurs générations de détecteurs
 - xenon : XENON (2006) \rightarrow XENONnT (2021) \rightarrow DARWIN (2028)
 - argon : Darkside50 (2014) \rightarrow Darkside20k (2028)



Limitations du Modèle Standard

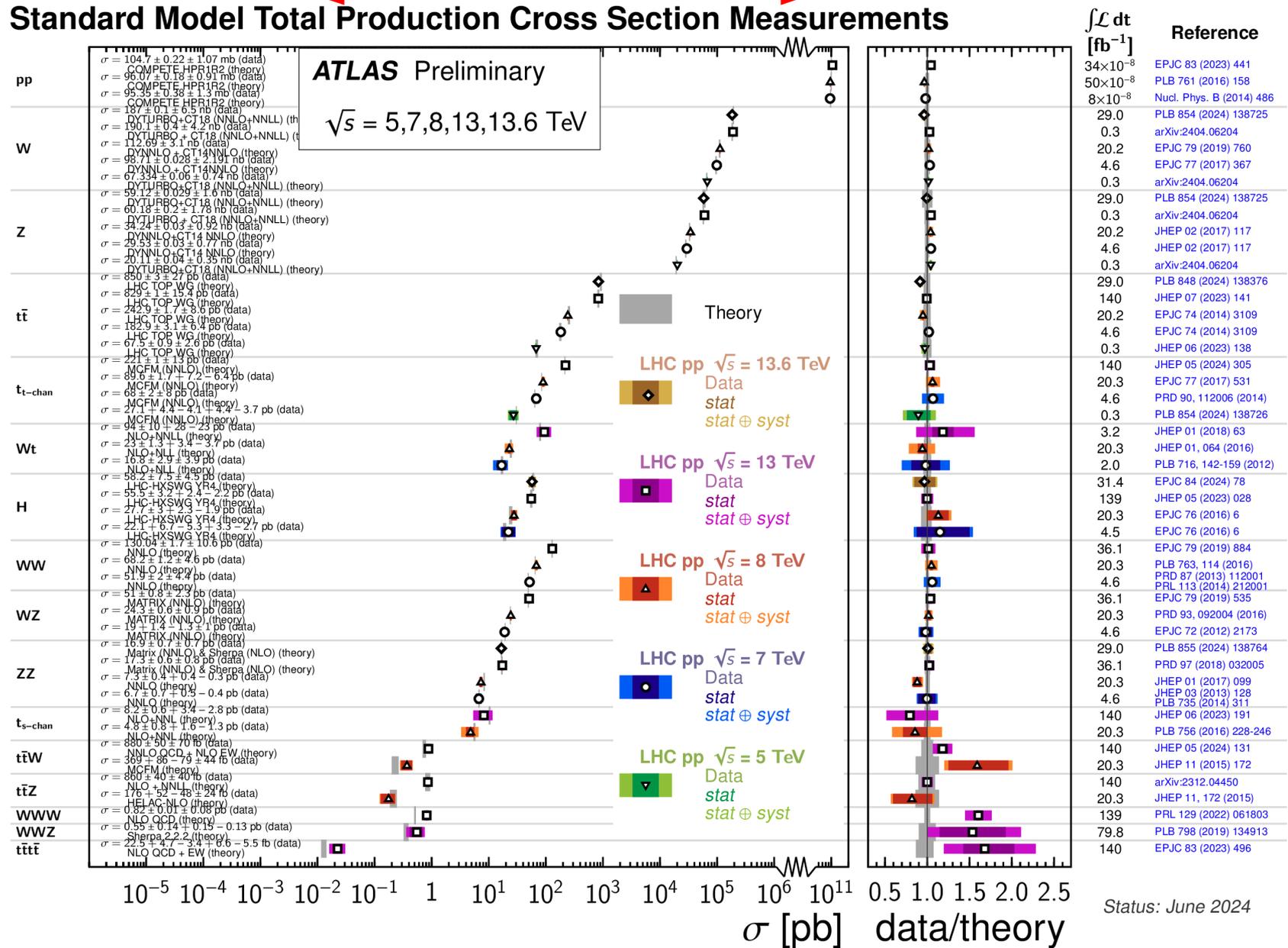
Physique des particules hors-accélérateurs

Physique des particules auprès des accélérateurs
(le LHC ici)

Mesures du Modèle Standard

◆ Exemple de mesures au LHC: Testé sur 13 ordres de grandeur !

Standard Model Total Production Cross Section Measurements



Status: June 2024

Recherche de nouvelle physique au LHC

◆ Résumé :

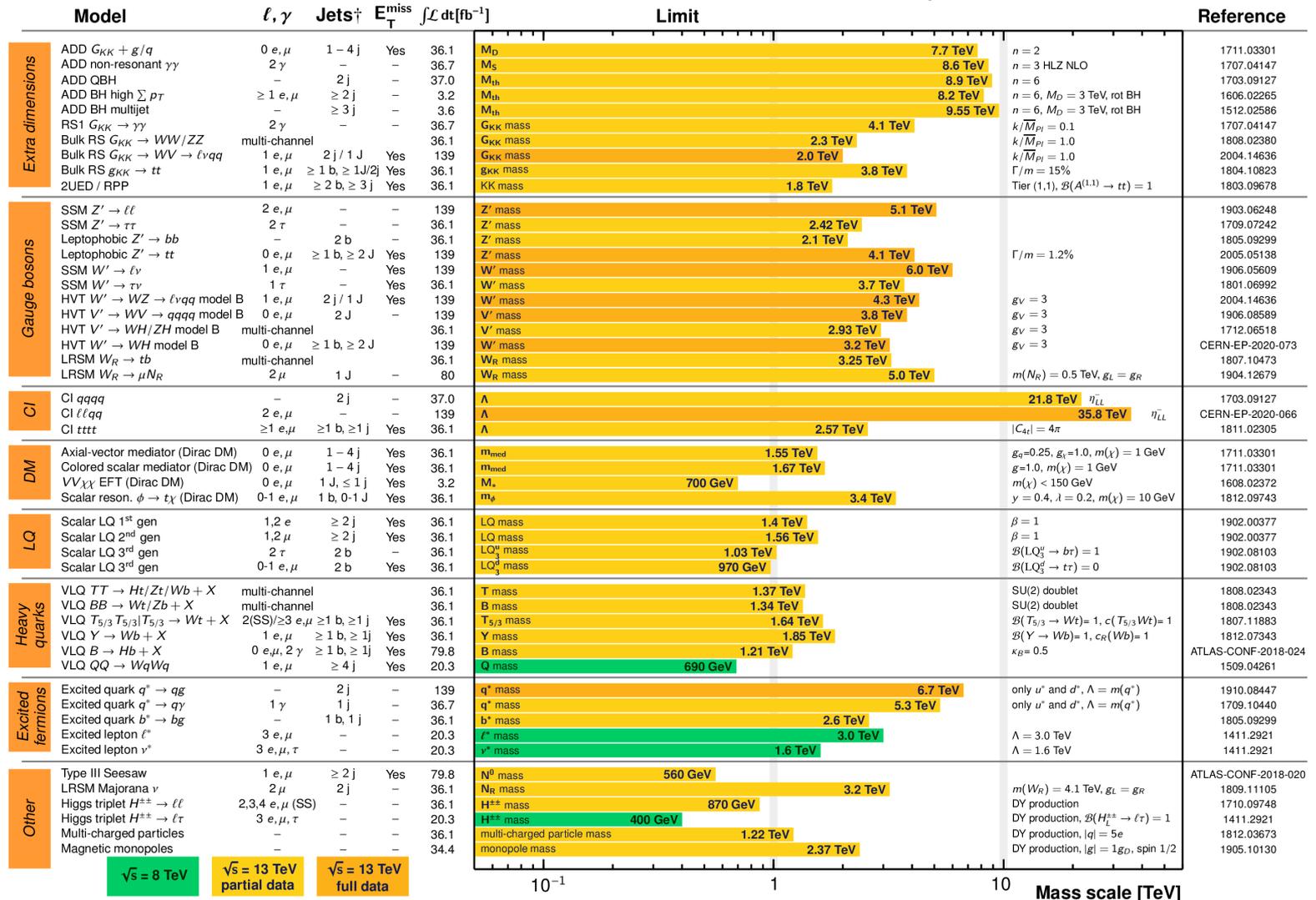
ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: May 2020

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 139) \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

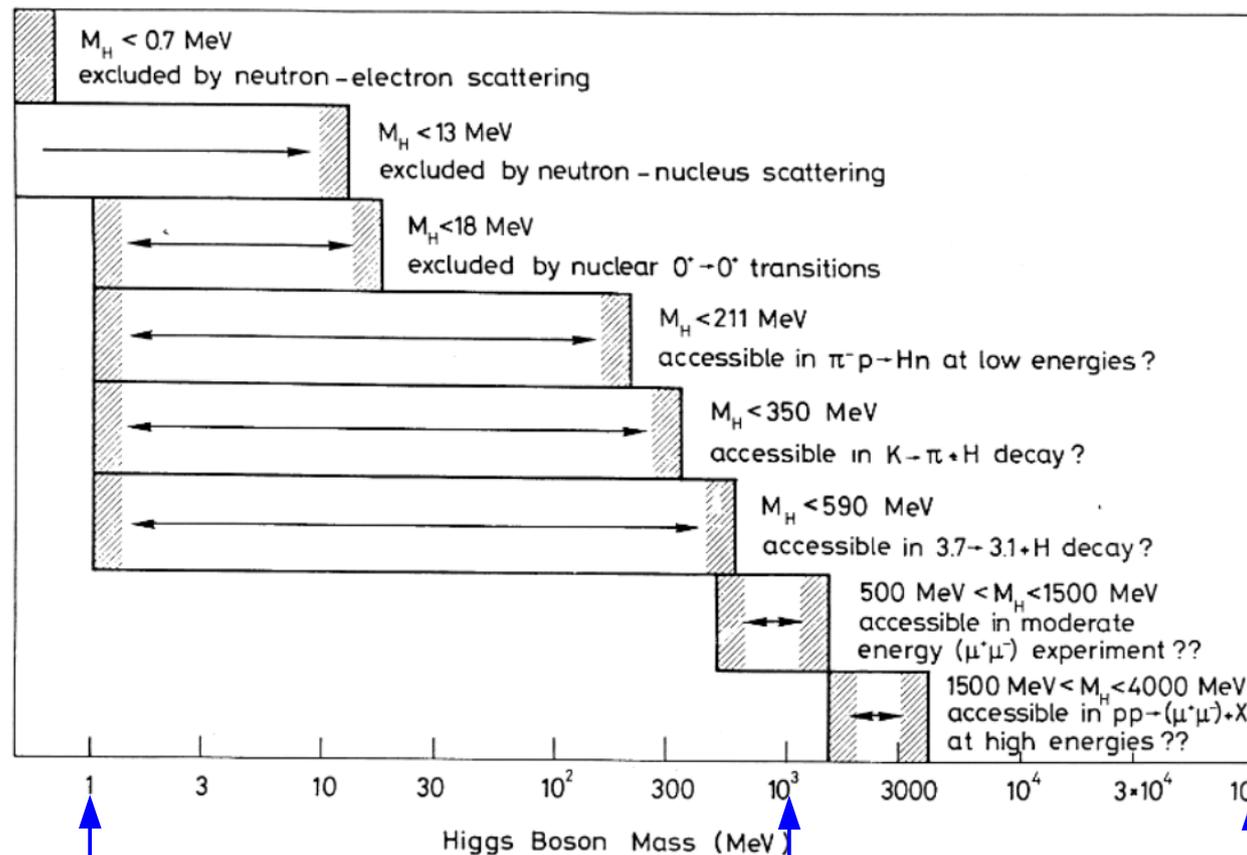
†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

◆ Nécessite de mesurer des électrons, muons, etc de plusieurs TeV

- contrainte pour la construction des détecteurs

Chercher le boson de Higgs

- ◆ On sait que le boson de Higgs crée sa propre masse, mais on ne sait **pas laquelle !**
- ◆ Article “A phenomenological profile of the Higgs boson”, 1975:
 - “Nous nous excusons auprès des expérimentalistes de n’avoir aucune idée de la masse du boson de Higgs [...]. Pour ces raisons nous ne voulons pas encourager de grosses recherches expérimentales du boson de Higgs.”



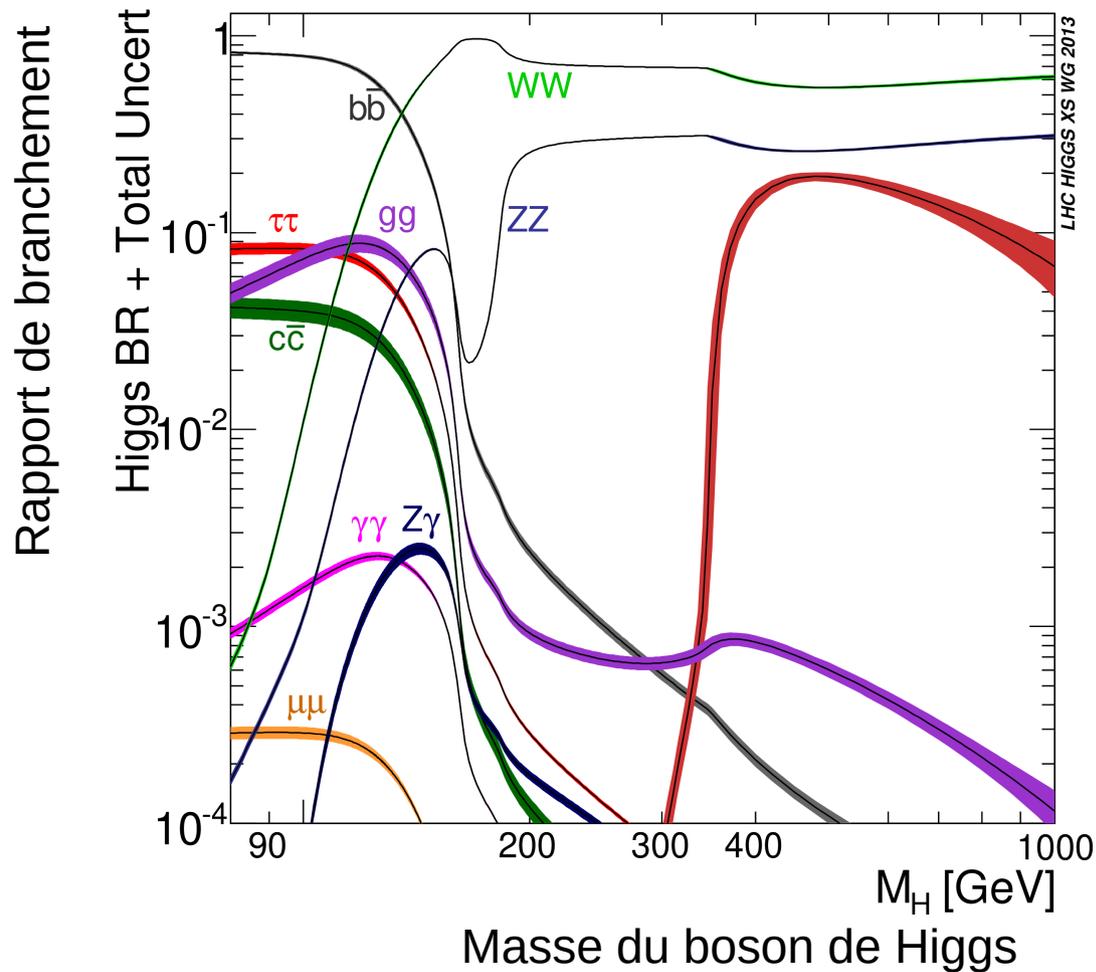
1 MeV

1 GeV

100 GeV

Recherche du boson de Higgs au LHC (1)

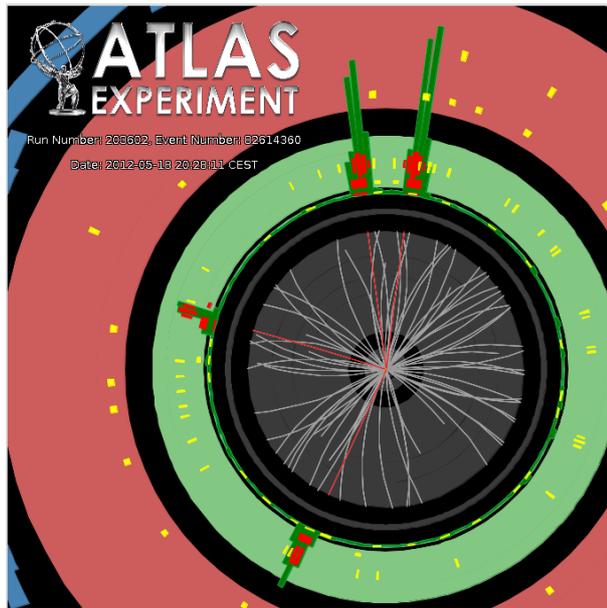
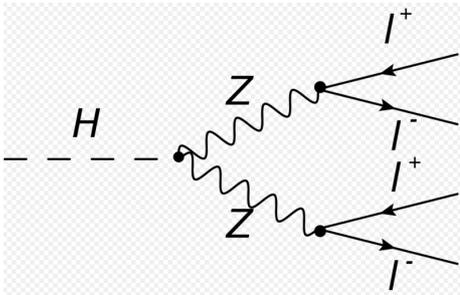
- ◆ Il peut se désintégrer en **beaucoup** de particules différentes
 - dépend de sa masse



- ◆ Il fallait être capable de découvrir le boson de Higgs quelle que soit sa masse
- ◆ Il a servi de référence pour le design des expériences ATLAS et CMS

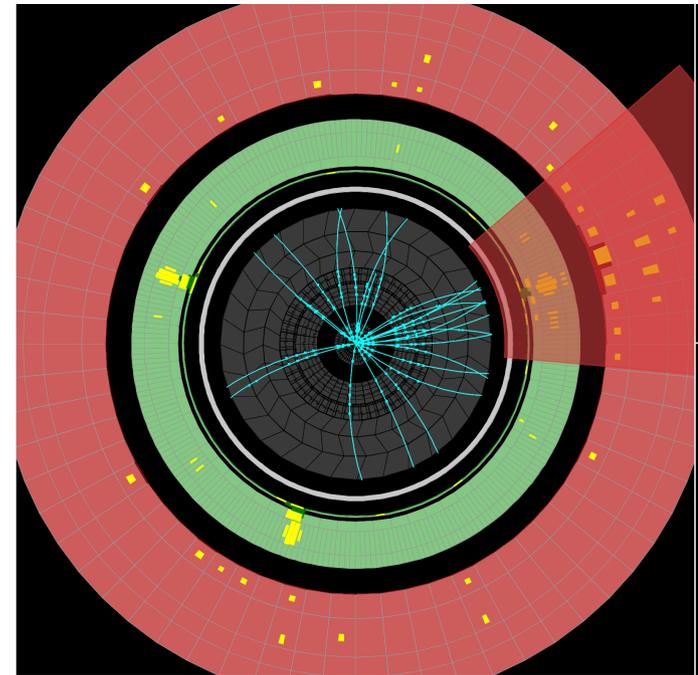
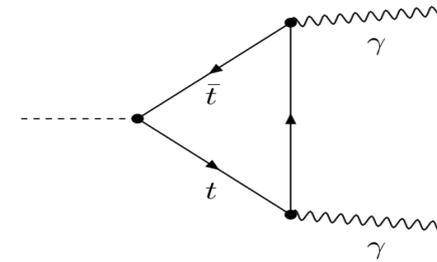
Les canaux en or

◆ $HH \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l = e$ ou μ)



- ◆ Avantage : très peu de bruit de fond (ie d'événements semblables au signal qu'on cherche)
- ◆ Désavantage : rare
 - 0.3/heure

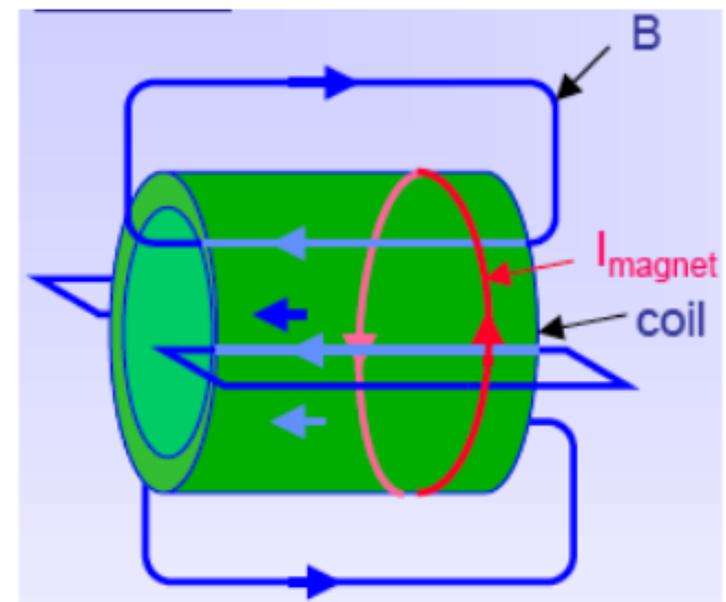
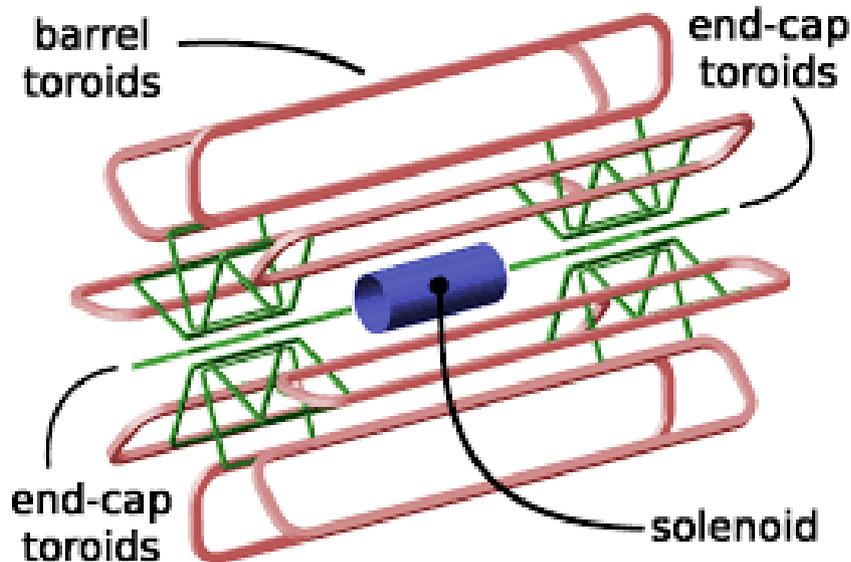
◆ $H \rightarrow \gamma\gamma$



- ◆ Avantage : signal clair
- ◆ Désavantage : assez rare
 - 1/heure

Le boson de Higgs comme référence (1)

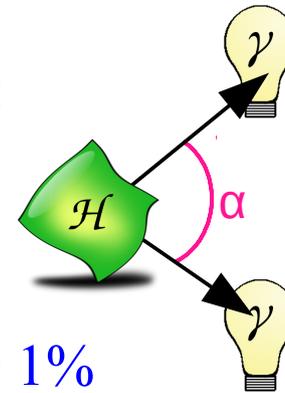
- ◆ Premier séminaire sur la possibilité d'un LHC en 1984 :
 - “Avec des collisionneurs hadroniques opérant à une énergie dans le centre de masse de plusieurs TeV, les muons seront les seuls leptons qui pourront être détectés sur une grande gamme d'énergie.”
- ⇒ chercher le boson de Higgs se désintégrant en **4 muons**
- ◆ Deux choix d'aimants pour ATLAS et CMS :
 - **toroïdal**
 - champ moins fort (2 T) mais moins de matière
 - ou **solénoïdal**
 - champ plus fort (4 T) mais plus de matière



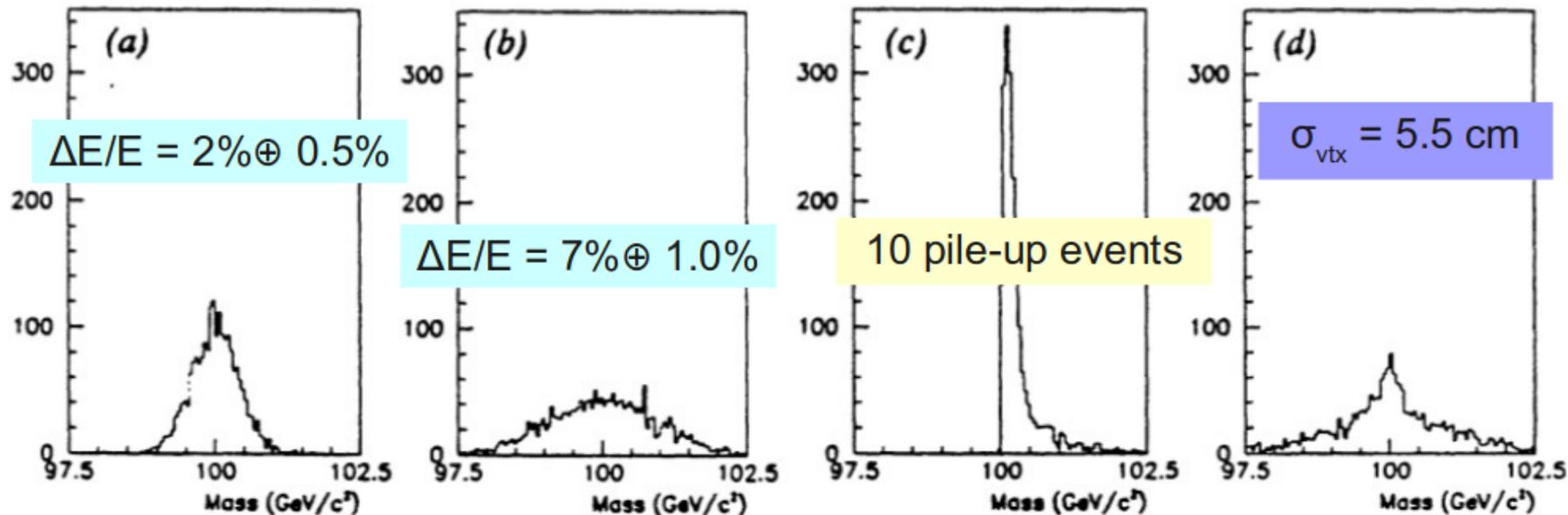
Le boson de Higgs comme référence (2)

- ◆ Recherche en deux photons, masse invariante :

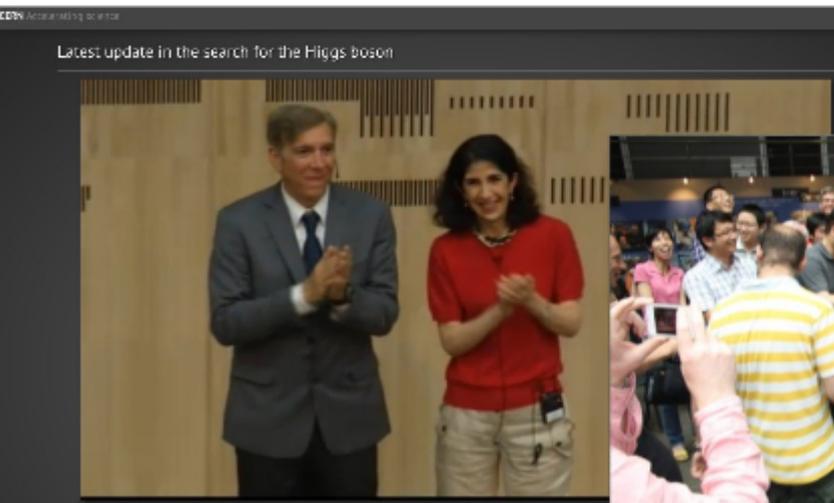
$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2 \cdot E_T^{\gamma 1} \cdot E_T^{\gamma 2} \cdot \cos \Delta \alpha}$$



- ◆ Mesure de l'énergie des photons meilleure que 1%
⇒ résolution en énergie du calorimètre électromagnétique < 1%
- ◆ Séparation angulaire α meilleure que 5 mrad
⇒ précision sur le vertex des deux photons meilleure que 1.5 cm
- ◆ Exemple de la masse invariante reconstruite pour différentes hypothèses :



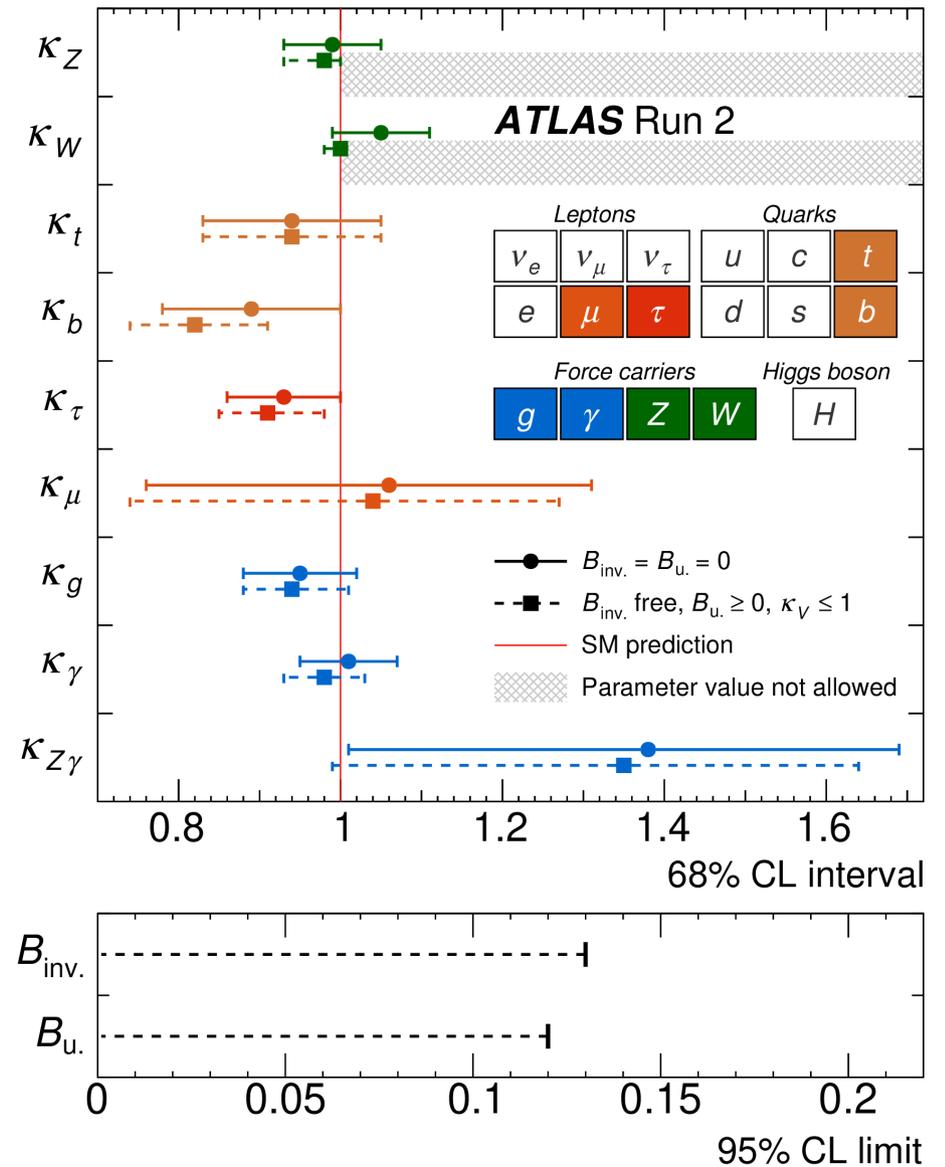
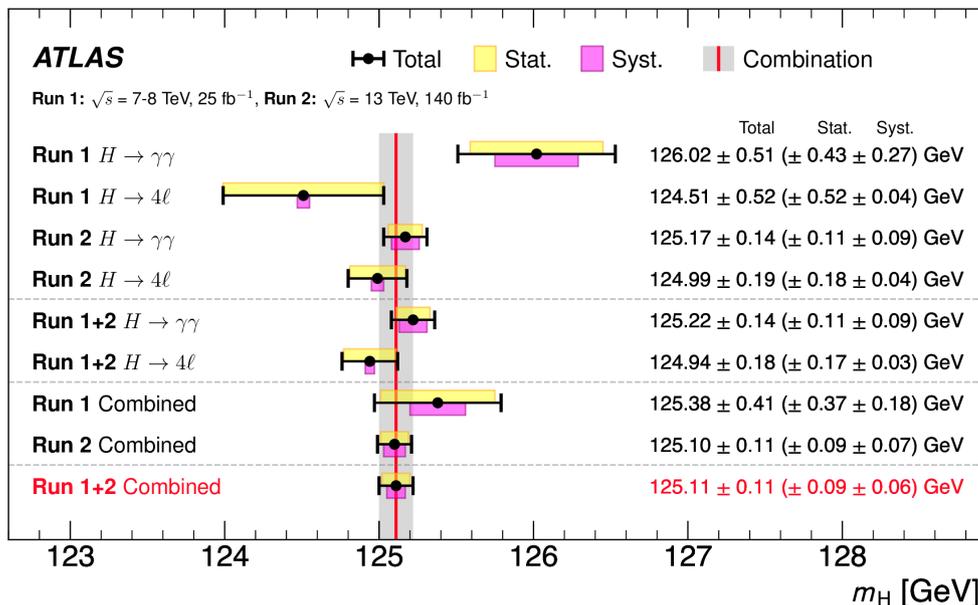
Annonce de la découverte : 4 juillet 2012



Et depuis ?

◆ **Couplages** mesurés avec une précision de 10-50%

◆ **Masse** mesurée avec une précision de 0.09%

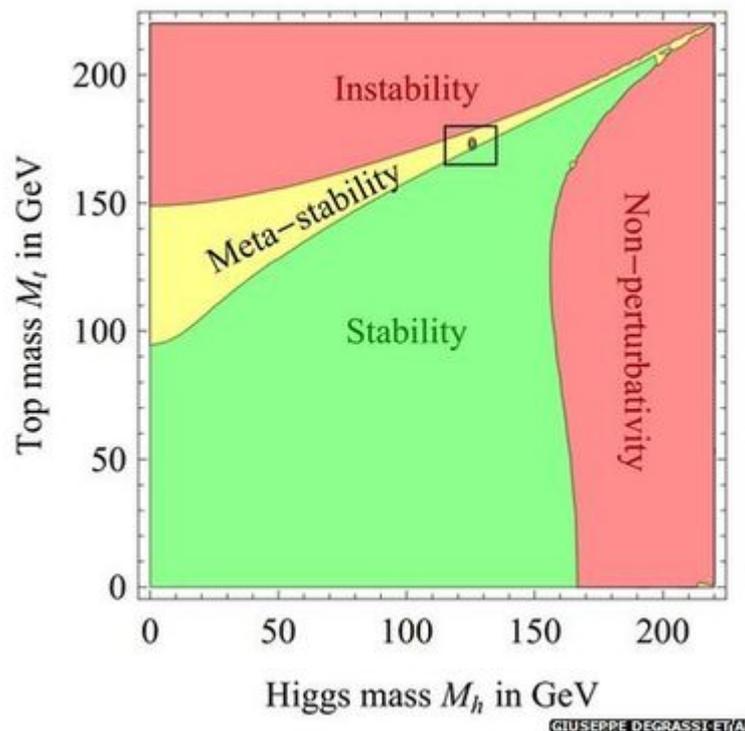


Et après ?



Et après

- ◆ On ne veut pas se contenter de découvrir une particule, on peut aussi mesurer toutes ses **propriétés** : masse, charge, modes de décroissance, etc
- ◆ Il faudra avoir toutes les données jusqu'en **~2040** pour mesurer les propriétés du boson de Higgs avec une précision de **quelques %**
 - nécessaire pour vérifier que ce boson de Higgs est bien celui prévu par le Modèle Standard
 - et aussi comprendre comment le boson de Higgs se donne sa propre masse
- ◆ Exemple : stabilité de l'univers liée à la masse du boson de Higgs :

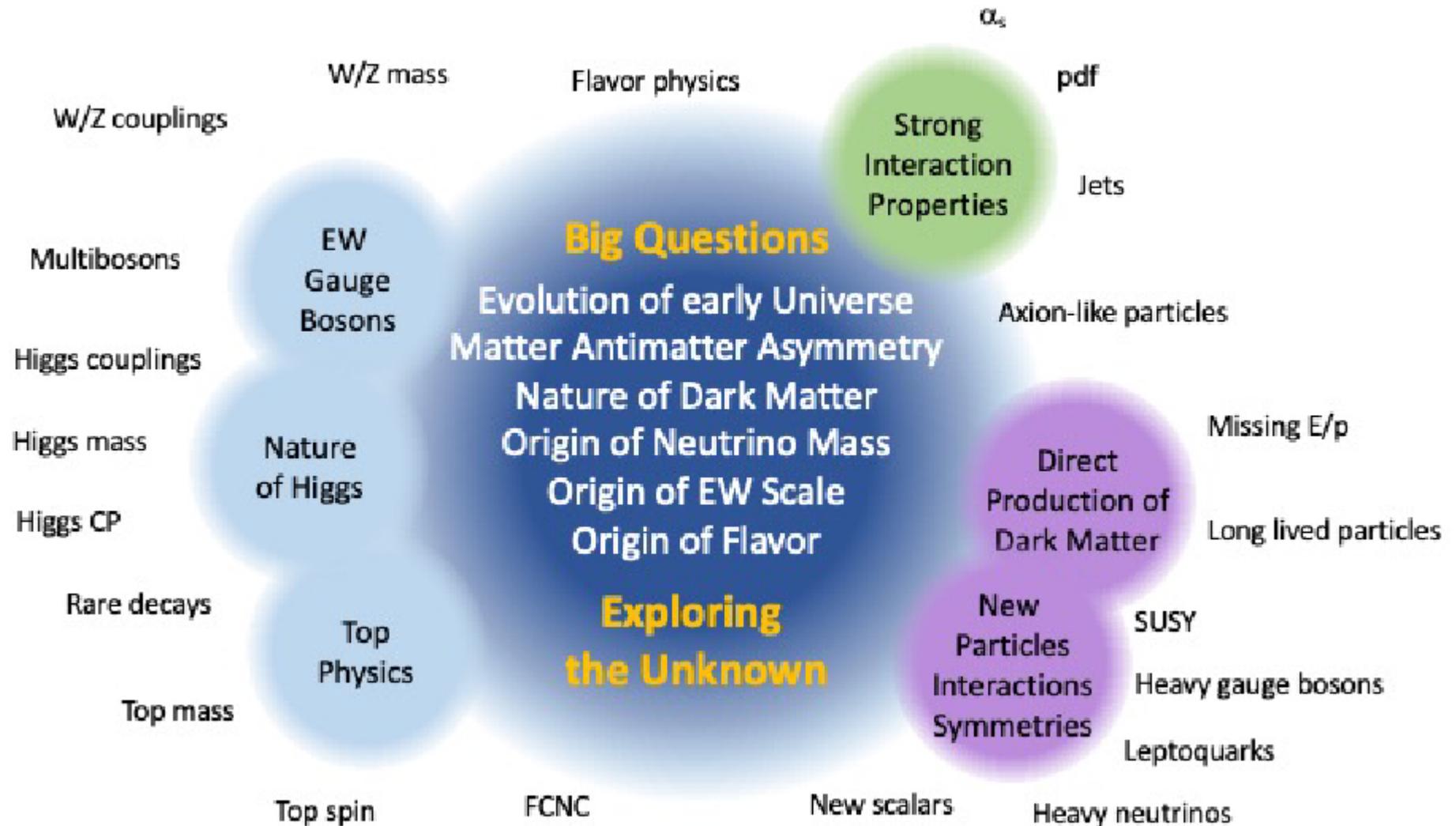


Conclusion

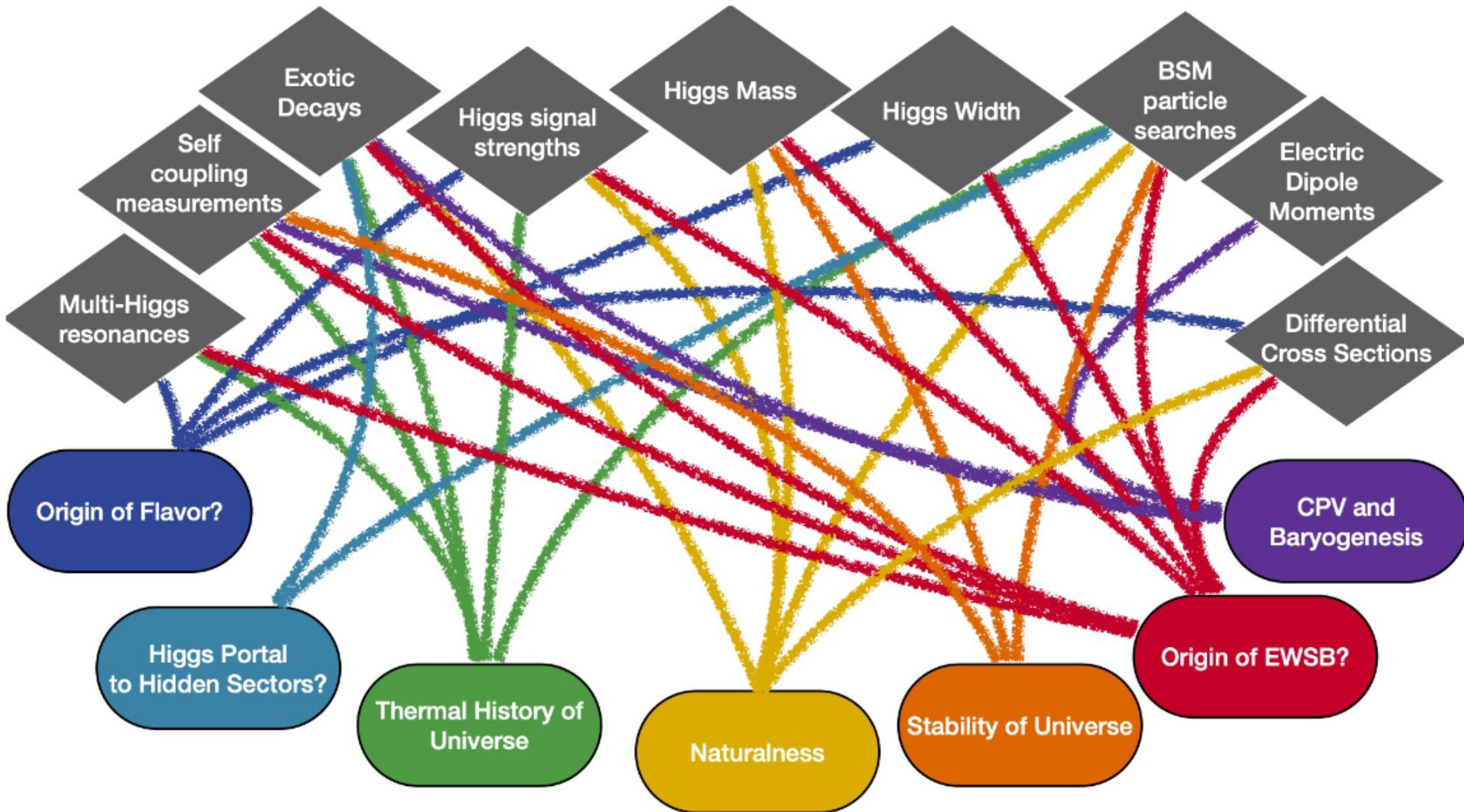
- ◆ Le **Modèle Standard** de la physique des particules a été (é)prouvé avec une grande précision, mais il y a certaines choses qu'il n'explique pas
- ◆ Expériences en cours pour mieux comprendre le **neutrino** et la **matière noire**
- ◆ De nombreuses **théories au-delà du Modèle Standard** existent, qui prédisent des nouvelles particules qui pourraient être produites dans les accélérateurs
 - aucune trouvée pour l'instant
 - pour l'instant rien ne dit à partir de quelle énergie cette nouvelle physique devrait se manifester
- ◆ Programme de mesures et de recherches au LHC
 - découverte du **boson de Higgs** ouvre de nouvelles pistes
- ◆ On verra au prochains cours comment marchent les accélérateurs de particules et les détecteurs associés

Back-up

Energy frontier to address the big questions

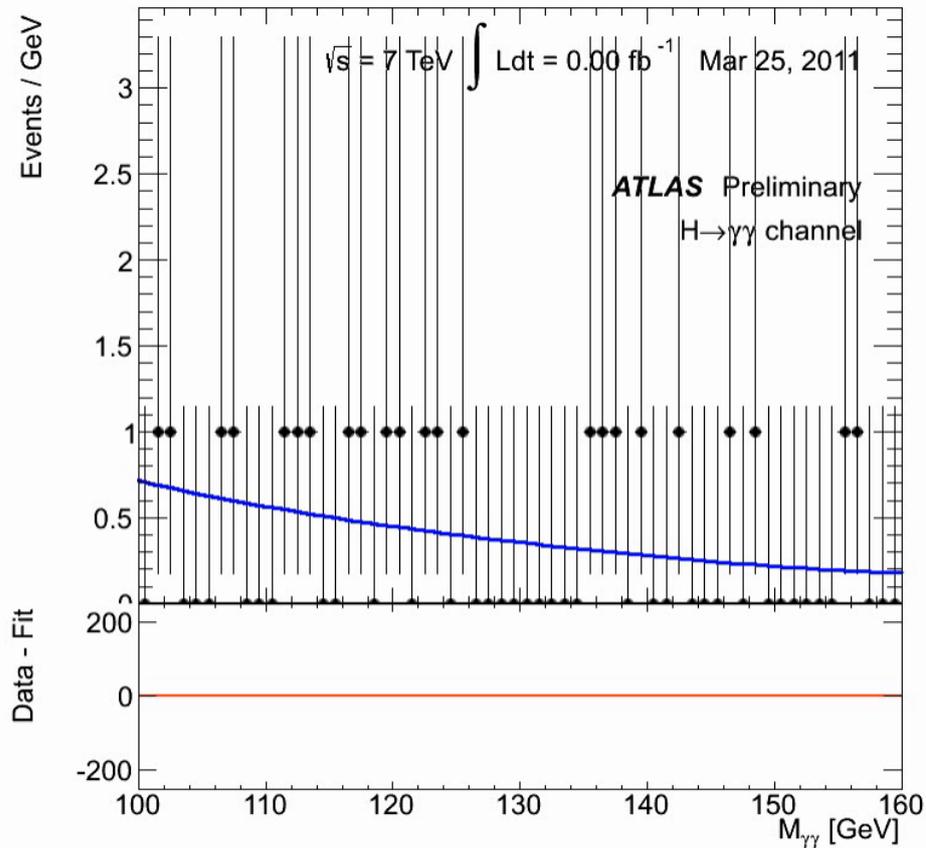


Higgs boson and big questions



Accumulation du signal avec le temps

◆ Masse invariante deux photons :



◆ Masse invariante 4 leptons :

