

En attendant la nouvelle physique ...

Andreas Hocker (CERN)

Congrès SFP 2009, 6 au 10 juillet 2009



Le Modèle Standard (MS)

Le MS comporte 24 particules de matière et 3 forces,
utilisant 19 paramètres libres (+ ≥ 9 paramètres du secteur des neutrinos massifs)

Fermions

Particules de matière

Organisées en 3 familles

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

6 Leptons



6 Quarks



$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Bosons

Quanta de force

Distinguant 3 forces

Photon



Force électro-
magnétique

3 Bosons faibles



Force faible



8 Gluons



Force forte

Force de couplage au
quark u :

Forte	➡	1
EM	➡	10^{-2}
Faible	➡	10^{-6}
Gravitation	➡	10^{-43}

Boson de Higgs

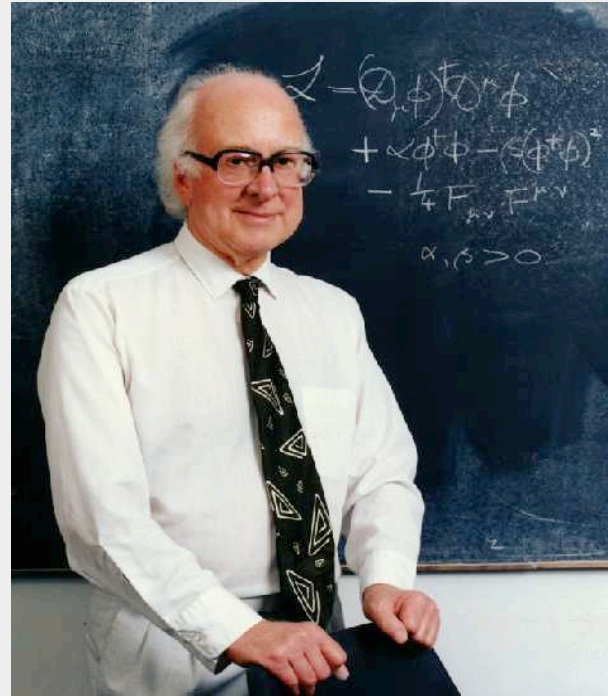


Brise la symétrie électrofaible
Génère les masses des particules

Le boson de Higgs est un élément fondamental du Modèle Standard

**Seulement :
Le Higgs n'a pas
encore été observé !**

P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132



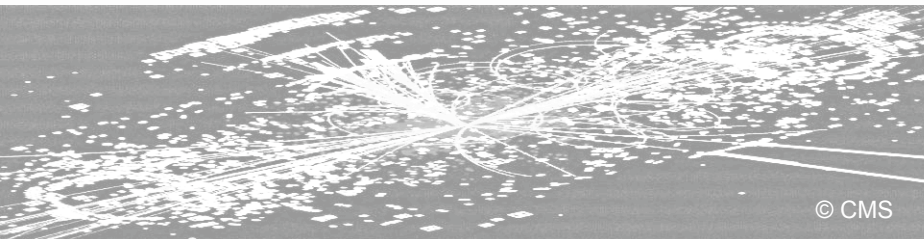
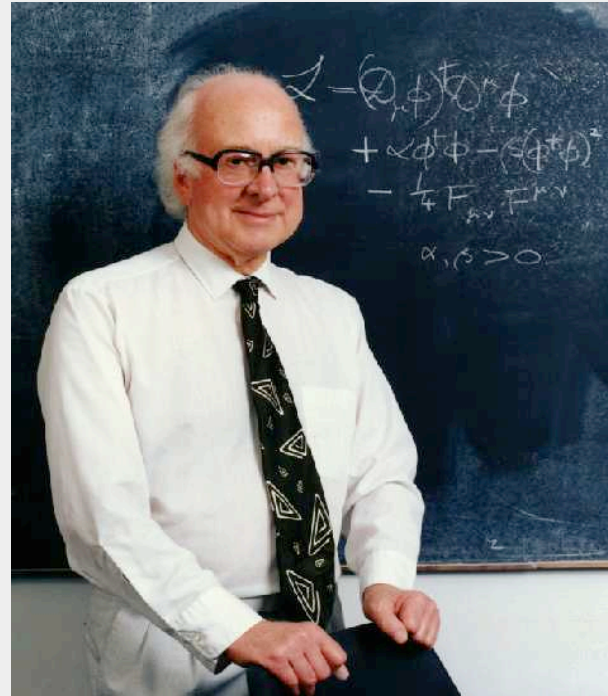
« Le Higgs »

Suivons Daniel Froidevaux (CERN) :

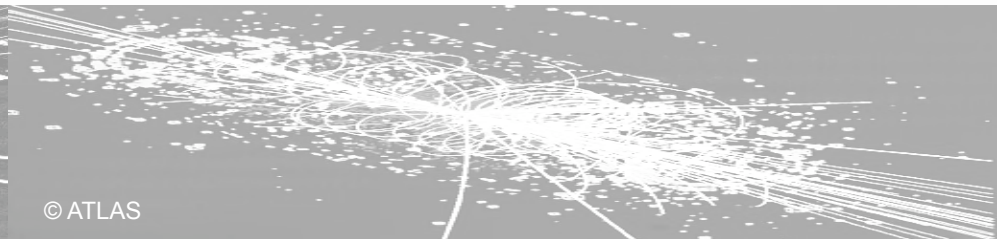
Le Higgs nous a accompagné depuis 4 décennies en tant que ...

- Concept théorique
- Incarnation du « parti communiste car il contrôle les masses »
[L. Alvarez-Gaumé à l'école d'été du CERN à Alushta]
- Partie pénible de l'introduction de thèse de tous les étudiants en physique de particules

P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132



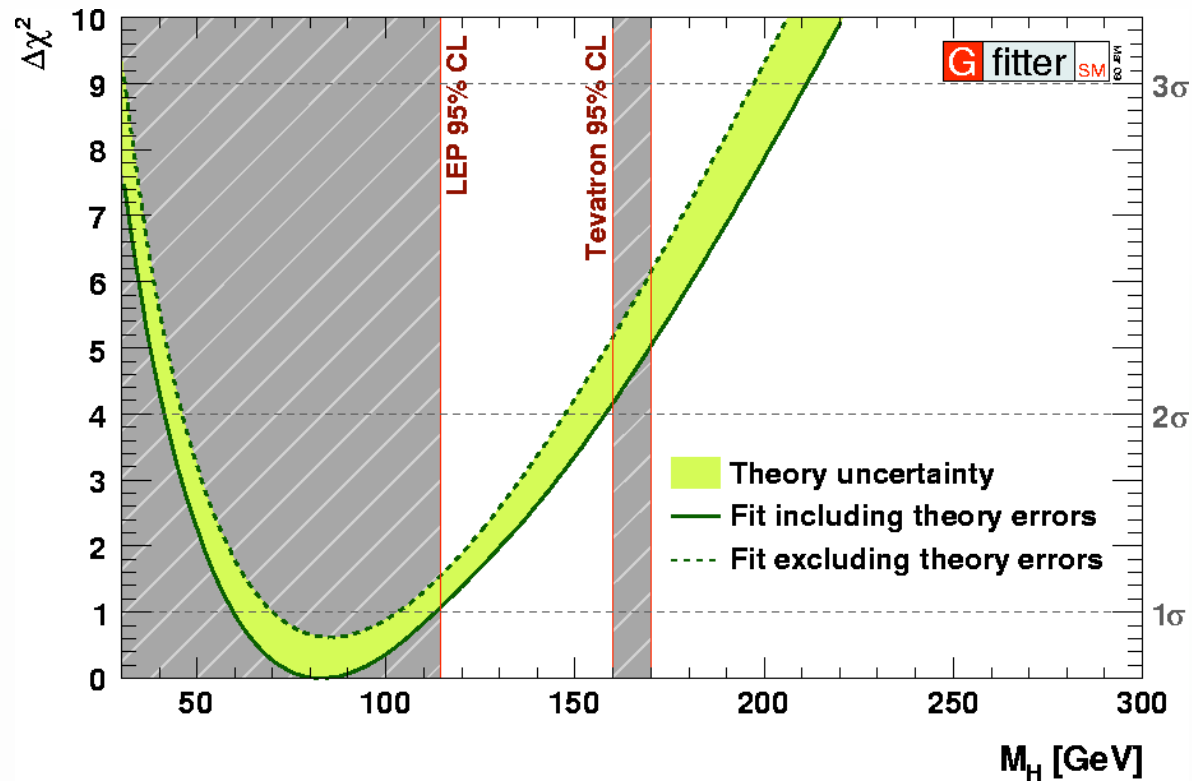
© CMS



© ATLAS

Le Higgs du Modèle Standard est **léger**

« Ce Higgs » léger, s'il existe, sera produit et découvert au LHC



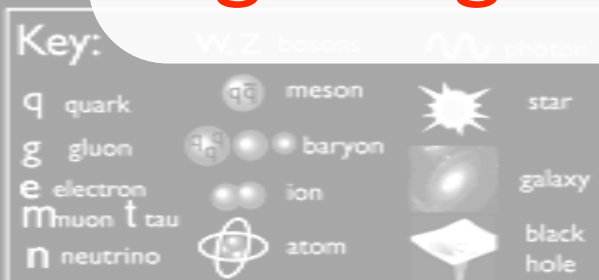
$$\Delta\rho_{(\text{Higgs})} = \frac{11G_F m_Z^2 \cos^2 \theta_W}{24\sqrt{2}\pi^2} \log \left(\frac{m_H^2}{m_W^2} \right)$$

History of the Universe

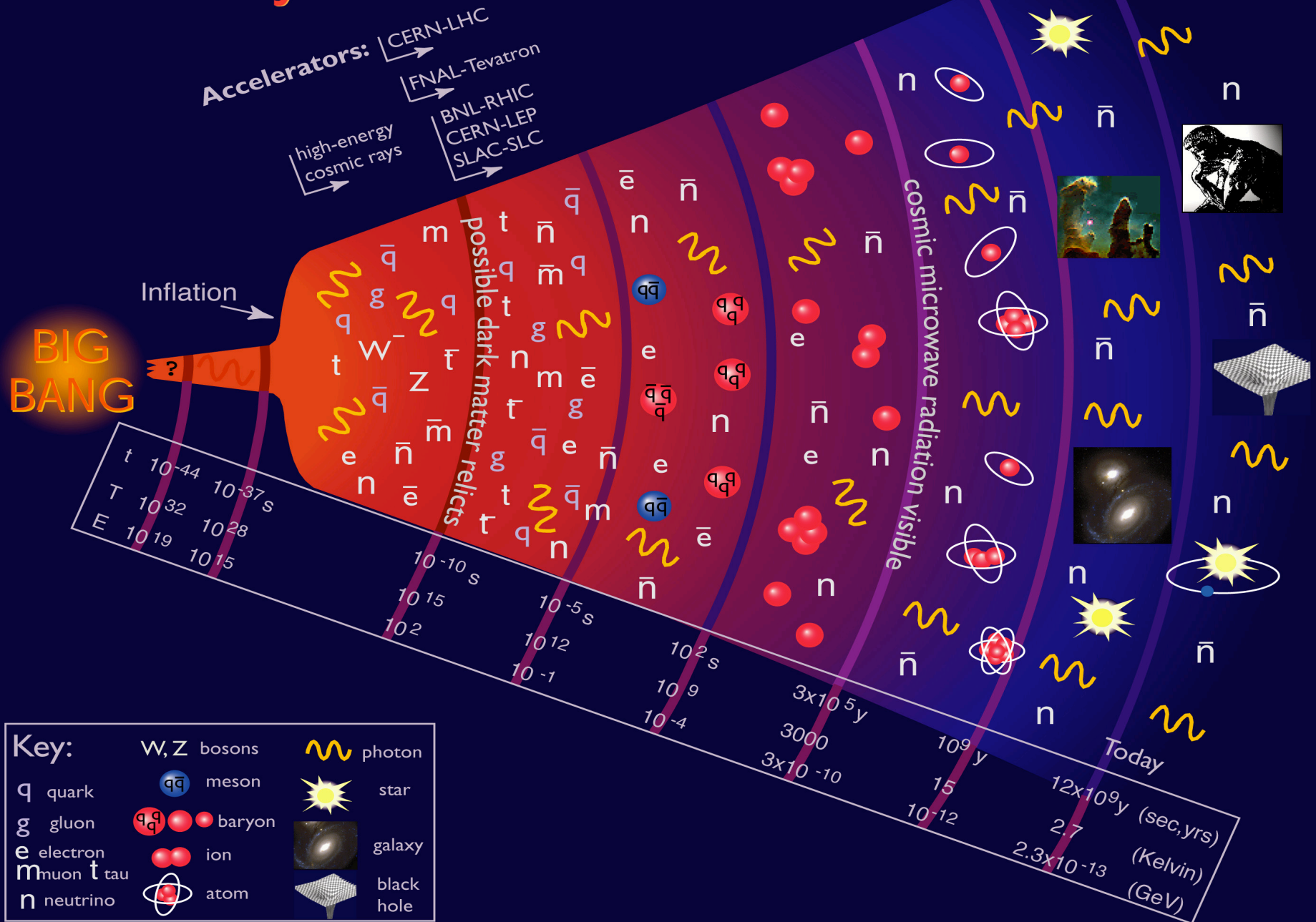
Accelerators: CERN-LHC
FNAL-Tevatron
BNL-RHIC
CERN-LEP
SLAC SLC

Mais – il y a des **problèmes** très sérieuses avec le **Modèle Standard**

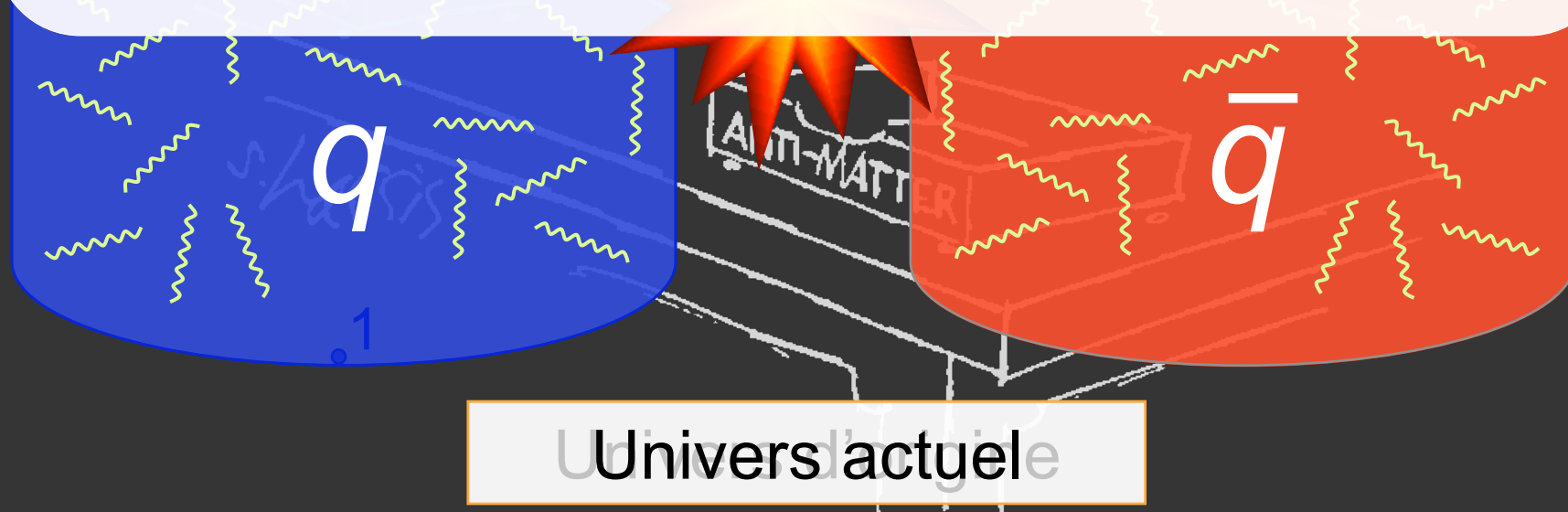
La plupart de ces problèmes sont liés à la **fraction de seconde après le Big Bang**



History of the Universe



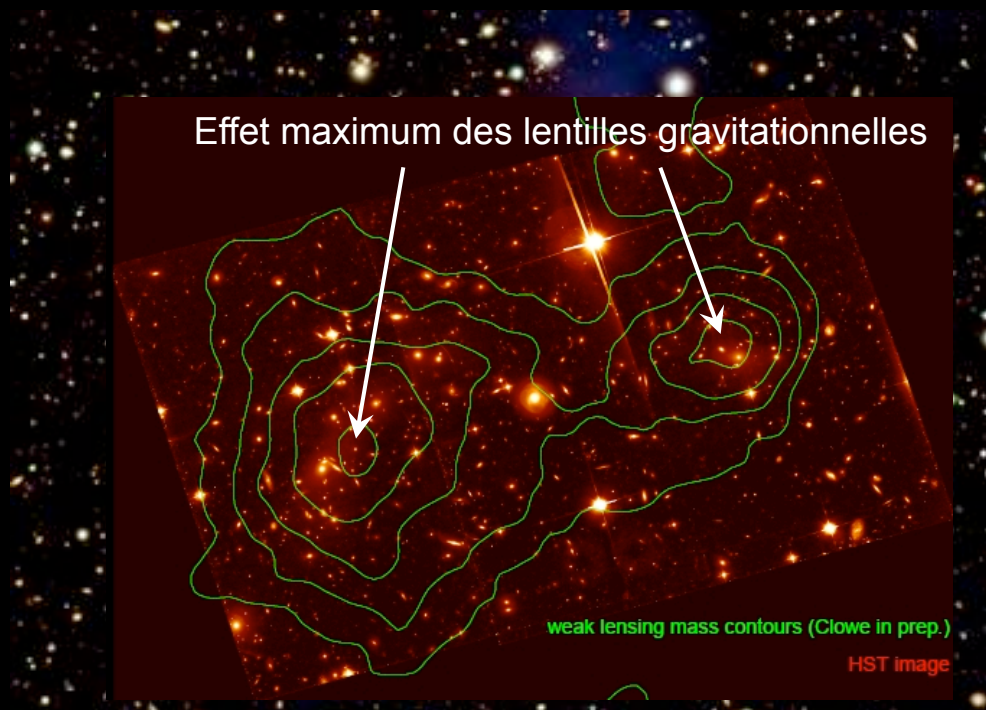
Bien que peu de matière ait survécu la grande annihilation, **il y en a beaucoup trop pour être expliquée par l'asymétrie matière-antimatière du Modèle Standard !**



Univers actuelle

La matière noire

Bullet cluster. Collision entre deux amas de galaxies: la matière baryonique, les étoiles – peu affecté par des collisions (bleu) – du gaz interstellaire, fortement affecté par des collisions (rose)



Contours de densité de masse superposant une photo du télescope Hubble

Matière noire – le « miracle des WIMP »

- Considérons une nouvelle particule χ
- Dans la « soupe » initiale, sa réaction d'annihilation est en équilibre thermodynamique :

$$\chi\chi \leftrightarrow f\bar{f}$$

- En s'étendant, la « soupe » se refroidit. Supposant $m(\chi) \gg m(f)$, tout en restant en équilibre thermodynamique :

$$\chi\chi \rightarrow f\bar{f}$$

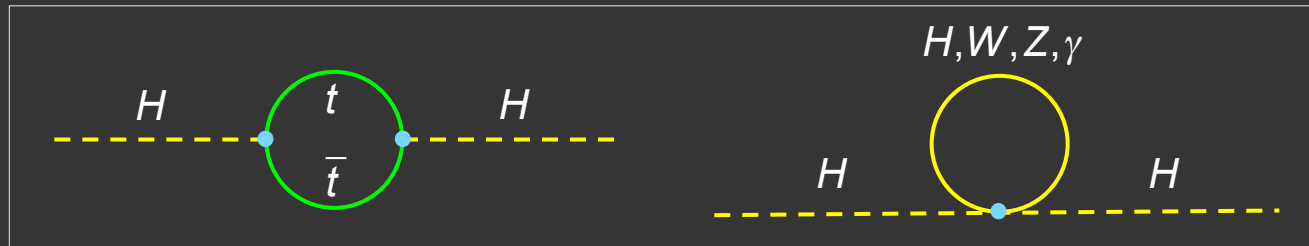
- Quand $\sigma_A \ll H(T)$, quelques χ « gèlent », créant de la « matière noire » Ω_{DM}
- La quantité de matière noire est inversement proportionnelle à σ_A

$$\Omega_{\text{DM}} \propto \frac{1}{\langle v\sigma_A \rangle} \propto m_\chi^2 \quad \Rightarrow \quad \Omega_{\text{DM}} \approx 0.1 \quad \rightarrow \quad m_\chi \sim 0.1 - 1 \text{ TeV}$$

EST-CE UNE COINCIDENCE ?

La masse du Higgs n'est pas « protégée »

- Les masses empiriques des particules sont données par leurs masses « nue » plus des corrections virtuelles



$$\Rightarrow m_H^2 = m_0^2 + \delta m_H^2 \text{ terme divergent !}$$

- A une échelle $\sim \text{TeV}$ de nouvelles particules doivent régulariser la divergence
- Si cette échelle est trop élevée il y a un problème « d'ajustement fin »

Il y a beaucoup

S t a n d a r d M o d e l

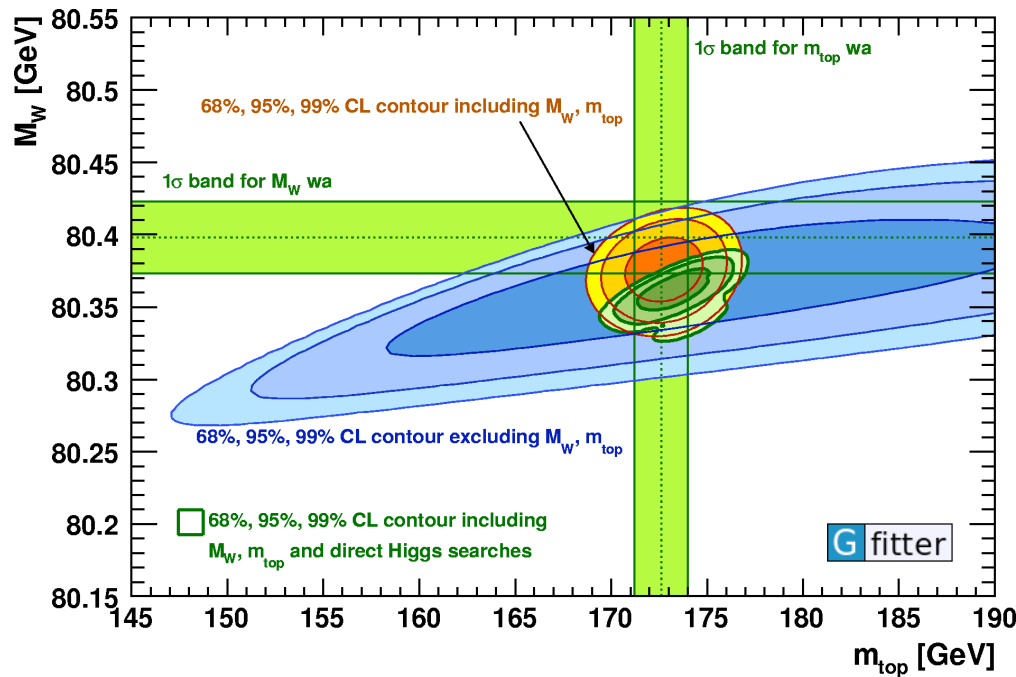
de Standard

Quid des tests de précision du Modèle Standard
auprès des accélérateurs de particules ?

Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision

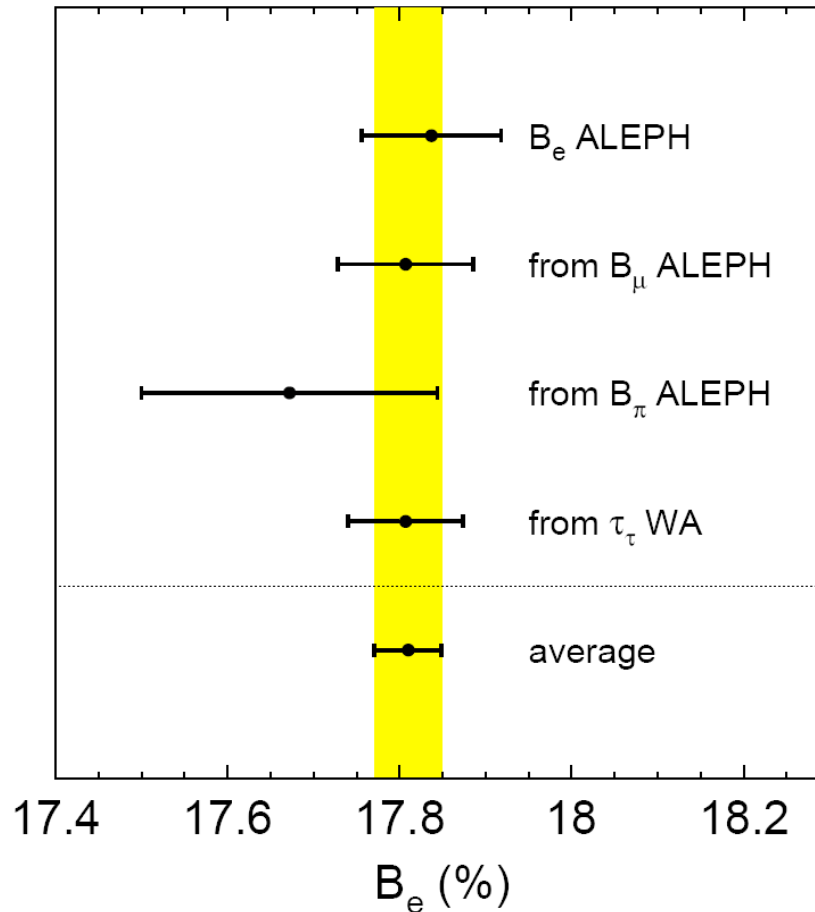
Le MS prédit la masse du quark top par des effets « virtuelles »



L'unification des forces électromagnétique et faible est vérifiée à l'échelle électrofaible

Le Modèle Standard

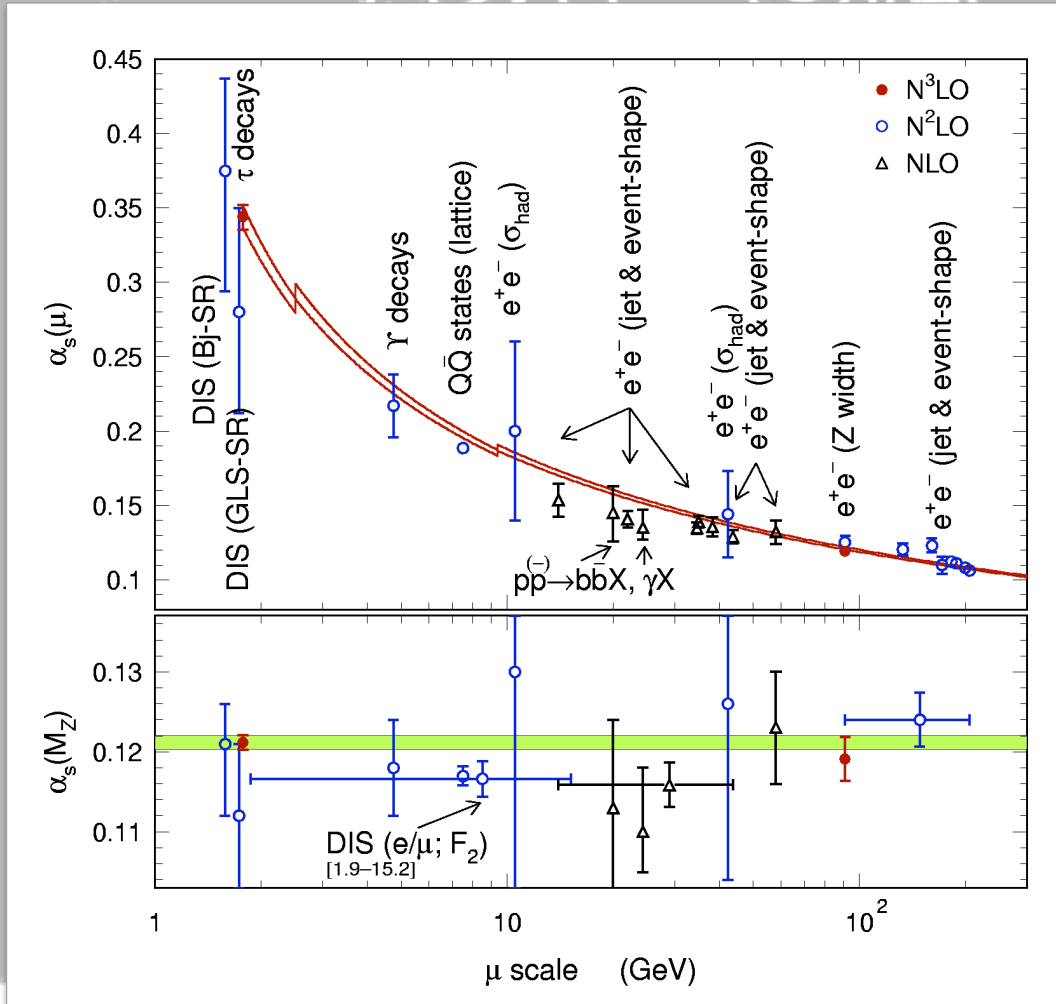
Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision



« L'universalité »
de l'interaction
faible est testée
au niveau de
0.3%

Le Modèle Standard

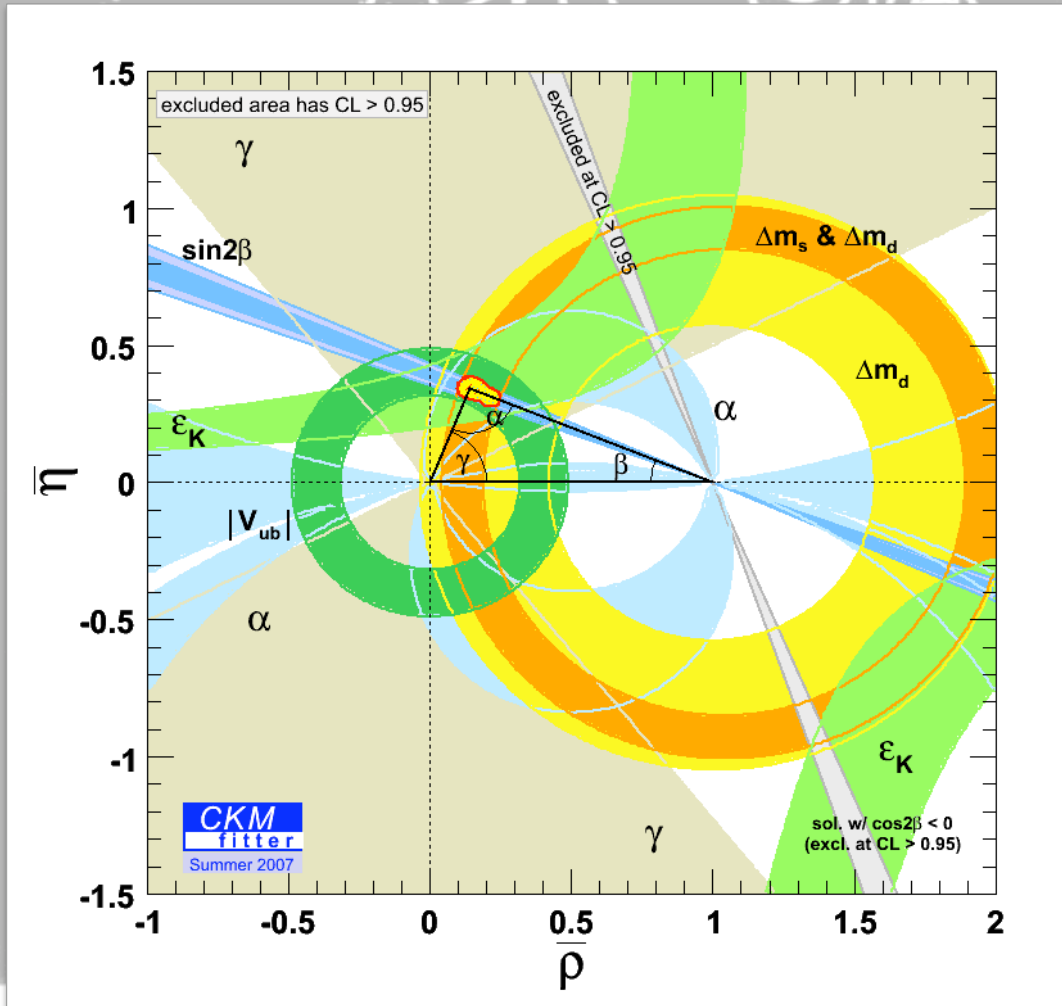
Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision



La propriété de la « liberté asymptotique » est vérifiée au niveau du pour cent

Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision

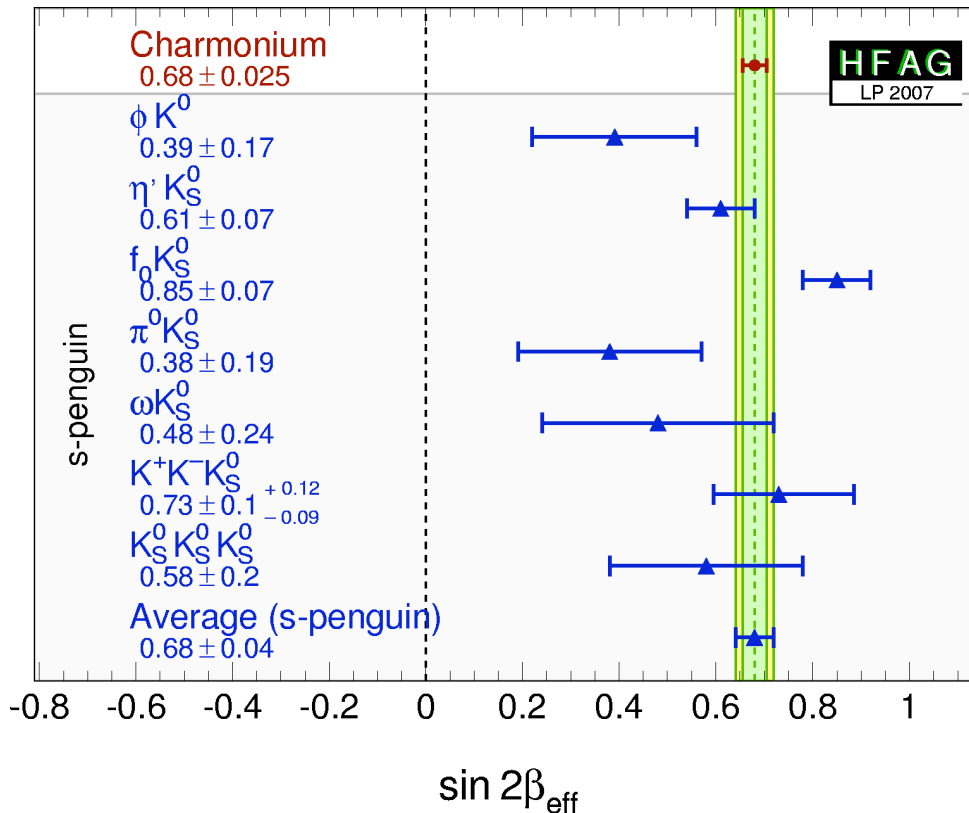


Toutes les observations de brisure de symétrie entre matière et anti-matière sont prédites par le MS

Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision

La violation de CP peut être comparée entre modes avec différentes sensibilités à la nouvelle physique

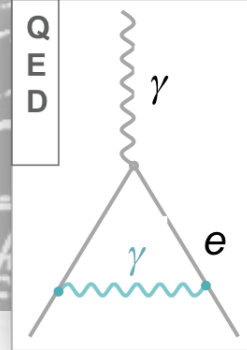
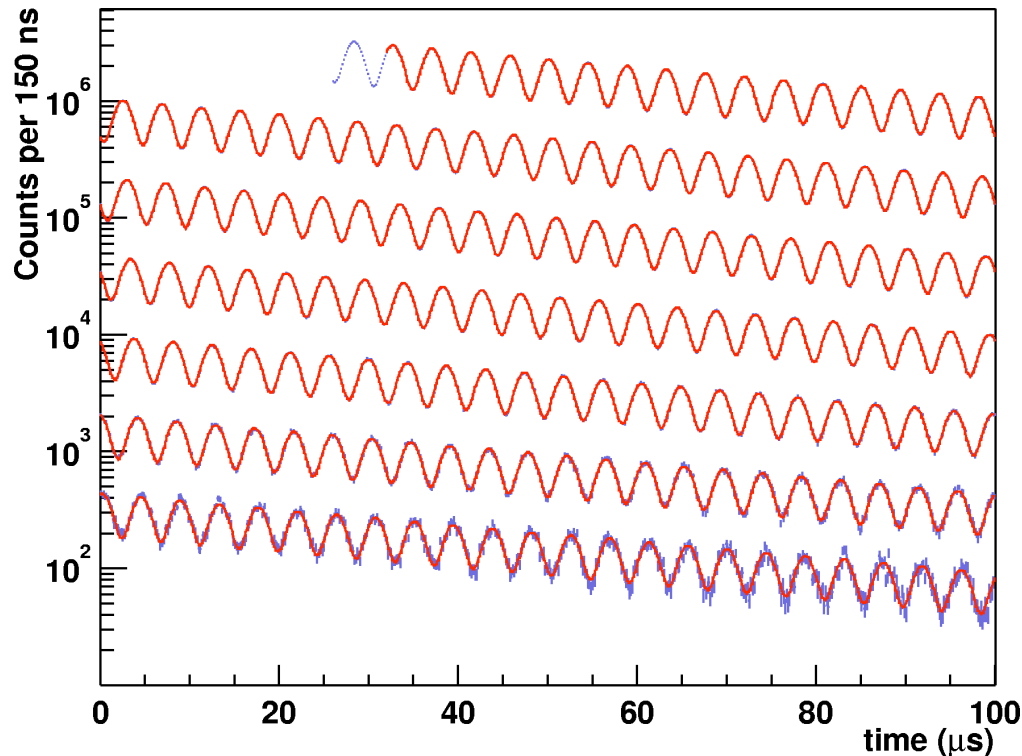


Toutes les observations de brisure de symétrie entre matière et anti-matière sont compatibles

Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision

Fréquence de précession du spin de muons dans un champs magnétique mesurée à BNL, USA

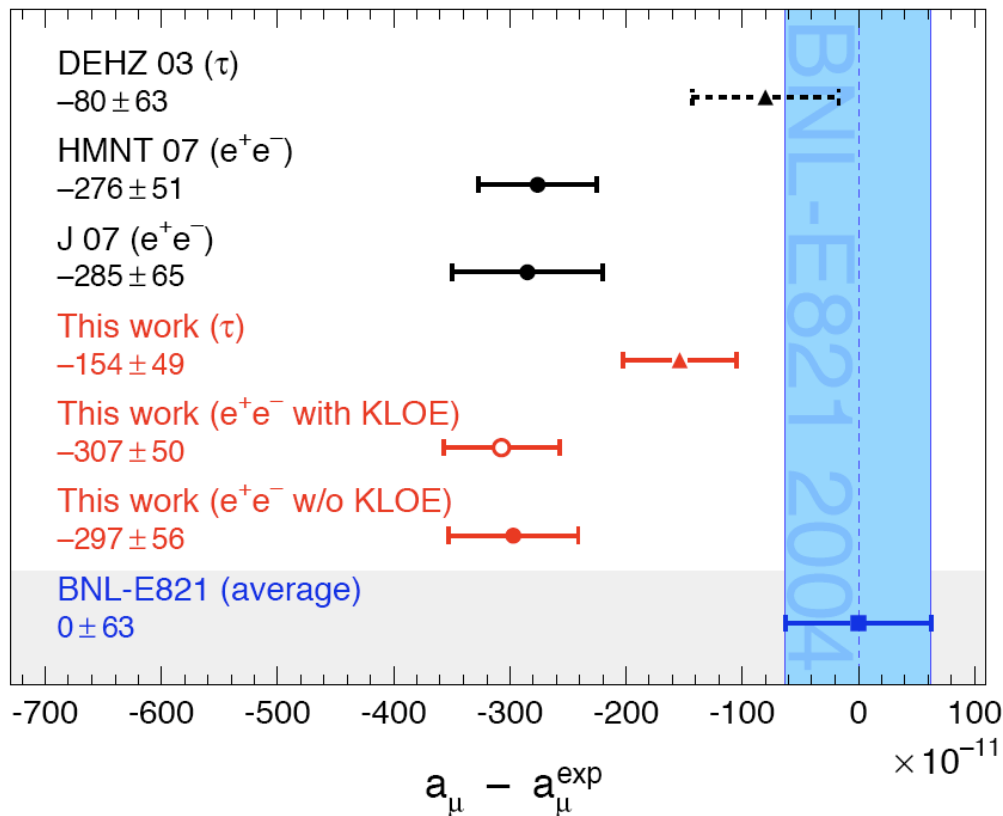


Le moment magnétique du muon est prédite avec une précision relative de quelques 10^{-6}

Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision

Moment magnétique du muon : comparaison entre mesure (bande bleue) et prédictions (points)

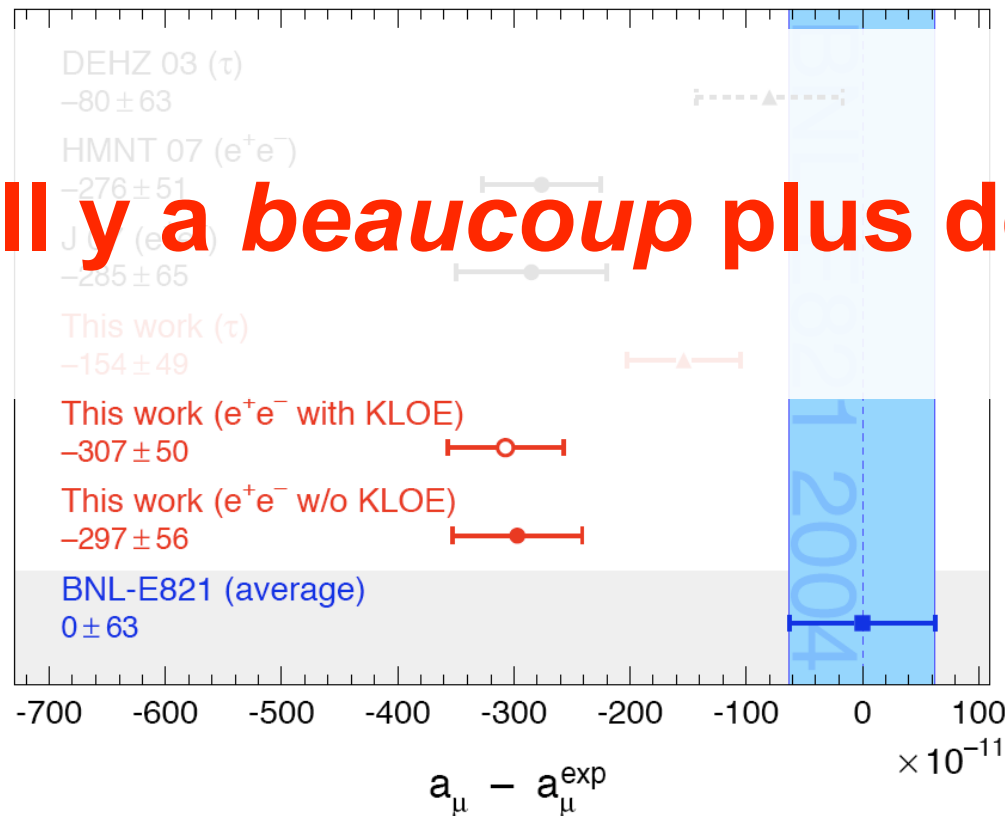


Ici par contre, il y a un suspense en raison d'une légère différence entre mesure et prédiction. À suivre ...

Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision

Moment magnétique du muon : comparaison entre mesure (bande bleue) et prédictions (points)



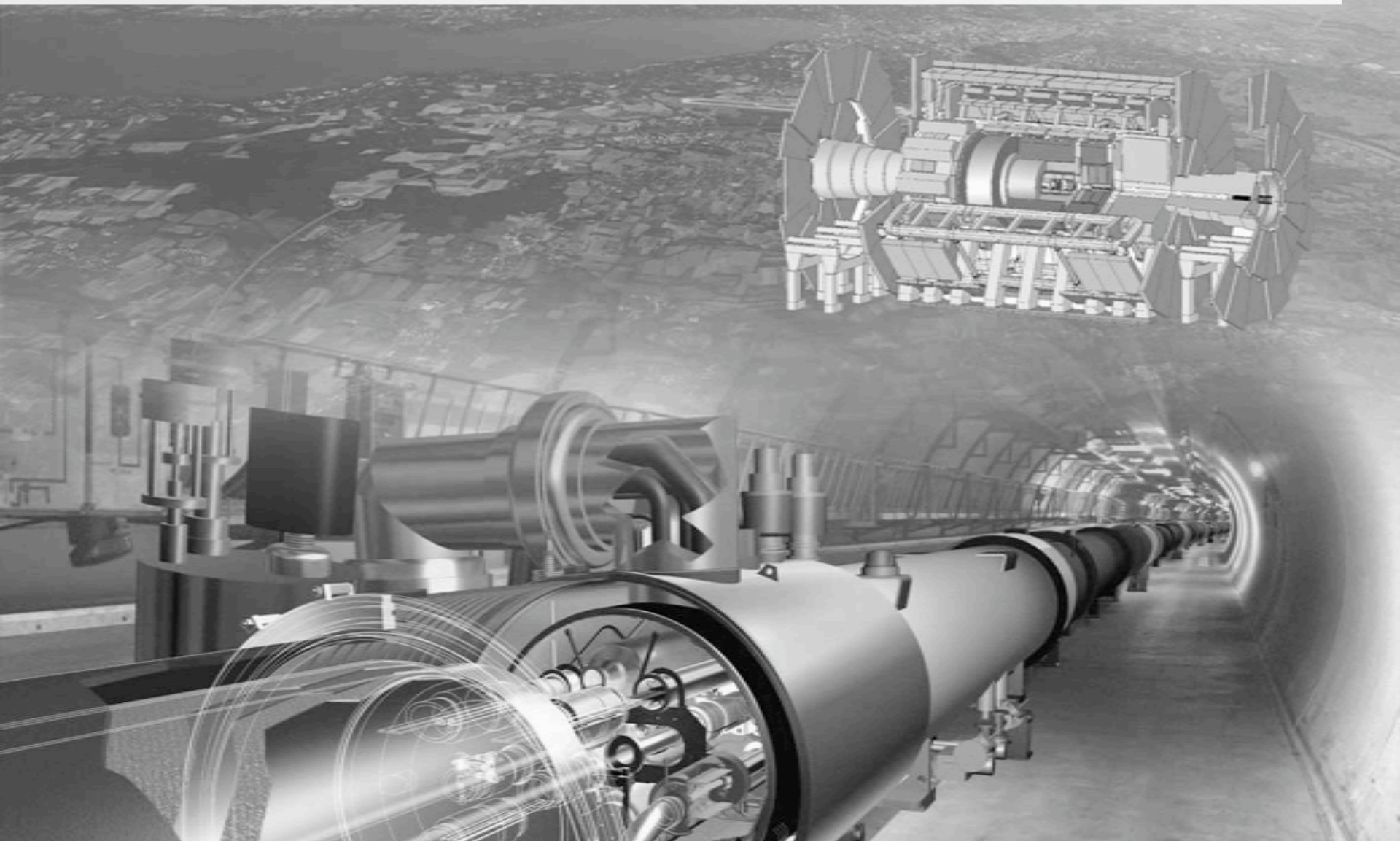
légère différence entre mesure et prédiction. À suivre ...

Que faire pour remédier aux multiples problèmes du Modèle Standard ?

A une majorité d'entre eux le LHC pourrait apporter des éléments de réponses ...

Qu'apportera le Futur ?

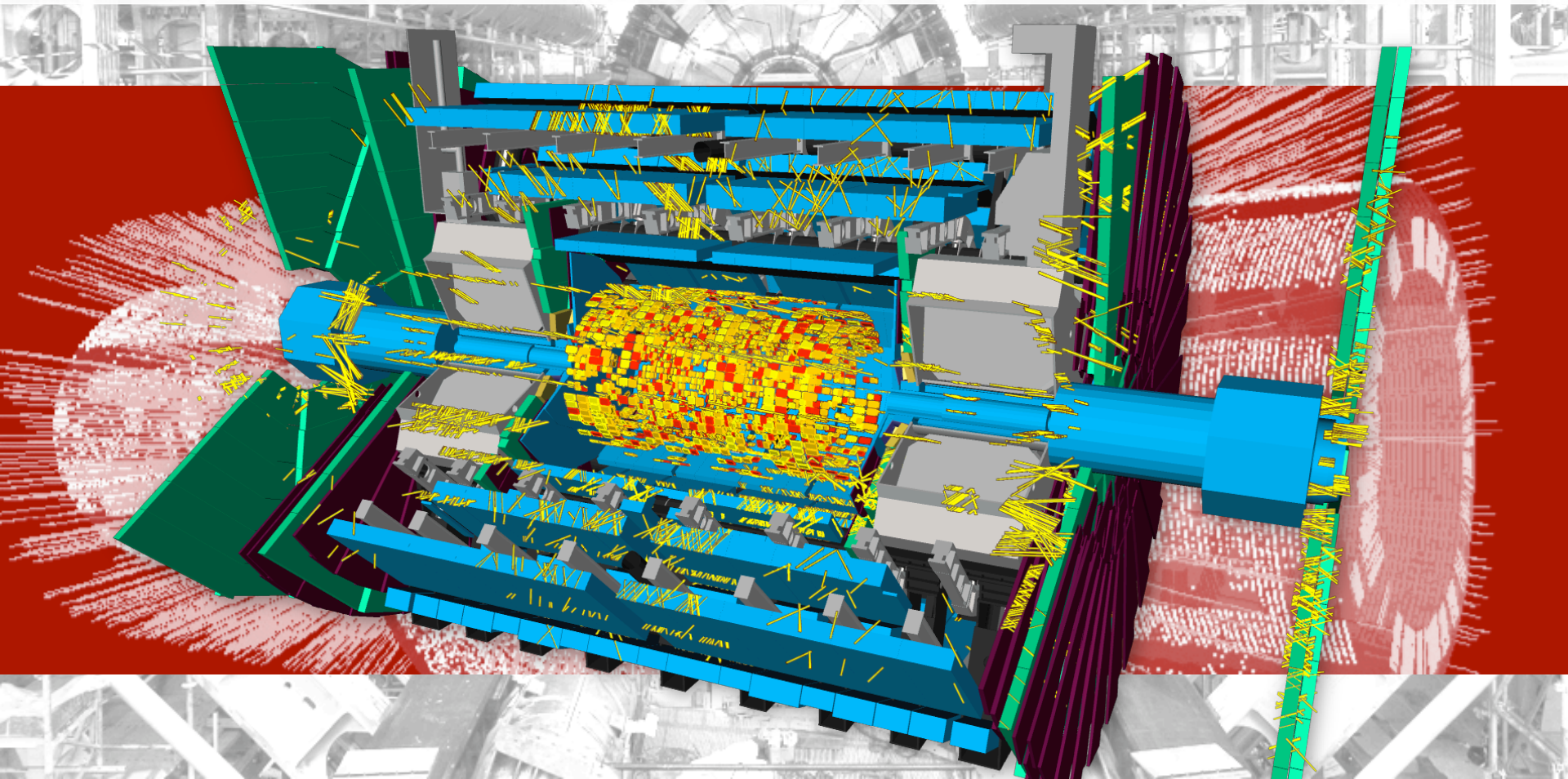
La recherche du **boson de Higgs** est des signes de **nouvelle physique** sont parmi des défis scientifiques des expériences ATLAS et CMS auprès du nouvel accélérateur **LHC du CERN**.



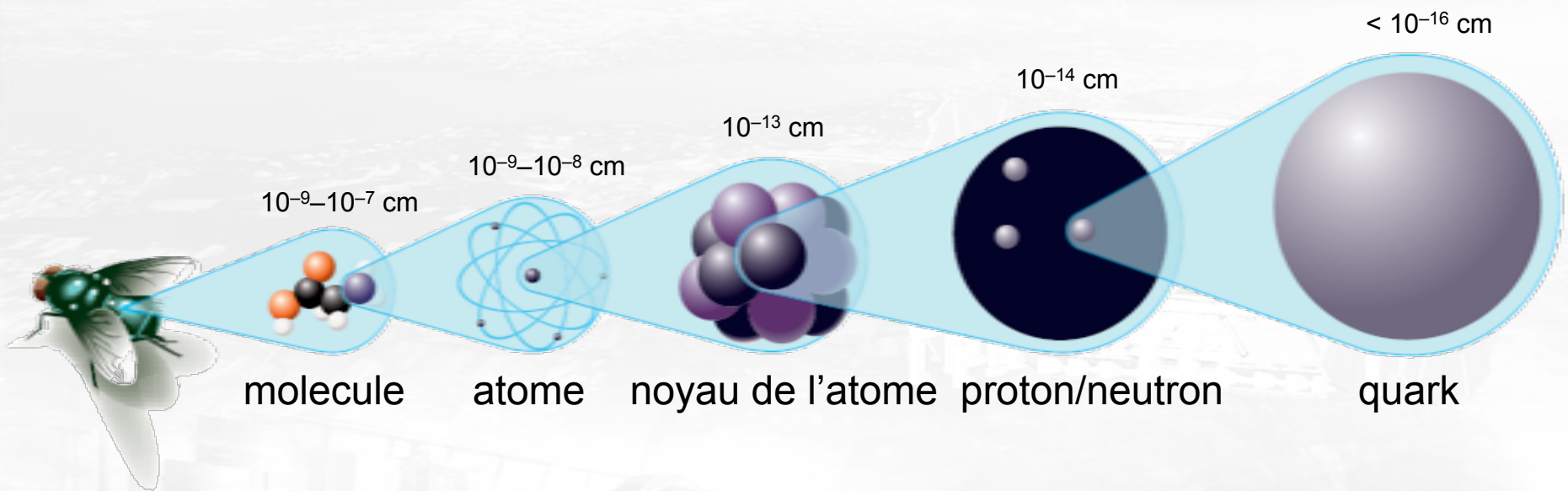
- (Le boson de Higgs n'a pas encore été observé !) ☒
- (Le Higgs est la seule particule élémentaire scalaire) ☒
- Quelle est l'origine de l'énorme hiérarchie de masse entre les particules ? ☒
- De quelle substance est faite la matière noire ? ☒
- Quel processus est responsable de l'énergie noire ? ☒
- Comment peut-on unifier les forces électrofaible et forte à grande énergie ? ☒
- Comment résoudre le problème de la hiérarchie de jauge ? ☒
- Pourquoi n'a-t-on pas observé de violation de CP dans l'interaction forte ? ☒
- Quelle est la nature des neutrinos ? ☒
- Comment unifier la Gravitation avec les autres forces ? ☒
- Comment générer l'excès de matière par rapport à l'antimatière ? ☒



Après la construction – **faire marcher et comprendre**
ces expériences représente un formidable challenge
pour les années à venir !



Backup

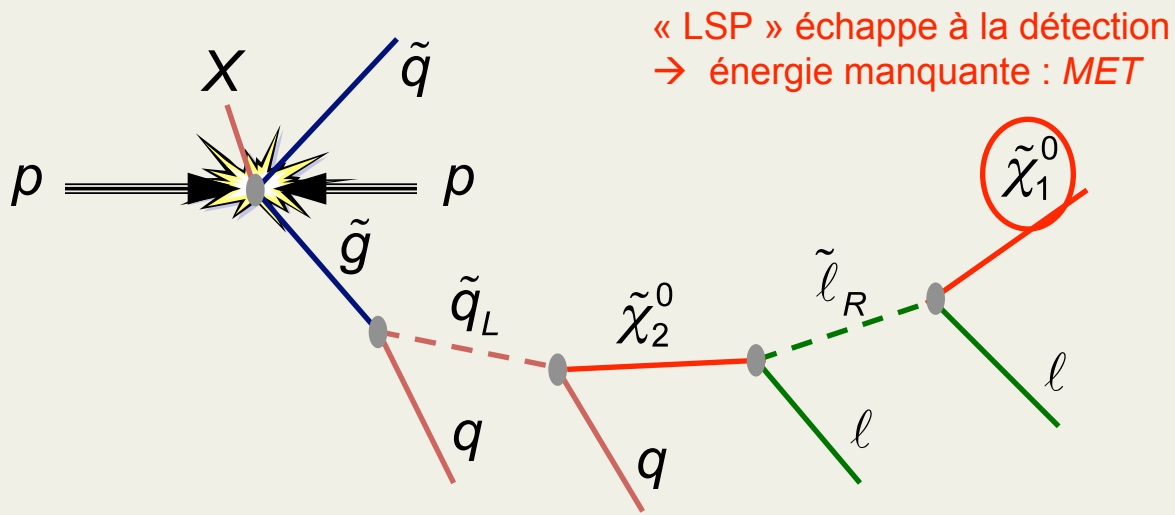


Les électrons et les quarks sont les
constituants élémentaires de la matière

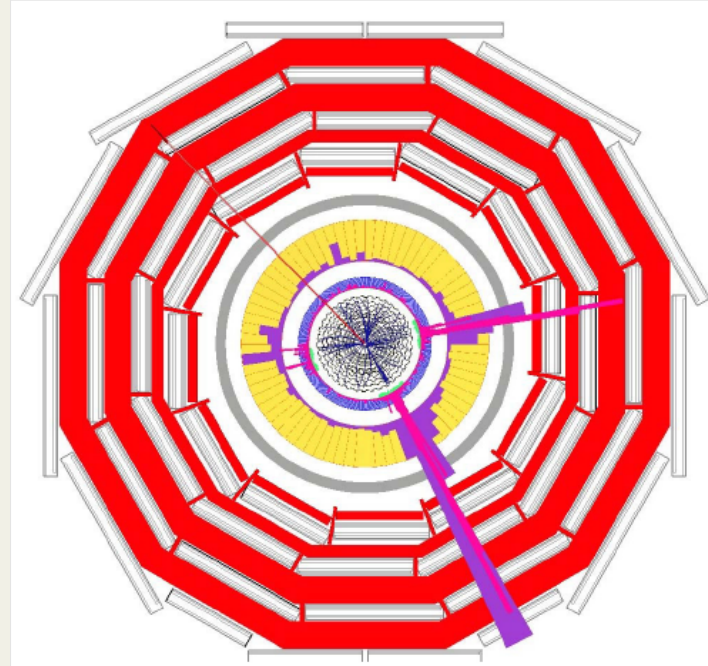
Les 3 interactions fondamentales (hors gravitation)

- La **Matière** est formée de particules élémentaires de spin $\frac{1}{2}$ (fermions)
- Les **Forces** sont générées par l'échange de particules de spin 1 (bosons)
- Principe commun « géométrique »: **invariance de jauge** / transformations liées à un groupe de symétrie
- Les interactions **électromagnétique** et **faible** sont décrites dans un cadre théorique commun: **la théorie électrofaible**
- **Unification** des interactions EM & faible & forte attendue à très haute énergie

La supersymétrie (SUSY) contient un candidat WIMP naturel !

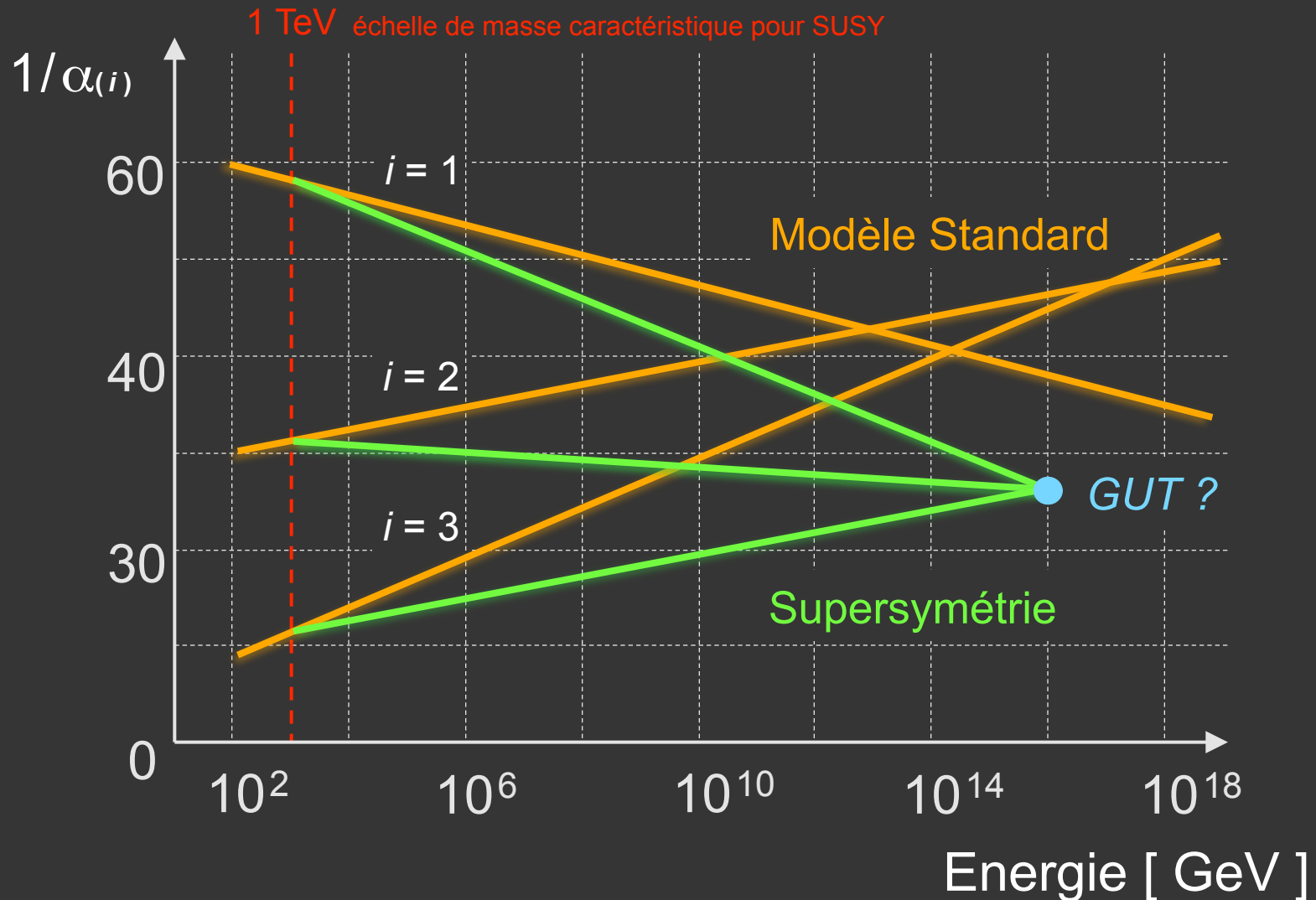


Cascade de désintégration SUSY au LHC –
supposant la conservation de la parité R



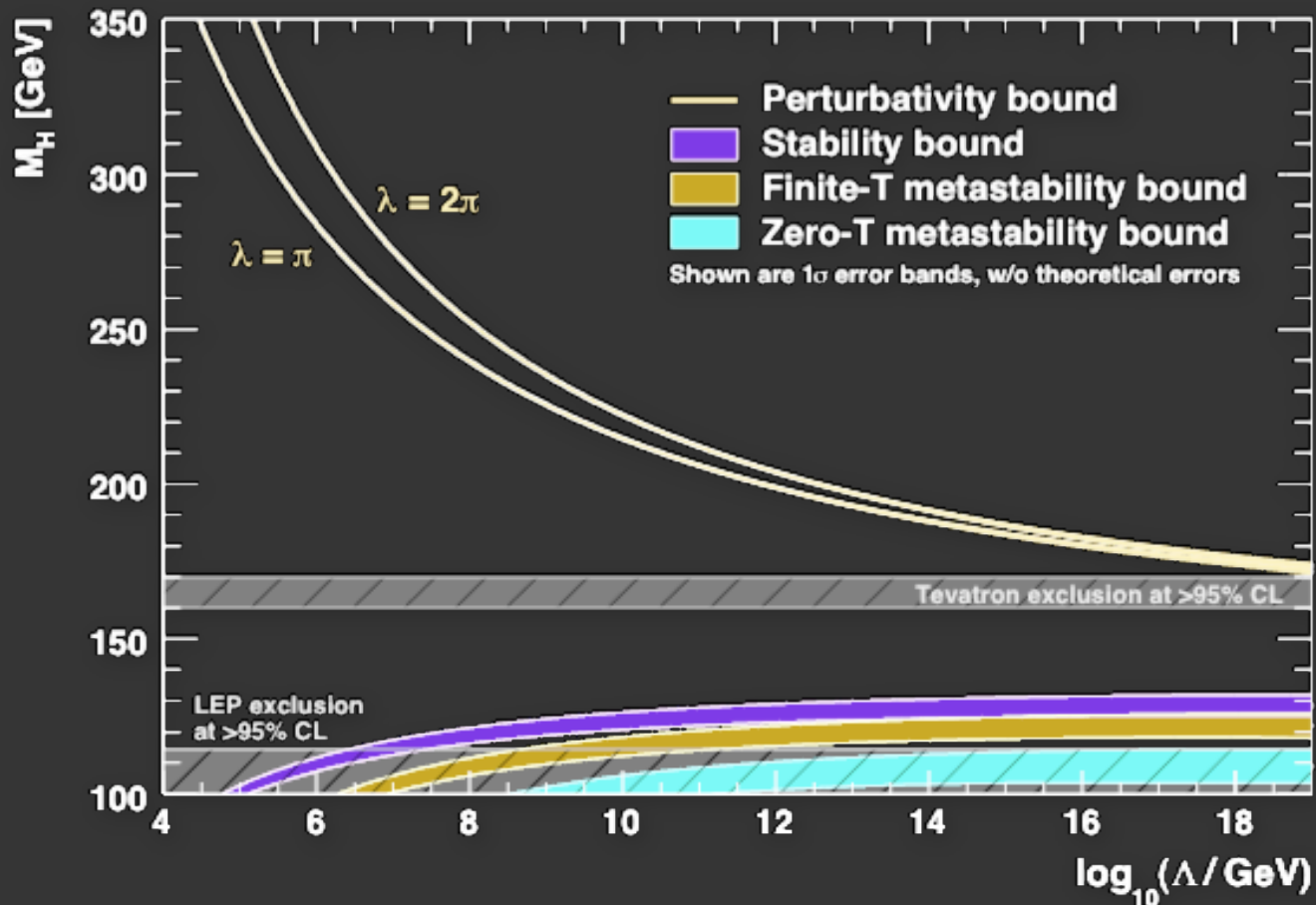
Évènement SUSY avec MET

Grand unification des forces (GUT)



Et si l'on acceptait l'ajustement fin ?

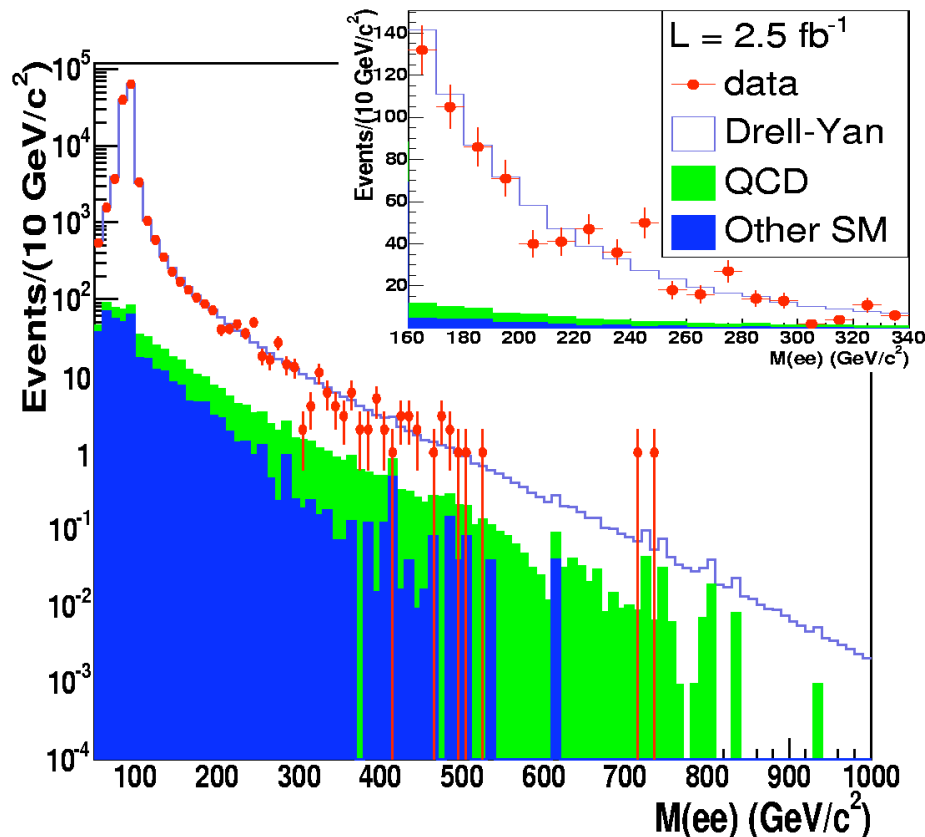
- Si la masse du Higgs est trop grande → la théorie du Higgs deviendrait « triviale » !
- Si la masse du Higgs est trop petite → le vide pourrait devenir instable !



Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision

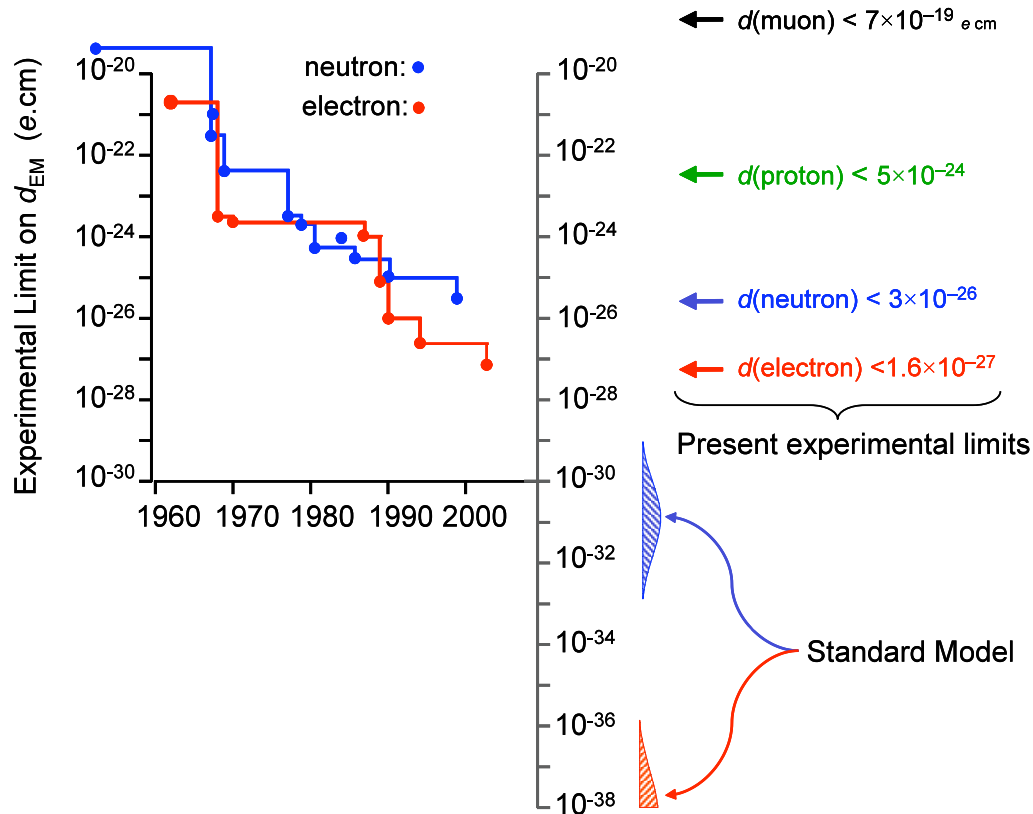
Données de L'expérience CDF



La section efficace de production de paires de leptons est vérifiée jusqu'à $O(1 \text{ TeV})$

Le Modèle Standard

Durant les dernières 35 années, le MS a été vérifié à très grande précision



La petitesse
prédites du
moment dipolaire
des particules
élémentaires est
vérifié au niveau
de 10^{-27} ecm