

Au delà du Modèle Standard

Journées de Rencontre des Jeunes Chercheurs
4-10 Décembre 2011

Alexandre Zabi
Laboratoire Leprince Ringuet
Ecole Polytechnique

Les acteurs de la session:

Mr. Simon Akar, simon.akar@lpnhe.in2p3.fr LPNHE Paris

Ms. Nicolas Beaupere, beaupere@ipnl.in2p3.fr IPNL

Mr. Jonathan Da Silva, dasilva@lapp.in2p3.fr LAPP-Annecy

Mr. Gregory Espitalier, gregory.espitalier-noel@hotmail.fr CC-UM2

Mlle Daniela Paredes, paredes@clermont.in2p3.fr Clermont

Introduction

En tachant de répondre à la question «de quoi la matière est-elle faite?» cela nous a conduit vers la mise en place du Modèle Standard de la physique des particules.

Pourquoi le Modèle Standard est-il si populaire?

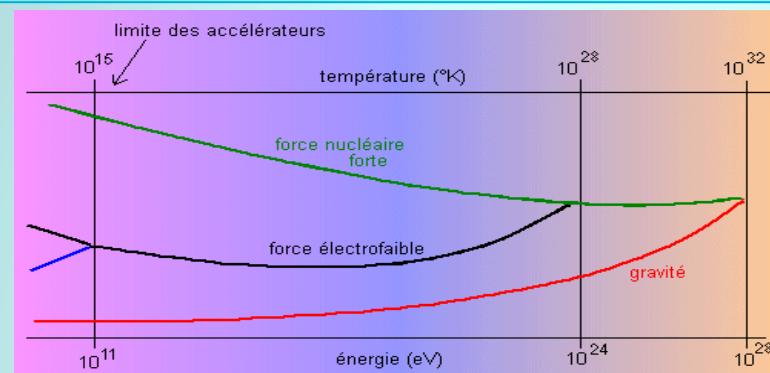
Son plus grand exploit n'est pas seulement de **décrire avec une extrême précision les interactions fondamentales** entre particules élémentaires mais surtout de démontrer que les forces suivantes:

- Électromagnétique
- Interaction Faible

sont la **manifestation de la même force à plus faible énergie!**

C'est la force électrofaible, un premier pas vers l'unification..

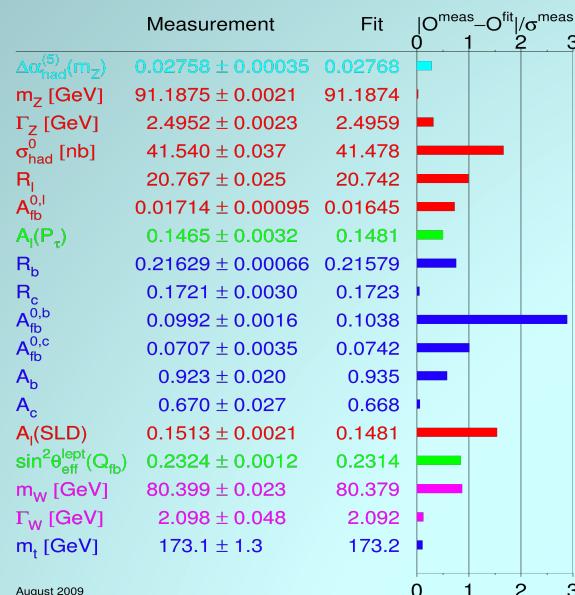
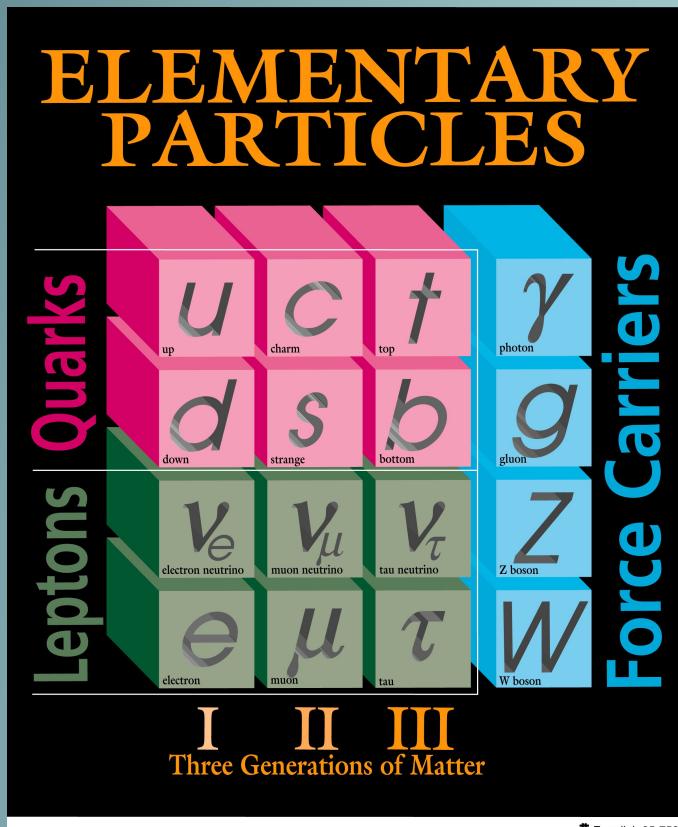
L'interaction forte y est aussi décrite mais...
pas la gravité



Une théorie des interactions

Les interactions sont parfaitement décrites par le principe d'invariance de Jauge auquel est associé une symétrie (nombre quantique etc.)

Une modèle qui marche plutôt bien puisque ses paramètres ont été testés avec précisions depuis plus de 40 ans!



Comprend t-on l'origine de la masse?
Celles-ci sont uniquement des
paramètres supplémentaires!

L'interaction au cœur du débat

De quelle masse parle t'on? De la masse des particules élémentaires bien sur. La masse du proton par exemple vient essentiellement de l'énergie de liaison des quarks qui les composent.

Par exemple, la force électrofaible décrite par l'invariance de jauge $SU(2) \times U(1)$ opère par le biais des bosons Z et W, comment introduire leur masse dans la théorie?

On pourrait par exemple introduire à la main des termes de masse: $M\phi\phi$ dans le lagrangien mais ceci engendre les problèmes suivants:

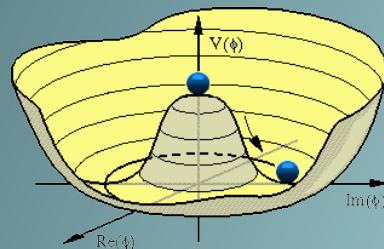
- Non respect de l'invariance de Jauge
- La théorie n'est pas renormalisable

M doit donc être nulle or on sait que M_Z et $M_W \neq 0$!!

L'interaction au cœur du débat

C'est là où l'introduction d'un champs scalaire semble être tout à fait adéquate: le champs de Higgs

Si ce champs (potentiel) est choisi correctement, alors la symétrie de jauge est brisée spontanément, c'est à dire pas au niveau du lagrangien conservant donc l'invariance de jauge et ma théorie est renormalisable.



$$\mathcal{L}_\phi = |D_\mu \phi|^2$$

$$\mathcal{L}_V = -V(\phi) \quad \text{avec} \quad V(\phi) = \frac{\mu^2}{2} \phi^\dagger \phi + \frac{\lambda}{4} (\phi^\dagger \phi)^2$$

Bosons Vecteurs: Z,W

$$W_\mu^\pm = \sqrt{\frac{1}{2}}(W_\mu^1 \mp iW_\mu^2) \quad \mathbf{M}_W = \frac{gv}{2}$$

$$Z_\mu = \frac{gW_\mu^3 - g'B\mu}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \quad m_Z = \frac{v}{2}\sqrt{g^2 + g'^2}$$

$$A_\mu = \frac{g'W_\mu^3 + gB_\mu}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \quad m_A = 0$$

Fermions: e, q etc..

$$\mathcal{L} = \frac{G_e}{\sqrt{2}}(\bar{e}_L(v+h)e_R + \bar{e}_R(v+h)e_L)$$

Physique des particules moderne: La nature même de la **masse** des particules est issue des **interactions** avec ce champs de Higgs.

La découverte du champs de Higgs validerait ce mode de pensé (en bonne voie avec les découvertes du Z et W en 1983)

Le Modèle Standard sans le Higgs

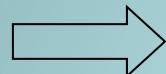
Sans le champs de Higgs

Théorique: Modèle Standard → petit problème de probabilité divergente

Observations: Les électrons et quarks n'ont pas de masse.. Toutes les particules se propagent à la vitesse de la lumière: atome? Chimie?

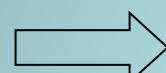
$$A(W_L^+W_L^- \rightarrow Z_LZ_L) = \frac{G_F E^2}{8\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{E^2}{E^2 - m_H^2} \right)$$

Sans le Higgs



$E < 1.2 \text{ TeV}$

Avec le Higgs



$M_H < 780 \text{ GeV}/c^2$

Pour éviter une violation de l'unitarité $P > 1$

Finalement, on sait que la brisure spontanée de la symétrie EW est nécessaire; le champs de Higgs est une bonne option (inspirée d'autres phénomènes physiques) mais ses caractéristiques restent un mystère?
De toute façon le LHC pourra sonder ce domaine d'énergie

Le Higgs et la nouvelle physique

Si le champs de Higgs existe alors

Boson de Higgs: matérialisation du champs de Higgs en particule massive

Couplage: Couplage du champs de Higgs avec lui même → contraintes

Quelles sont les conséquences pour la nouvelle physique?

$114 \text{ GeV} < m_H < 130 \text{ GeV}$:

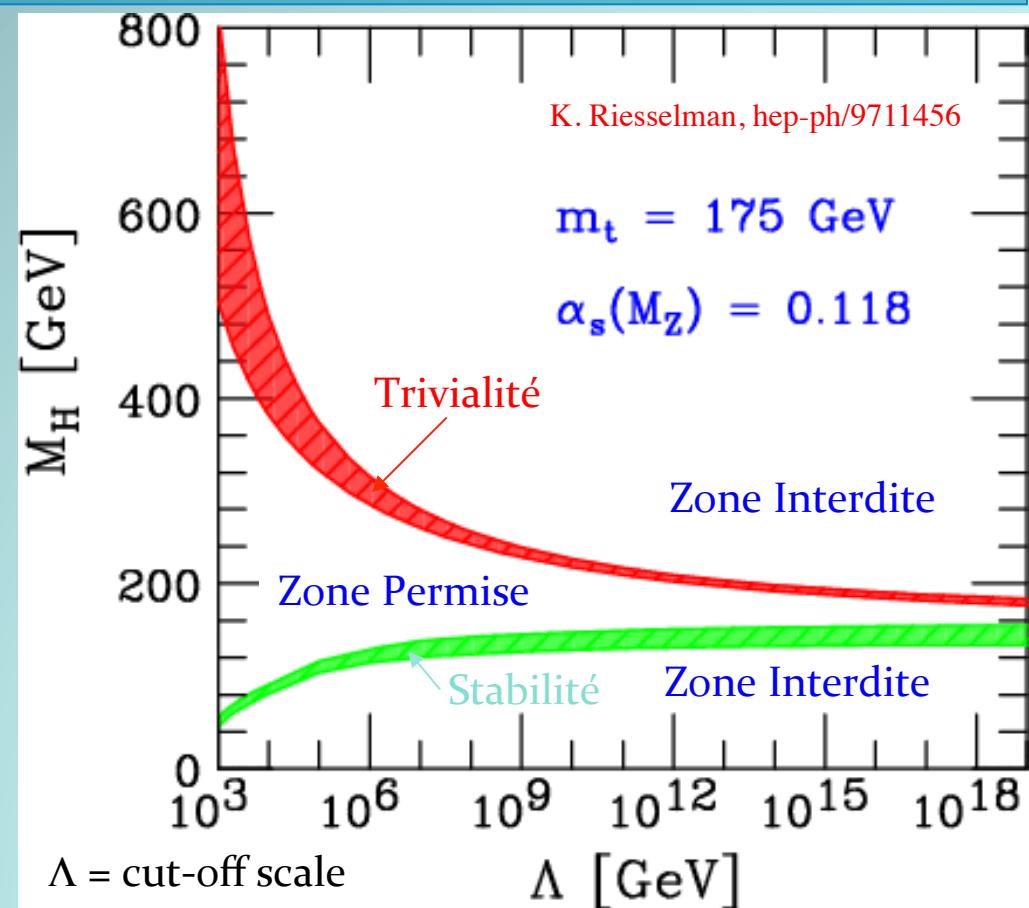
$V(H)$ instable for $\Lambda < 10^7 \text{ GeV}$

$130 \text{ GeV} < m_H < 180 \text{ GeV}$:

Extrapolation valide jusqu'à M_{GUT}

$m_H > 200 \text{ GeV}$:

conflit avec les données EW



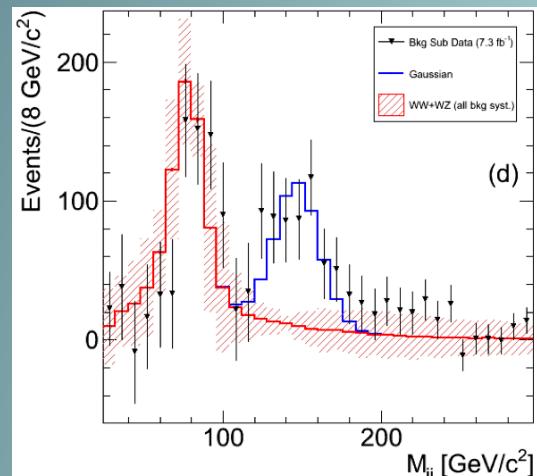
Le Higgs et la nouvelle physique

Contraintes actuelles sur la masse du boson de Higgs

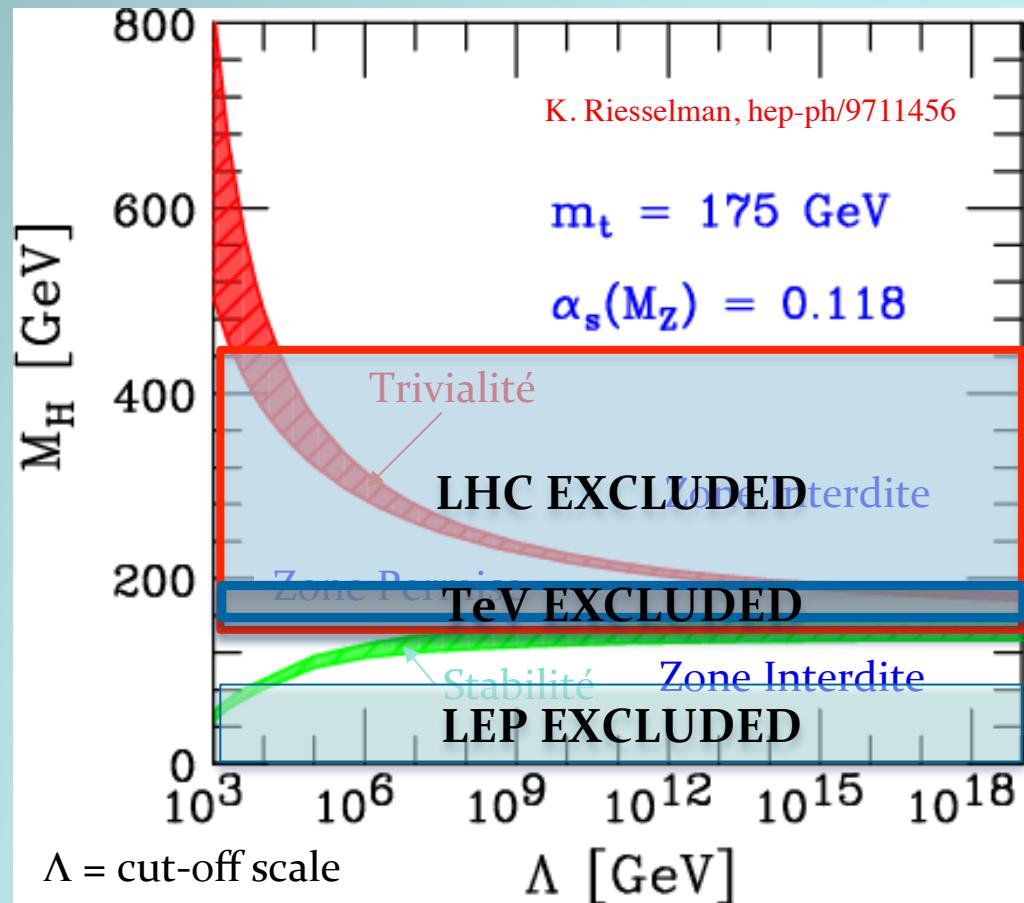
Contraintes théoriques et expérimentales (recherche directe et indirecte)

Les résultats semblent indiquer l'hypothèse d'un Boson de Higgs léger

Si $M_H \sim 140 \text{ GeV}/c^2$ (CDF bump)



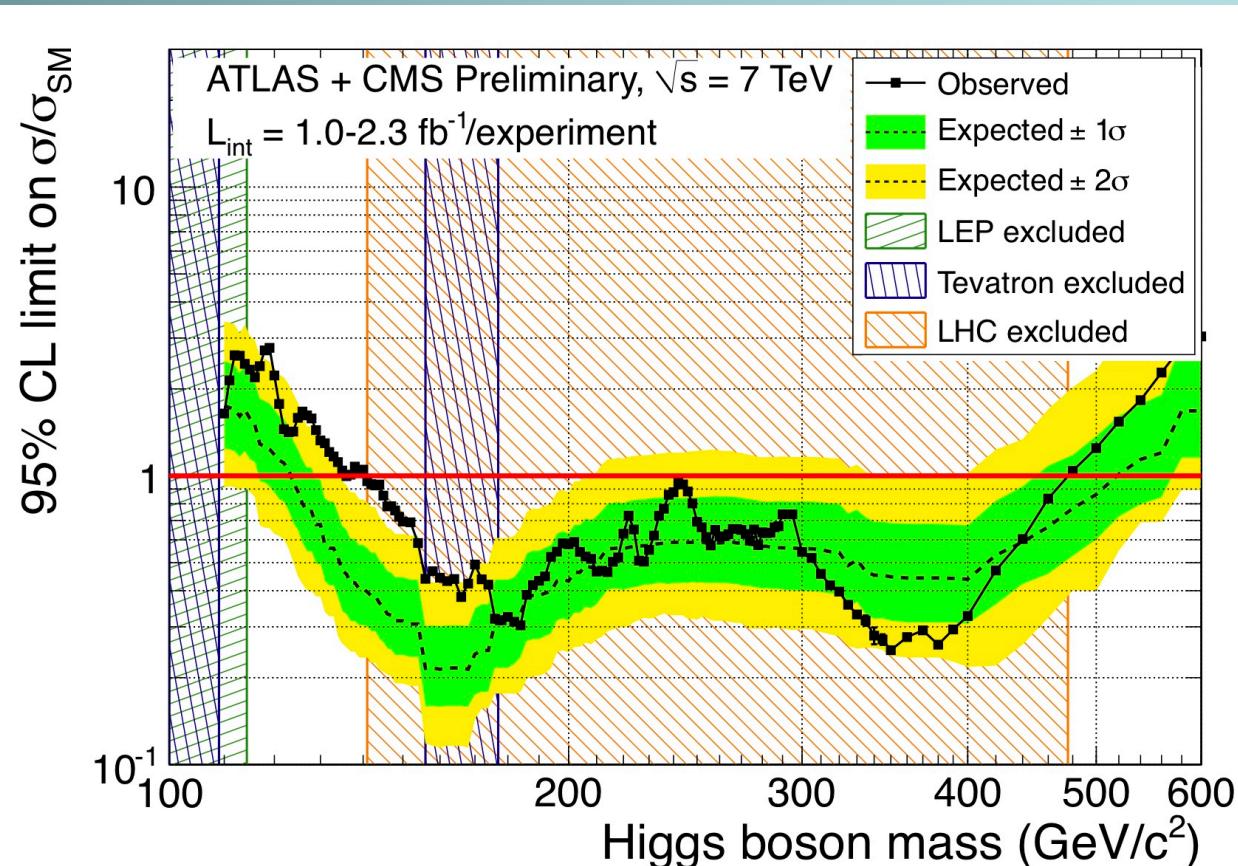
SM valide jusqu'à des échelles au-delà des limites du LHC



Le Higgs et la nouvelle physique

Contraintes actuelles sur la masse du boson de Higgs

Recherche du boson de Higgs au LHC

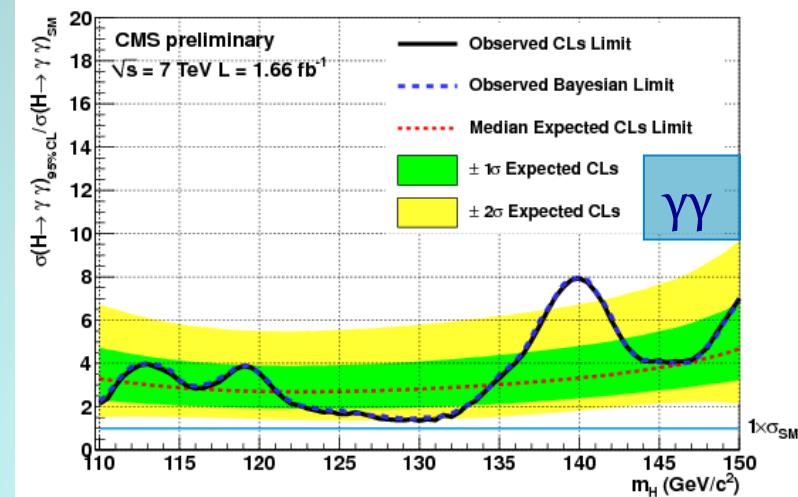
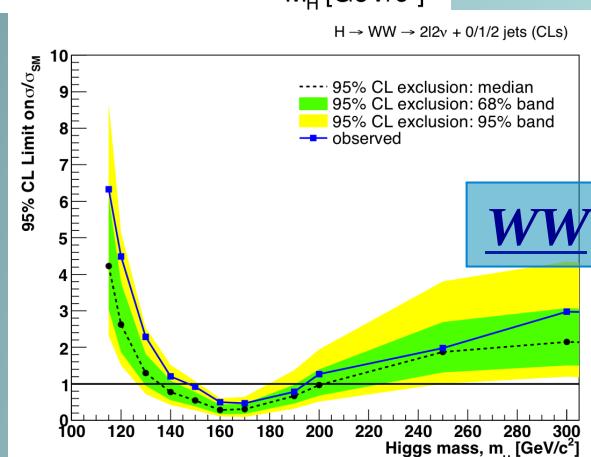
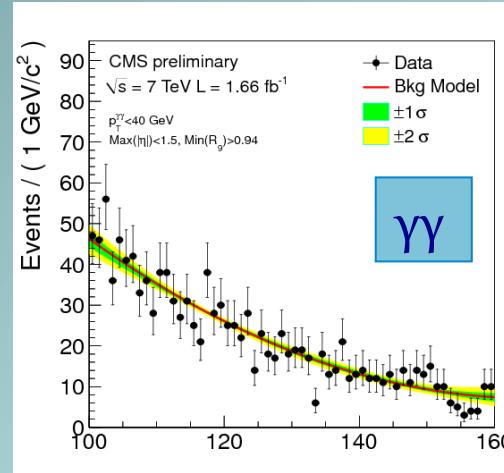
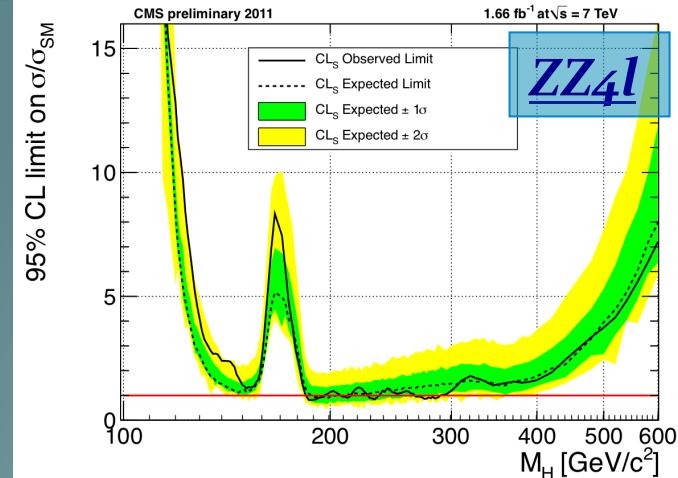


$M_H < 140 \text{ GeV}$ (or $M_H > 443 \text{ GeV}$) : la nouvelle physique @ TeV scale

Note: excès à basse masse! Ne pas rater le meeting du CERN 13 Dec

Le Higgs et la nouvelle physique

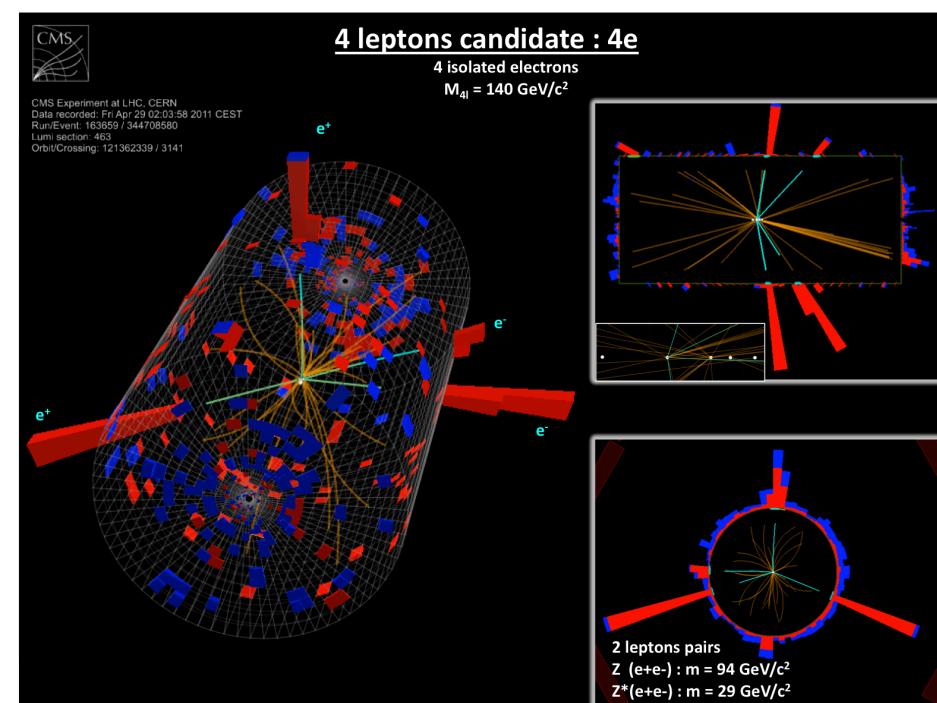
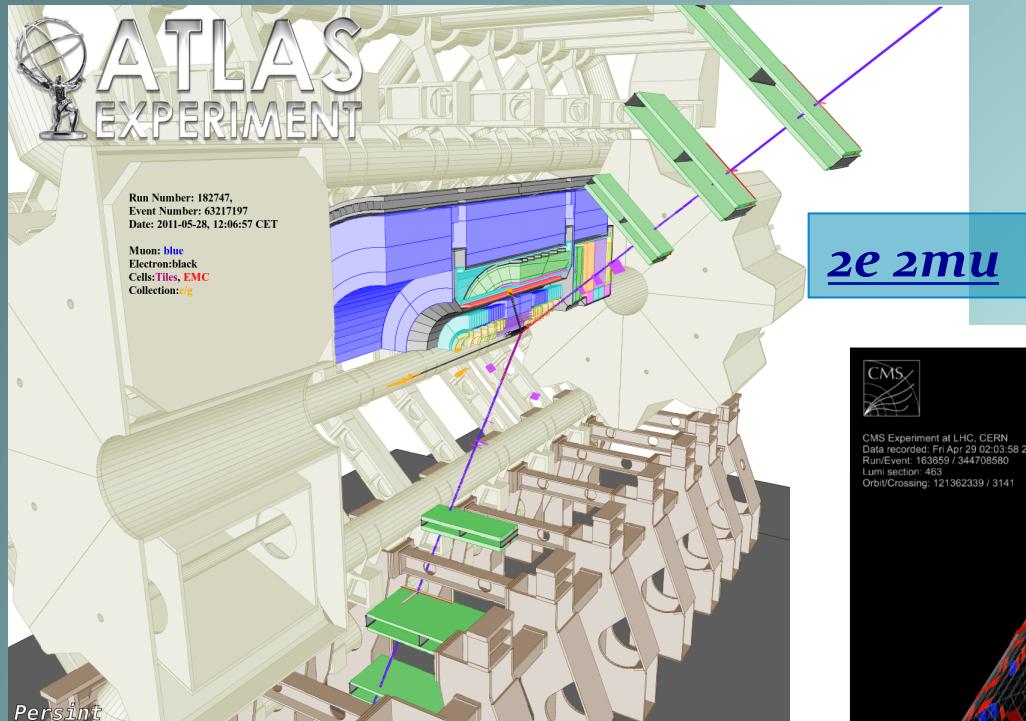
Les canaux en détails:



Exces vient essentiellement de WW avec des modulations venant de gamma gamma, un petit peu de ZZ.

Le Higgs et la nouvelle physique

Candidats magnifiques!



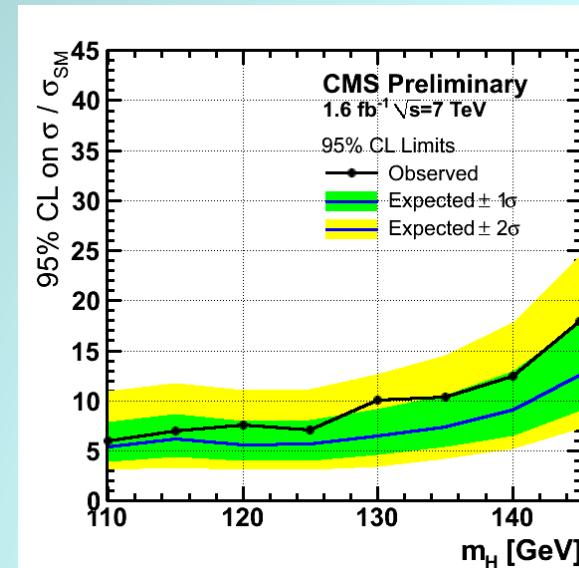
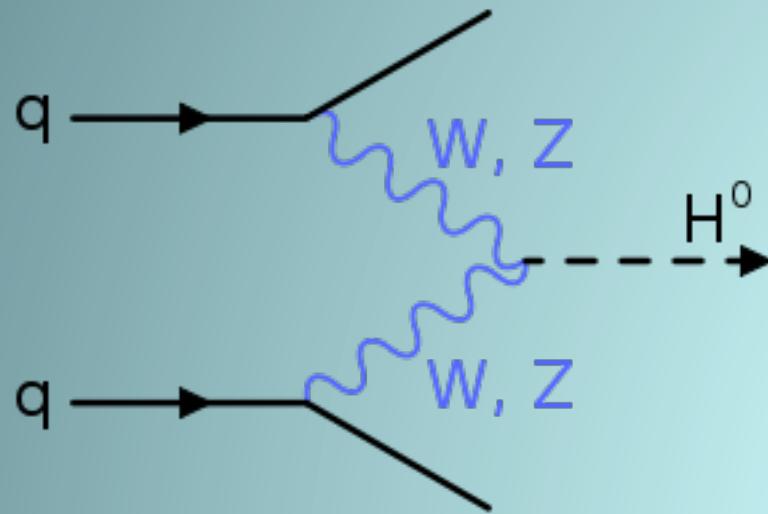
Le Higgs et la nouvelle physique

La découverte du Higgs?

Même si on a un bump (découverte à 5), faut-il encore prouver qu'il s'agisse du Higgs du Modèle Standard

Il faudrait mettre en évidence les couplages du Higgs avec les bosons vecteurs EW: WWH ZZH

Etude du canal de production par fusion de bosons vecteurs : VBF

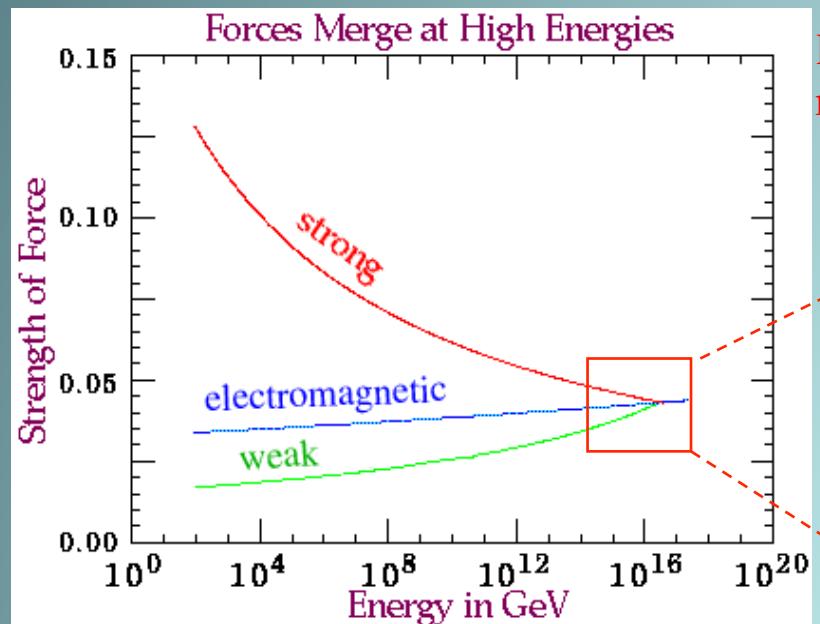


Pas avant 2012

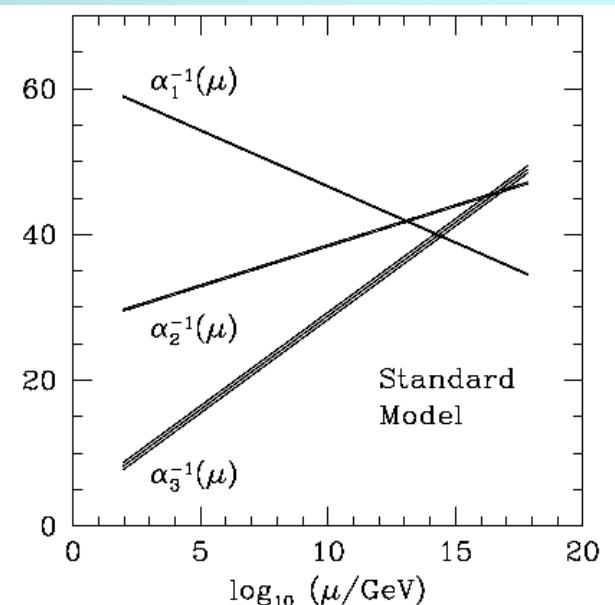
Vers une physique au delà du MS

Si le Higgs est léger alors il faut une nouvelle physique qui permette de stabiliser le mécanisme de brisure de symétrie électrofaible...

De plus, est ce que le Modèle Standard serait capable d'unifier les forces si on extrapolait à plus haute énergie?



Les couplages évoluent $\uparrow E$ (\downarrow distance) et se rencontrent à très grande échelle ... du moins presque !



Le Modèle Standard porte les germes d'une unification des interactions fondamentales !(requiert le concept du Higgs)

Pas vraiment.. Peut être que la nature des interactions est plus compliquée?

Vers une physique au delà du MS

Est ce que le Modèle Standard ne serait finalement valable que dans un domaine d'énergie donné (Théorie effective?)

→ Corrections radiative à la masse du Higgs

$$m^2(p^2) = m_0^2 + \frac{J=1}{p \phi} + \text{loop}^{J=1/2} + \text{loop}^{J=0}$$

$$m^2 = m_0^2 + \alpha \lambda \frac{\Lambda^2}{16\pi^2}$$

Si on prend $\Lambda \sim M_{GUT}$ alors ca devient dramatique

Ajustements fins (Fine Tuning) importants pour garder la masse du Higgs ~ 100 GeV → ce n'est pas naturel!

On évite ces ajustements si $\Lambda < 1$ TeV → nouvelle physique @ TeV

Autres indications que les interactions des particules sont peut être plus complexes et que le champs de Higgs lui même est plus complexe?

Vers une physique au delà du MS

- Qu'est ce que qui régit la masse du Higgs? Le MS ne prédit pas la masse du Higgs (Le boson de Higgs n'explique en aucun cas sa propre masse)
- Ok, si la masse des particules s'explique à travers «l'intensité » (couplage) au champs de Higgs, elle est choisie arbitrairement pour coller aux observations
- Hiérarchie/naturalité
- Elle est ou la gravité? Etc..

Le MS est l'une des théories les plus précises de la physique moderne mais on lui demande de tout expliquer. Elle est donc incomplète: les interactions fondamentales doivent être plus compliquées que ça. La compréhension des effets faibles de la physique @ GUT à notre échelle est la clé.

Quels sont les ingrédients auxquels nous pouvons penser:

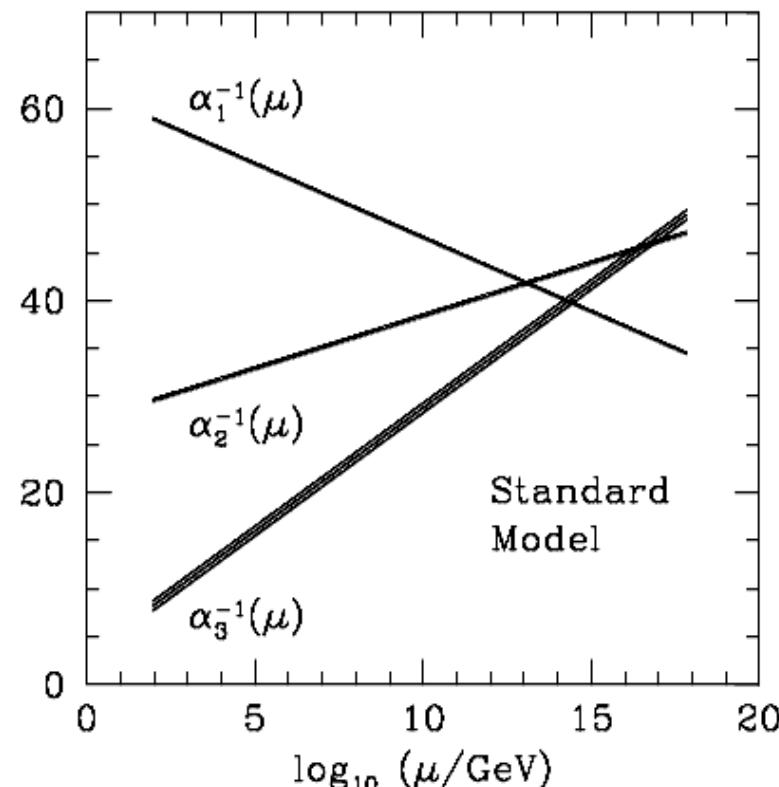
- interaction qui transforme boson \longleftrightarrow fermion? matière et interaction
- interaction qui transforme quark \longleftrightarrow lepton
- Champs de Higgs plus complexe: 2 doublets de champs
- Dimensions supplémentaires
- compositness.
- La brisure de symétrie EW s'opère à l'échelle du TeV etc..

Supersymétrie

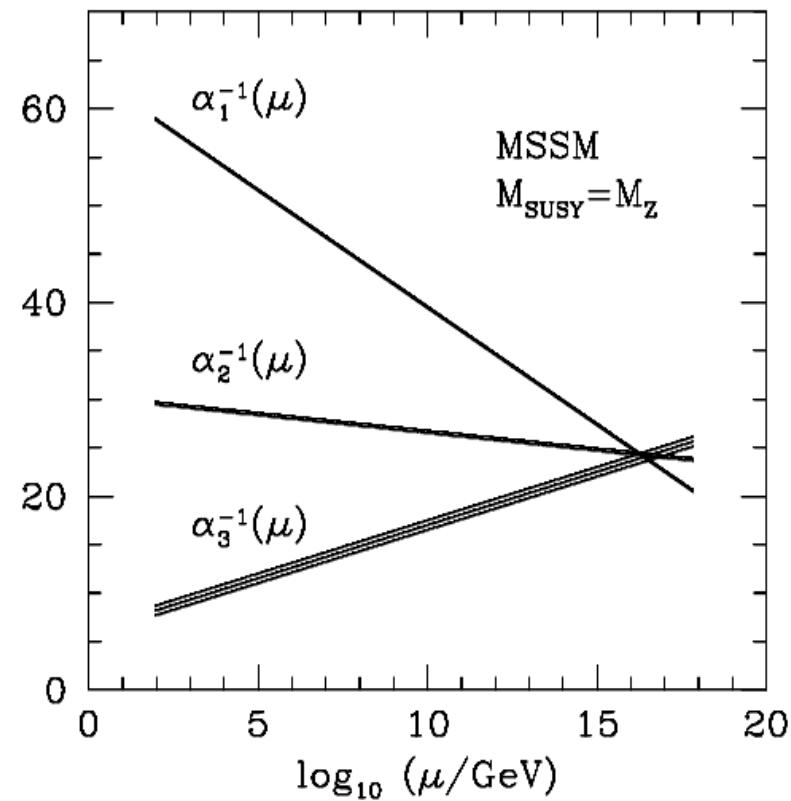
Une symétrie fondamentale de plus: boson – fermion mais pourquoi?

→ permet de réaliser une grande unification !

Coïncidence des constantes de couplage @ GUT



Modèle Standard



Supersymétrie

Supersymétrie

Une symétrie fondamentale de plus: boson – fermion mais pourquoi?

→ Divergences quadratiques sont neutralisées; les contributions des fermions annulent les contributions des bosons: une solution naturelle!

Attention: possible que par un choix judicieux du secteur du Higgs

→ La version minimale du modèle (MSSM) inclue un **Higgs SM-like:** h

→ La masse du Higgs n'a **plus besoin d'ajustement fin** aussi important %

→ Un candidat pour **la matière noire:** LSP (lightest supersymmetric particle) (certaines conditions de conservation des nombres quantiques)

Quelques complications:

- SUSY a besoin d'un Higgs léger $h < 135 \text{ GeV}$ (après corrections radiatives)
Non plus observé jusqu'à présent

- Aucun superpartner n'a été trouvé, ils sont très différents des particules usuelles (\neq masse $O(\text{TeV})$) → La SUSY est elle même brisée mais comment?
Gravite (mSUGRA); GMSB etc.

- Plus sérieuse: Conservation des nombres Baryonique/Leptonique en difficulté → conservation de la R-parité $R_p = (-1)^{2S} (-1)^{3B+L}$
LSP stable et sparticules sont produites par paires

Supersymétrie

Une symétrie fondamentale de plus: boson – fermion mais pourquoi?

→ Divergences quadratiques sont neutralisées · les contributions des

Grégory: Phénoménologie des NMSSMs et Fine Tuning

particle) (certaines conditions de conservation des nombres quantiques)

Quelques complications:

- SUSY a besoin d'un Higgs léger $h < 135$ GeV (après corrections radiatives)

Jonathan: la supersymétrie et la matière noire

difficulté → conservation de la R-parité $R_p = (-1)^{\tilde{q}} (-1)^{\tilde{l} + \tilde{e}}$

LSP stable et sparticules sont produites par paires

Unification et Symétrie étendue

Unification: pourquoi pas SU₅? Approche la plus simple finalement
Les particules sont groupées naturellement dans le même multiplet

$$\begin{pmatrix} d_R^c \\ d_Y^c \\ d_B^c \\ -e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}_L \quad (1.12) \quad \begin{pmatrix} g_{1,...,8} & \overline{X} & \overline{Y} \\ X & X & X \\ Y & Y & Y \end{pmatrix} \quad W_{1,2,3}$$

SU(5) englobe SU(3)xSU(2)xU(1)

Brisure de SU(5) masse aux bosons X /Y Leptoquarks
Ce modèle minimal problème de désintégration du proton (contraintes)

Symétrie: Le SM possède une symétrie chirale (nombres quantiques différents pour les chiralités droite et gauche des fermions)
On pourrait alors introduire un champs de Higgs plus complique: 2 triplets gauche et droite qui conserve la parité au niveau du lagrangien
 $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$
Nouveaux Higgs, bosons et Neutrinos (type Majorana massif neutrino droit).. Mécanisme de see-saw

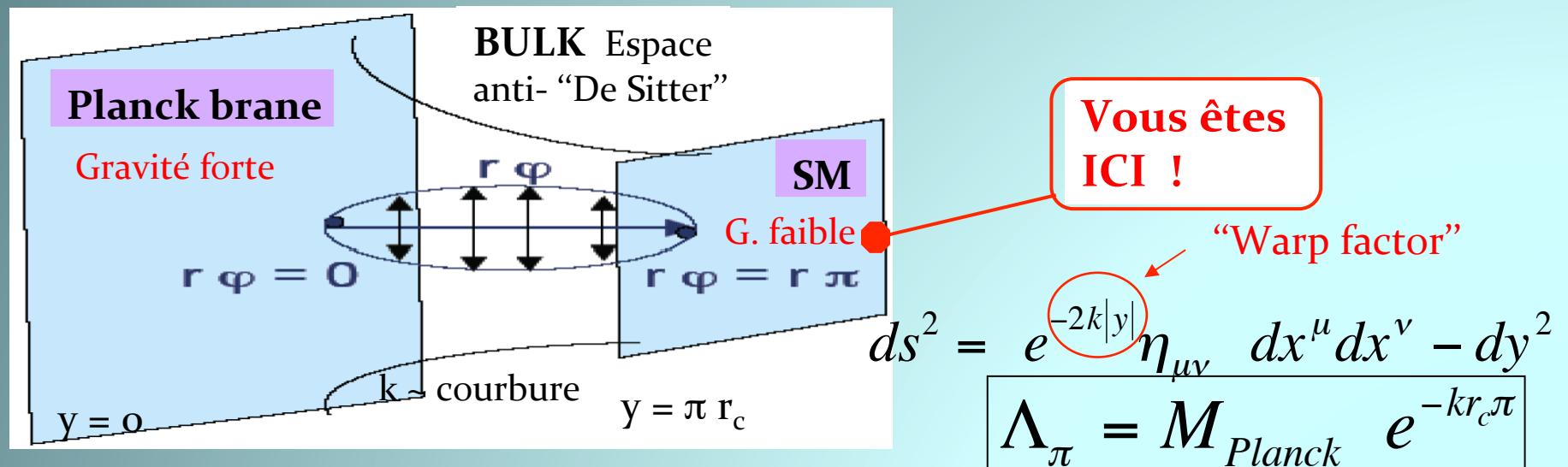
Dimensions supplémentaires

La seule option si on souhaite avoir un modèle d'unifications des interactions viables incluant la gravité quantique

M-theory (supercorde) à 11 dimensions

Idée: nouvelle physique complètement nouvelle à l'ordre du TeV

Le cut off du MS ~ TeV et plus de problème de hiérarchie



2 espaces (“branes”) de Minkowski à 4 dimensions bornant un “bulk” à 5 dimensions

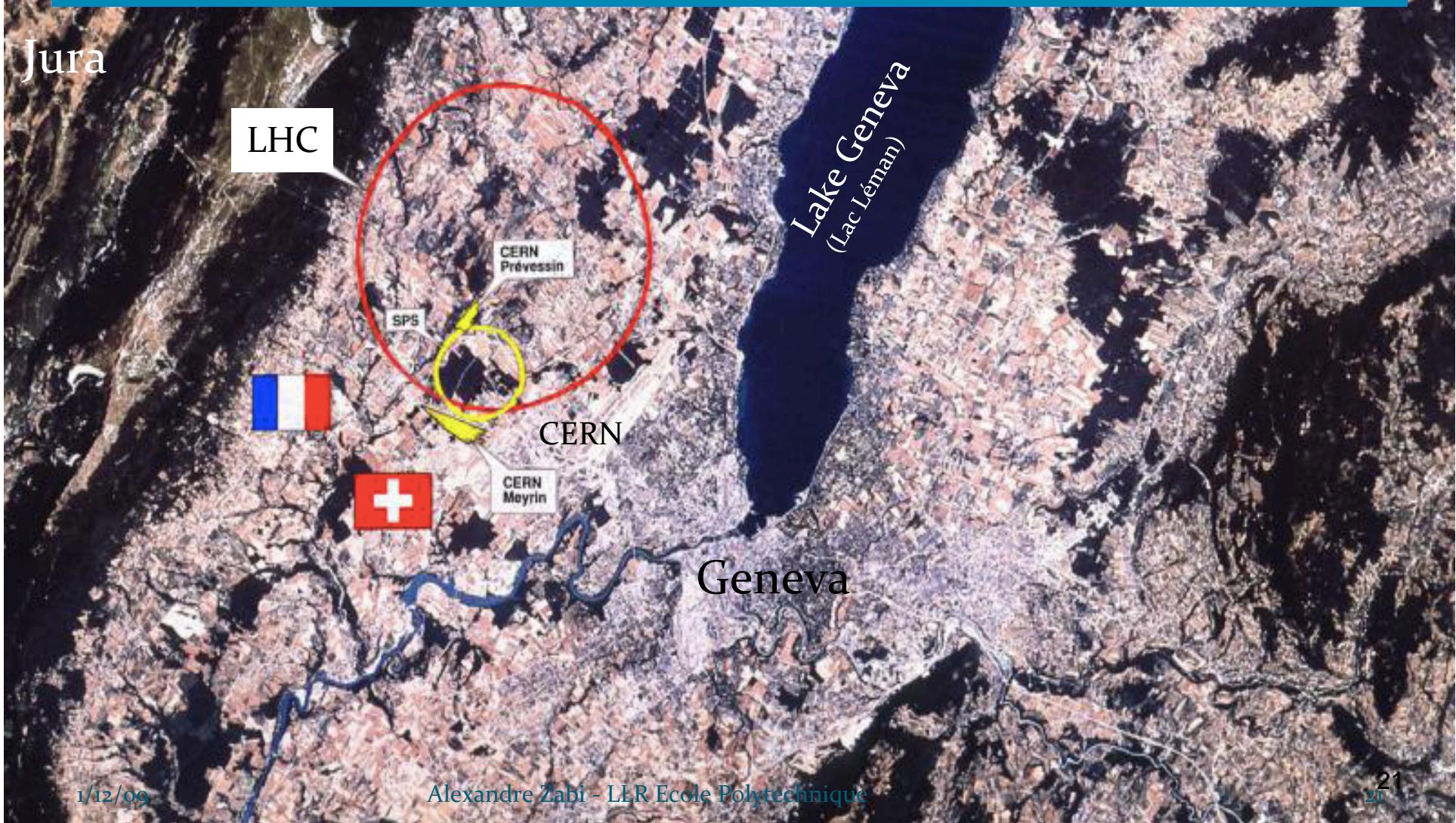
Échelle de Gravité: Λ et r_c = rayon de compactification

La hiérarchie entre les échelles EW et de Planck est éliminé par le facteur de “warp” si

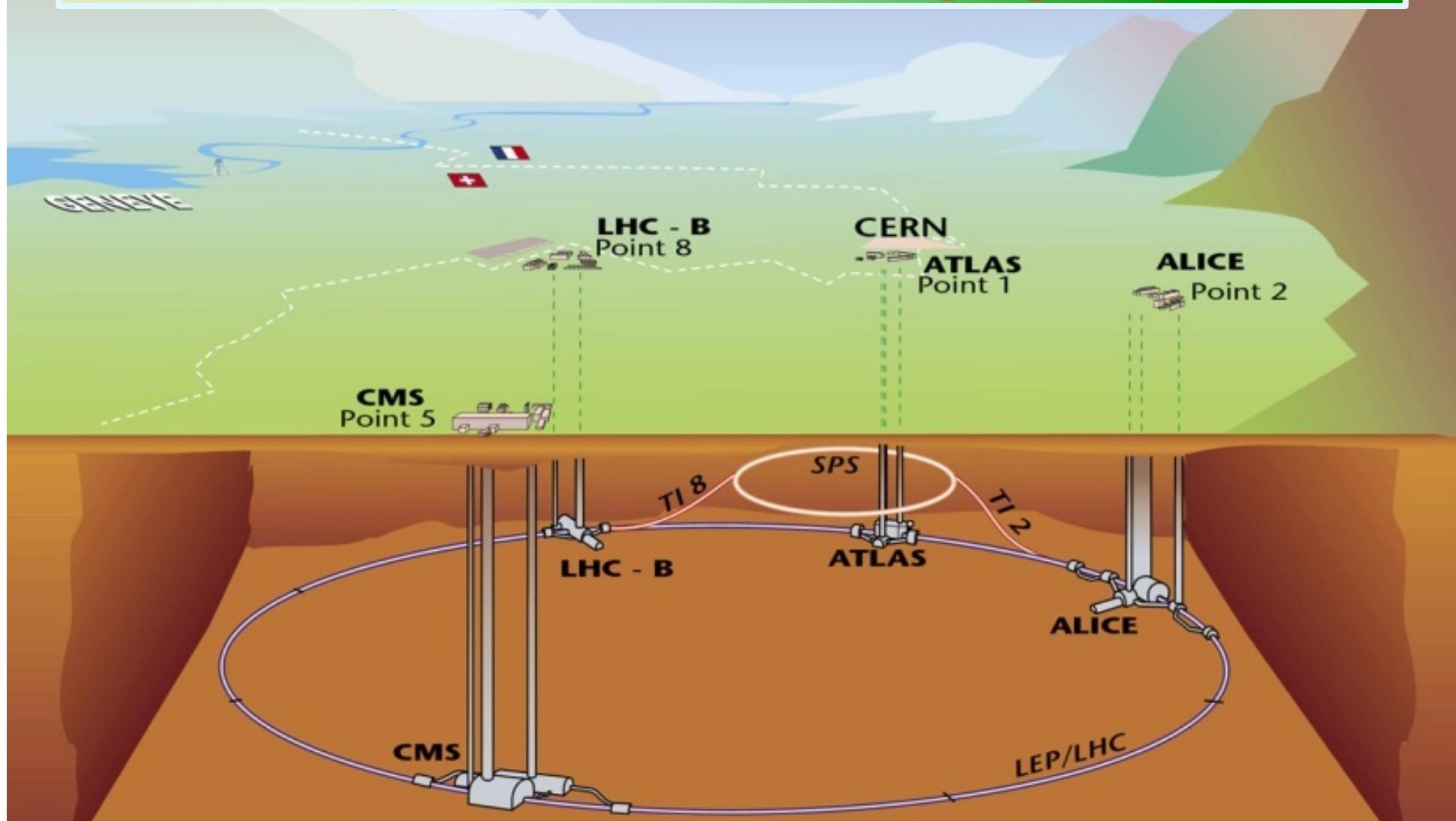
$$kr_c \sim 12 \rightarrow r_c \sim 10^{-32} \text{ m} \rightarrow \text{pas de déviations de la loi de Newton}$$

Chercher la nouvelle physique

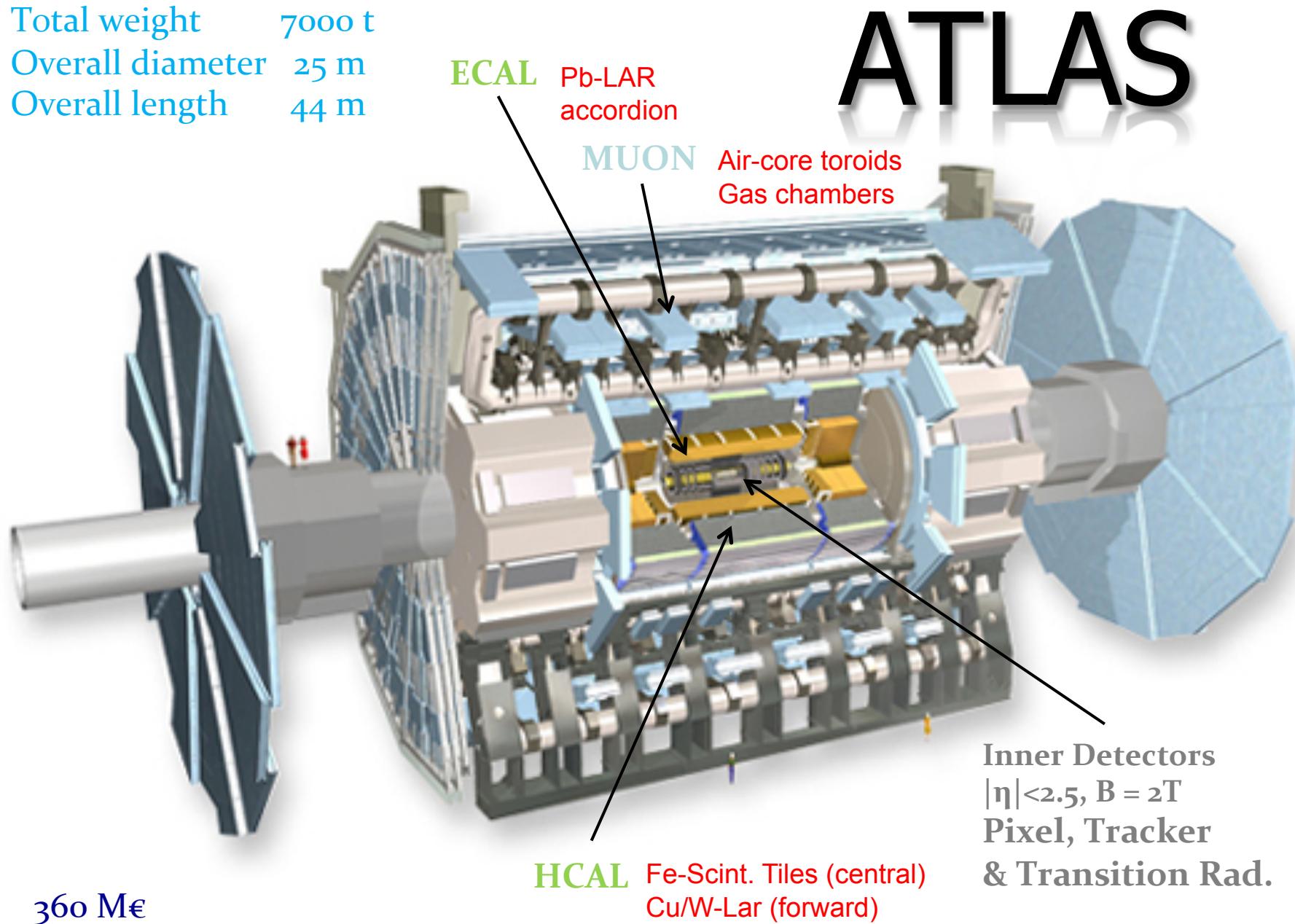
Scanner la physique à l'ordre du TeV, ca demande un accélérateur puissant et des détecteurs d'une précisions inouïes



Chercher la nouvelle physique



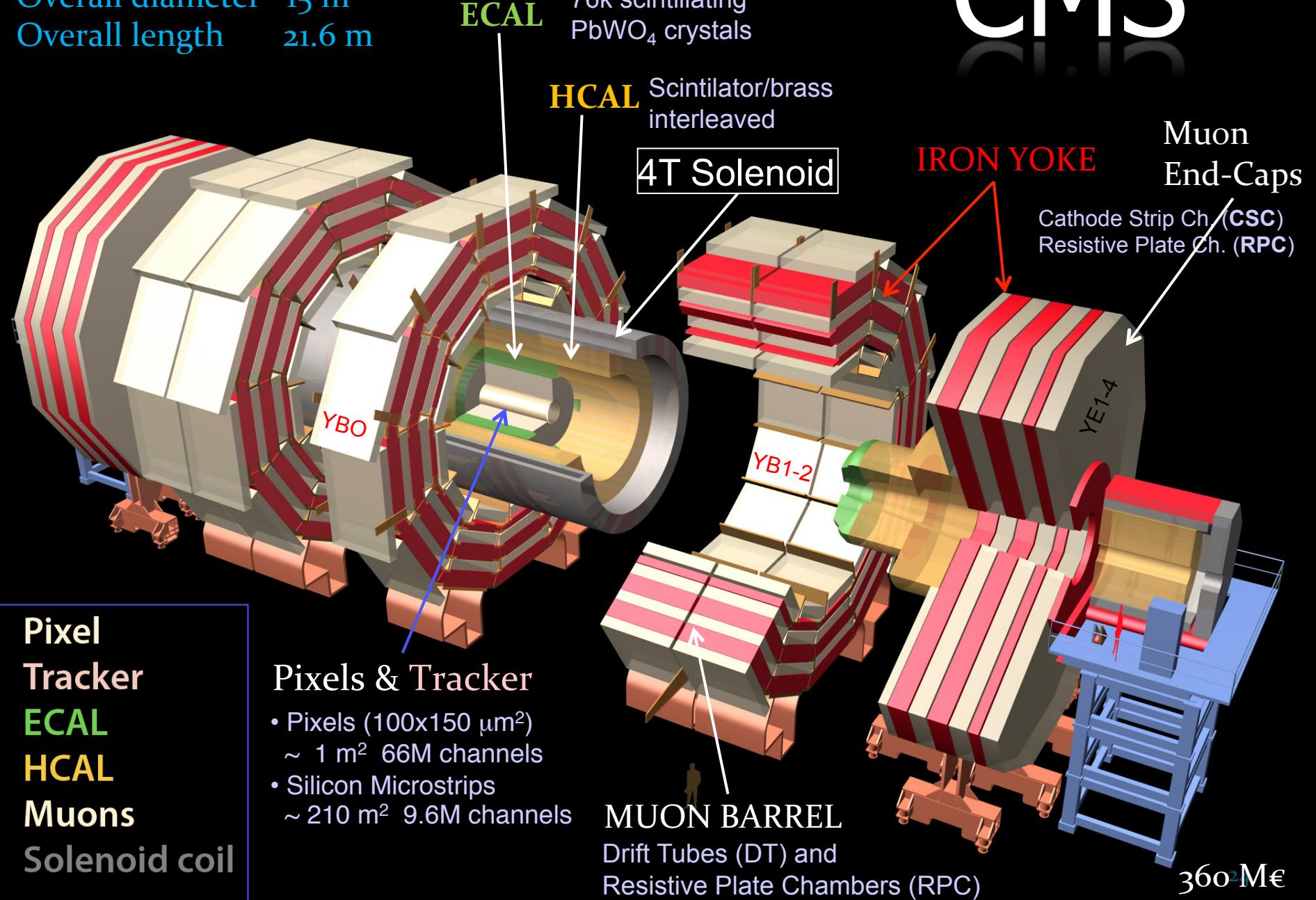
Total weight 7000 t
Overall diameter 25 m
Overall length 44 m



ATLAS: $7.7 \times$ CMS in volume / $0.56 \times$ CMS in weight

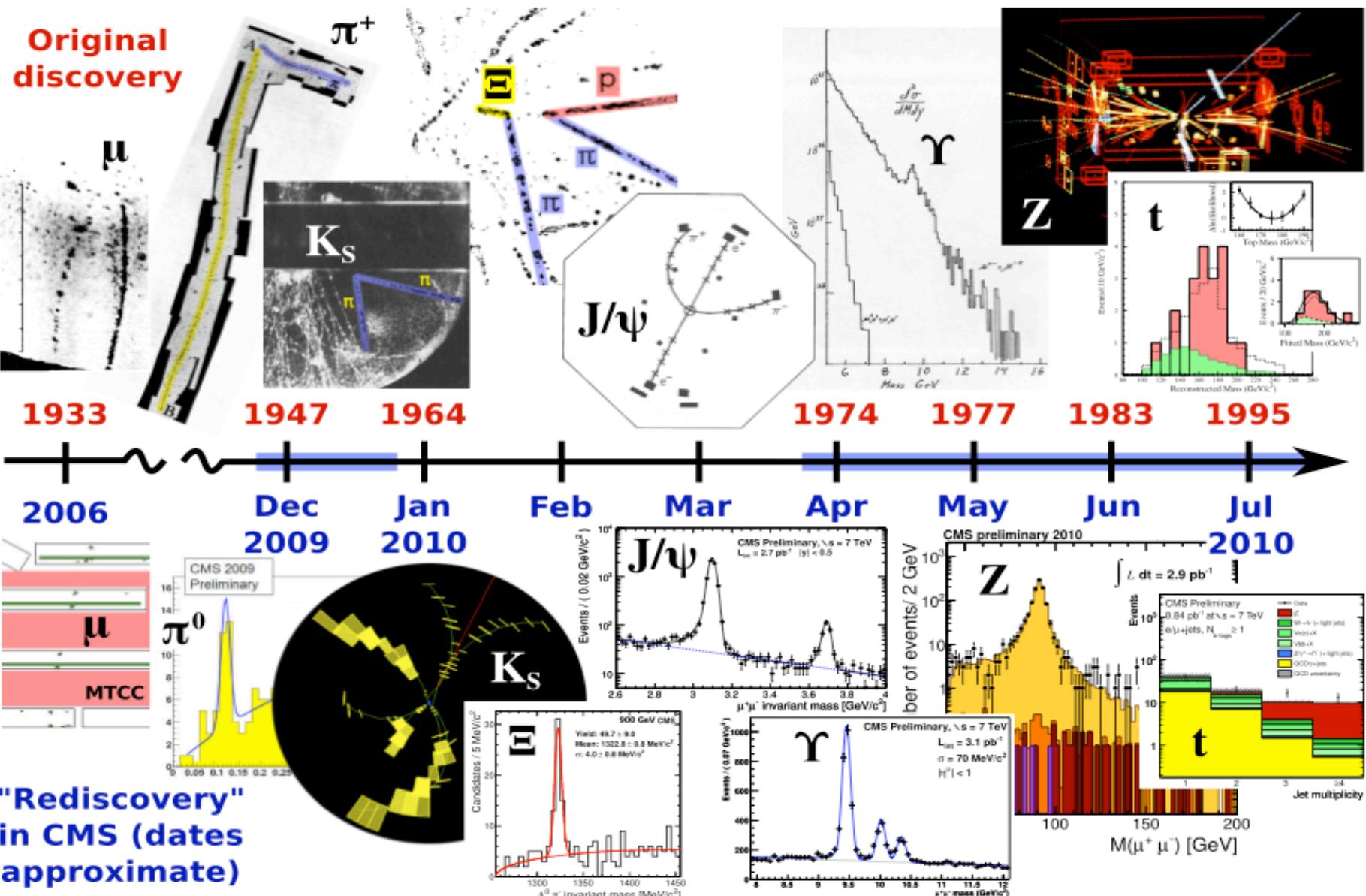
CMS

Total weight 12500 t
Overall diameter 15 m
Overall length 21.6 m

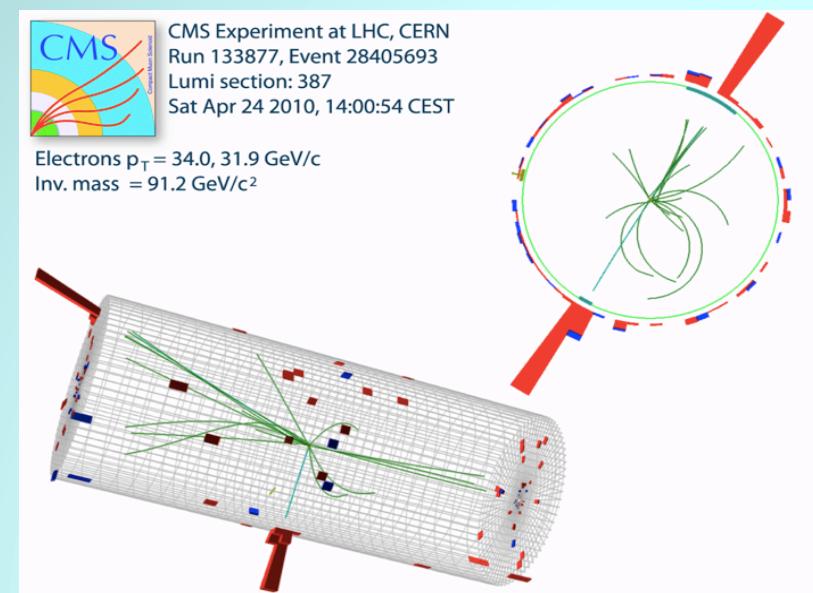
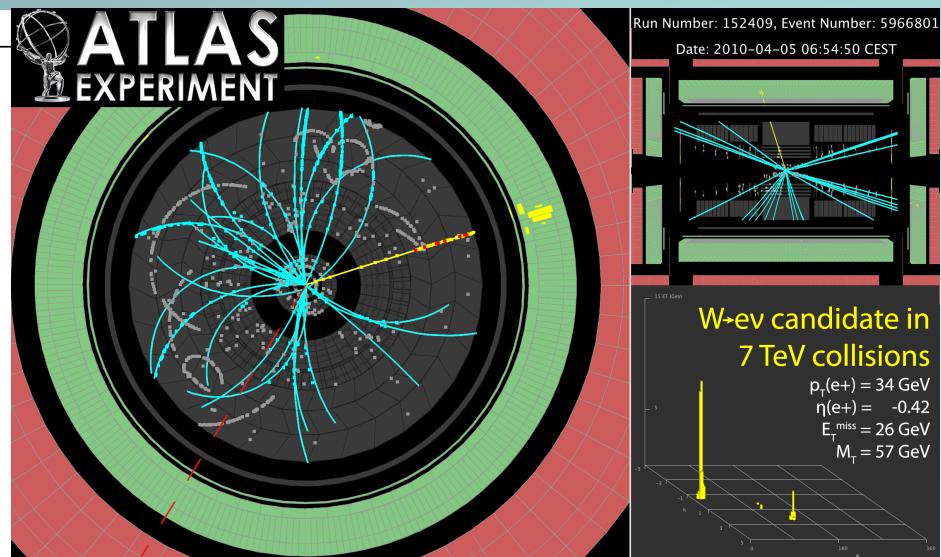
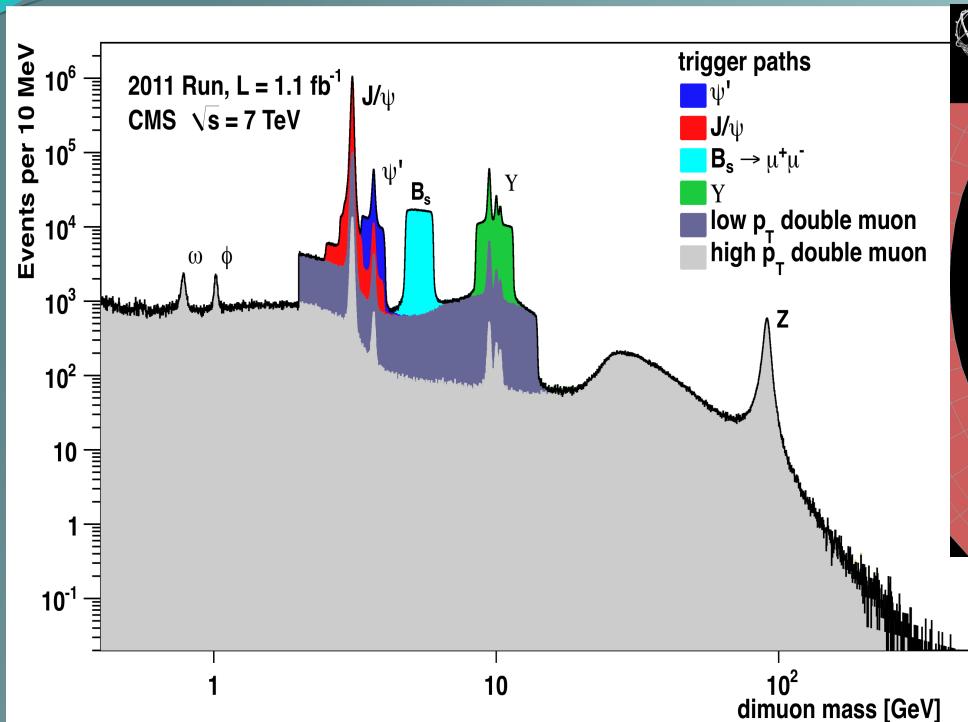


Pixel
Tracker
ECAL
HCAL
Muons
Solenoid coil

The LHC : Accelerating HEP



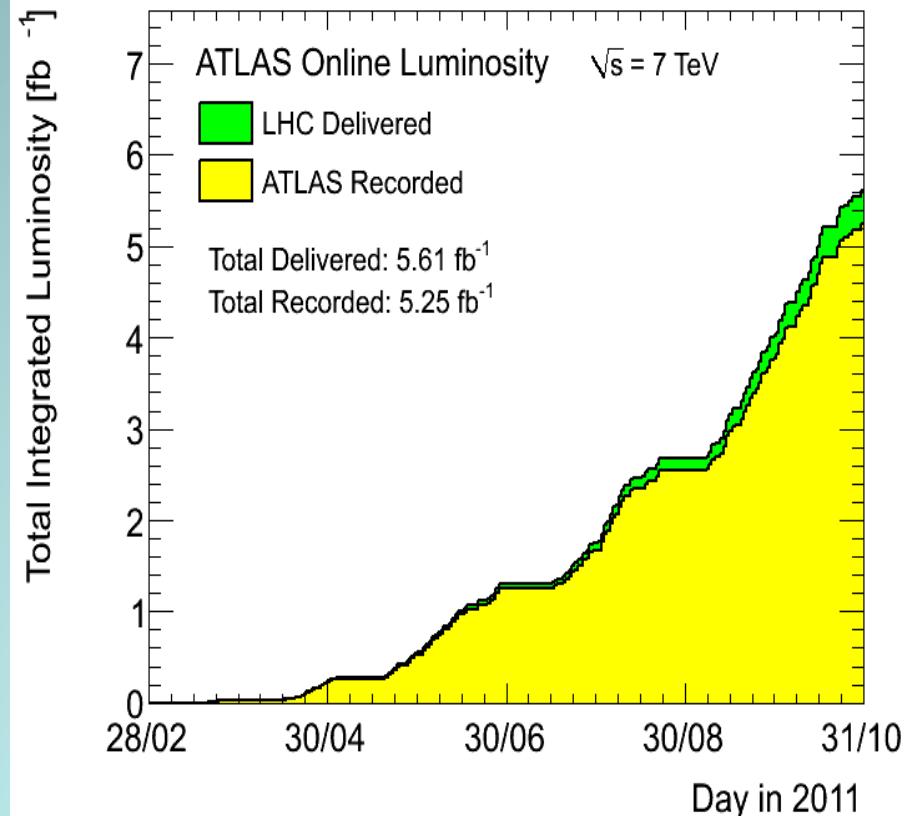
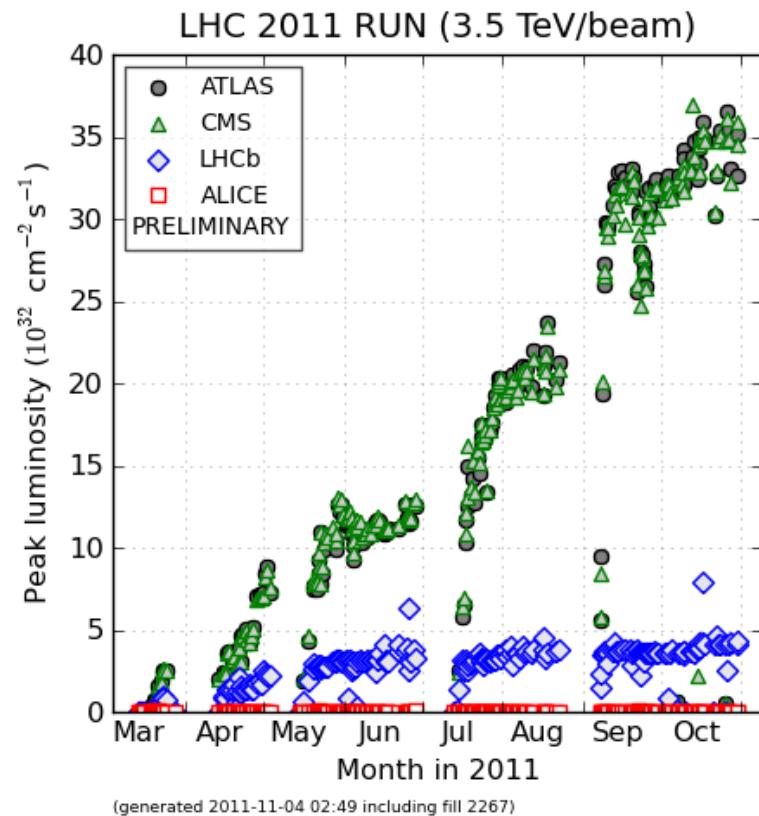
Chercher la nouvelle physique



DéTECTEURS opérationnels et prêts à sonder la nouvelle physique du TeV

Chercher la nouvelle physique

Des data, bien plus que prévu



Compte tenu des performances du LHC et des détecteurs, la physique au-delà du MS est à porté de main

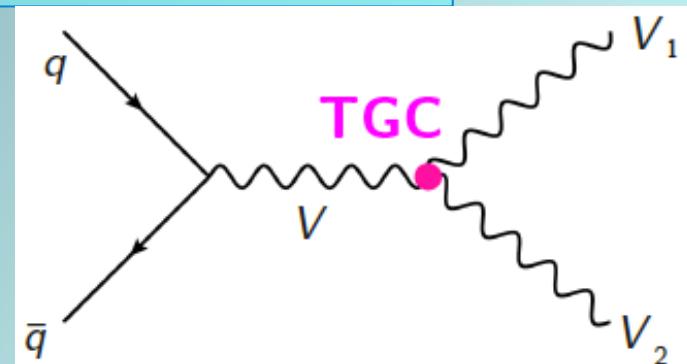
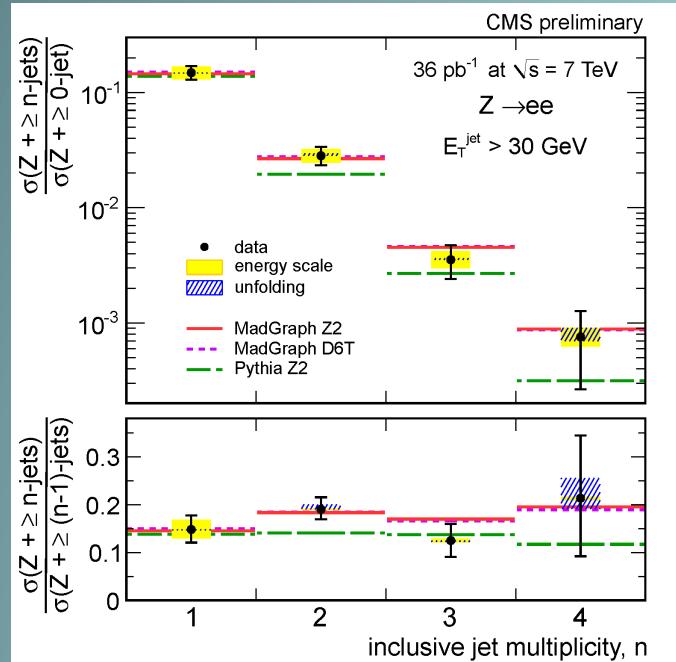
Chercher la nouvelle physique

De la même façon que pour le Higgs:

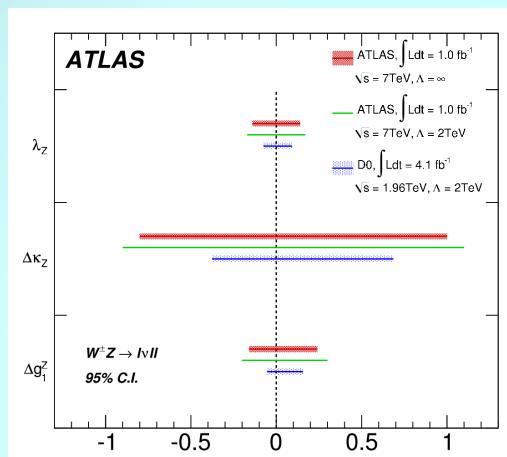
Recherche directe à travers les produits de désintégration

Recherche indirecte en utilisant les contraintes (mesures de précisions)

Recherche indirecte: déviation = nouvelle physique



Anomalous
Triple Gauge
Couplings

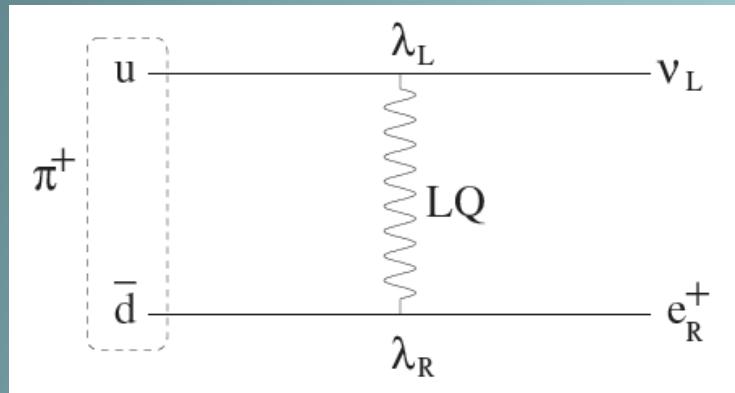


Chercher la nouvelle physique

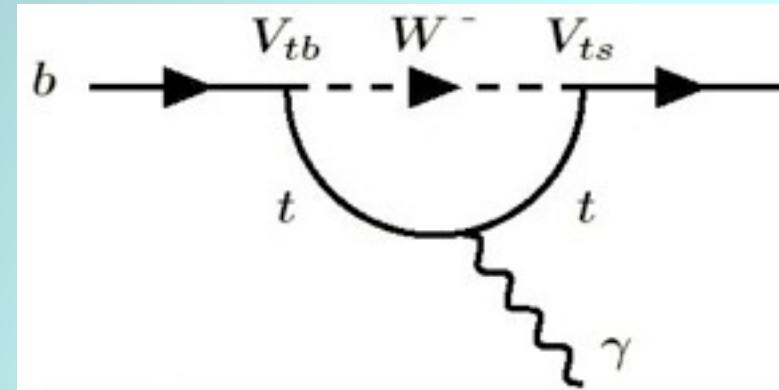
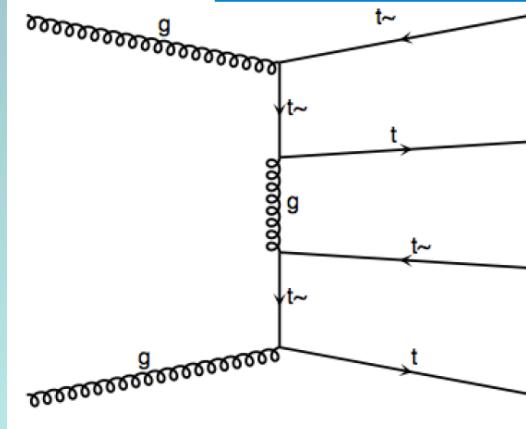
Recherche indirecte: déviation = nouvelle physique

Production de 4 tops!

Augmentation de la section efficace de certaines désintégrations rares



Pions et leptoquarks



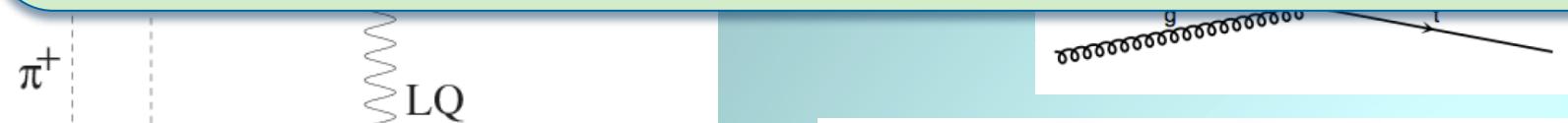
B quark radiative decay

Chercher la nouvelle physique

Recherche indirecte: déviation = nouvelle physique

Production de 4 tops!

Simon: Time-Dependent Analysis of $B_0 \rightarrow K_S \rho^0 \gamma$ Decays (BABAR)

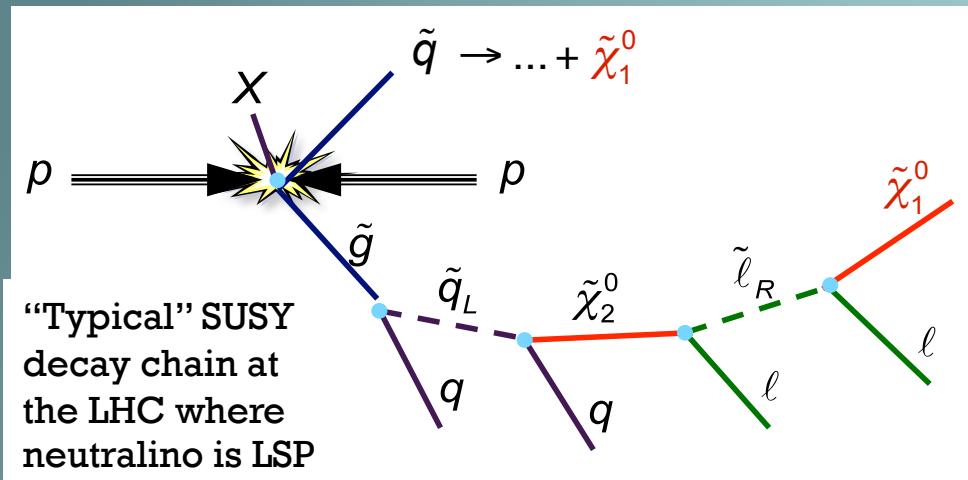


Daniela: Search for New Physics in events with 4 top quarks (ATLAS)

B quark radiative decay

Chercher la nouvelle physique

Recherche directe à travers les produits de désintégration



Paramètres considérés: $\tan\beta$ et A_o

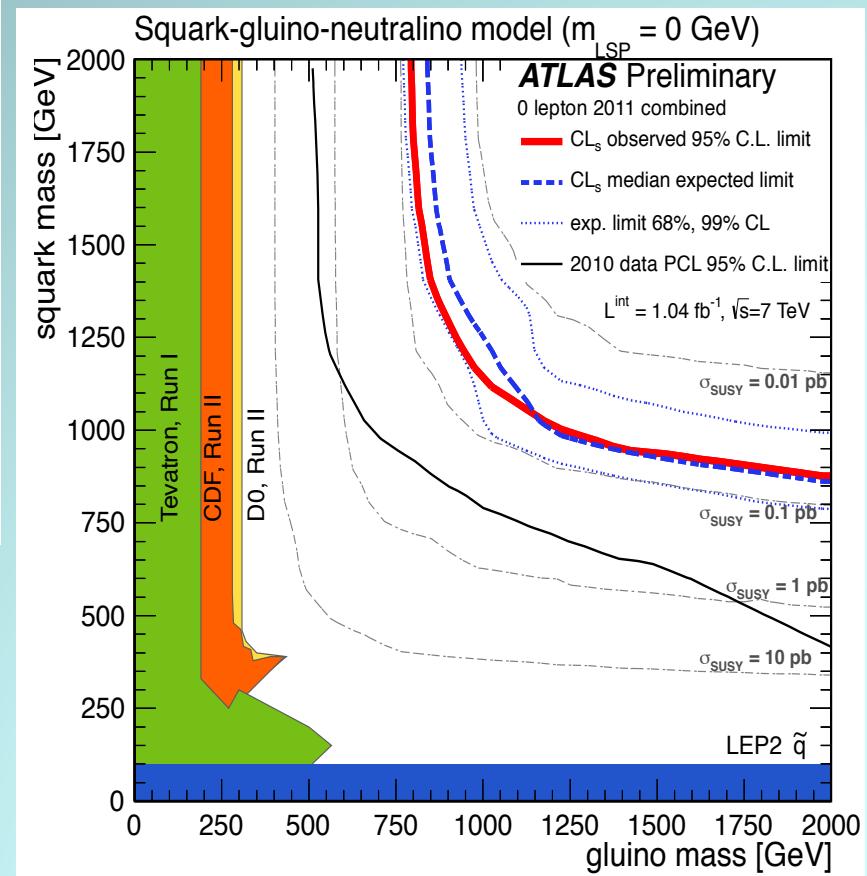
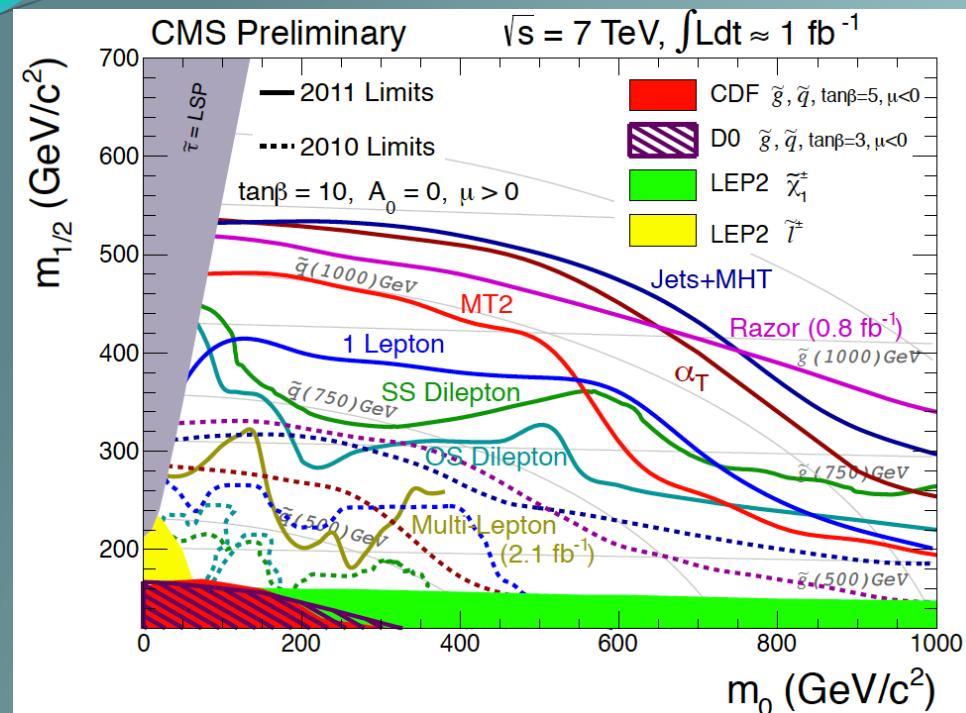
- Pair production of SUSY particles
- LSP escapes detection $\Rightarrow E_T^{\text{miss}}$
- SUSY cascades
 \Rightarrow high P_T jets, leptons, E_T^{miss}

Observables sensitive to:

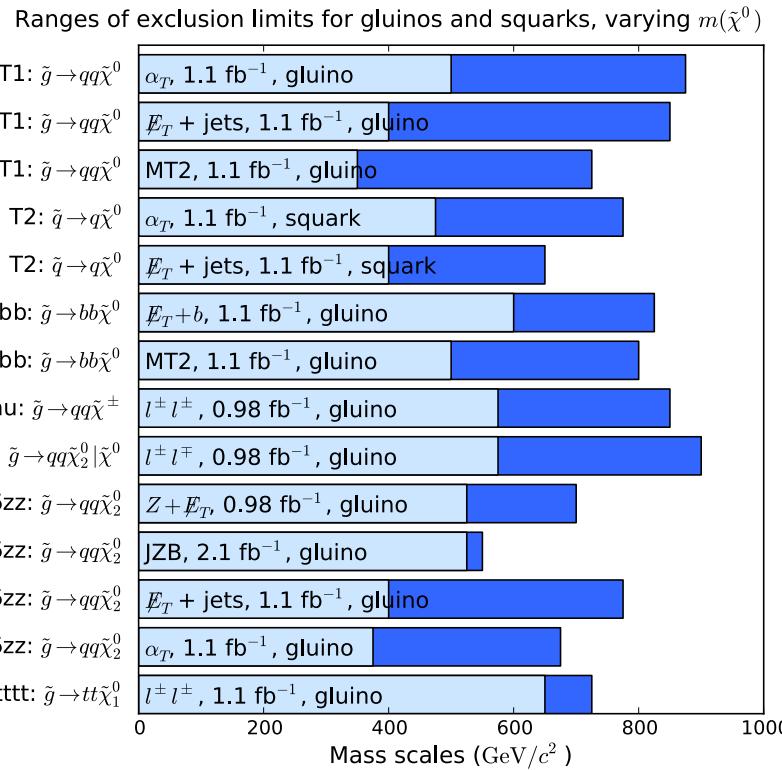
$$M_\Delta = \frac{M_{\tilde{q}}^2 - M_{\tilde{\chi}^0_1}^2}{M_{\tilde{q}}} \quad \text{"Razor" search}$$

$$\alpha_T = \sqrt{\frac{p_{T,j2}/p_{T,j1}}{2(1-\cos\Delta\phi)}} \quad \text{Suppression of QCD multijets}$$

SUSY

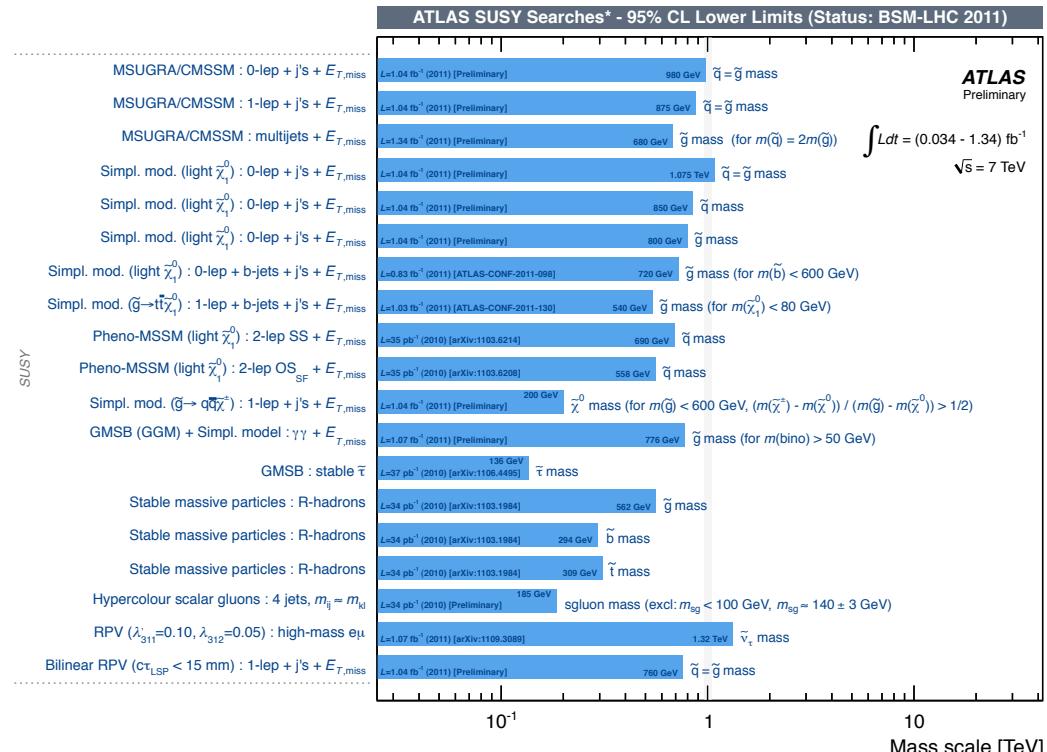


CMS Preliminary



For limits on $m(\tilde{g}), m(\tilde{q}) > m(\tilde{\chi}^0)$ (and vice versa), $\sigma^{\text{prod}} = \sigma^{\text{NLO-QCD}}$.
 $m(\tilde{\chi}^\pm), m(\tilde{\chi}_2^0) \equiv \frac{m(\tilde{g}) + m(\tilde{\chi}^0)}{2}$.

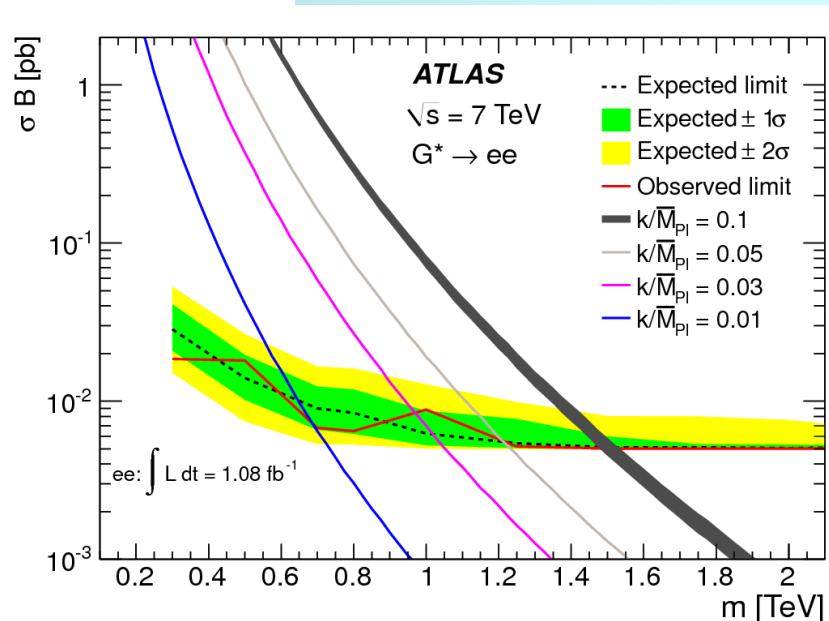
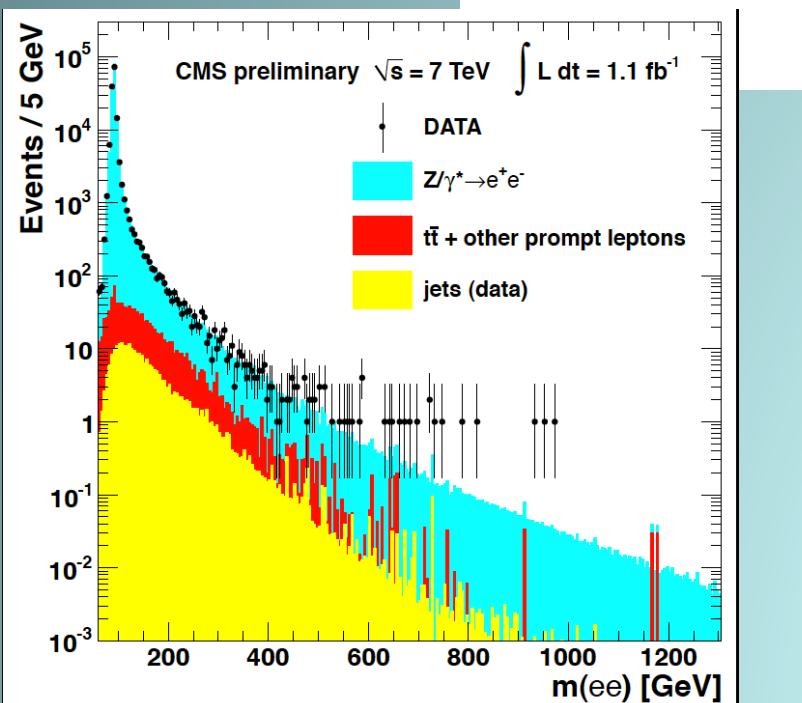
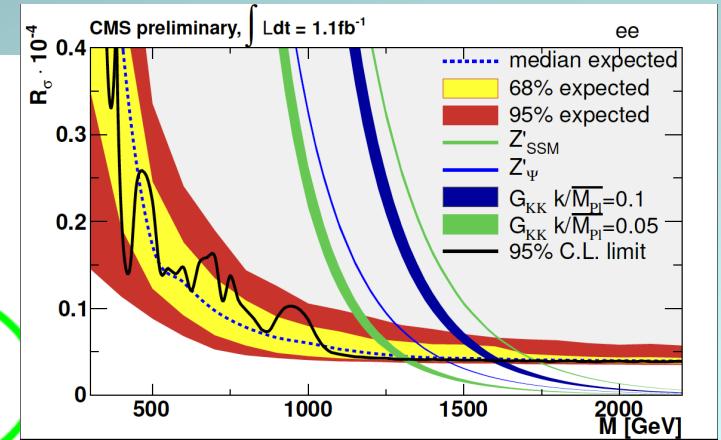
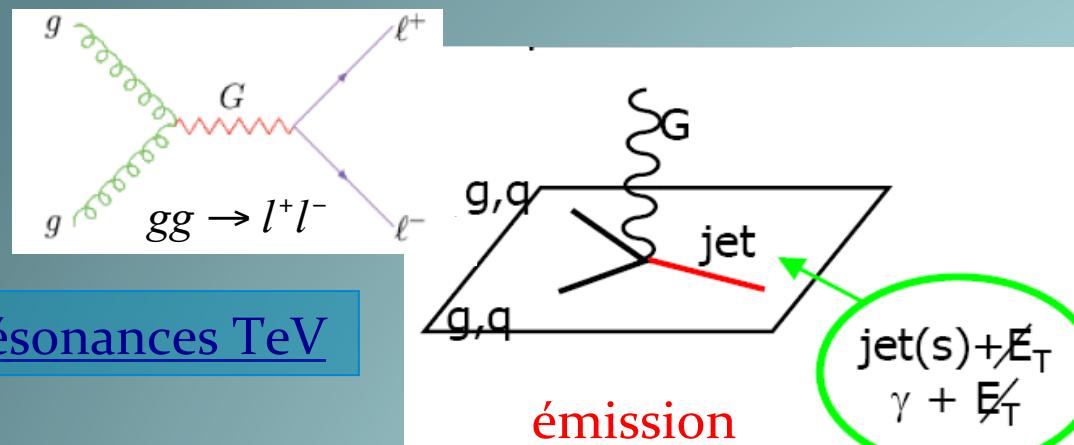
$m(\tilde{\chi}^0)$ is varied from $0 \text{ GeV}/c^2$ (dark blue) to $m(\tilde{g}) - 200 \text{ GeV}/c^2$ (light blue).



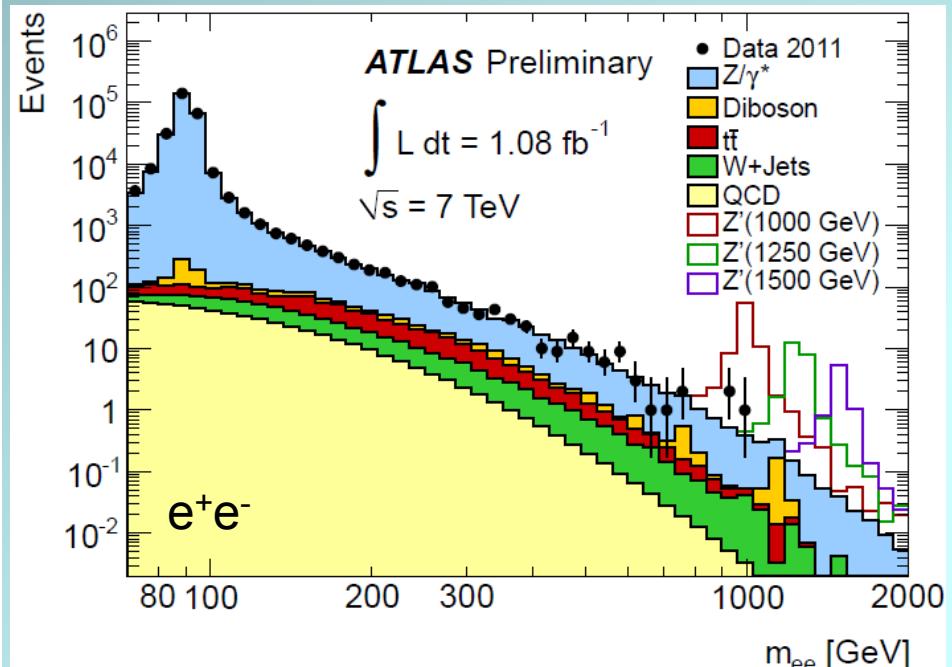
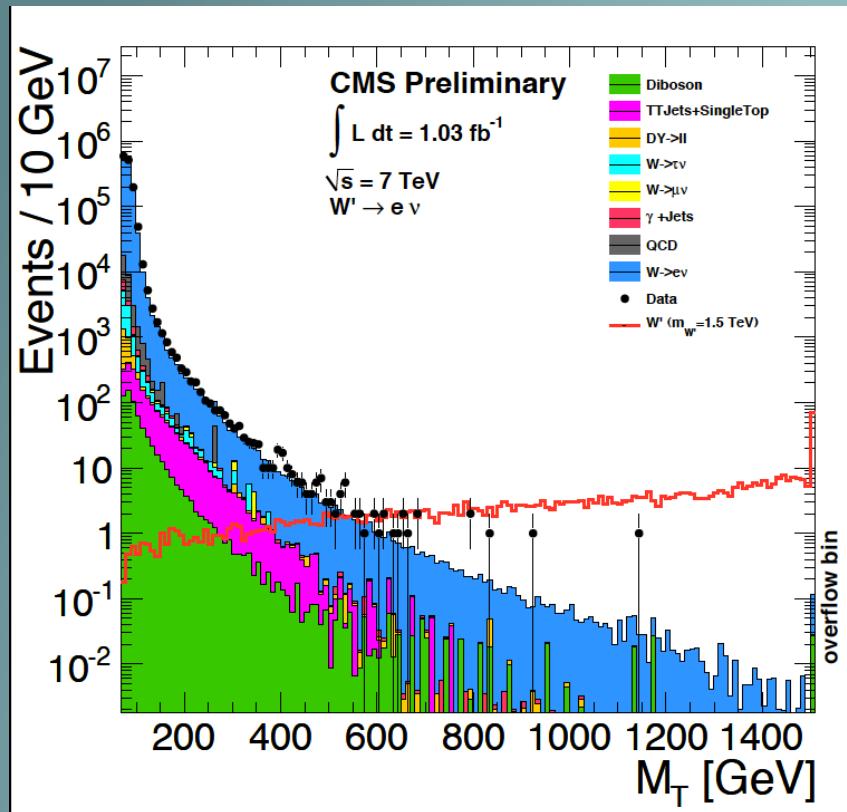
*Only a selection of the available results leading to mass limits shown

Beaucoup de progrès mais pas de
SUSY pour le moment
Tout n'a pas encore été exploré!

EXOTICA



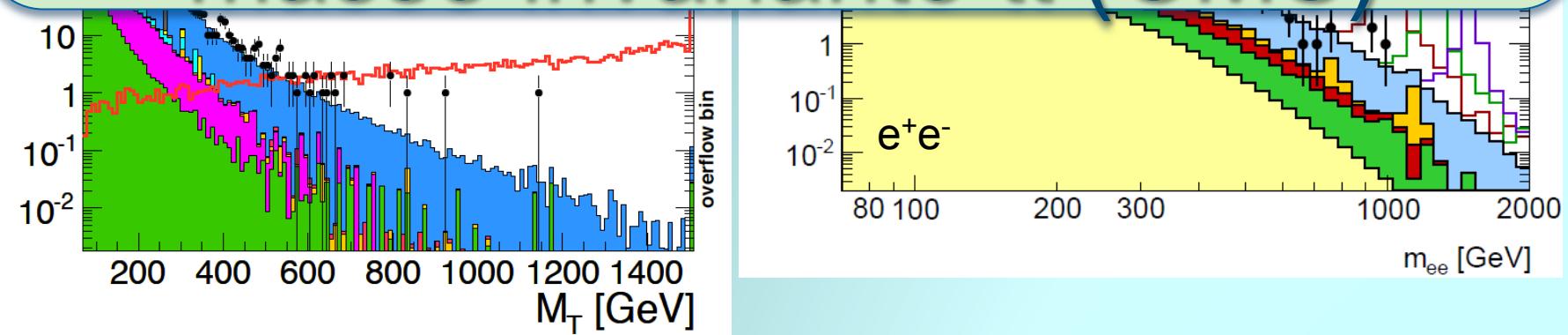
Nouveaux bosons jauge responsable de EWSB à l'ordre du TeV: Z';W'



Limite inférieure masse $M_{W'} > 2.27 \text{ TeV}$

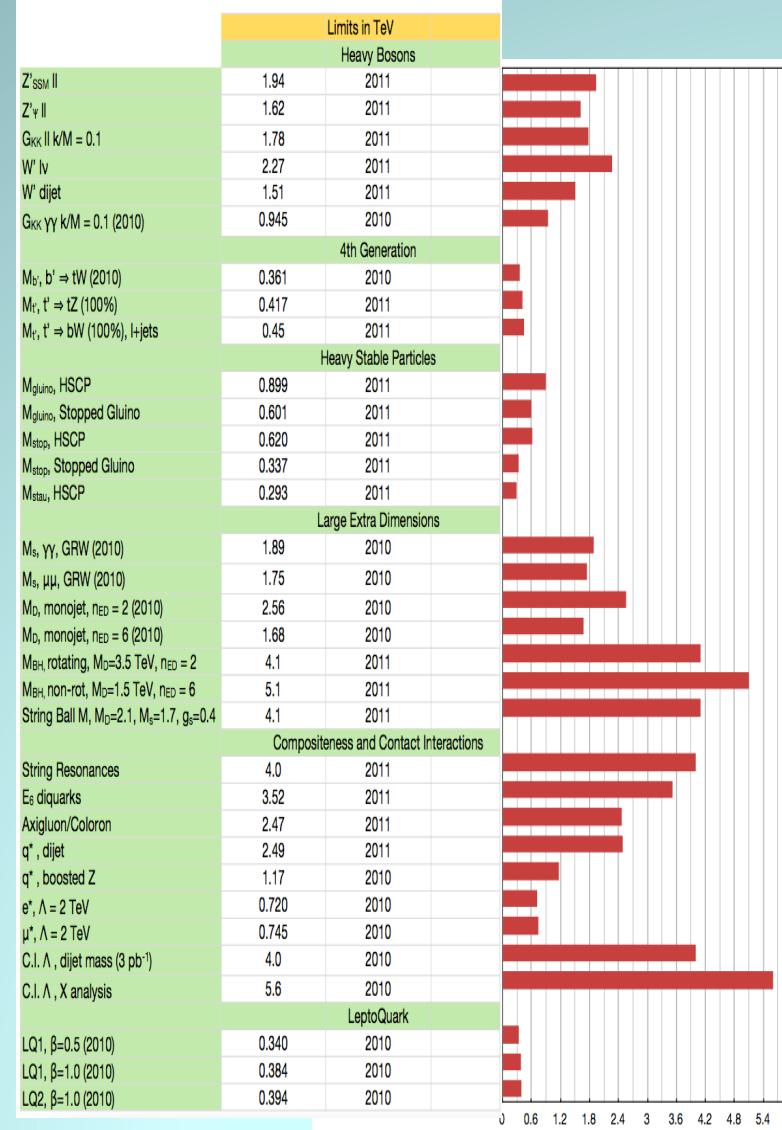
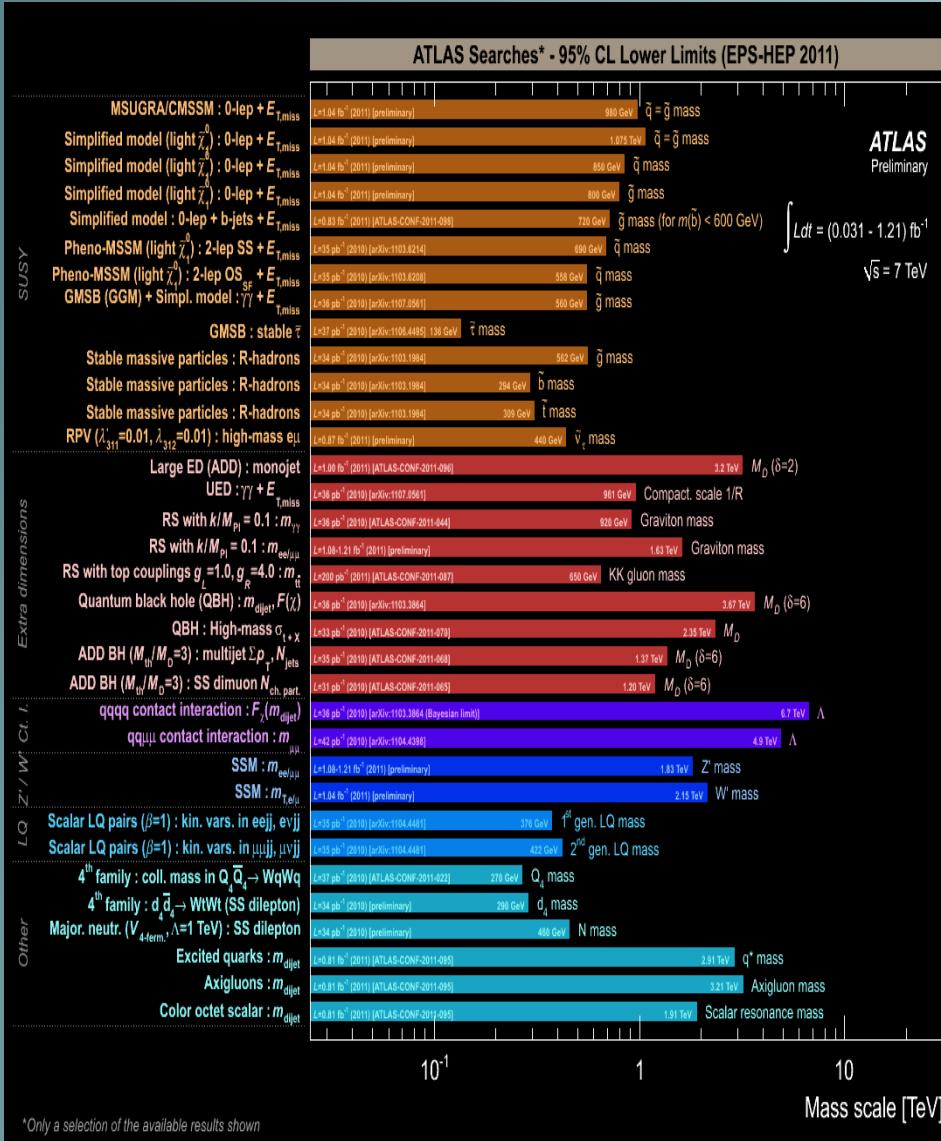
Nouveaux bosons jauge responsable de EWSB à l'ordre du TeV: Z';W'

Nicolas: Recherche de nouvelle physique dans le spectre de masse invariante $t\bar{t}$ (CMS)



Limite inférieure masse $M_{W'} > 2.27 \text{ TeV}$

EXOTICA



OUTLOOK

La nature nous cache encore bien des choses!

La chasse à la nouvelle physique ne fait que commencer (modèles minimaux, autres canaux...)

Notre compréhension du secteur du Higgs est important afin de mieux cibler notre recherche au-delà du Modèle Standard.

Le Modèle Standard est finalement une extraordinaire théorie mais ce n'est que la première brique d'une théorie de grande unification

2011: Moments extraordinaires au CERN (ne pas manquer le 13 Dec)

Fin des opérations pour 2011: 15h29, Mercredi dernier, reprise en mi-mars

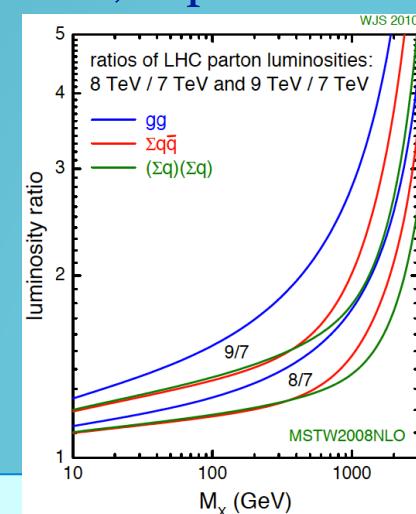
2012.

2012: LHC prévoit de fonctionner avec une luminosité de $5-7 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Augmentation en énergie: Envisageable..

En tout important pour la physique au-delà du MS : section efficaces ↗

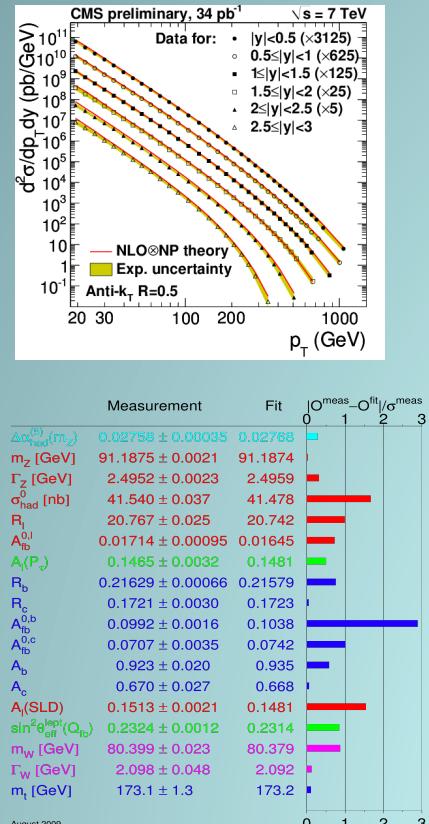
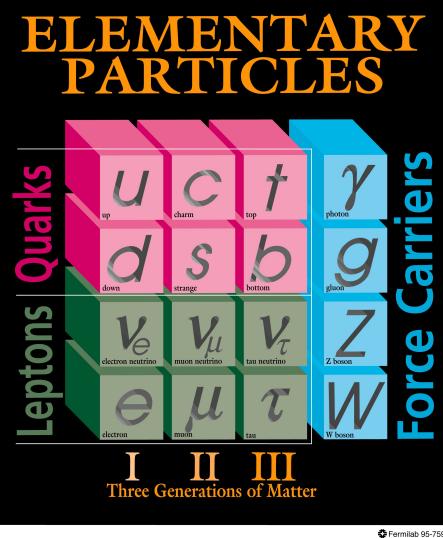
It's only the beginning !



Une petite pour Nico

Modèle Standard de la physique des particules

Précision depuis 40 ans!



Modèle Standard de la cosmologie



A des milliers d'années lumière encore..

Une dernière pour Nico

Même si nous on va pas à Hawai, pour la découverte du Higgs on sera la:



The advertisement features a large red puzzle piece icon with yellow dots on the left. To its right, the text "36th International Conference on High Energy Physics" is displayed in bold black font. Below this, a black button contains the text "CLICK HERE TO RECEIVE ICHEP2012 UPDATES". At the bottom right, the text "Exhibition Centre" is partially visible. The background has a warm orange and yellow gradient with a pattern of circles.



Et en attendant:

