

Quelques nouvelles de la physique des particules expérimentale au LHC :

le boson de Higgs comme nouvel outil
pour sonder les interactions fondamentales
et comme nouvelle fenêtre sur les premiers instants de l'Univers

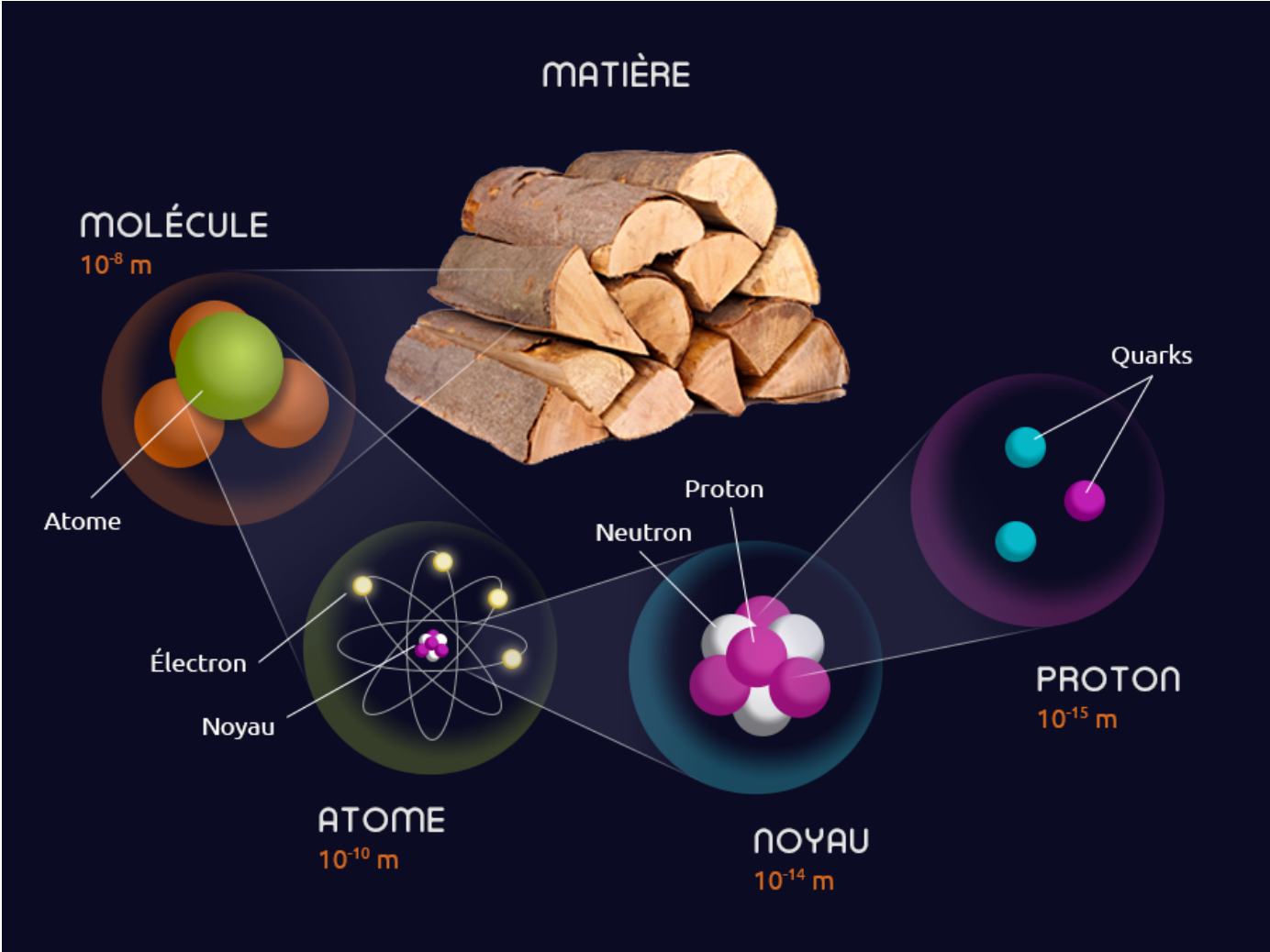
Jan Stark

Laboratoire des 2 infinis – Toulouse (L2IT)

Séminaire SFP Midi-Pyrénées, 20 décembre 2019



Constituants fondamentaux de la matière



Interactions fondamentales

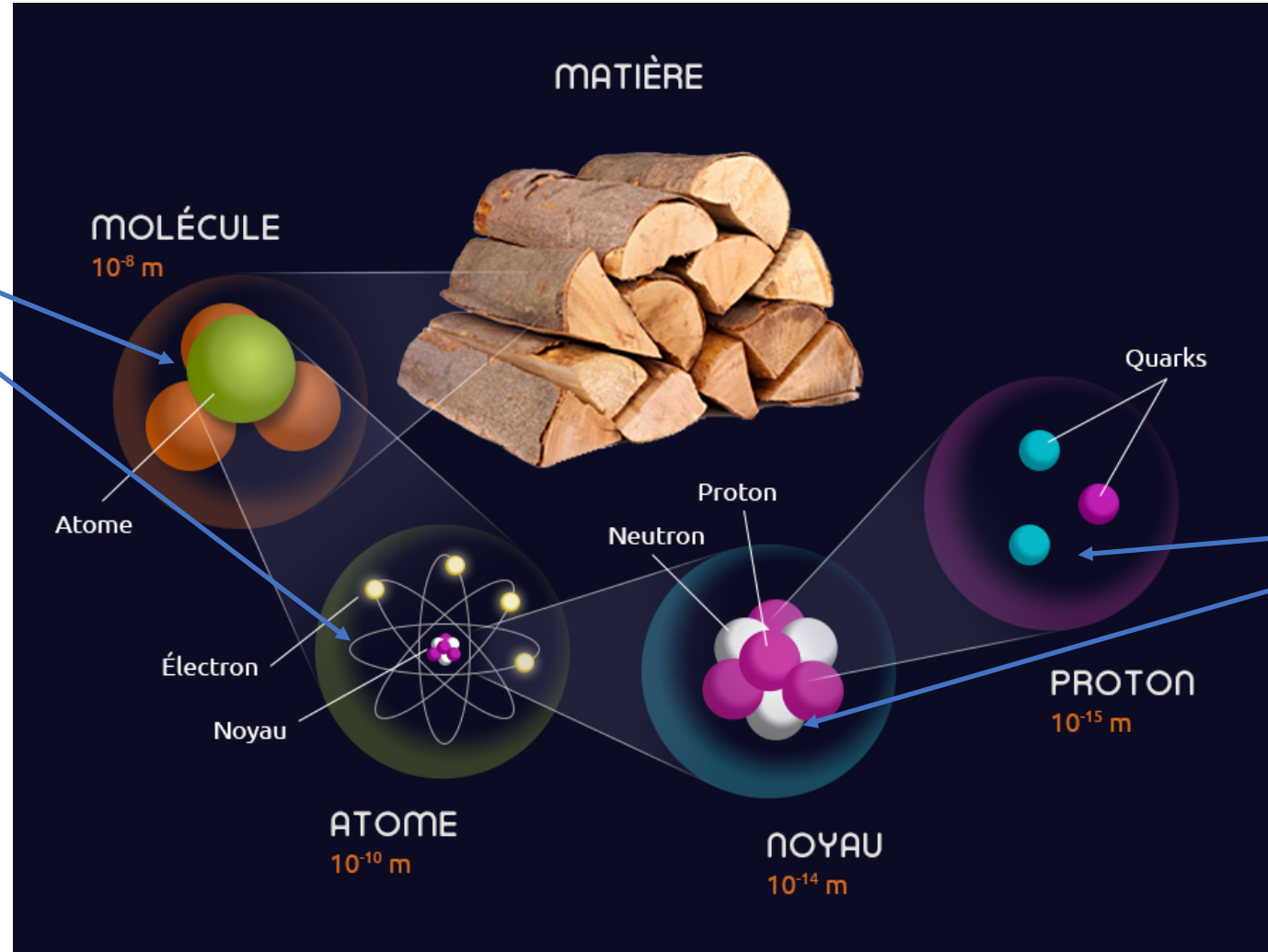
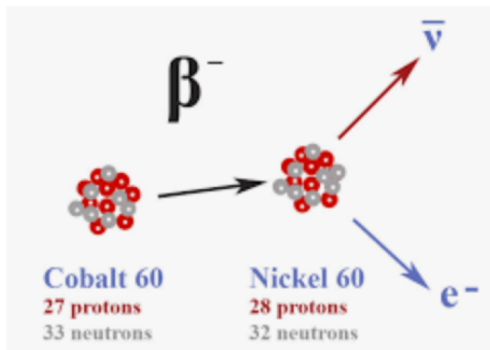
électromagnétisme



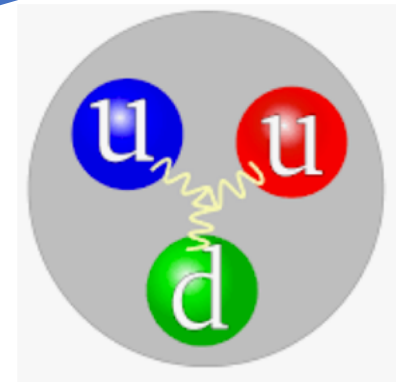
gravitation



Interaction faible



Interaction forte



Physique des particules

- Particle Physics not just “stamp collecting”, hunting new resonances.
- The study of the **fundamental** particles and their **interactions** is interesting...
- ...but what makes it **really interesting** is that the **fundamental interactions** are **dictated** by a **few theoretical guidelines** and the **fundamental dynamics** can be directly related to **observations**.
(fundamental: related to terms in the Lagrangian)

Modèle standard de la physique des particules

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{Dirac}} + \mathcal{L}_{\text{mass}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} . \quad (1)$$

Here,

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = i\bar{e}_L^i \partial e_L^i + i\bar{\nu}_L^i \partial \nu_L^i + i\bar{e}_R^i \partial e_R^i + i\bar{u}_L^i \partial u_L^i + i\bar{d}_L^i \partial d_L^i + i\bar{u}_R^i \partial u_R^i + i\bar{d}_R^i \partial d_R^i ; \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{\text{mass}} = -v \left(\lambda_e^i \bar{e}_L^i e_R^i + \lambda_u^i \bar{u}_L^i u_R^i + \lambda_d^i \bar{d}_L^i d_R^i + \text{h.c.} \right) - M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{M_W^2}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu ; \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4} (G_{\mu\nu}^a)^2 - \frac{1}{2} W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} - \frac{1}{4} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{L}_{WZA} , \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} G_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g_3 f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \\ W_{\mu\nu}^\pm &= \partial_\mu W_\nu^\pm - \partial_\nu W_\mu^\pm \\ Z_{\mu\nu} &= \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu \\ F_{\mu\nu} &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu , \end{aligned} \quad (5)$$

and

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{WZA} &= ig_2 \cos \theta_W \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu Z^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} Z^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu} Z^\nu \right] \\ &+ ie \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu A^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} A^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu} A^\nu \right] \\ &+ g_2^2 \cos^2 \theta_W (W_\mu^+ W_\nu^- Z^\mu Z^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\nu) \\ &+ g_2^2 (W_\mu^+ W_\nu^- A^\mu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\nu) \\ &+ g_2 e \cos \theta_W [W_\mu^+ W_\nu^- (Z^\mu A^\nu + Z^\nu A^\mu) - 2W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu A^\nu] \\ &+ \frac{1}{2} g_2^2 (W_\mu^+ W_\nu^-) (W^{+\mu} W^{-\nu} - W^{+\nu} W^{-\mu}) ; \end{aligned} \quad (6)$$

and

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} = -g_3 A_\mu^a J_{(3)}^{\mu a} - g_2 (W_\mu^+ J_{W^+}^\mu + W_\mu^- J_{W^-}^\mu + Z_\mu J_Z^\mu) - e A_\mu J_A^\mu , \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} J_{(3)}^{\mu a} &= \bar{u}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a u^i + \bar{d}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a d^i \\ J_{W^+}^\mu &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{\nu}_L^i \gamma^\mu e_L^i + V^{ij} \bar{u}_L^i \gamma^\mu d_L^j) \\ J_{W^-}^\mu &= (J_{W^+}^\mu)^* \\ J_Z^\mu &= \frac{1}{\cos \theta_W} \left[\frac{1}{2} \bar{\nu}_L^i \gamma^\mu \nu_L^i + \left(-\frac{1}{2} + \sin^2 \theta_W \right) \bar{e}_L^i \gamma^\mu e_L^i + (\sin^2 \theta_W) \bar{e}_R^i \gamma^\mu e_R^i \right. \\ &+ \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_L^i \gamma^\mu u_L^i + \left(-\frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_R^i \gamma^\mu u_R^i \\ &+ \left. \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_L^i \gamma^\mu d_L^i + \left(\frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_R^i \gamma^\mu d_R^i \right] \\ J_A^\mu &= (-1) \bar{e}^i \gamma^\mu e^i + \left(\frac{2}{3} \right) \bar{u}^i \gamma^\mu u^i + \left(-\frac{1}{3} \right) \bar{d}^i \gamma^\mu d^i . \end{aligned} \quad (8)$$

Au cours des années 60 et 70, un modèle qui décrit l'ensemble des particules fondamentales et leurs interactions a été mis au point : le « modèle standard ».

Voici l'équation qui résume ce modèle (son « lagrangien »).

Modèle standard de la physique des particules

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{Dirac}} + \mathcal{L}_{\text{mass}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} . \quad (1)$$

Here,

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = i\bar{e}_L^i \not{\partial} e_L^i + i\bar{\nu}_L^i \not{\partial} \nu_L^i + i\bar{e}_R^i \not{\partial} e_R^i + i\bar{u}_L^i \not{\partial} u_L^i + i\bar{d}_L^i \not{\partial} d_L^i + i\bar{u}_R^i \not{\partial} u_R^i + i\bar{d}_R^i \not{\partial} d_R^i ; \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{\text{mass}} = -v \left(\lambda_e^i \bar{e}_L^i e_R^i + \lambda_u^i \bar{u}_L^i u_R^i + \lambda_d^i \bar{d}_L^i d_R^i + \text{h.c.} \right) - M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{M_W^2}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu ; \quad (3)$$

Cette équation peut être déduite à partir de :

- considérations de symétrie,
- et du mécanisme de Higgs.

Concrètement, le modèle standard est une théorie quantique des champs qui respecte la symétrie suivante :

$$G = SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$J_A^\mu = (-1)\bar{e}^i \gamma^\mu e^i + \left(\frac{2}{3}\right)\bar{u}^i \gamma^\mu u^i + \left(-\frac{1}{3}\right)\bar{d}^i \gamma^\mu d^i . \quad (8)$$

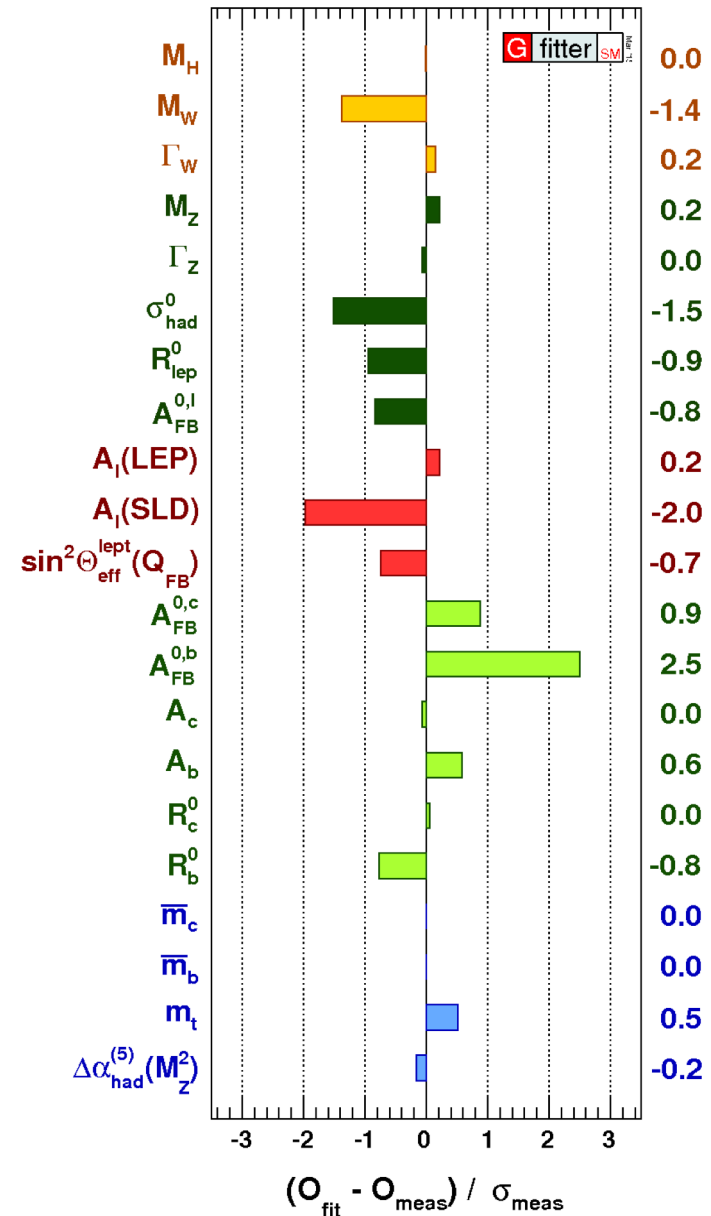
Au cours des années 60 et 70, un modèle qui décrit l'ensemble des particules fondamentales et leurs interactions a été mis au point : le « modèle standard ».

Voici l'équation qui résume ce modèle (son « lagrangien »).

Une théorie qui marche !

Depuis la découverte d'une particule dont les propriétés sont compatibles avec celles prédites pour le boson de Higgs, le **modèle standard (MS)** est une **théorie élégante, parfaitement cohérente** sur le plan mathématique.

Le **MS est en bon accord avec l'ensemble des données** des expériences en physique des particules.



Ajustement global des paramètres libres du secteur électro-faible du MS

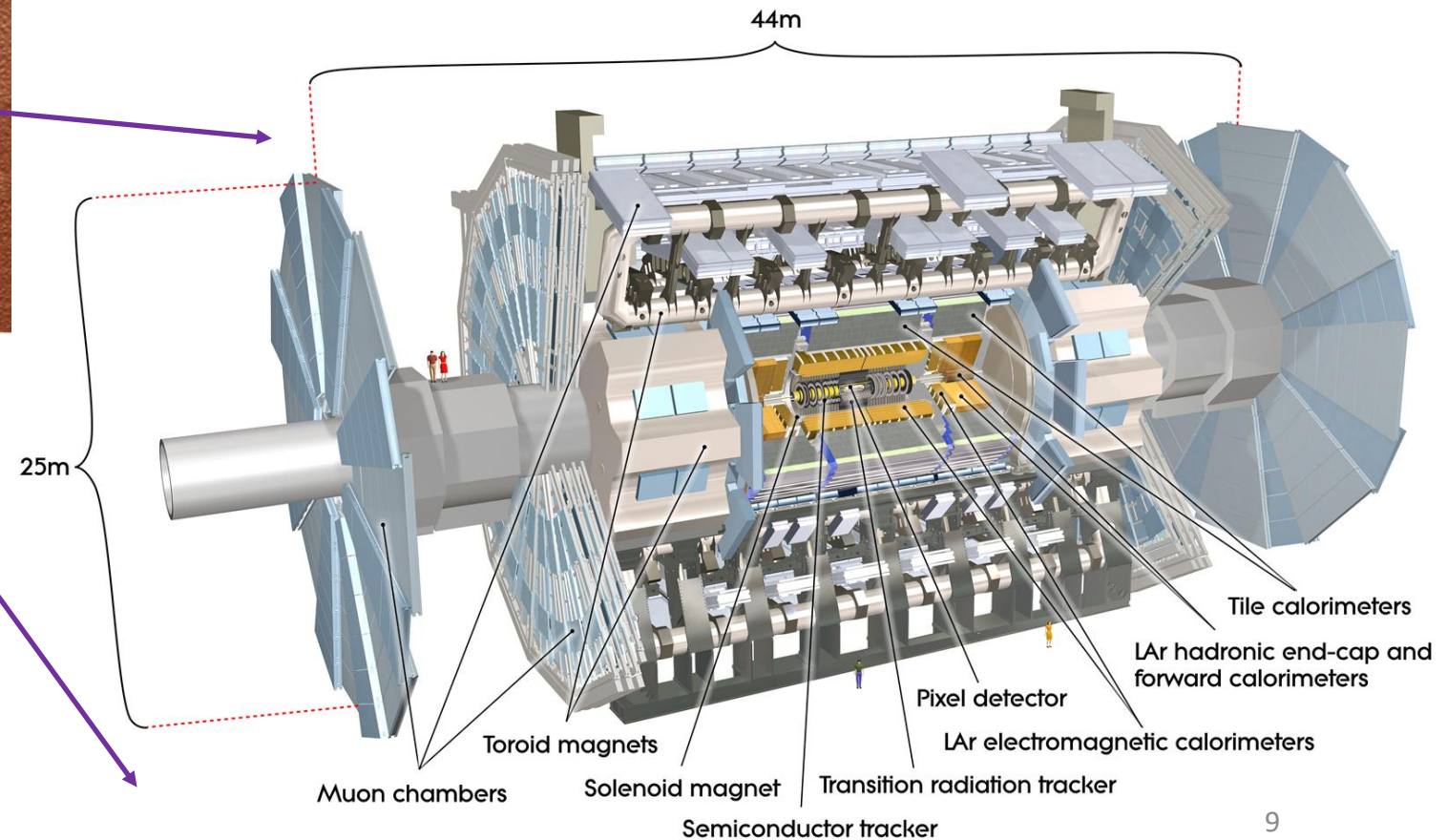
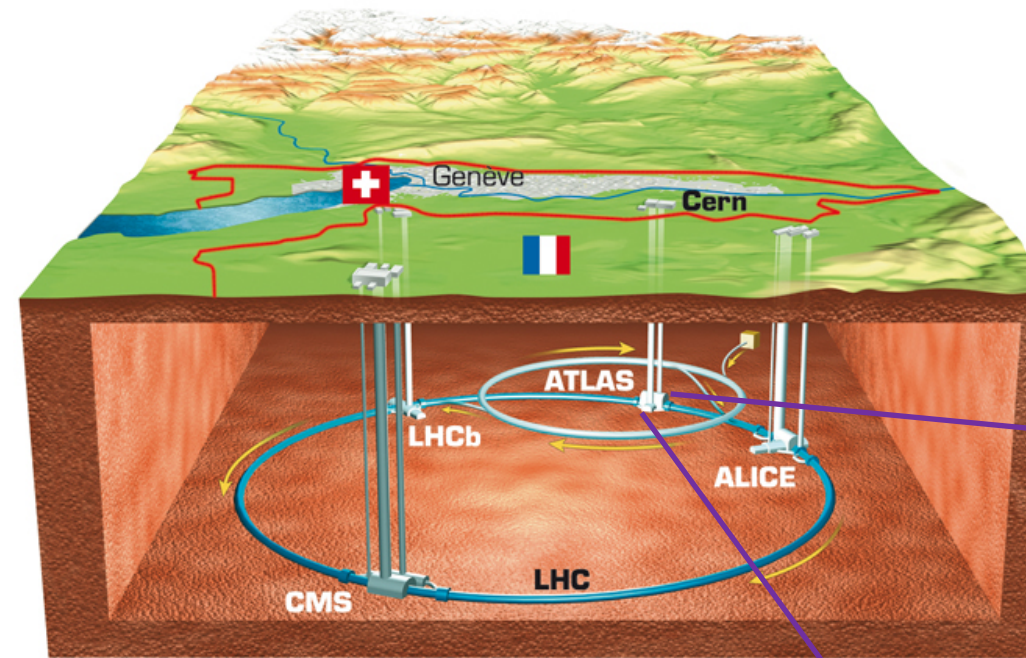
Questions ...

Mais beaucoup de questions restent sans réponse :

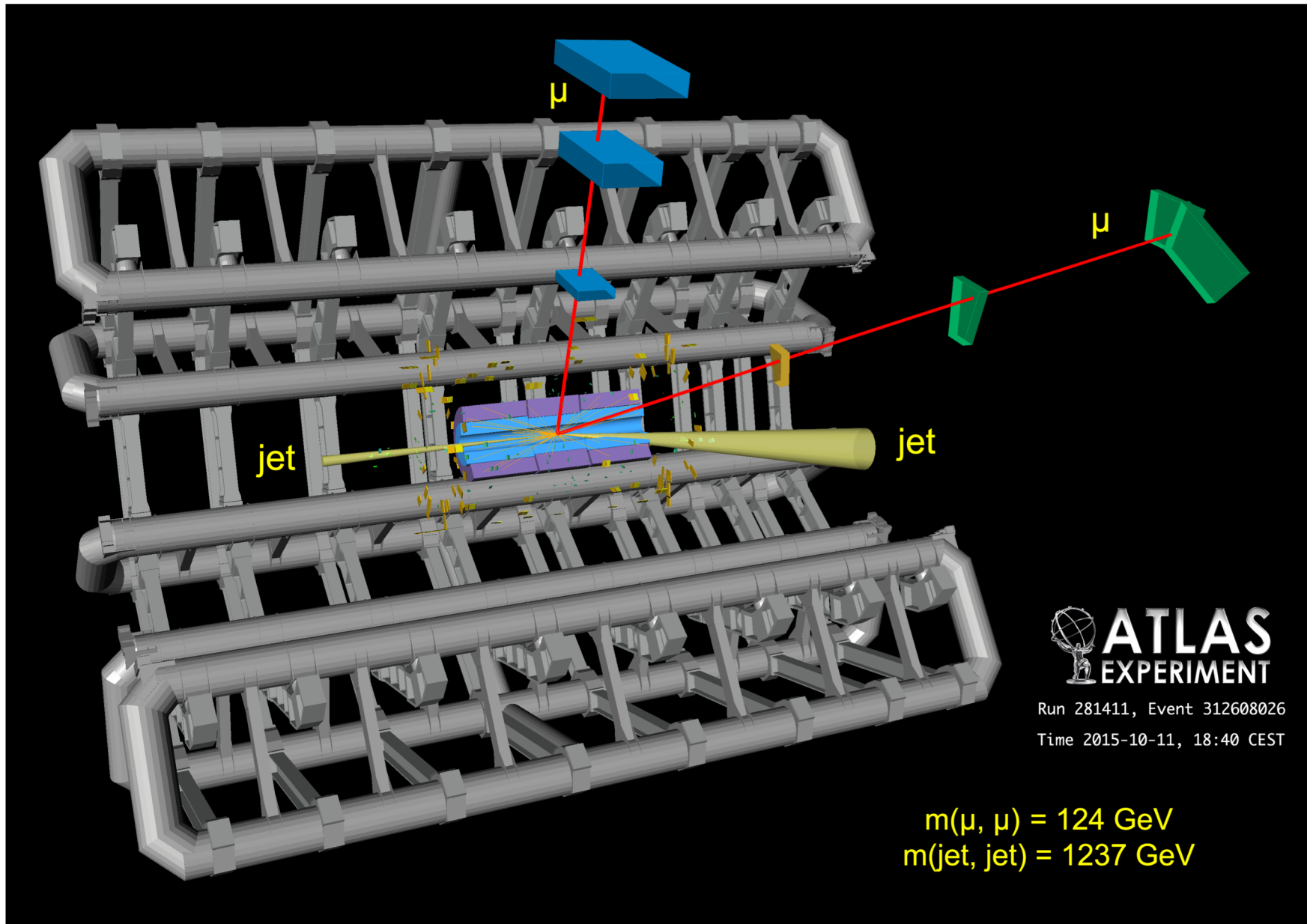
- Comment inclure la gravitation dans le modèle standard ?
- Problème de la hiérarchie : $m_{EW}/M_{Pl} \sim 10^{-16}$
- Quelle est la nature de la matière sombre ?
- D'où vient le grand excès de matière (par rapport à l'anti-matière) dans l'Univers actuel ?
- Pourquoi trois générations de particules ?
- ...

Il est raisonnable de penser que le modèle standard n'est pas une description complète de la nature.

Collisionneur LHC et détecteur ATLAS



Une collision vue par le détecteur ATLAS



Collaboration ATLAS



Expérience de
physique des particules,
basée au CERN
à Genève (Suisse)



Environ 3000 physiciens
(dont 1200 doctorants)
dans 183 instituts
dans 38 pays

IN2P3 (institut national de physique nucléaire et de physique des particules)



Depuis 80 ans, nos connaissances
bâtissent de nouveaux mondes

IN2P3 : un des dix instituts du CNRS

A droite : brève description de l'IN2P3
sur la page web du CNRS

Accueil > L'IN2P3

Sonder les infinis

28 août 2018

Avec leurs homologues du monde entier, les chercheurs de l'IN2P3 explorent les interactions fondamentales entre l'infiniment grand et l'infiniment petit. Leurs recherches permettent de comprendre l'histoire et les mécanismes de formation de la matière pour remonter jusqu'aux origines de l'Univers.

Les recherches menées par l'IN2P3 portent à la fois sur la physique de l'infiniment grand – astroparticules, cosmologie – et sur la physique de l'infiniment petit – physique nucléaire, physique des particules. L'institut couvre les principaux champs de recherche actuels dans ces domaines.

L'IN2P3 tente de répondre à trois grandes questions : Quels sont les constituants fondamentaux du monde subatomique ? Comment se structure la matière nucléaire ? De quoi est fait l'Univers et quelles sont son histoire et son évolution depuis le Big Bang ?

Les compétences scientifiques et techniques de l'IN2P3 sont également développées aux interfaces des disciplines portées par d'autres instituts du CNRS : l'astrophysique, les sciences chimiques, la physique des matériaux et des lasers, les sciences de la vie, les sciences de l'environnement, les sciences de l'ingénierie et les sciences de l'information.

Laboratoire des 2 infinis - Toulouse

Laboratoire des 2 infinis

L'agenda

Les actualités

Annuaire

L'IN2P3

Le Laboratoire

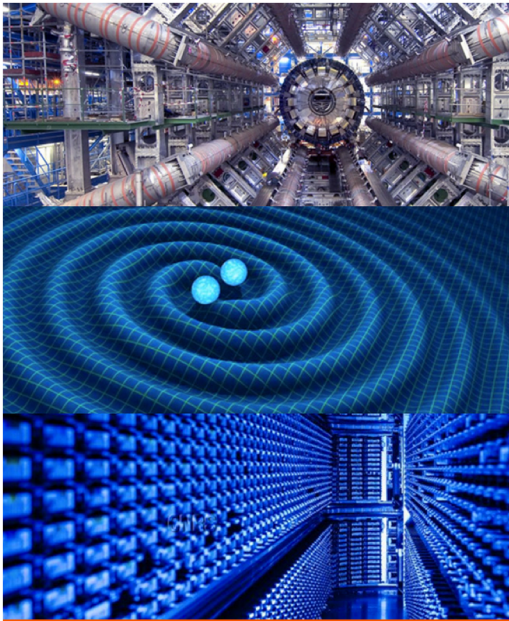
La Recherche

Infos pratiques



Site web :

<https://www.l2it.in2p3.fr/>



FRE2037

Laboratoire des 2 infinis

Le Laboratoire des deux Infinis – Toulouse (L2IT) est né le 1er septembre 2019. Les objets d'étude des chercheurs et ingénieurs du L2IT sont les deux infinis – l'infiniment petit et l'infiniment grand – et les relations entre les phénomènes qui régissent chacun d'entre eux. Nous poursuivons nos recherches au sein de grandes collaborations internationales comme par exemple au CERN à Genève. Les tutelles du L2IT sont le CNRS à travers l'Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3), et l'Université Toulouse III – Paul Sabatier.



Institut national
de physique nucléaire
et de physique des particules



Le mécanisme de Higgs

RAPPEL : Modèle standard de la physique des particules

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{Dirac}} + \mathcal{L}_{\text{mass}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} . \quad (1)$$

Here,

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = i\bar{e}_L^i \not{\partial} e_L^i + i\bar{\nu}_L^i \not{\partial} \nu_L^i + i\bar{e}_R^i \not{\partial} e_R^i + i\bar{u}_L^i \not{\partial} u_L^i + i\bar{d}_L^i \not{\partial} d_L^i + i\bar{u}_R^i \not{\partial} u_R^i + i\bar{d}_R^i \not{\partial} d_R^i ; \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{\text{mass}} = -v \left(\lambda_e^i \bar{e}_L^i e_R^i + \lambda_u^i \bar{u}_L^i u_R^i + \lambda_d^i \bar{d}_L^i d_R^i + \text{h.c.} \right) - M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{M_W^2}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu ; \quad (3)$$

Cette équation peut être déduite à partir de :

- considérations de symétrie,
- et du mécanisme de Higgs.

Concrètement, le modèle standard est une théorie quantique des champs qui respecte la symétrie suivante :

$$G = SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$J_A^\mu = (-1)\bar{e}^i \gamma^\mu e^i + \left(\frac{2}{3}\right)\bar{u}^i \gamma^\mu u^i + \left(-\frac{1}{3}\right)\bar{d}^i \gamma^\mu d^i . \quad (8)$$

Au cours des années 60 et 70, un modèle qui décrit l'ensemble des particules fondamentales et leurs interactions a été mis au point : le « modèle standard ».

Voici l'équation qui résume ce modèle (son « lagrangien »).

Le champ de Higgs est partout dans l'univers
imaginons-le comme un champ de neige



La masse des particules est une conséquence de leur interaction avec le champ de Higgs.

Le champ de Higgs est partout dans l'univers imaginons-le comme un champ de neige



quark top

Les particules qui interagissent beaucoup avec le champ sont ralenties – elles sont plus massives.

Le champ de Higgs est partout dans l'univers imaginons-le comme un champ de neige



électron

Les particules qui interagissent moins avec le champ se déplacent avec facilité – elles sont moins massives.

Le champ de Higgs est partout dans l'univers imaginons-le comme un champ de neige



photon

Les particules qui n'interagissent pas avec le champ se déplacent sans entrave – elles sont sans masse.

Le champs de Higgs est partout dans l'univers imaginons-le comme un champ de neige



boson de Higgs

Les boson de Higgs est une excitation du champs de Higgs. Il a une masse aussi.

Physique du boson de Higgs : détails ...

Transparent « classique » montré par Guido Altarelli
à une conférence prestigieuse en 2009

The Higgs problem is central in particle physics today

The main problems of the SM show up in the Higgs sector

$$V_{Higgs} = V_0 - \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 + [\bar{\psi}_{Li} Y_{ij} \psi_{Rj} \phi + h.c.]$$

Vacuum energy
 $V_{0exp} \sim (2 \cdot 10^{-3} \text{ eV})^4$

Possible instability
depending on m_H

Origin of quadratic
divergences.
Hierarchy problem

The flavour problem:
large unexplained ratios
of Y_{ij} Yukawa constants



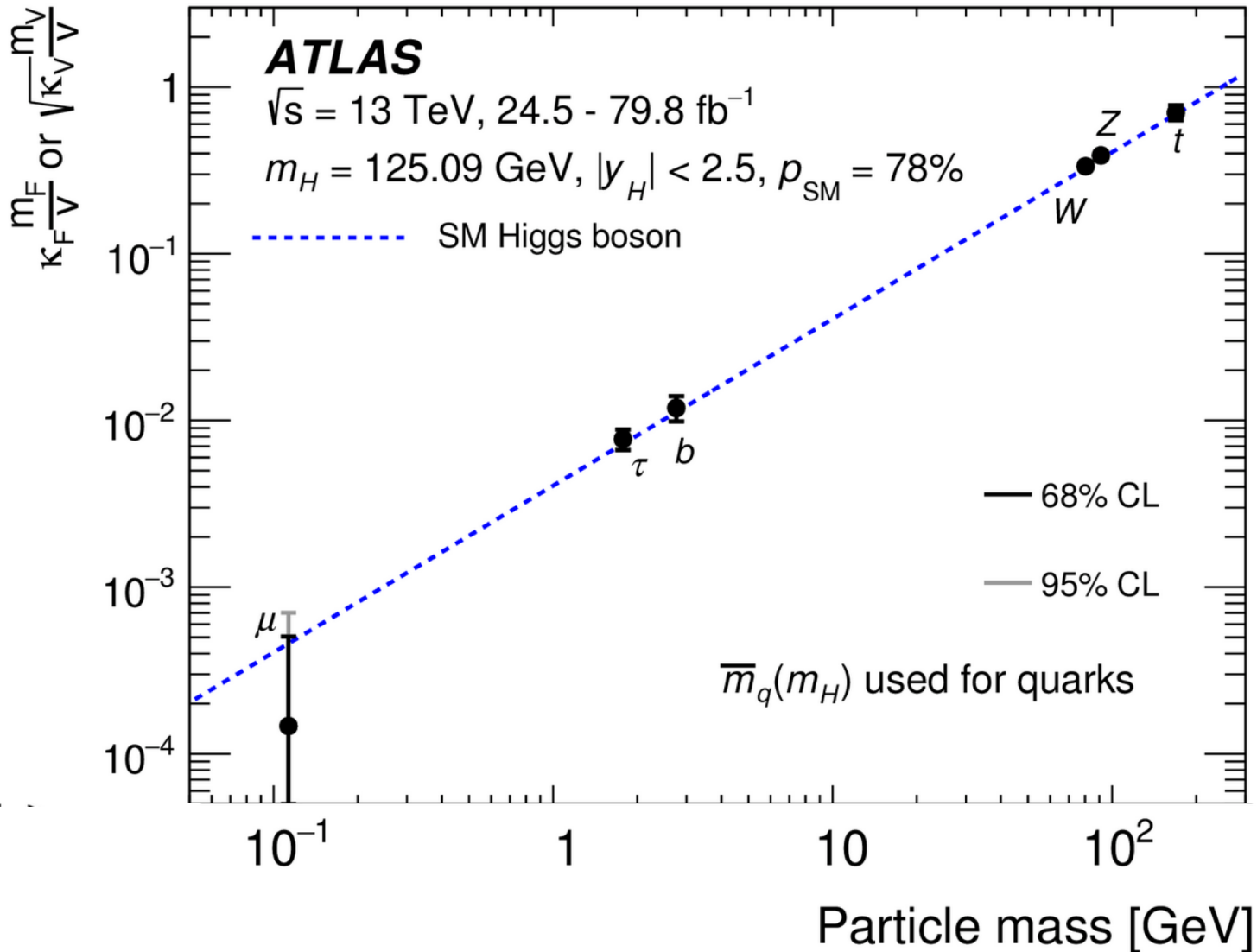
Une partie de l'équation
mathématique qui représente
le modèle standard de
la physique des particules

Spécifiquement, la partie
qui concerne le Higgs et
ses interactions

Une bonne partie des problèmes du modèle standard
est liée à des termes dans cette équation,
p.ex. le problème de la hiérarchie.

Il est crucial d'étudier les propriétés
du boson de Higgs en détail.

Résultats expérimentaux : couplages du boson de Higgs aux autres particules

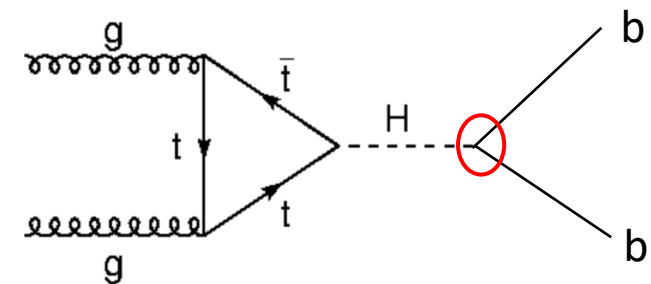


Prédictions vérifiables du modèle standard :

- couplages aux fermions
proportionnels à la masse du fermion
- couplages aux bosons de gauge
proportionnels à la (masse)²
du boson de gauge

Comment mesurer une constante de couplage :

Étudier un processus qui fait intervenir
le couplage en question, p.ex. :



Les graphes log-log peuvent être trompeurs

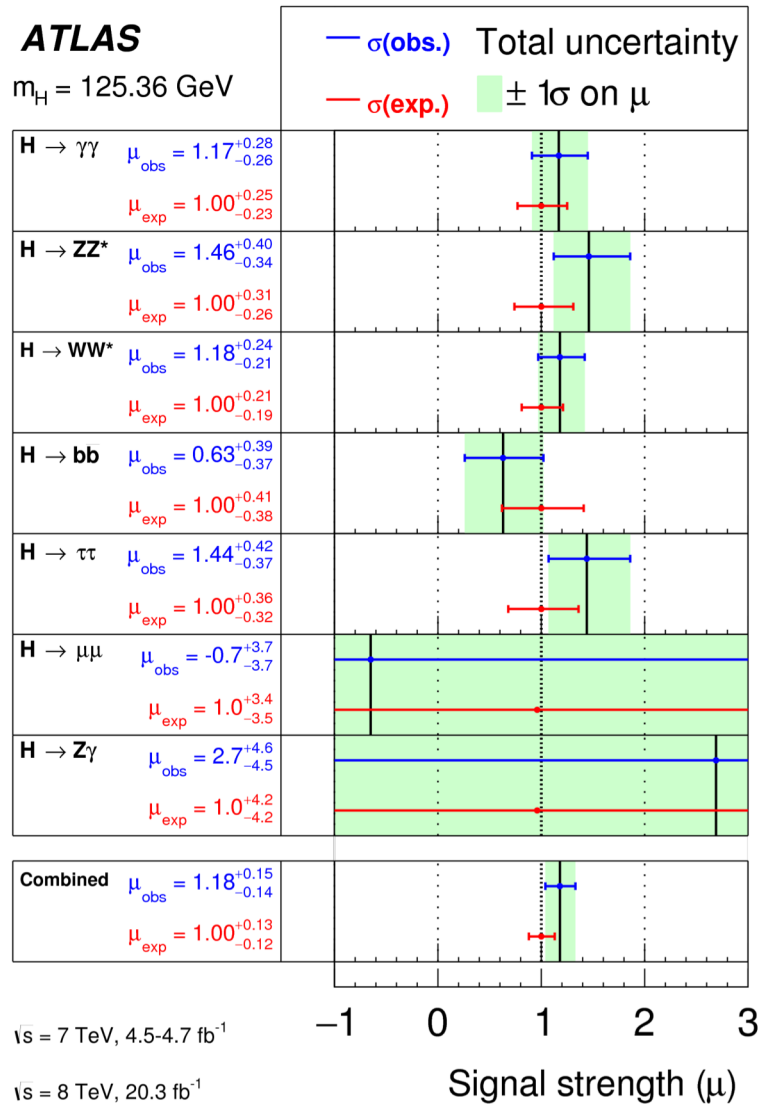
| Parameter | Result |
|---------------|------------------------|
| κ_Z | 1.10 ± 0.08 |
| κ_W | 1.05 ± 0.08 |
| κ_b | $1.06^{+0.19}_{-0.18}$ |
| κ_t | $1.02^{+0.11}_{-0.10}$ |
| κ_τ | 1.07 ± 0.15 |
| κ_μ | < 1.53 at 95% CL |

Paramètres kappa : valeur mesurée du couplage divisée par la valeur prédite par le modèle standard.

Notons les taille des incertitudes expérimentales actuelles.

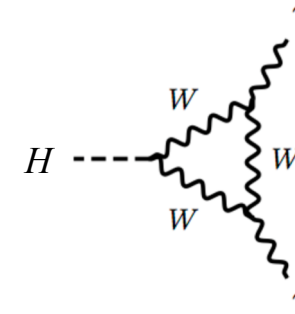
Avec les mesures actuelles, nous ne pouvons pas exclure des déviations de l'ordre de 10% par rapport aux prédictions du modèle standard.

Nouvelle physique dans les interactions du Higgs ?



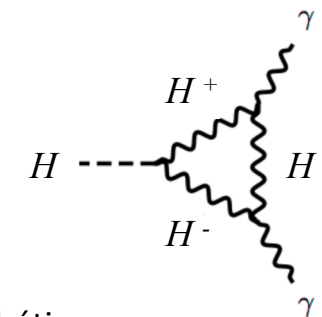
Exemple de $H \rightarrow \gamma\gamma$:

Dans le MS, ce processus est décrit par des graphes comme celui-ci:



L'intensité mesurée est *compatible* avec la prévision du MS. Mais *l'incertitude de la mesure est de ~30 %*.

Dans des extensions du MS, ce processus serait aussi possible via un autre graphe:



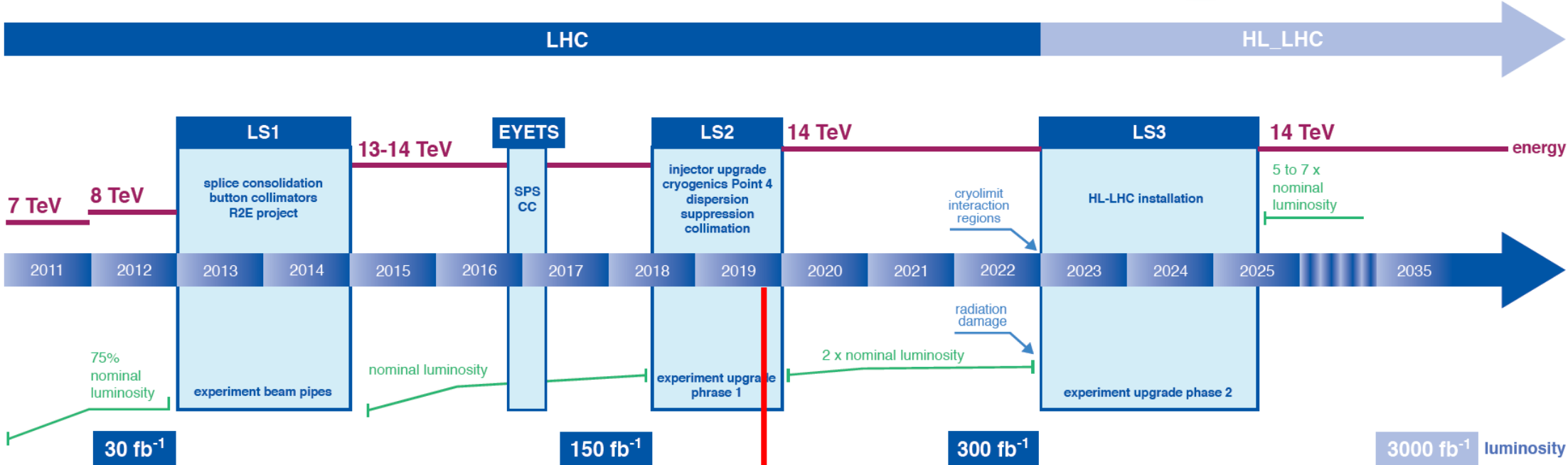
H^+, H^- : particules hypothétiques

Ceci modifierait l'intensité par *quelques pour-cents*.

Les deux prochaines décennies au LHC

Les différentes phases de l'expérience ATLAS

LHC / HL-LHC Plan



année 2011

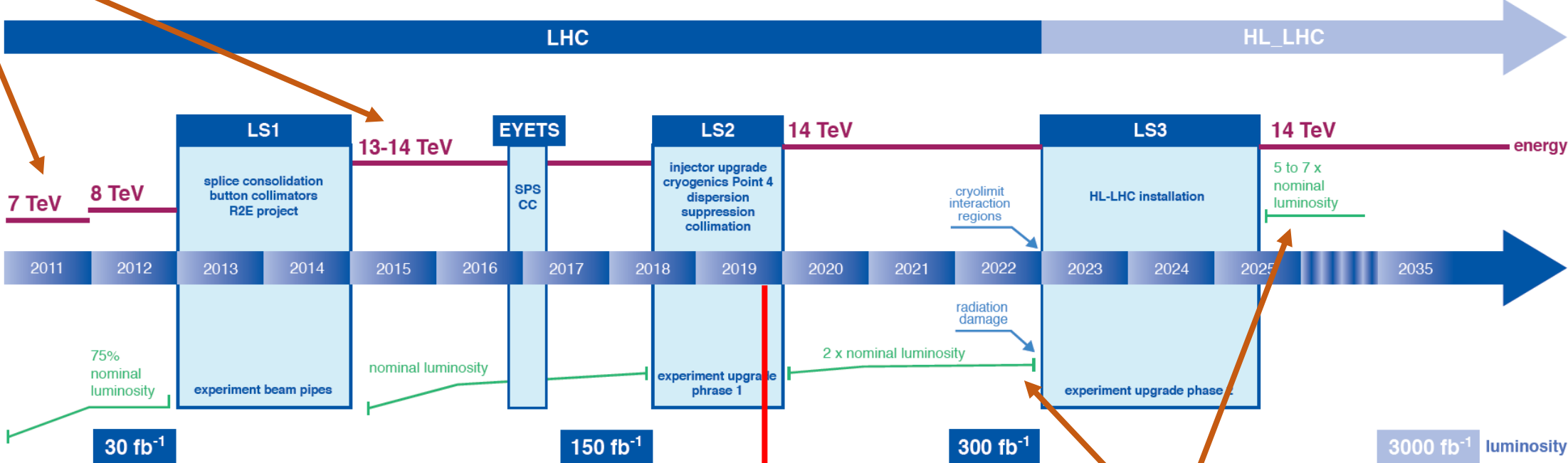
aujourd'hui

années 2035-2040

Les différentes phases de l'expérience ATLAS

Montée importante en énergie

LHC / HL-LHC Plan



Collisionneur précédent: 2 TeV

année 2011

aujourd'hui

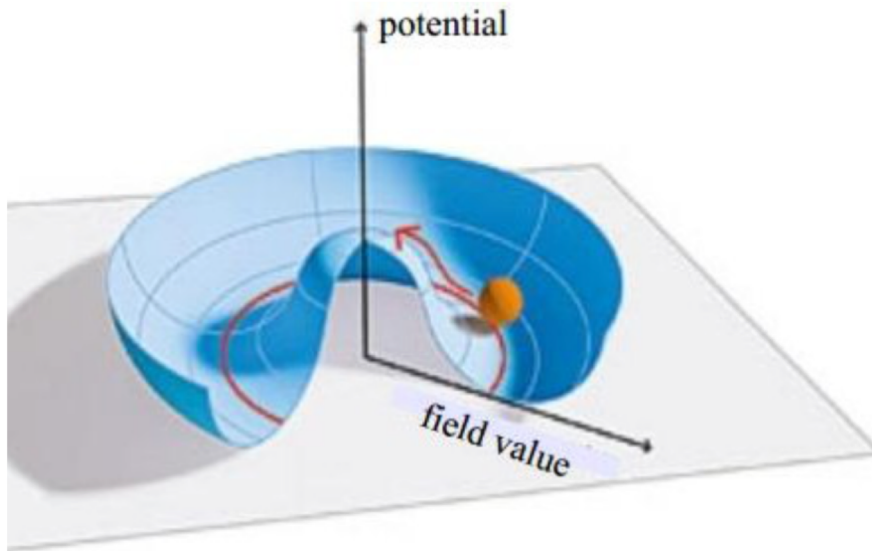
Montée importante en luminosité (collisions / seconde)

années 2035-2040

Auto-couplage du boson de Higgs

La seule façon de reconstruire le potentiel de Higgs : mesurer l'auto-couplage du boson de Higgs.

Potentiel de Higgs : le fameux « chapeau mexicain »



Potentiel de Higgs dans le modèle standard :

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^+ \Phi + \eta (\Phi^+ \Phi)^2$$

expansion autour du minimum

$$\frac{1}{2} m_H^2 h^2 + \sqrt{\frac{\eta}{2}} m_H h^3 + \frac{\eta}{4} h^4$$



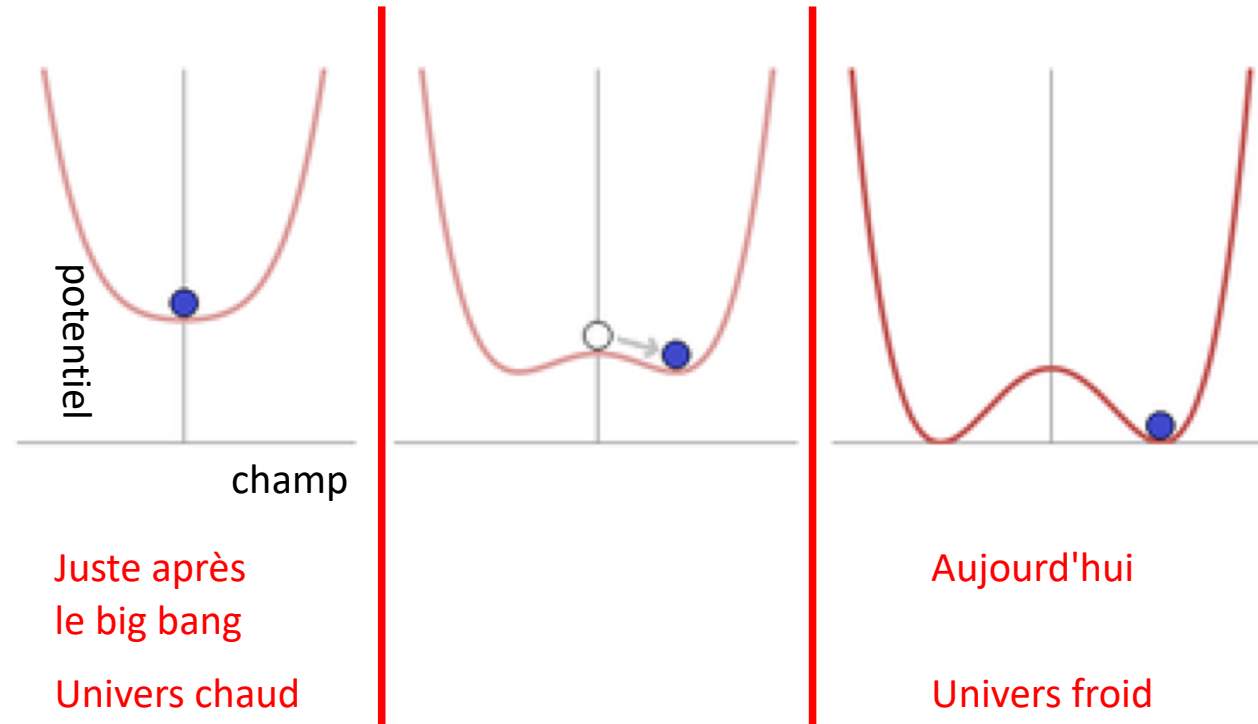
$$m_H = \sqrt{\lambda/2} v$$

$$v = (\sqrt{2} G_F)^{-1/2} \approx 246 \text{ GeV}$$

Potentiel de Higgs au cours du temps

Dans le modèle standard, le **champ de Higgs** est interagit avec un **potentiel**.

La forme du potentiel évolue avec le temps:



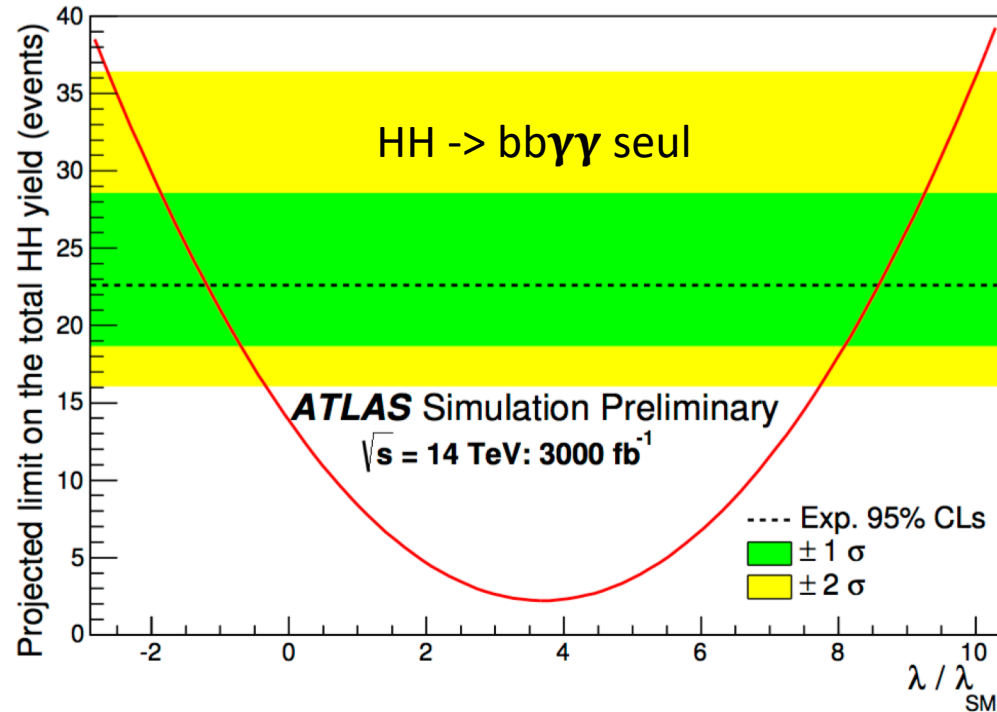
Le moment de la **transition** est crucial pour l'évolution de l'Univers (création de plus de matière que d'anti-matière).

L'évolution dépend des détails de la **forme du potentiel**.

Le potentiel est postulé de manière **ad hoc** dans le MS.

Auto-couplage du boson de Higgs : prévisions pour le HL-LHC

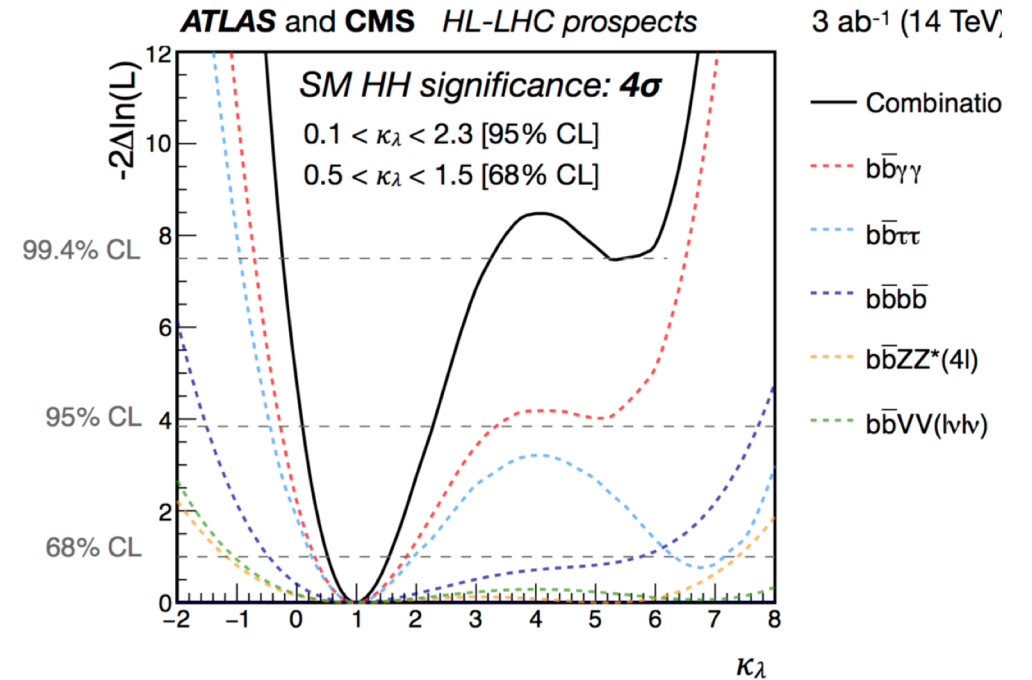
Publié en 2014 :



Message très simplifié :

nous n'arriverons pas à observer la production de paires de Higgs ;
il y a trop de bruit de fond

Publié en 2019 :



Message simplifié :

a l'aide de **méthodes d'analyse poussées (« machine learning »)**
nous arriverons à extraire le signal di-Higgs du bruit de fond,
et nous arriverons à mesurer l'auto-couplage

Auto-couplage du boson de Higgs : prévisions pour le HL-LHC

Ces nouvelles prévisions sont un élément important pris en compte dans la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.

Projected limit on the total HH yield (events)



Message très
nous n'arriv
il y a trop de

et nous arriverons à mesurer l'auto-couplage

4 TeV,

binatio

*(4l)

(lvlv)

arning »)

fond,

Conclusions

Physique des particules : étude des constituants fondamentaux de la matière et de leurs interactions.

L'**outil** principal de la physique des particules : collisionneur de particules; détecteurs associés

Actuellement le collisionneur avec le plus d'énergie : le **LHC** au CERN à Genève.

Il le restera pendant deux décennies au moins.

Dernière découverte majeure : le **boson de Higgs** (2012)

Depuis, nous avons effectué des **études précises** des propriétés du boson de Higgs, y compris de ses interactions (couplages) avec les autres particules.

Bientôt une nouvelle ère au LHC (le HL-LHC) : augmentation importante du taux de collisions (facteur cinq).
Nous donnera accès à des **phénomènes rares**, comme p.ex. l'auto-couplage du boson de Higgs.

Nous attendons des résultats qui peuvent potentiellement nous éclaircir sur un élément clé de l'**histoire de l'Univers** (baryosynthèse, création de l'asymétrie matière-antimatière).

Réserve



IN2P3 : THEMATIQUES SCIENTIFIQUES

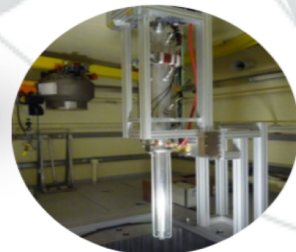
Physique des particules et hadronique

Composants ultimes et interactions fondamentales



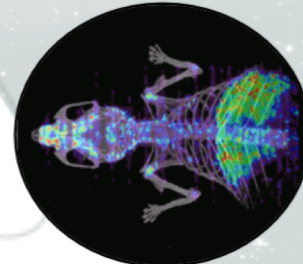
Physique nucléaire et applications

Structure de la matière nucléaire, énergie nucléaire environnement et applications médicales



Accélérateurs et Technologies

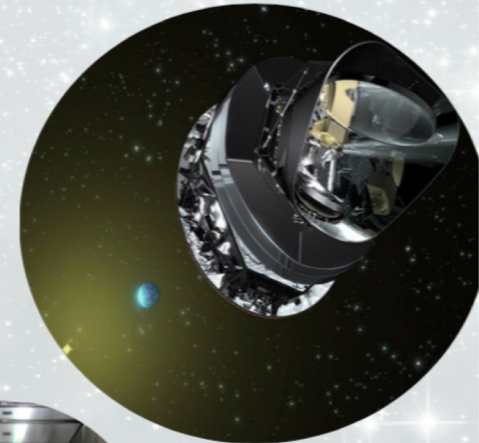
R&D sur des technologies majeures



Astroparticules & Cosmologie

Composition et Evolution de l'Univers

Calcul et Données
R&D autour des Big Data et des techniques de calcul



L'accent sur les méthodes d'analyse innovantes

Les aspects théoriques et numériques - modélisation, simulation, analyses des données - sont l'activité clé du L2IT. Ceci inclut la simulation des instruments (détecteurs) que nous utilisons pour sonder les deux infinis, le traitement des données issues de ces instruments, et la confrontation entre les simulations et les données réelles. Nous développerons ces aspects innovants dans notre domaine en étroite collaboration avec les experts dans les établissements de pointe dans les domaines du numérique et de l'intelligence artificielle implantés à Toulouse.

Le programme de physique d'ATLAS

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits

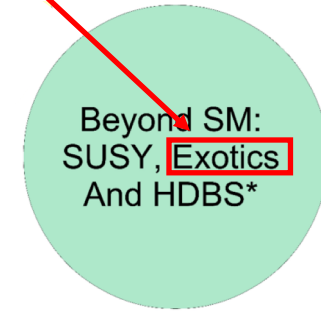
Status: May 2019

ATLAS Preliminary

$$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 139) \text{ fb}^{-1} \quad \sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$$

| Model | ℓ, γ | Jets [†] | E_T^{miss} | $\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$ | Limit | Reference | |
|---------------------------|--|--|------------------------|--|-------------------------|--|--|
| Extra dimensions | ADD $G_{KK} + g/q$ | $0 e, \mu$ | $1-4 j$ | Yes | 36.1 | M_D 7.7 TeV | $n = 2$ 1711.03301 |
| | ADD non-resonant $\gamma\gamma$ | 2γ | - | - | 36.7 | M_S 8.6 TeV | $n = 3$ HLZ NLO 1707.04147 |
| | ADD QBH | - | $2 j$ | - | 37.0 | M_{th} 8.9 TeV | $n = 6$ 1703.09127 |
| | ADD BH high Σp_T | $\geq 1 e, \mu$ | $\geq 2 j$ | - | 3.2 | M_{th} 8.2 TeV | $n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, rot BH 1606.02265 |
| | ADD BH multijet | - | $\geq 3 j$ | - | 3.6 | M_{th} 9.55 TeV | $n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, rot BH 1512.02586 |
| | RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$ | 2γ | - | - | 36.7 | G_{KK} mass 4.1 TeV | $k/\bar{M}_{Pl} = 0.1$ 1707.04147 |
| | Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW/ZZ$ | multi-channel | - | - | 36.1 | G_{KK} mass 2.3 TeV | $k/\bar{M}_{Pl} = 1.0$ 1808.02380 |
| | Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ | $0 e, \mu$ | $2 J$ | - | 139 | G_{KK} mass 1.6 TeV | $k/\bar{M}_{Pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2019-003 |
| | Bulk RS $G_{KK} \rightarrow t\bar{t}$ | $1 e, \mu$ | $\geq 1 b, \geq 1J/2j$ | Yes | 36.1 | G_{KK} mass 3.8 TeV | $\Gamma/m = 15\%$ 1804.10823 |
| | 2UED / RPP | $1 e, \mu$ | $\geq 2 b, \geq 3 j$ | Yes | 36.1 | KK mass 1.8 TeV | Tier (1,1), $\mathcal{B}(A^{(1,1)} \rightarrow t\bar{t}) = 1$ 1803.09678 |
| Gauge bosons | SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$ | $2 e, \mu$ | - | - | 139 | Z' mass 5.1 TeV | $\Gamma/m = 1\%$ 1903.06248 |
| | SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$ | 2τ | - | - | 36.1 | Z' mass 2.42 TeV | 1709.07242 |
| | Leptophobic $Z' \rightarrow b\bar{b}$ | - | $2 b$ | - | 36.1 | Z' mass 2.1 TeV | 1805.09299 |
| | Leptophobic $Z' \rightarrow t\bar{t}$ | $1 e, \mu$ | $\geq 1 b, \geq 1J/2j$ | Yes | 36.1 | Z' mass 3.0 TeV | 1804.10823 |
| | SSM $W' \rightarrow \ell\nu$ | $1 e, \mu$ | - | Yes | 139 | W' mass 6.0 TeV | CERN-EP-2019-100 |
| | SSM $W' \rightarrow \tau\nu$ | 1τ | - | Yes | 36.1 | W' mass 3.7 TeV | 1801.06992 |
| | HVT $V' \rightarrow WZ \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ model B | $0 e, \mu$ | $2 J$ | - | 139 | V' mass 3.6 TeV | $g_V = 3$ ATLAS-CONF-2019-003 |
| | HVT $V' \rightarrow WH/ZH$ model B | multi-channel | - | - | 36.1 | V' mass 2.93 TeV | $g_V = 3$ 1712.06518 |
| | LRSM $W_R \rightarrow t\bar{b}$ | multi-channel | - | - | 36.1 | W_R mass 3.25 TeV | 1807.10473 |
| | LRSM $W_R \rightarrow \mu N_R$ | 2μ | $1 J$ | - | 80 | W_R mass 5.0 TeV | $m(N_R) = 0.5 \text{ TeV}$, $g_L = g_R$ 1904.12679 |
| CI | CI $qq\bar{q}\bar{q}$ | - | $2 j$ | - | 37.0 | Λ 21.8 TeV | η_{LL} 1703.09127 |
| | CI $\ell\ell q\bar{q}$ | $2 e, \mu$ | - | - | 36.1 | Λ 40.0 TeV | η_{LL} 1707.02424 |
| | CI $t\bar{t}t\bar{t}$ | $\geq 1 e, \mu$ | $\geq 1 b, \geq 1 j$ | Yes | 36.1 | Λ 2.57 TeV | $ C_{4t} = 4\pi$ 1811.02305 |
| DM | Axial-vector mediator (Dirac DM) | $0 e, \mu$ | $1-4 j$ | Yes | 36.1 | m_{med} 1.55 TeV | $g_a = 0.25, g_s = 1.0, m(\chi) = 1 \text{ GeV}$ 1711.03301 |
| | Colored scalar mediator (Dirac DM) | $0 e, \mu$ | $1-4 j$ | Yes | 36.1 | m_{med} 1.67 TeV | $g = 1.0, m(\chi) = 1 \text{ GeV}$ 1711.03301 |
| | $VV\chi$ EFT (Dirac DM) | $0 e, \mu$ | $1 J, \leq 1 j$ | Yes | 3.2 | M_s 700 GeV | $m(\chi) < 150 \text{ GeV}$ 1608.02372 |
| | Scalar reson. $\phi \rightarrow t\bar{t}$ (Dirac DM) | $0-1 e, \mu$ | $1 b, 0-1 J$ | Yes | 36.1 | m_ϕ 3.4 TeV | $y = 0.4, \lambda = 0.2, m(\chi) = 10 \text{ GeV}$ 1812.09743 |
| LQ | Scalar LQ 1 st gen | $1, 2 e$ | $\geq 2 j$ | Yes | 36.1 | LQ mass 1.4 TeV | $\beta = 1$ 1902.00377 |
| | Scalar LQ 2 nd gen | $1, 2 \mu$ | $\geq 2 j$ | Yes | 36.1 | LQ mass 1.56 TeV | $\beta = 1$ 1902.00377 |
| | Scalar LQ 3 rd gen | 2τ | $2 b$ | - | 36.1 | LQ_s^* mass 1.03 TeV | $\mathcal{B}(LQ_s^* \rightarrow b\bar{t}) = 1$ 1902.08103 |
| | Scalar LQ 3 rd gen | $0-1 e, \mu$ | $2 b$ | Yes | 36.1 | LQ_s^* mass 970 GeV | $\mathcal{B}(LQ_s^* \rightarrow t\bar{t}) = 0$ 1902.08103 |
| Heavy quarks | VLQ $TT \rightarrow Ht/Zt/Wb + X$ | multi-channel | - | - | 36.1 | T mass 1.37 TeV | SU(2) doublet 1808.02343 |
| | VLQ $BB \rightarrow Wt/Zb + X$ | multi-channel | - | - | 36.1 | B mass 1.34 TeV | SU(2) doublet 1808.02343 |
| | VLQ $T_{5/3} T_{5/3} T_{5/3} \rightarrow Wt + X$ | $2(SS)/\geq 3 e, \mu \geq 1 b, \geq 1 j$ | Yes | 36.1 | $T_{5/3}$ mass 1.64 TeV | $\mathcal{B}(T_{5/3} \rightarrow Wt) = 1, c(T_{5/3} Wt) = 1$ 1807.11883 | |
| | VLQ $Y \rightarrow Wb + X$ | $1 e, \mu \geq 1 b, \geq 1 j$ | Yes | 36.1 | Y mass 1.85 TeV | $\mathcal{B}(Y \rightarrow Wb) = 1, c_R(Wb) = 1$ 1812.07343 | |
| | VLQ $B \rightarrow Hb + X$ | $0 e, \mu, 2 \gamma \geq 1 b, \geq 1 j$ | Yes | 79.8 | B mass 1.21 TeV | $\kappa_B = 0.5$ ATLAS-CONF-2018-024 | |
| VLQ $QQ \rightarrow WqWq$ | $1 e, \mu \geq 4 j$ | Yes | 20.3 | Q mass 690 GeV | 1509.04261 | | |
| Excited fermions | Excited quark $q^* \rightarrow qg$ | - | $2 j$ | - | 139 | q^* mass 6.7 TeV | only u' and d' , $\Lambda = m(q')$ ATLAS-CONF-2019-007 |
| | Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$ | 1γ | $1 j$ | - | 36.7 | q^* mass 5.3 TeV | only u' and d' , $\Lambda = m(q')$ 1709.10440 |
| | Excited quark $b^* \rightarrow b\bar{g}$ | - | $1 b, 1 j$ | - | 36.1 | b^* mass 2.6 TeV | 1805.09299 |
| | Excited lepton ℓ^* | $3 e, \mu$ | - | - | 20.3 | ℓ^* mass 3.0 TeV | $\Lambda = 3.0 \text{ TeV}$ 1411.2921 |
| | Excited lepton ν^* | $3 e, \mu, \tau$ | - | - | 20.3 | ν^* mass 1.6 TeV | $\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$ 1411.2921 |
| Other | Type III Seesaw | $1 e, \mu \geq 2 j$ | Yes | 79.8 | N^0 mass 560 GeV | ATLAS-CONF-2018-020 | |
| | LRSM Majorana ν | 2μ | $2 j$ | - | 36.1 | N_R mass 3.2 TeV | $m(W_R) = 4.1 \text{ TeV}$, $g_L = g_R$ 1809.11105 |
| | Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$ | $2, 3, 4 e, \mu$ (SS) | - | - | 36.1 | $H^{\pm\pm}$ mass 870 GeV | DY production 1710.09748 |
| | Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$ | $3 e, \mu, \tau$ | - | - | 20.3 | $H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV | DY production, $\mathcal{B}(H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau) = 1$ 1411.2921 |
| | Multi-charged particles | - | - | - | 36.1 | multi-charged particle mass 1.22 TeV | DY production, $ q = 5e$ 1812.03673 |
| | Magnetic monopoles | - | - | - | 34.4 | monopole mass 2.37 TeV | DY production, $ g = 1g_D$, spin 1/2 1905.10130 |

Tableau : résumé concis des résultats actuels de la partie « Exotics » d'une des cases de la page précédente.

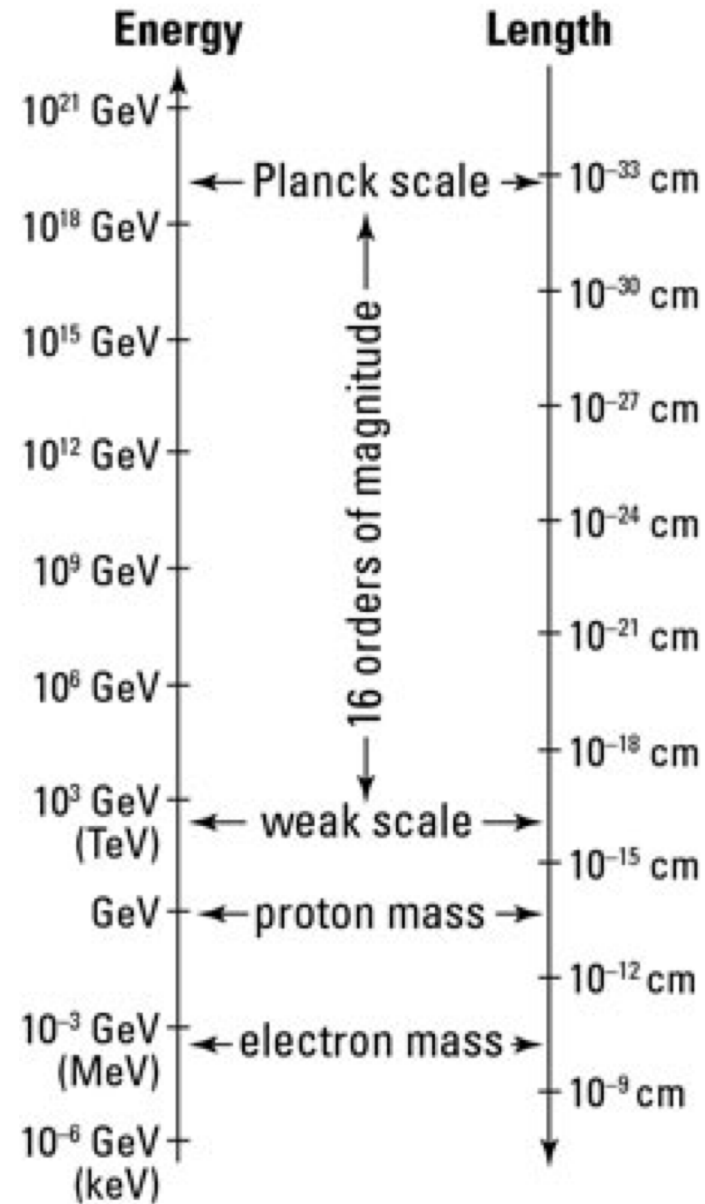


Chaque ligne dans le tableau représente une analyse / une publication.

*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).

Le problème de la hiérarchie



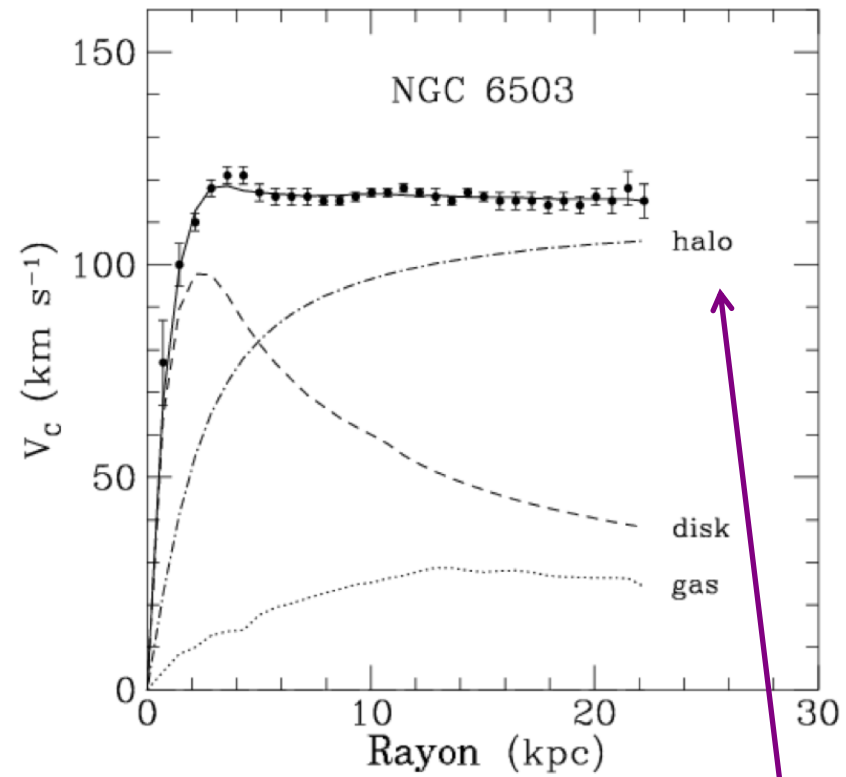
Matière sombre

La galaxie NGC 6503



centre de la galaxie

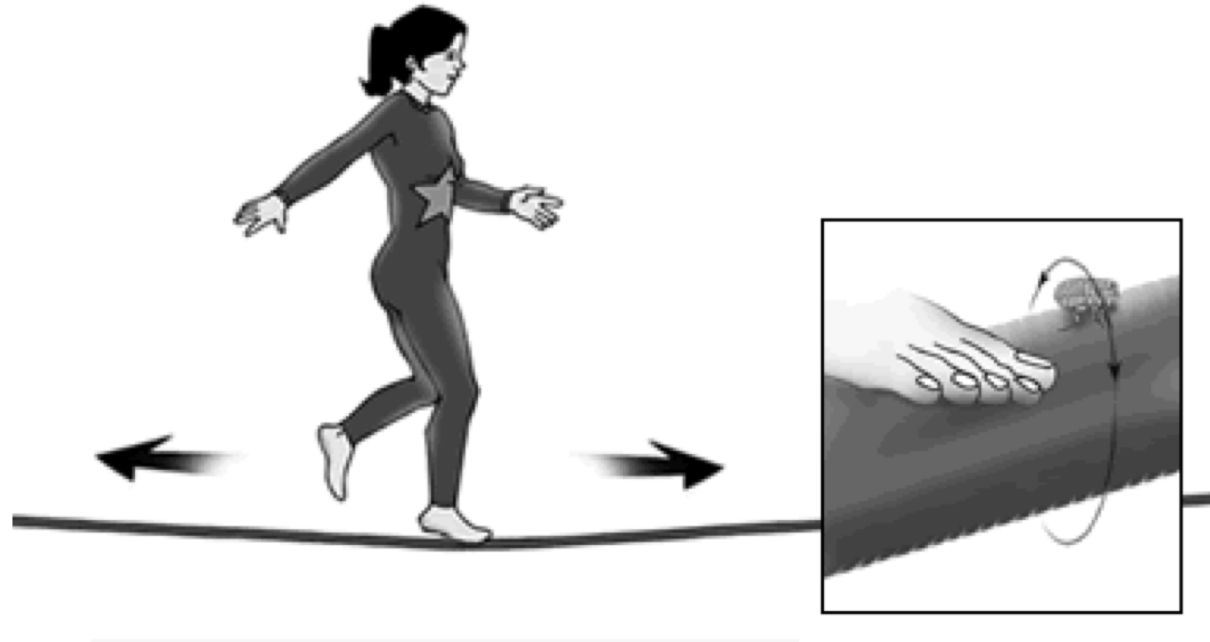
Vitesse de rotation des étoiles dans cette galaxie, en fonction de la distance de l'étoile par rapport au centre de la galaxie



il est fait de quoi, ce halo ?

Dimensions spatiales supplémentaires

(cette hypothèse pourrait expliquer le problème de la hiérarchie)



Classe de modèles proposé par Randall et Sundrum :

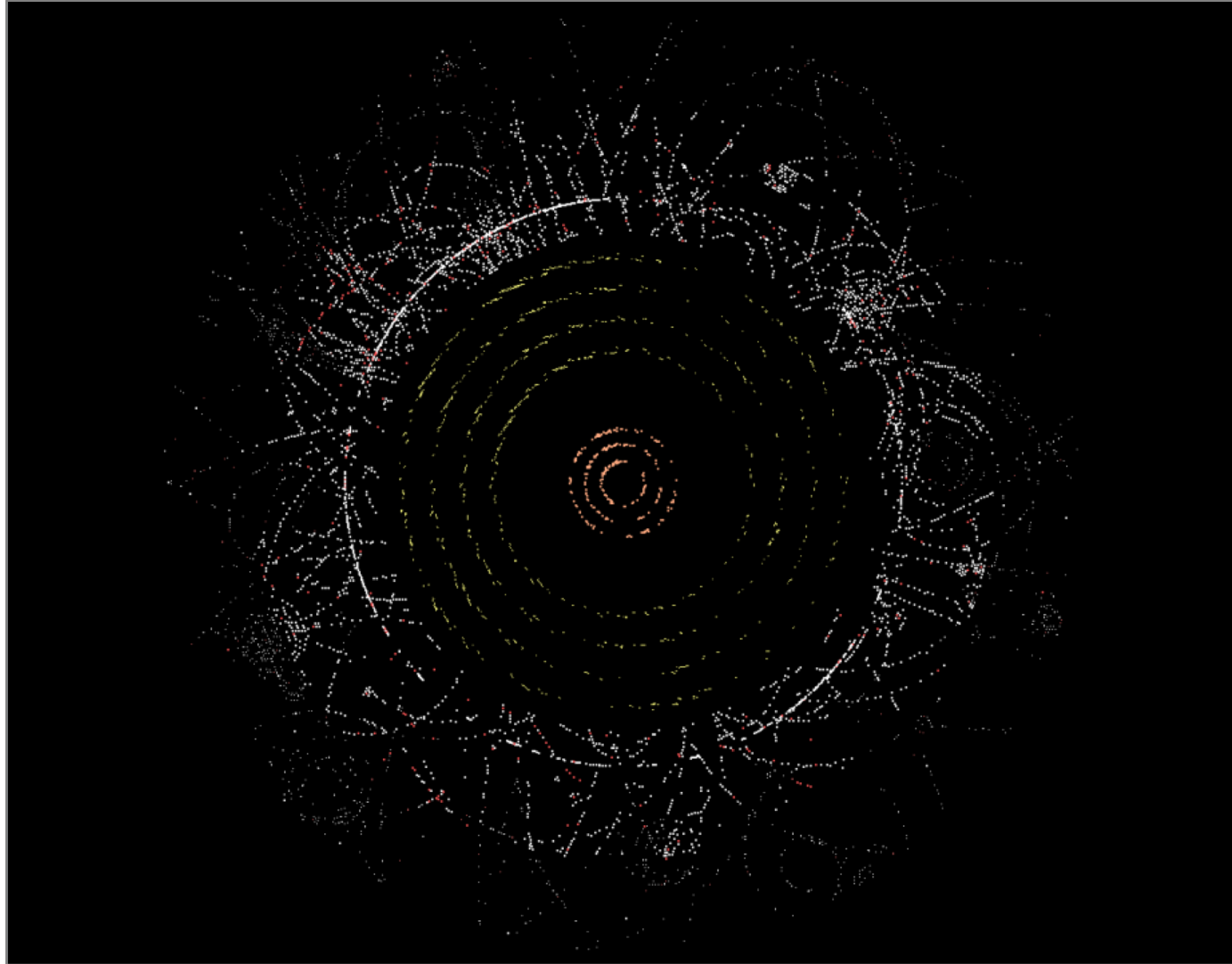
Postulat d'une quatrième dimension spatiale

Cette quatrième dimension serait très petite; nous ne nous en rendrions pas compte dans la vie quotidienne.

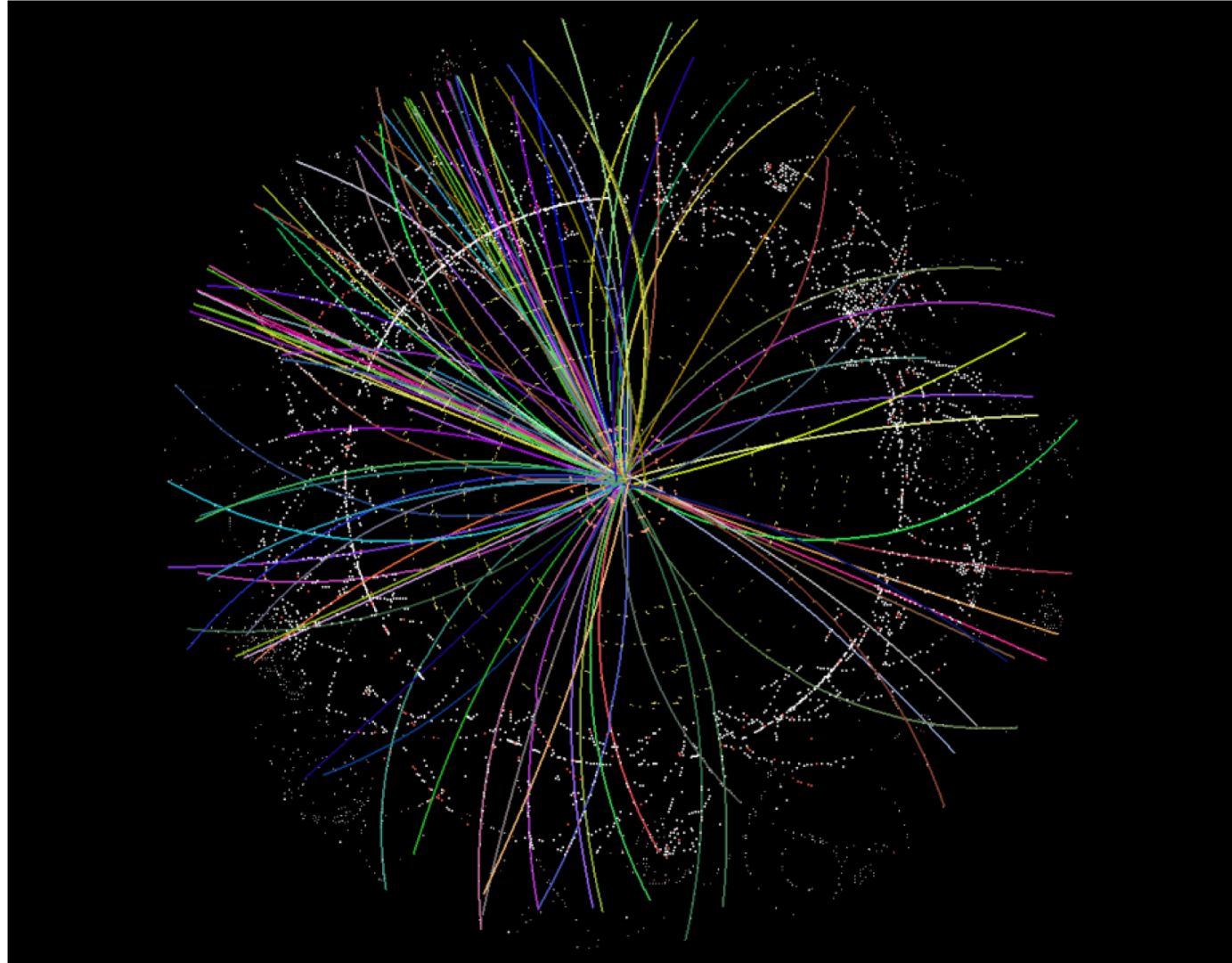
La gravitation serait **fondamentalement de la même intensité que les autres interactions.**

Mais elle nous **paraîtrait tellement faible parce qu'elle est diluée** dans la quatrième dimension spatiale.

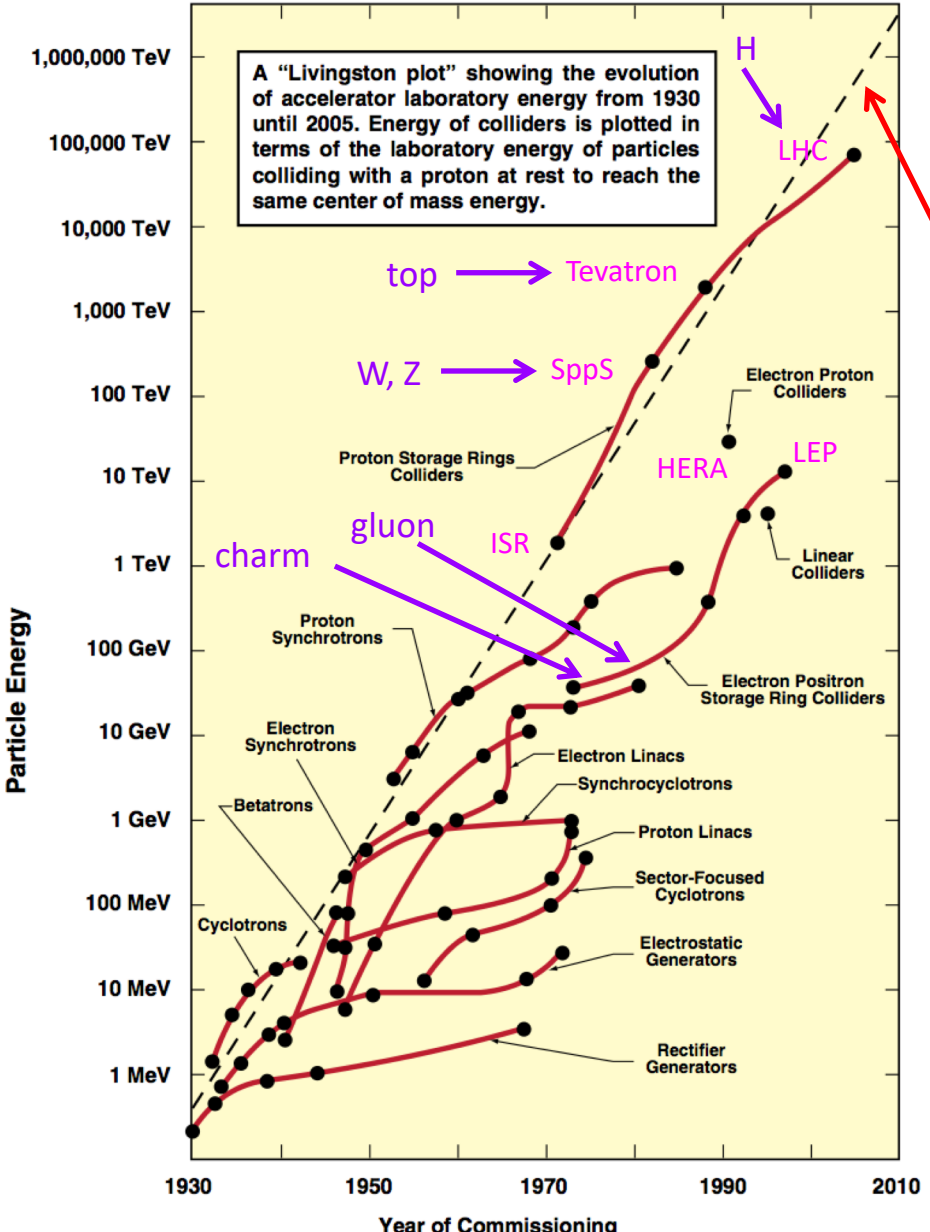
Reconstruction des traces dans le détecteur



Reconstruction des traces dans le détecteur



Le graphe de Livingston



Graphe fait pour la première fois par M. Stanley Livingston en 1954.

“Droite de Livingston” : loi de croissance exponentielle.

Pour comparaison : la “loi de Moore” (puissance de calcul des circuits intégrés) a été énoncée pour la première fois en 1965.

Découvertes récentes