

Résultats récents au LHC

Une physique en pleine accélération

Yves Sirois

Ecole Polytechnique, IN2P3/CNRS



Physique des **2** Infinis et des **O**rigines

Colloque d'inauguration

Principaux

Objectifs Scientifiques au LHC

Origine des Masses

Brisure de la symétrie électrofaible – masse des particules, supersymétrie – nature de la matière noire, ...

Unification des interactions fondamentales

Nouvelles symétries de jauge, dimensions supplémentaires, ...

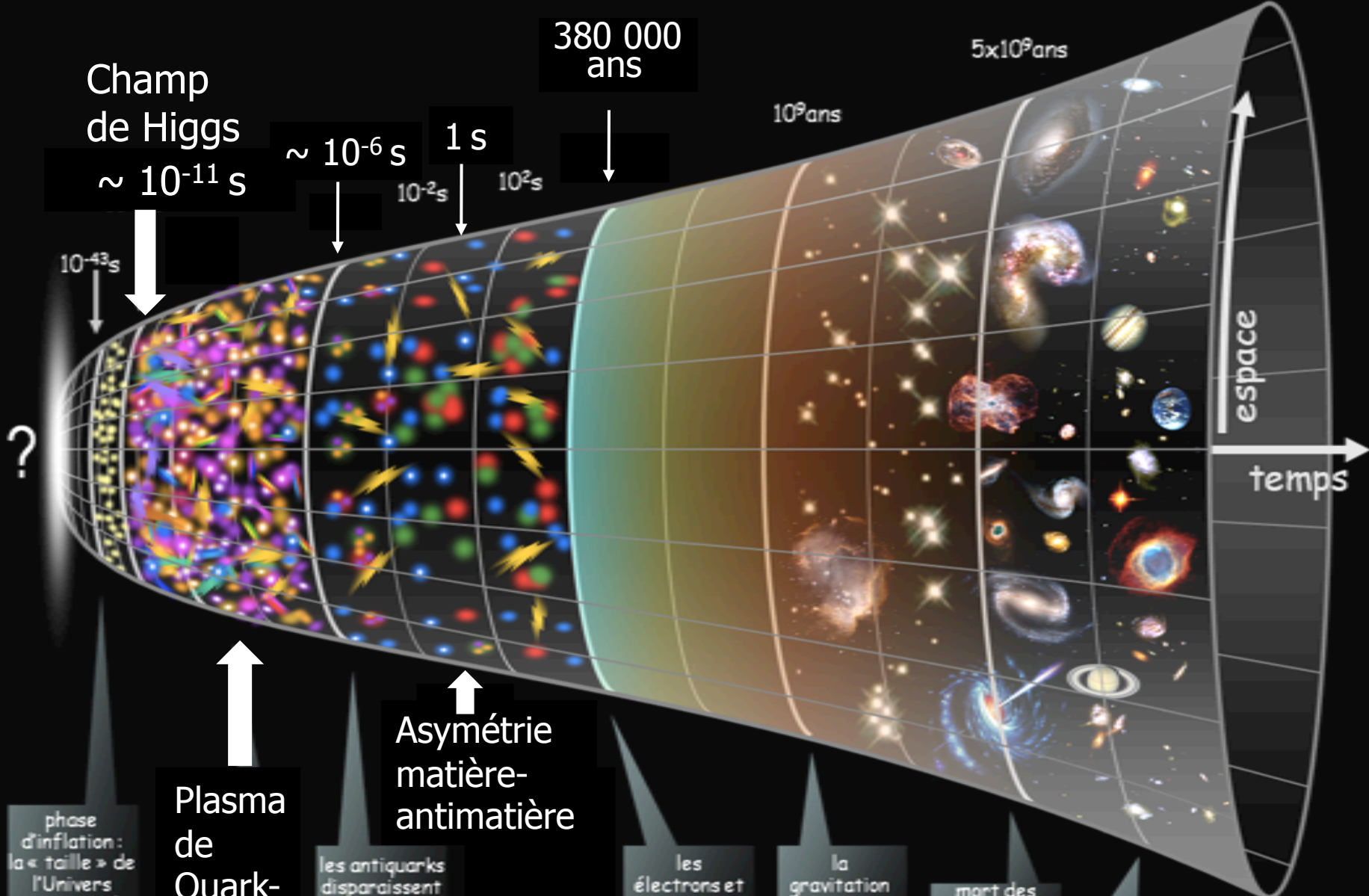
Structure de la matière élémentaire

Trois familles (« répliques ») de fermions, interaction faible et changements de saveur (CKM et PMNS), violation CP et asymétrie matière-antimatière

Propriétés de la soupe primitive de matière

Plasma de Quarks Gluons, confinement de la couleur, masse hadronique, ...

L'Univers aujourd'hui
(~13.7 milliards d'années)



Champ de Higgs
 $\sim 10^{-11}$ s

$\sim 10^{-6}$ s

1 s

10^2 s

380 000 ans

10^9 ans

5×10^8 ans

10^{-43} s

?

espace

temps

phase d'inflation: la « taille » de l'Univers s'accroît très rapidement à partir de la singularité initiale

Plasma de Quark-Gluon

les antiquarks disparaissent et l'excès de quarks donne naissance aux nucléons

Asymétrie matière-antimatière

les électrons et les noyaux se combinent pour former les atomes

la gravitation aboutit à la formation des premières étoiles

mort des étoiles de première génération, apparition des noyaux lourds

formation du système solaire

l'Univers aujourd'hui

Montagnes
du
JURA

LHC

CERN
Prévessin

SPS



CERN

CERN
Meyrin

Genève

Lac Léman

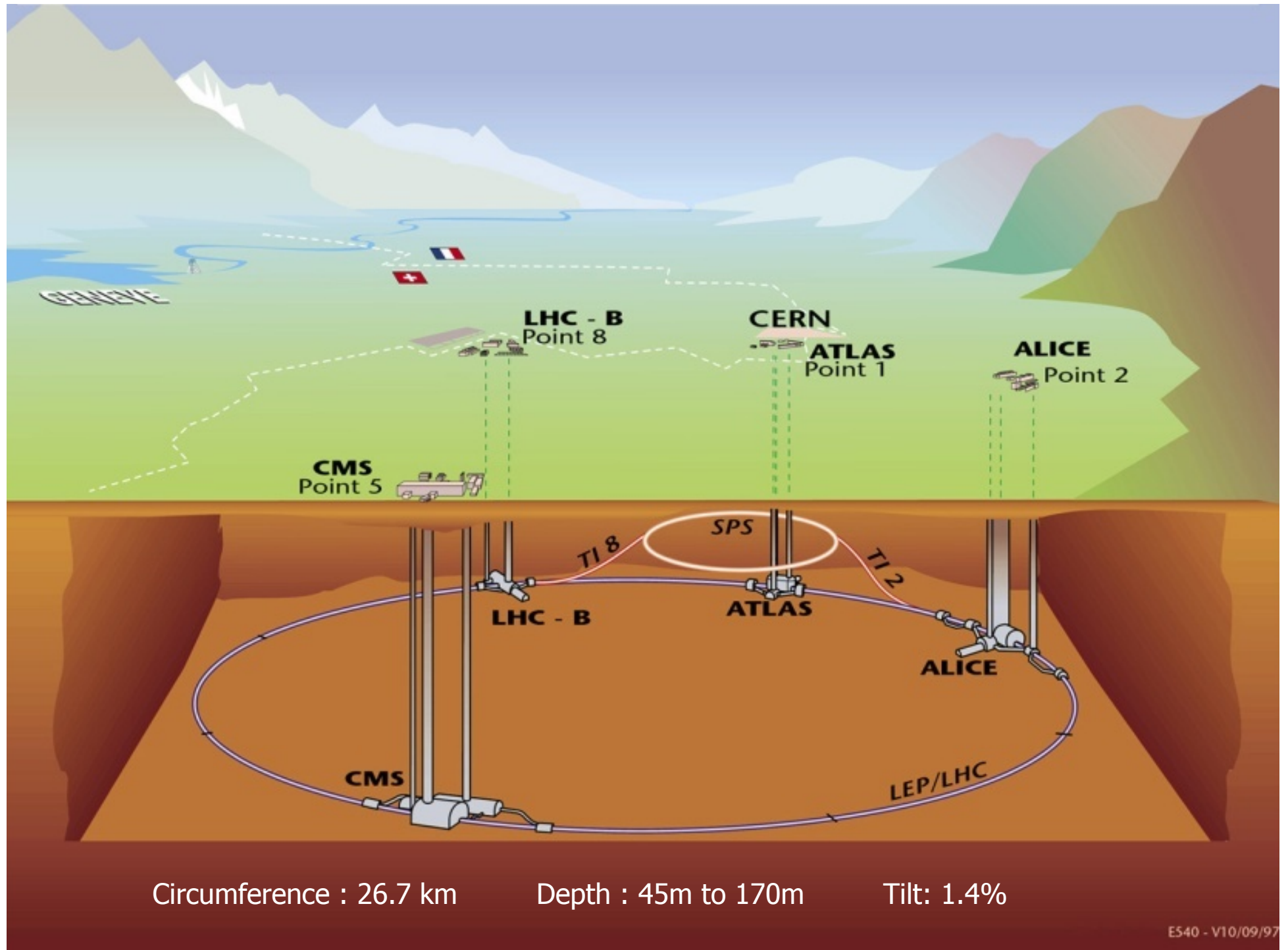
Mont-Salève

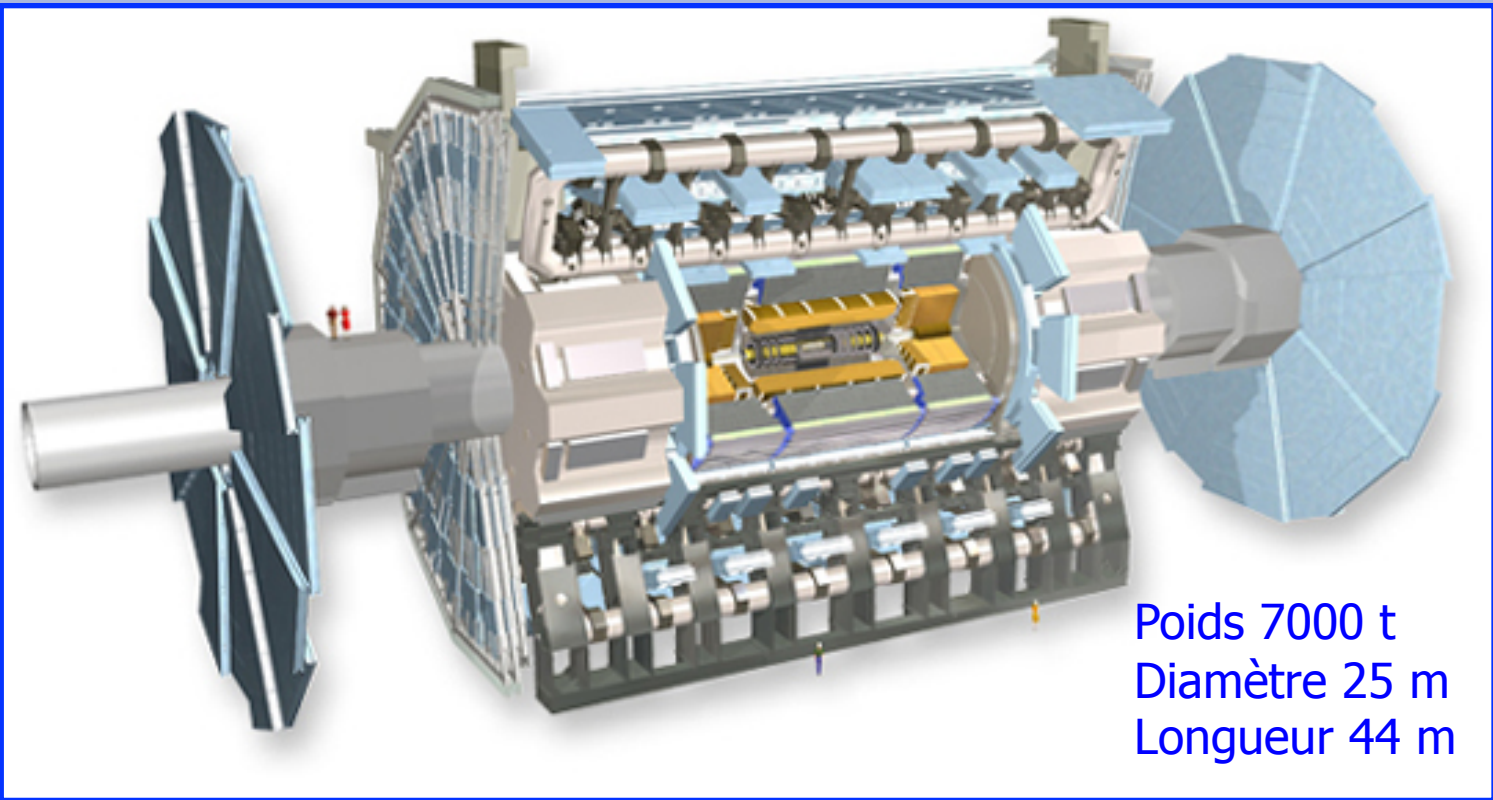
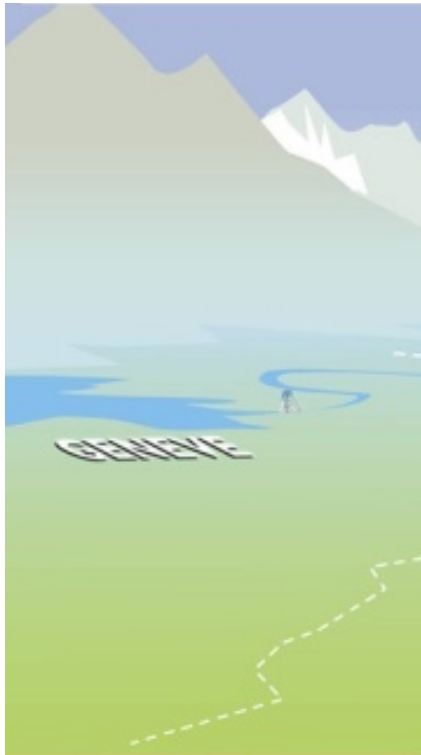


Vous êtes ici

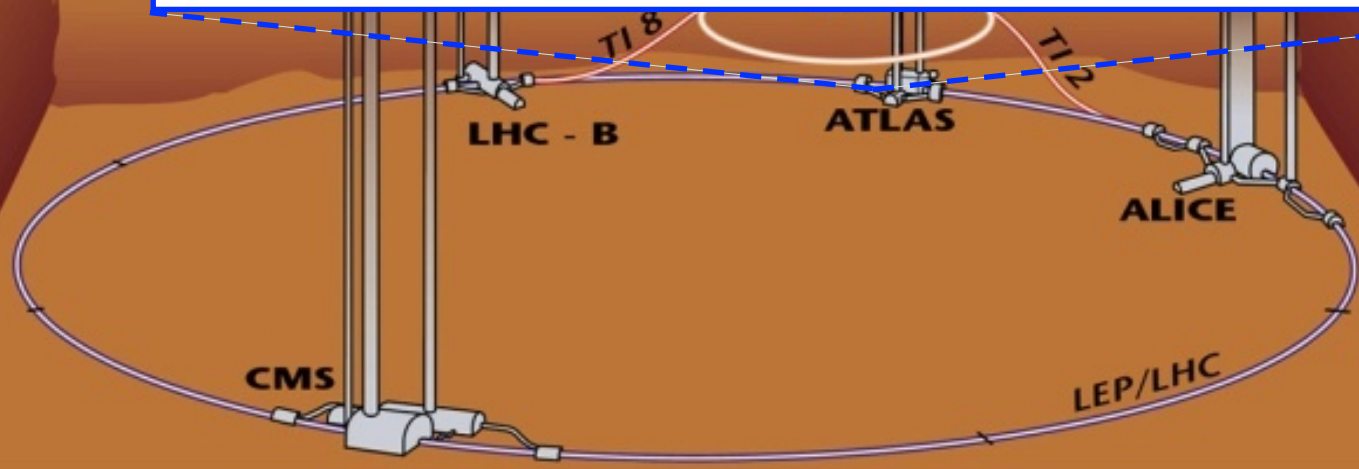
P2IO

CERN





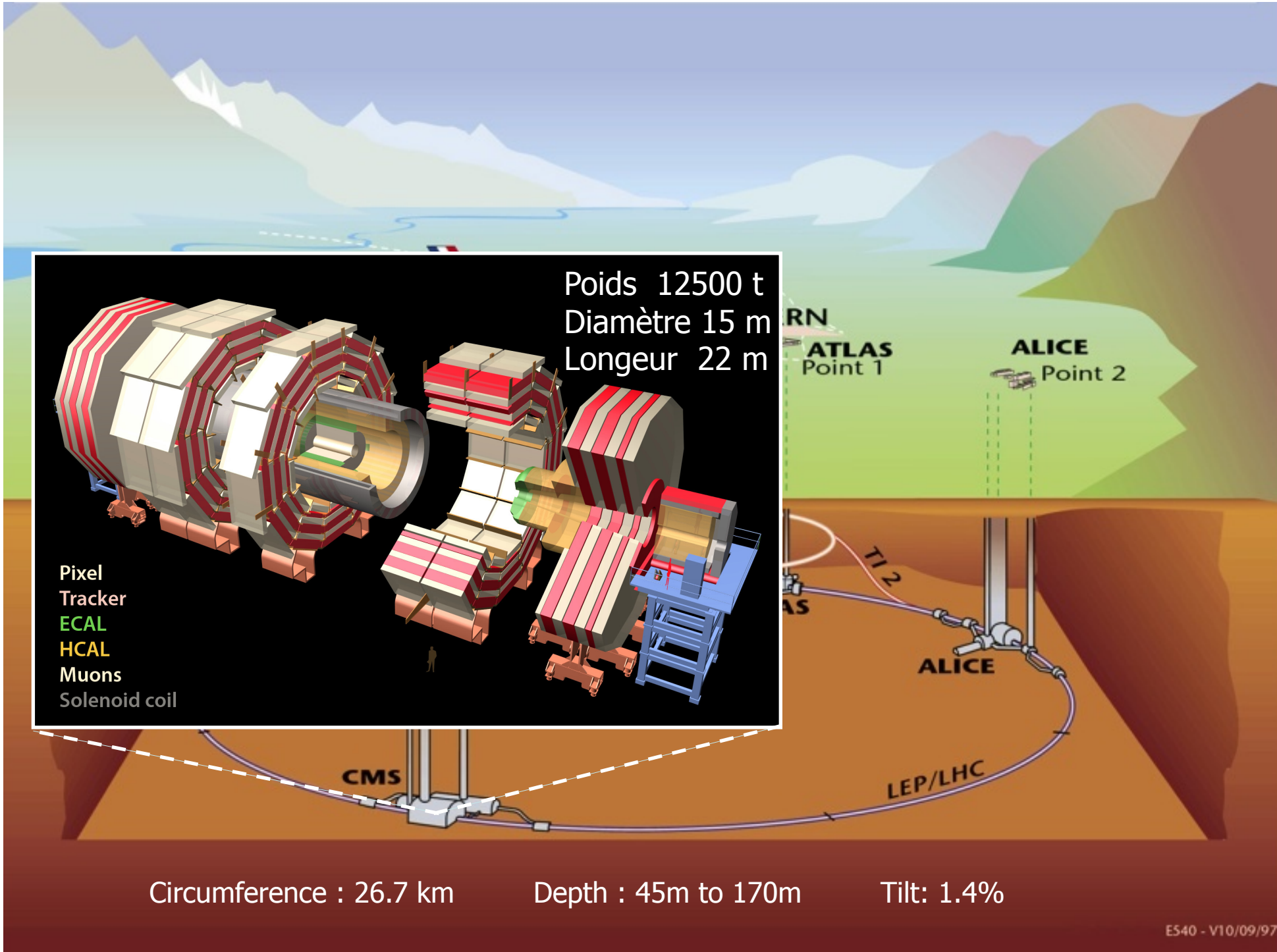
Poids 7000 t
Diamètre 25 m
Longueur 44 m



Circumference : 26.7 km

Depth : 45m to 170m

Tilt: 1.4%



Poids 12500 t
Diamètre 15 m
Longeur 22 m

- Pixel
- Tracker
- ECAL
- HCAL
- Muons
- Solenoid coil

ATLAS Point 1
ALICE Point 2

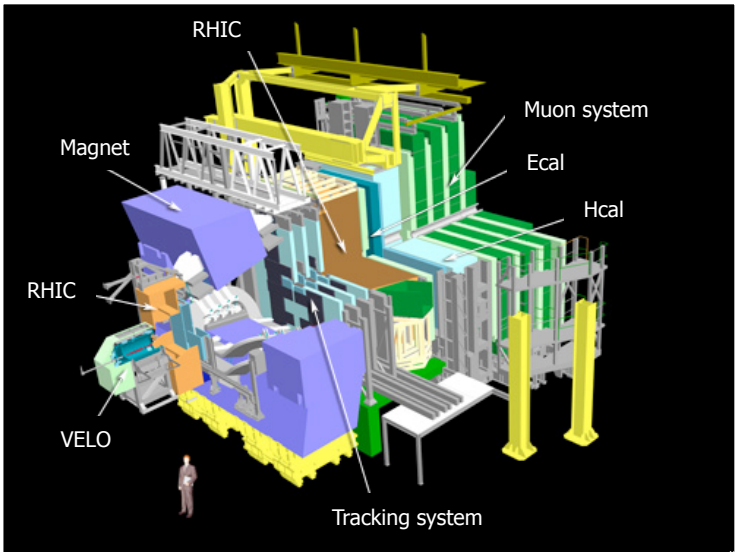
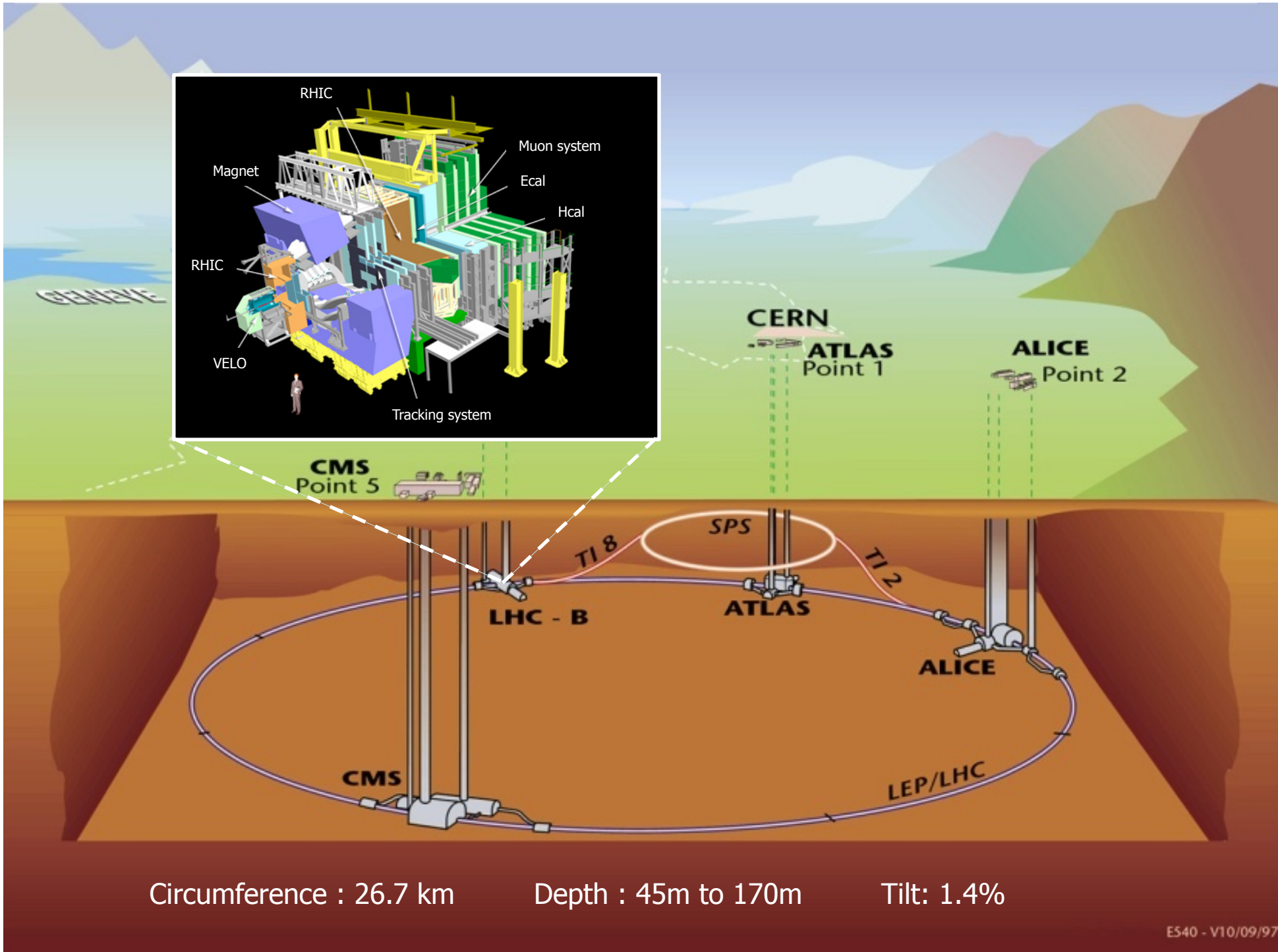
CMS

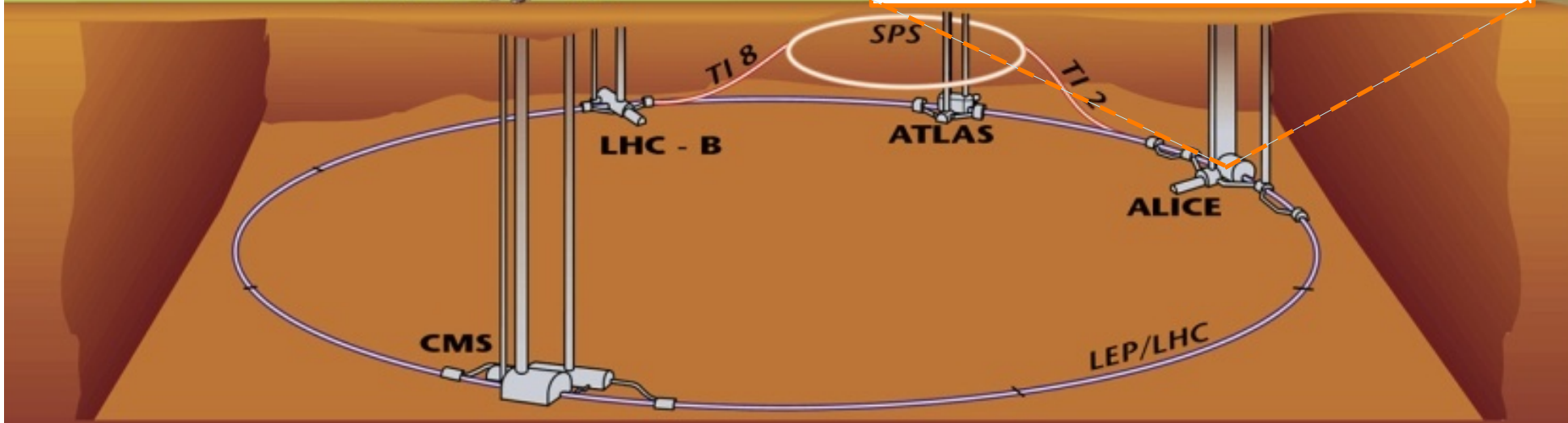
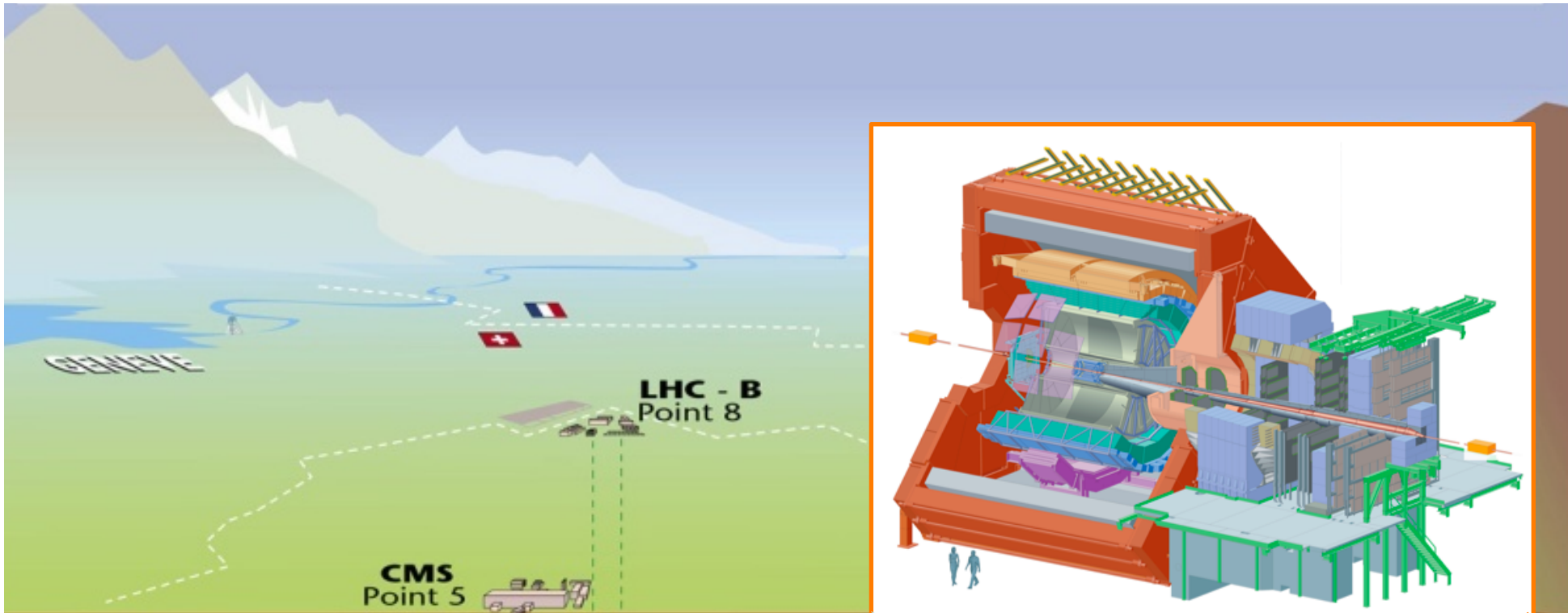
LEP/LHC

Circumference : 26.7 km

Depth : 45m to 170m

Tilt: 1.4%





Circumference : 26.7 km

Depth : 45m to 170m

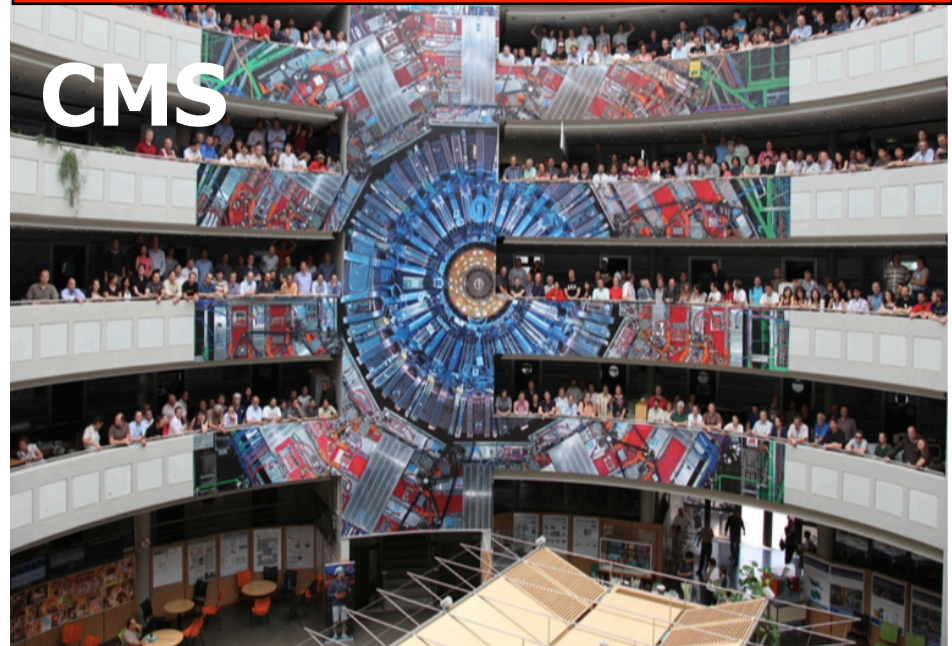
Tilt: 1.4%

Les Physicien(ne)s de

~ 4K scientifiques, 38 pays, 174 institutions
3000 Physicien(ne)s & Thésard(e)s



~ 3K scientifiques, 39 pays, 172 institutions
2200 Physicien(ne)s & Thésard(e)s



~ 750 scientifiques, 15 pays, 52 institutions
575 Physicien(ne)s & Thésard(e)s



1300 scientifiques, 35 pays, 118 institutions
950 Physicien(ne)s & Thésard(e)s



Les Physicien(ne)s de

~ 4K scientifiques, 38 pays, 174 institutions
3000 Physicien(ne)s & Thésard(e)s

ATLAS



~ 3K scientifiques, 39 pays, 172 institutions
2200 Physicien(ne)s & Thésard(e)s

CMS



9000 scientifiques de 58 pays

Plus de 200 institutions (laboratoires, universités)

4500 Physicien(ne)s

+ 2000 Thésard(e)s *

* ~ 30% des signataires

~ 750 scientifiques, 118 institutions
575 Physicien(ne)s & Thésard(e)s

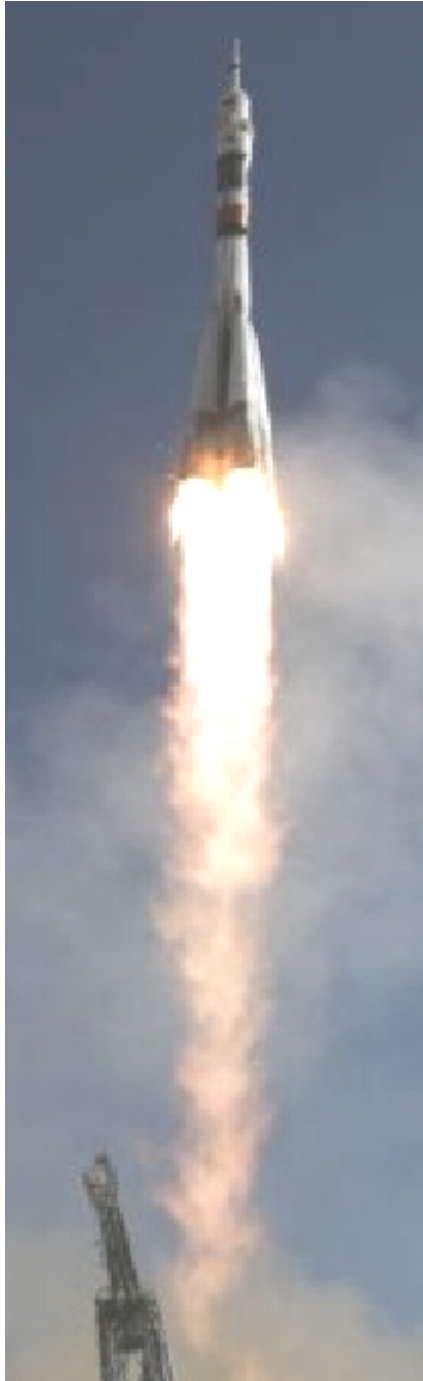
LHCb



~ 750 scientifiques, 118 institutions
& Thésard(e)s

ALICE





Le LHC : la PHE en accélération

PbPb Physics Runs $\sqrt{s} = 2.8 \text{ TeV} : \sim 150 \mu\text{b}^{-1}/\text{exp.}$

pp Physics Runs $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV} : \sim 5 \text{ fb}^{-1}/\text{exp.}$

----- EPS/LP 2011 -----

↑ 2011

pp Physics Runs $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

$\mathcal{L} \sim 1\text{-}2 \text{ fb}^{-1} / \text{exp.}$

----- Quark Matter 2011 -----

November – Décembre 2010

PbPb – Premiers runs Ions Lourds

----- Moriond 2011 -----

↑ Juillet - Décembre 2010

pp Physics Runs $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

$\mathcal{L} \sim 35 \text{ pb}^{-1} / \text{exp.}$

----- ICHEP 2010 -----

↑ Avril - Juillet 2010

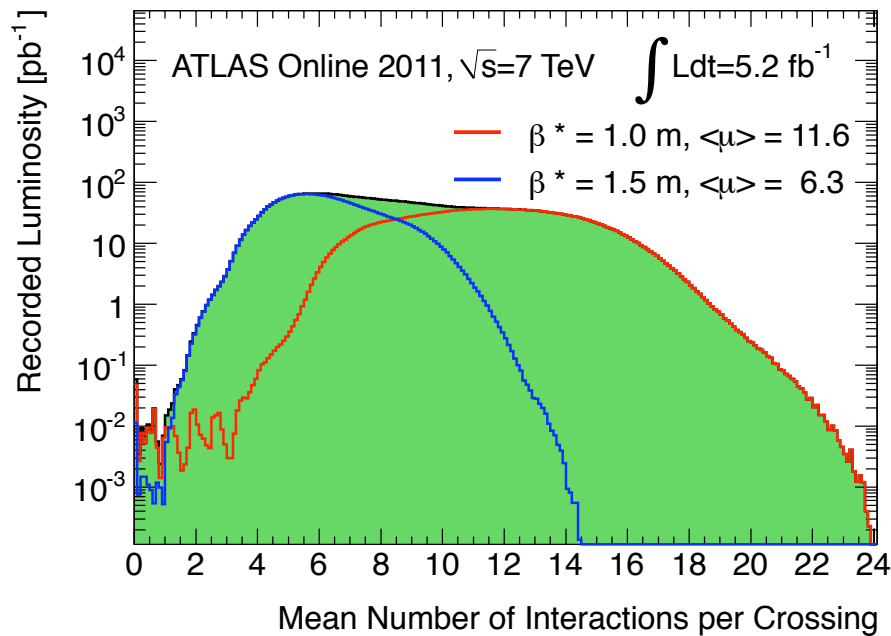
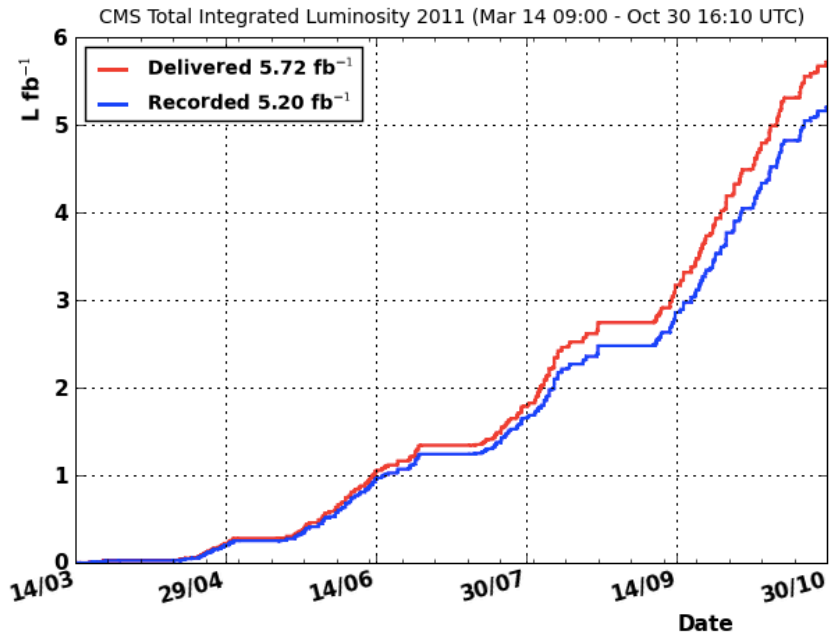
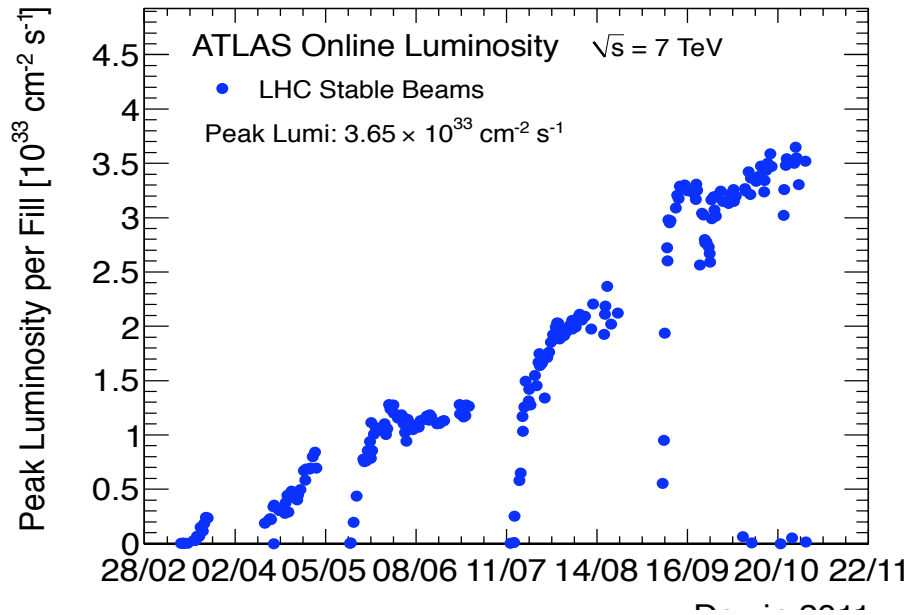
Start-up Runs $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

$\mathcal{L} \sim 3 \text{ pb}^{-1} / \text{exp.}$

↑ Décembre 2009

Pilot runs $\sqrt{s} = 0.9 \text{ \& } 2.36 \text{ TeV}$

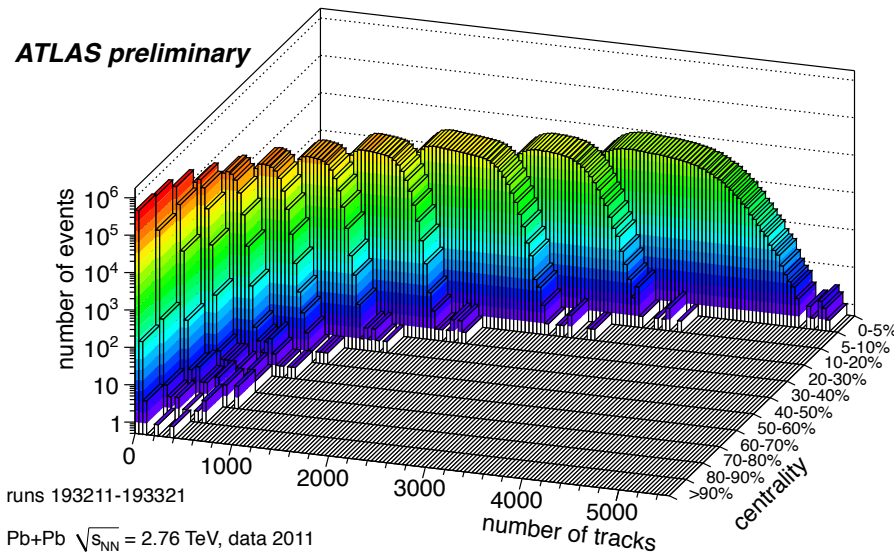
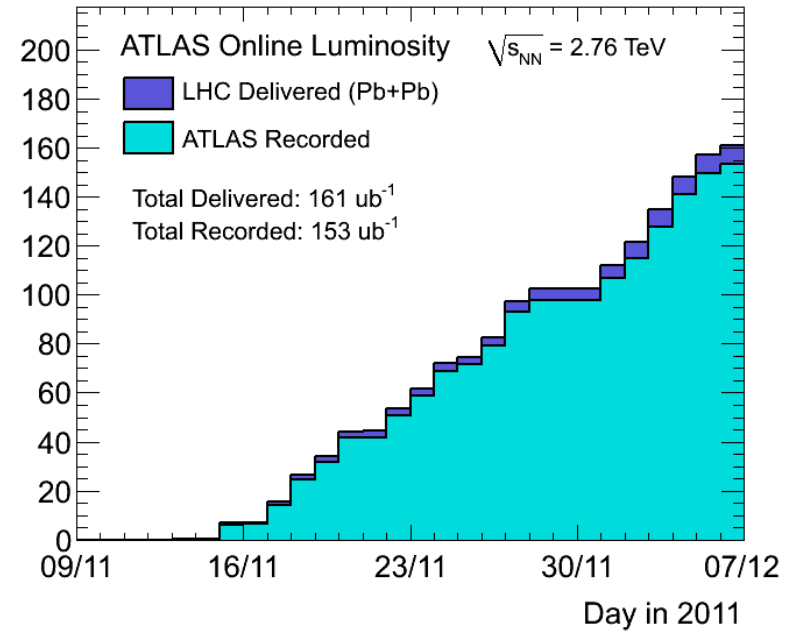
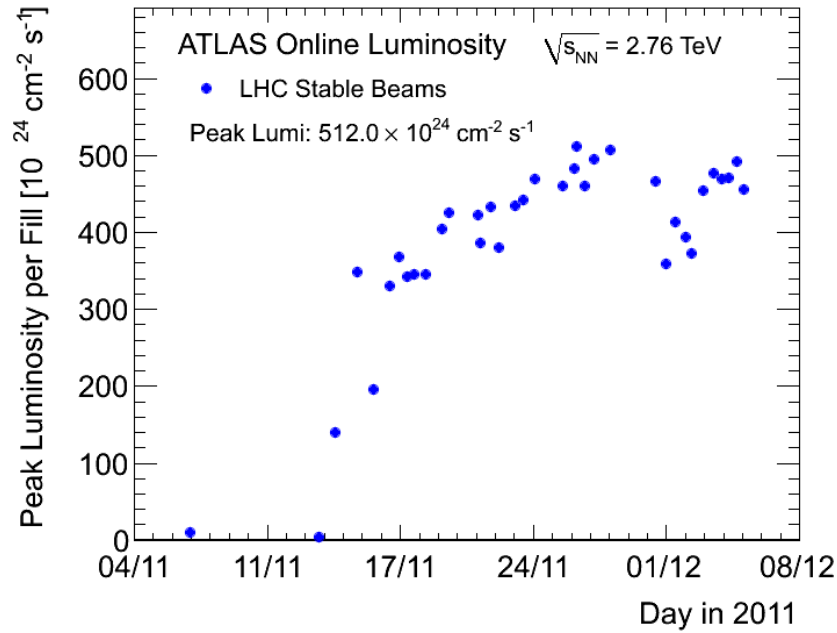
Collisions pp à $\sqrt{s} = 7$ TeV en 2011



L instantanée $\uparrow 3.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 L intégrée $> 5 \text{ fb}^{-1}$ / expérience
 Un nombre d'empilement très élevé !

140 x L_{2010} !!!

Ions Lourds – Collisions PbPb en 2011



L instantanée $\uparrow 500 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 L intégrée $> 150 \mu\text{b}^{-1}$ / expérience

15 x L₂₀₁₀ !!!

Bosons Z/W



- “Chandelles” - comprendre et calibrer le détecteur;

$W \rightarrow l\nu$ et $Z \rightarrow l^+ l^-$ = états finaux les plus propres; $\uparrow S/\sqrt{B}$ avec \sqrt{s}
 déclenchement, mesure et identification des leptons, P_T^{miss} , etc.

- Référence ou bruit de fond dominant (e.g. W + jets, Z +jets) pour des recherches Higgs ou BSM \Rightarrow comparaison aux calculs de précision

Ratios $[V+(n+1)/V+n]$ or $[W+n/Z+n]$ for n jets partially cancel uncertainties (\mathcal{L} , PDFs, ...);
 Incentive for considerable progress in techniques for NLO calculations;
 $V+QQ$ remain challenging for theoretical models

- Asymétrie $W^+/W^- \Rightarrow$ contrainte sur les fonctions de structure du proton

$$A_W = \frac{d\sigma/d\eta(\ell^+) - d\sigma/d\eta(\ell^-)}{d\sigma/d\eta(\ell^+) + d\sigma/d\eta(\ell^-)} \quad \begin{array}{l} u + \bar{d}(\bar{s}) \rightarrow W^+ \\ d + \bar{u}(\bar{c}) \rightarrow W^- \end{array}$$

- Production de di-bosons \Rightarrow contrainte sur couplages trilinéaires (TGCs)
- Production de tri-bosons \Rightarrow contrainte sur couplages quadrilinéaires (QGCs)

Bosons Z/W

- “Chandelles” - comprendre et calibrer le détecteur;

$W \rightarrow l \nu$ et $Z \rightarrow l^+ l^-$ = états finaux les plus propres; $\uparrow S/\sqrt{B}$ avec \sqrt{s}
 déclenchement, mesure et identification des leptons, P_T^{miss} , etc.

- Référence ou bruit de fond dominant (e.g. W + jets, Z +jets) pour des recherches Higgs ou BSM \Rightarrow comparaison aux calculs de précision

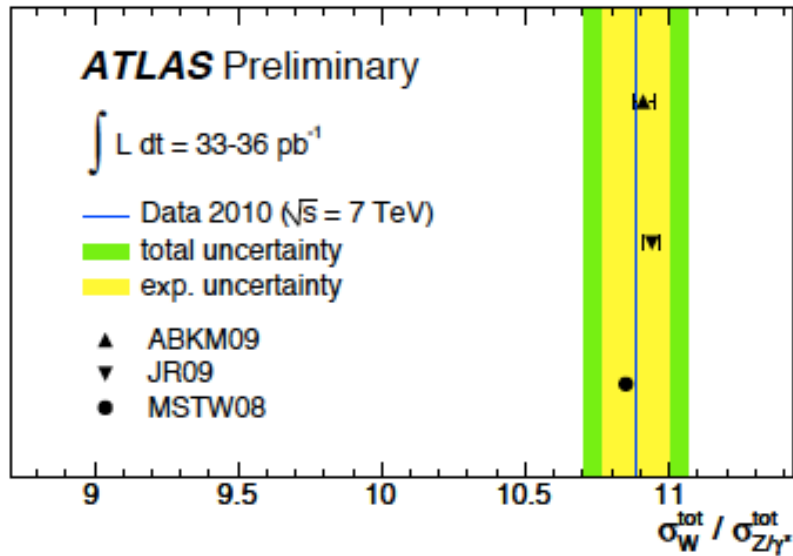
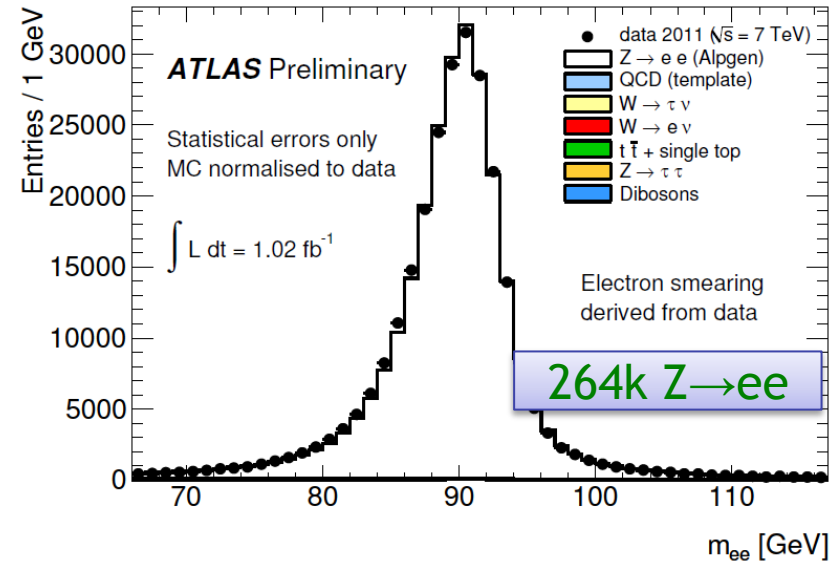
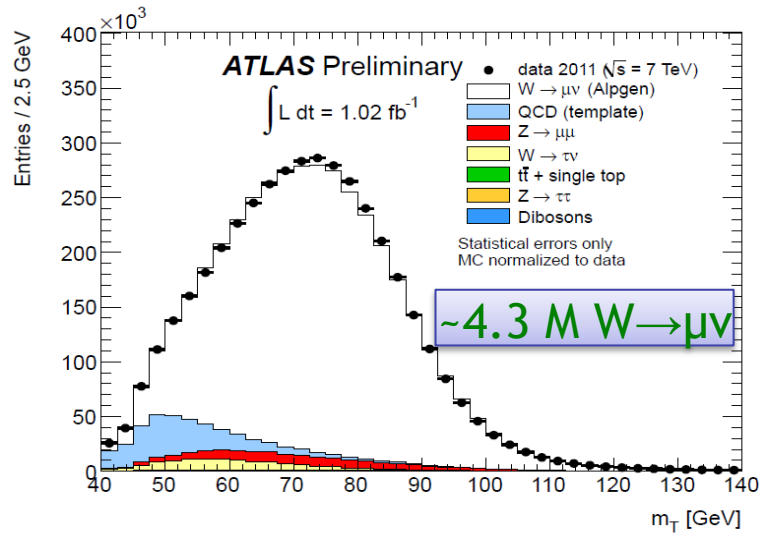
Ratios $[V+(n+1)/V+n]$ or $[W+n/Z+n]$ for n jets partially cancel uncertainties (\mathcal{L} , PDFs, ...);
 Incentive for considerable progress in techniques for NLO calculations;
 $V+QQ$ remain challenging for theoretical models

- Asymétrie $W^+/W^- \Rightarrow$ contrainte sur les fonctions de structure du proton

$$A_W = \frac{d\sigma/d\eta(\ell^+) - d\sigma/d\eta(\ell^-)}{d\sigma/d\eta(\ell^+) + d\sigma/d\eta(\ell^-)} \quad \begin{array}{l} u + \bar{d}(\bar{s}) \rightarrow W^+ \\ d + \bar{u}(\bar{c}) \rightarrow W^- \end{array}$$

- Production de di-bosons \Rightarrow contrainte sur couplages trilinéaires (TGCs)
- Production de tri-bosons \Rightarrow contrainte sur couplages quadrilinéaires (QGCs)

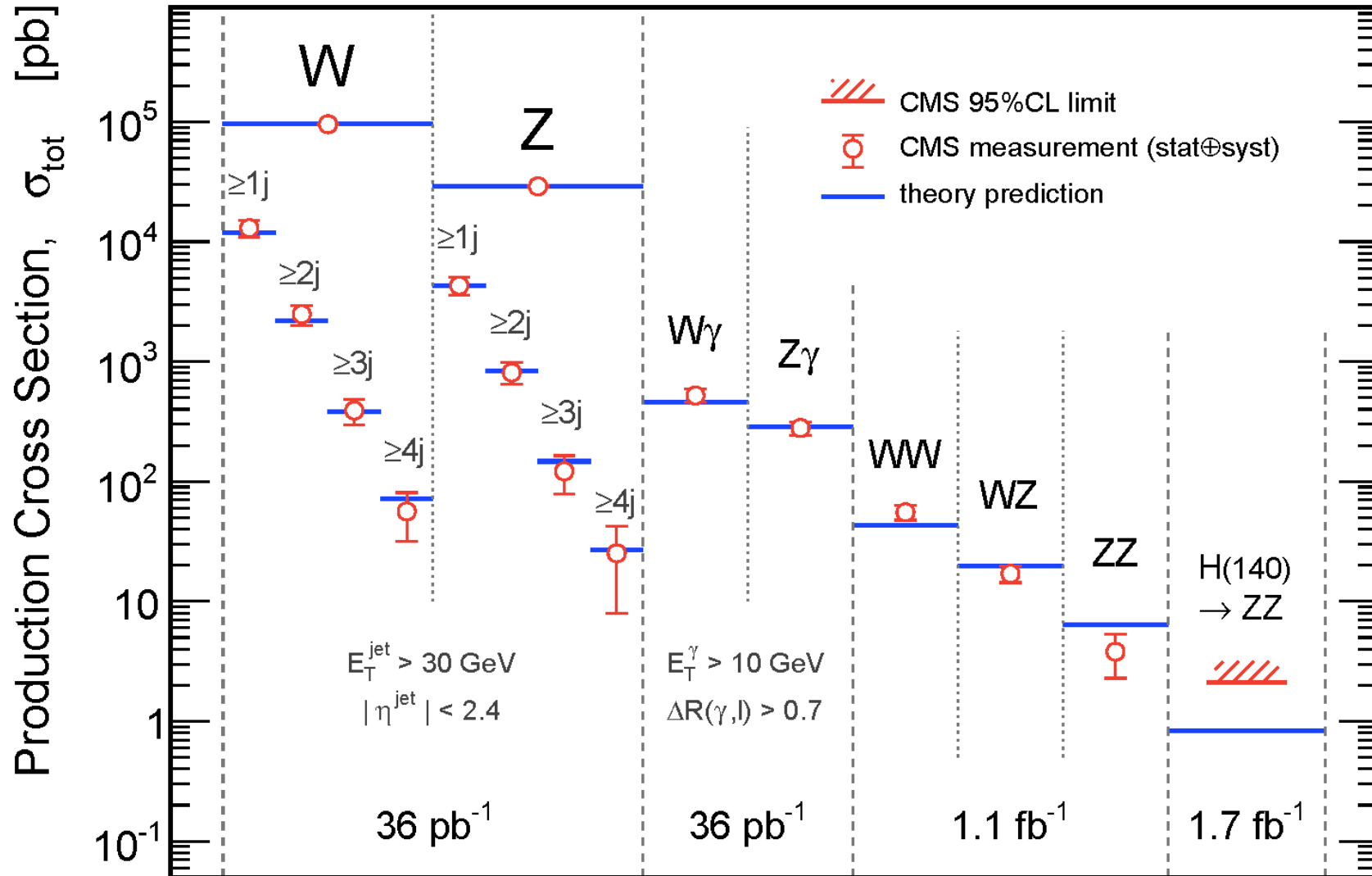
Production W/Z



- Excellent accord entre les données et la simulation
- Bon accord avec les prédictions théoriques (NNLO+PDD_F)
- Move to "new environment":
 - $\sigma(W^+) \neq \sigma(W^-)$ (~ 1.4)
 - W polarization

Weak Boson Production

CMS



JHEP10(2011)132
CMS-PAS-EWK-10-012

PLB701(2011)535

CMS-PAS-EWK-11-010

CMS-PAS-HIG-11-015

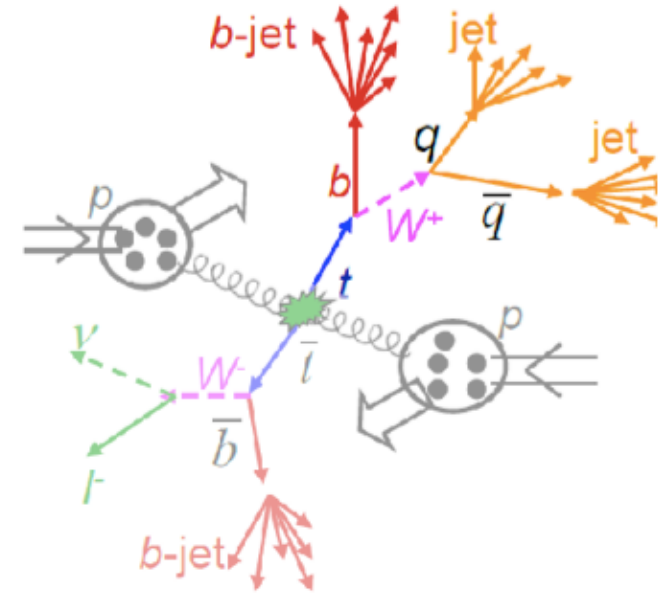
Quark Top

- Particule la plus lourde, masse "naturelle" ($\lambda_t \approx 1$)
Pourrait jouer un rôle particulier dans la brisure de symétrie électrofaible ?
- Se désintègre avant hadronisation ($\tau_t \approx 5 \times 10^{-25} \text{ s} \ll \Lambda_{\text{QCD}}^{-1}$)
Mesure directe de la masse par les produits de désintégrations (= $m_{\text{pôle}}$?)
- Production et désintégration du quark top = sensible à la nouvelle physique (nouveaux couplages, Z' « top-philic », violation de la conservation de la saveur)
- Mesures de précisions: m_{top} , Q_{top} , Γ_{top} , $|V_{tb}|$, $\Delta m (t - \bar{t})$, polarisation

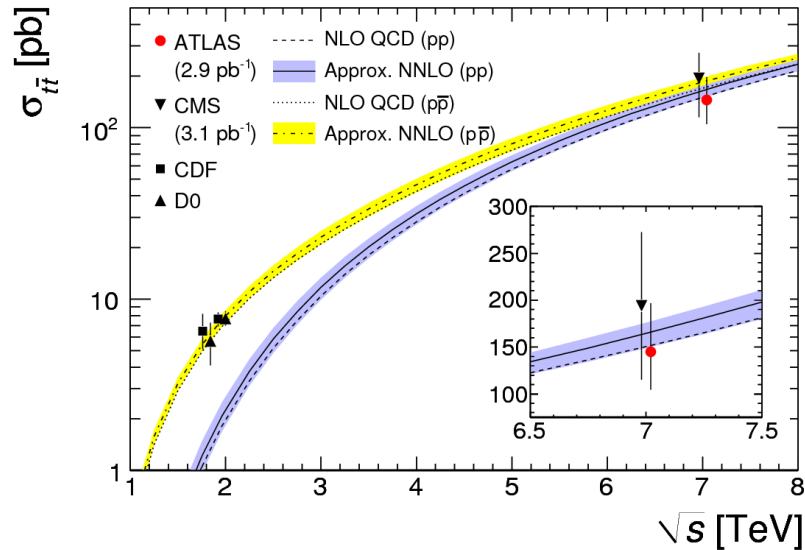


Quark Top

- Particule la plus lourde, masse "naturelle" ($\lambda_t \approx 1$)
Pourrait jouer un rôle particulier dans la brisure de symétrie électrofaible ?
- Se désintègre avant hadronisation ($\tau_t \approx 5 \times 10^{-25} \text{ s} \ll \Lambda_{\text{QCD}}^{-1}$)
Mesure directe de la masse par les produits de désintégrations (= $m_{\text{pôle}}$?)
- Production et désintégration du quark top = sensible à la nouvelle physique (nouveaux couplages, Z' « top-philic », violation de la conservation de la saveur)
- Mesures de précisions: m_{top} , Q_{top} , Γ_{top} , $|V_{tb}|$, $\Delta m(t - \bar{t})$, polarisation



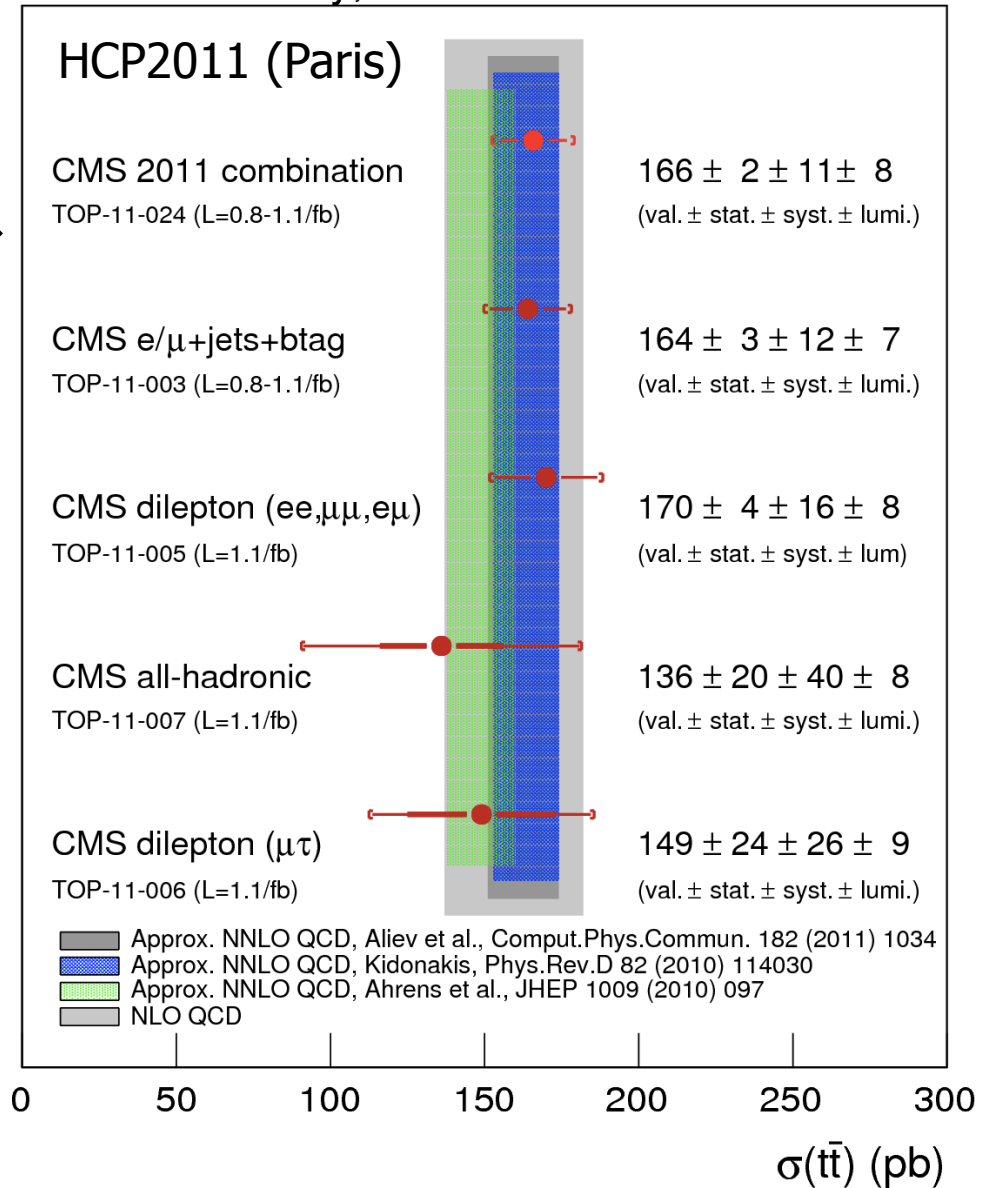
Top Pair Production Cross-Section



Précision $\sim 8\%$
(syst. Limited)

Sensibilité à diverses approximations à l'ordre NNLO !!!

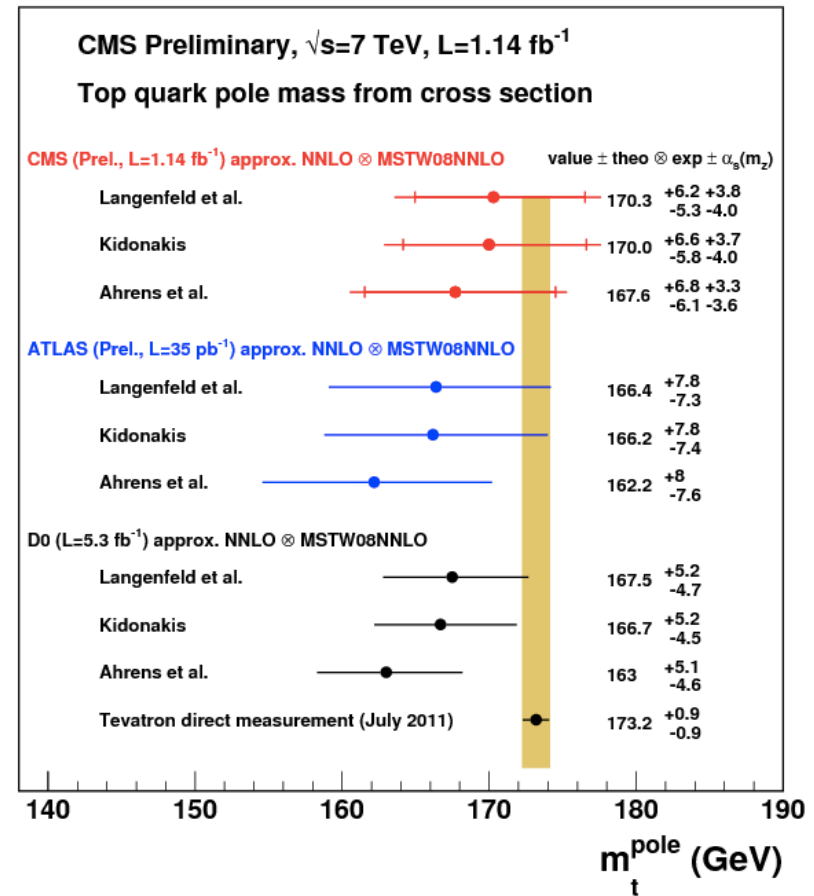
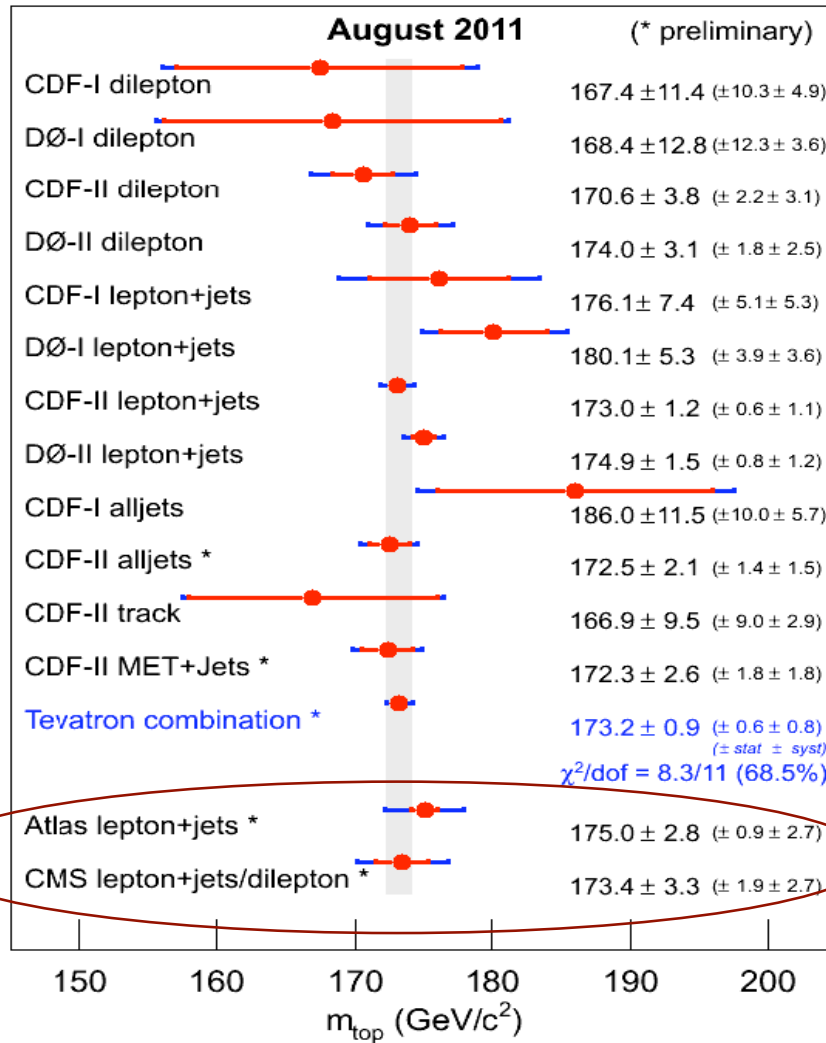
CMS Preliminary, $\sqrt{s}=7$ TeV



Top Mass

Mesure directe:

M. Galinaro, TOP2011



Brisure de la Symétrie Electrofaible

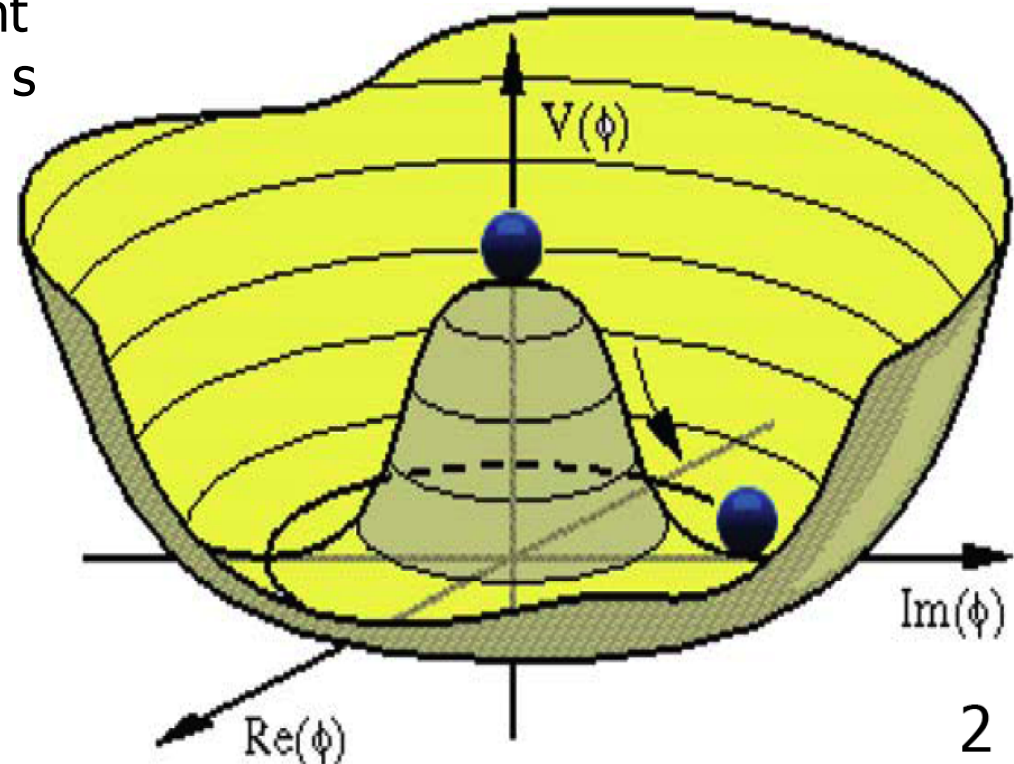
Il existe un champ scalaire présent dans tout l'univers, apparu $\sim 10^{-12}$ s après le Big Bang

Ce champ est responsable de la brisure spontanée de la symétrie électrofaible

Les bosons Z^0 et W^\pm acquièrent une masse

Les fermions élémentaires interagissent et acquièrent une masse

(i.e. les composantes gauches et droites se mélangent !)



Il doit exister au moins un boson scalaire associé au champ, le boson de Higgs

Le Boson de Higgs

Recall: 1 doublet de champs de Higgs \Rightarrow 1 boson physique (CP-pair)
 M_H est un paramètre libre ... $M_H^2 = 2 \lambda v^2$; $v \sim 246 \text{ GeV}$

Theory Constraints:

Unitarity:

$$M_H < 700 - 800 \text{ GeV}/c^2$$

“Triviality” (Higgs self-coupling remains finite :)

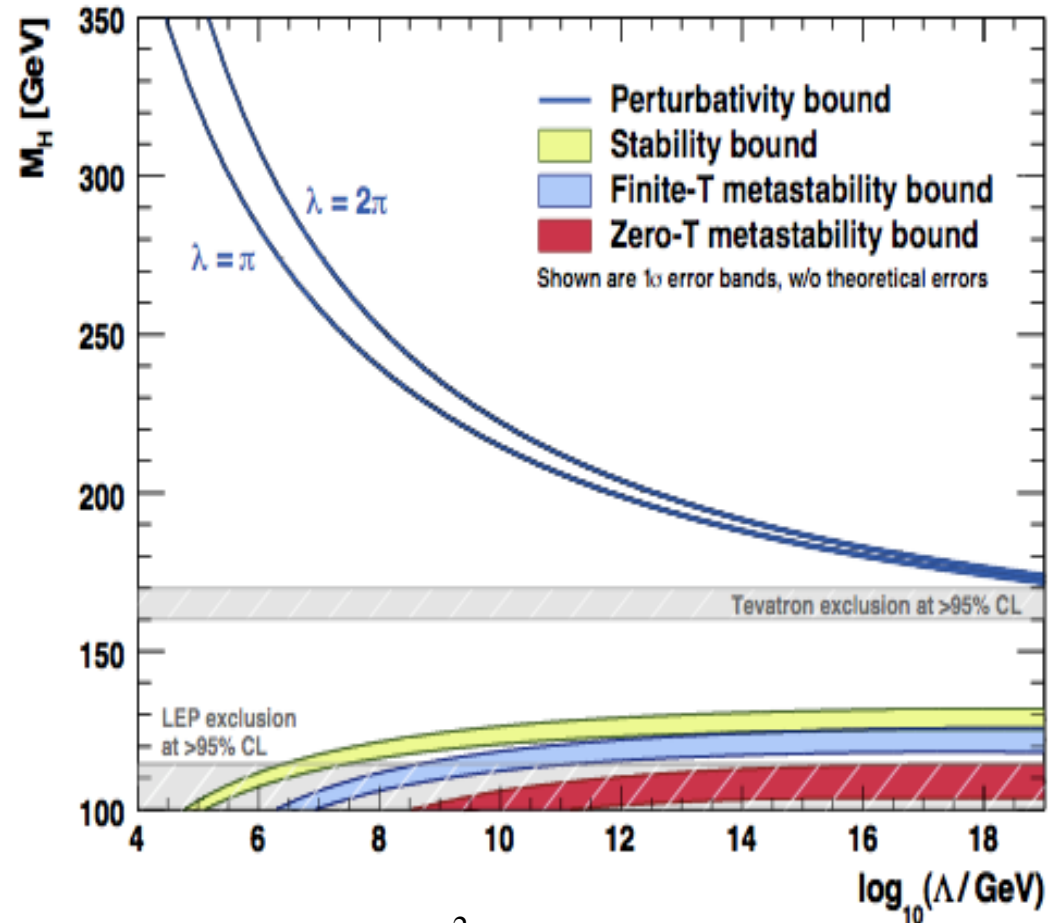
$$M_H^2 < \frac{4\pi^2 v^2}{3 \ln(\Lambda/v)}$$

“Stability” of vacuum:

$$M_H^2 > \frac{4m_t^4}{\pi^2 v^2} \ln(\Lambda/v)$$

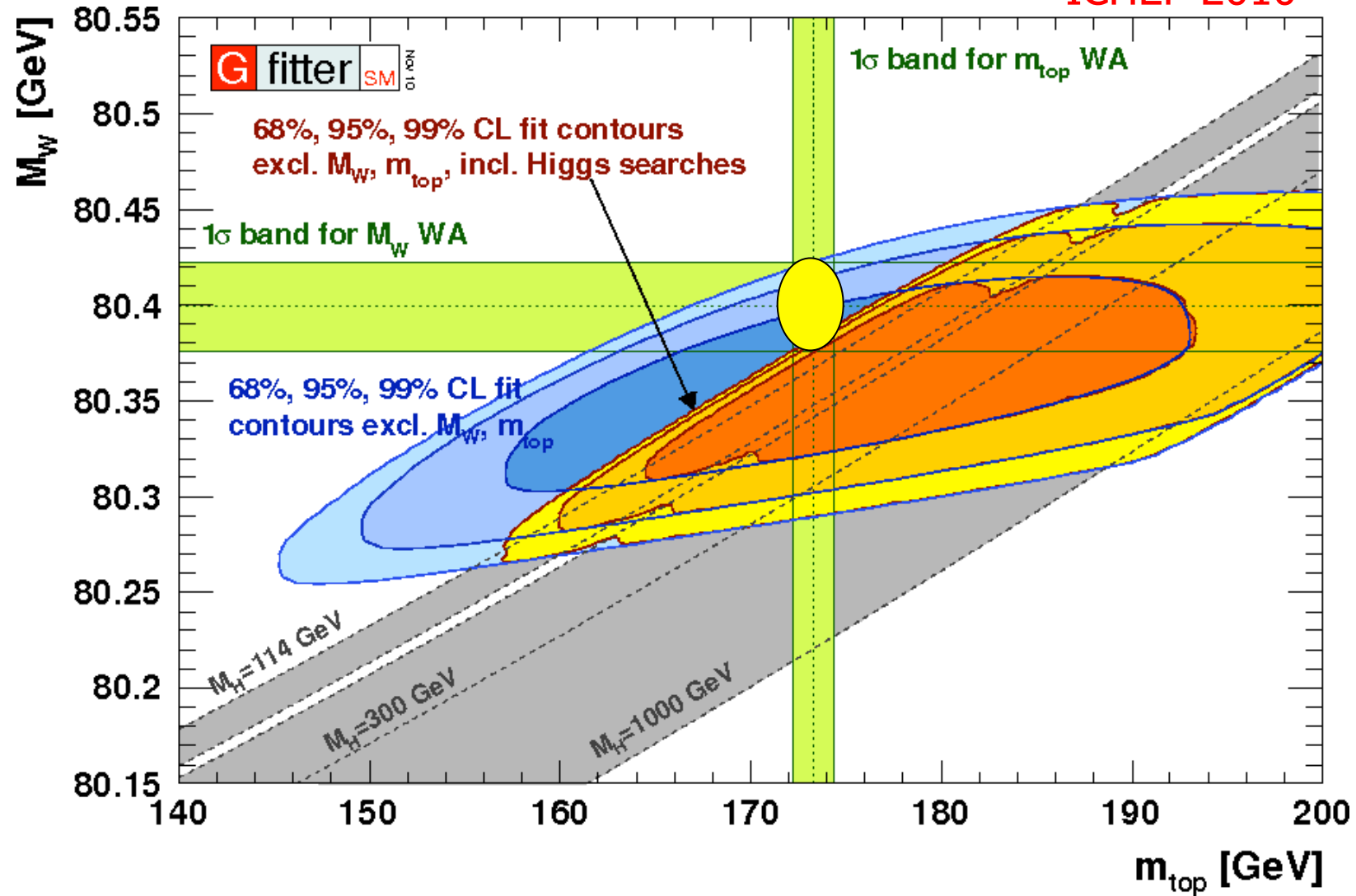
$\Lambda =$ cut-off scale

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

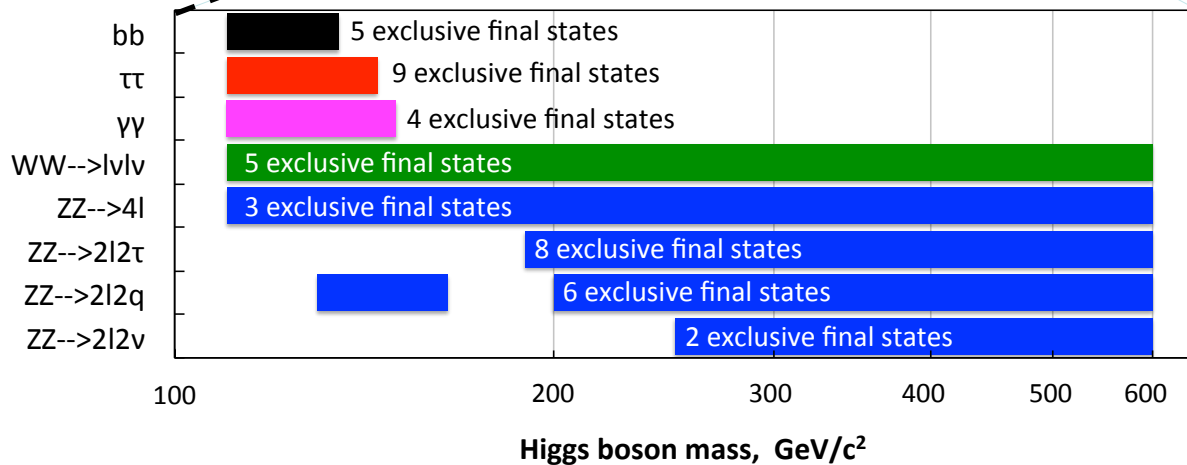
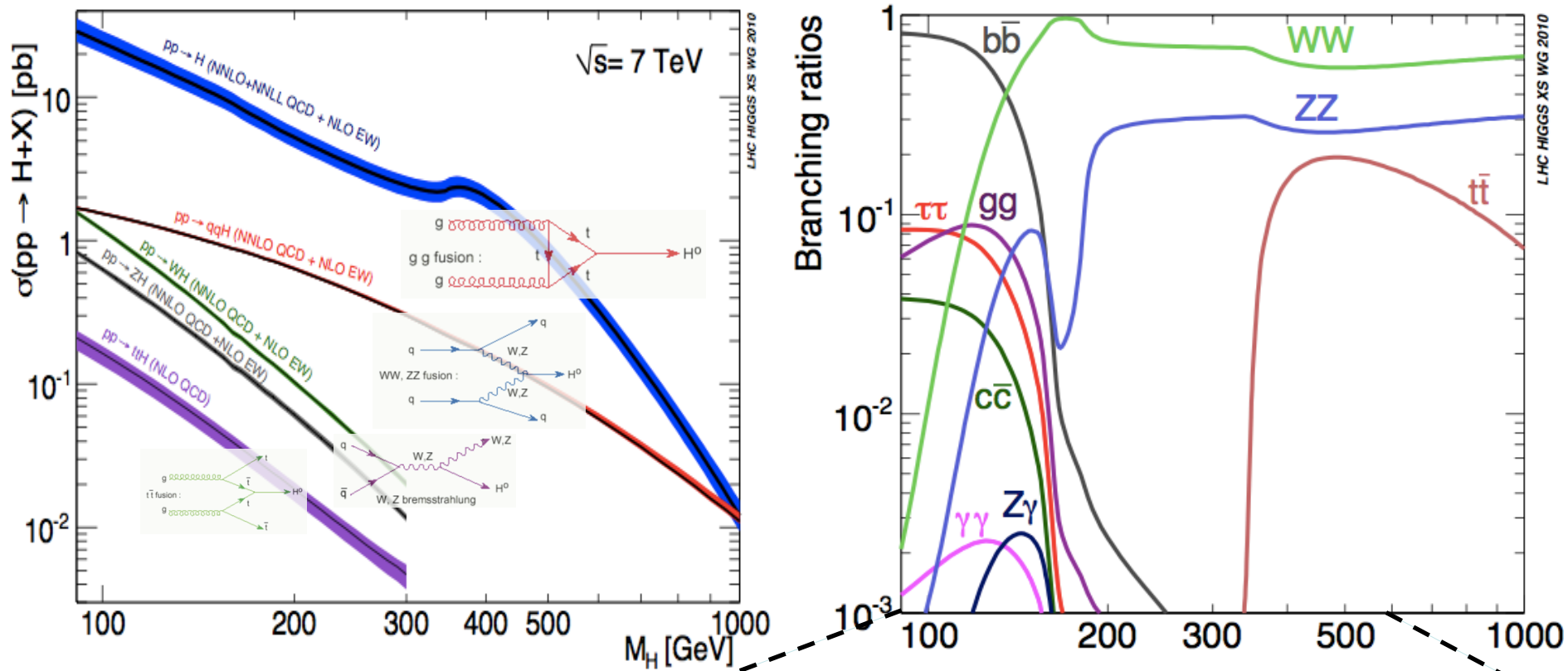


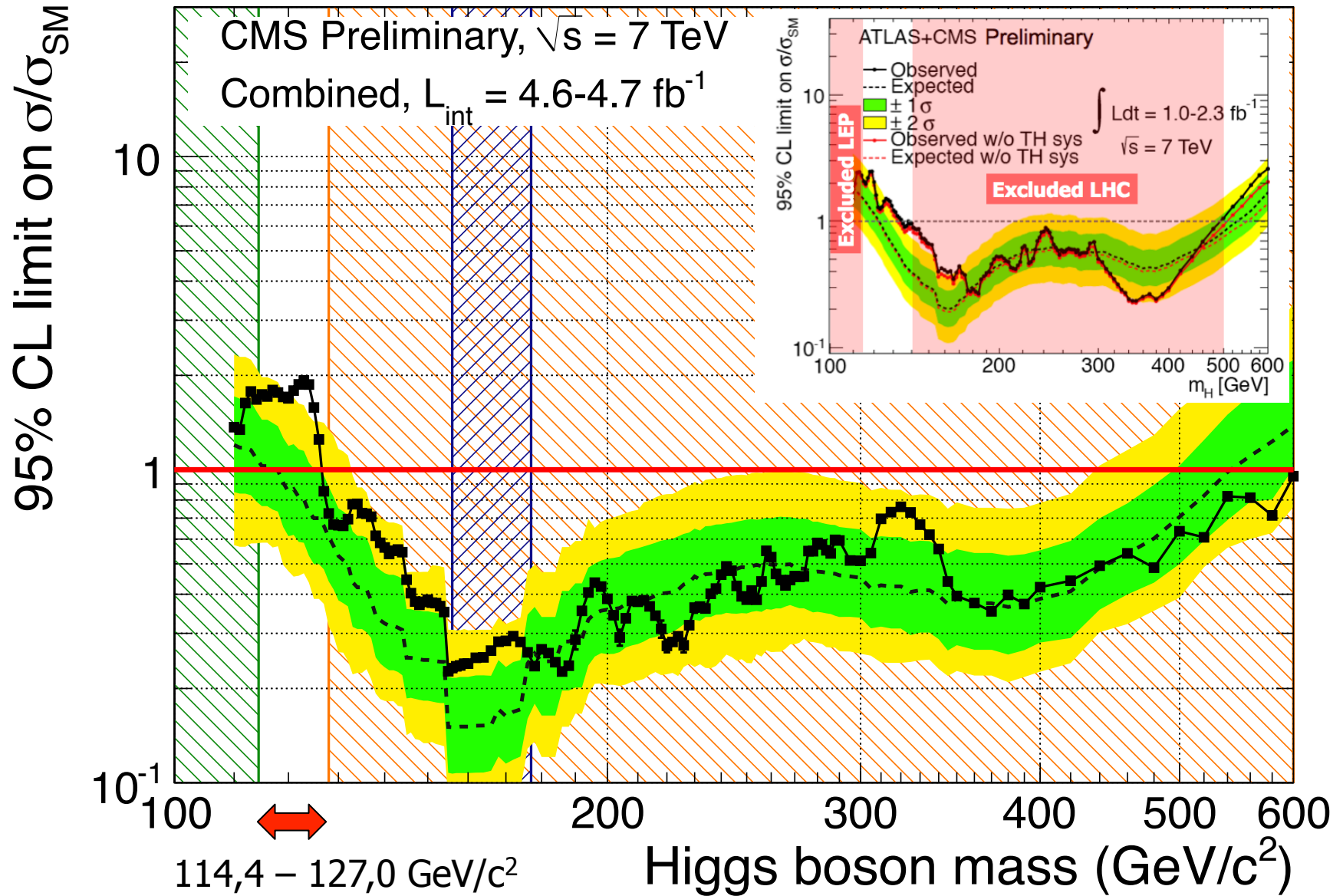
Ajustement EW et contraintes de masse

ICHEP 2010

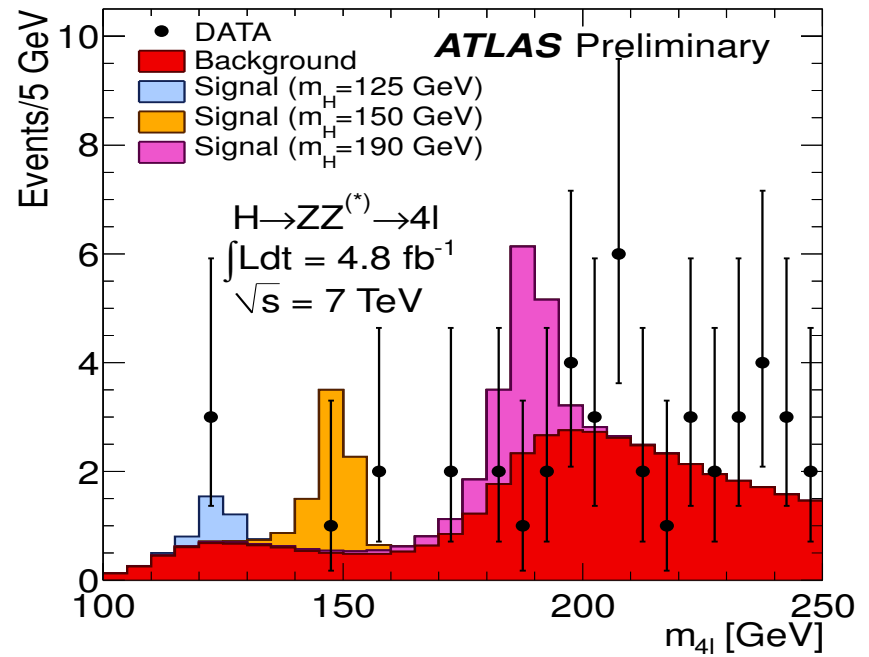
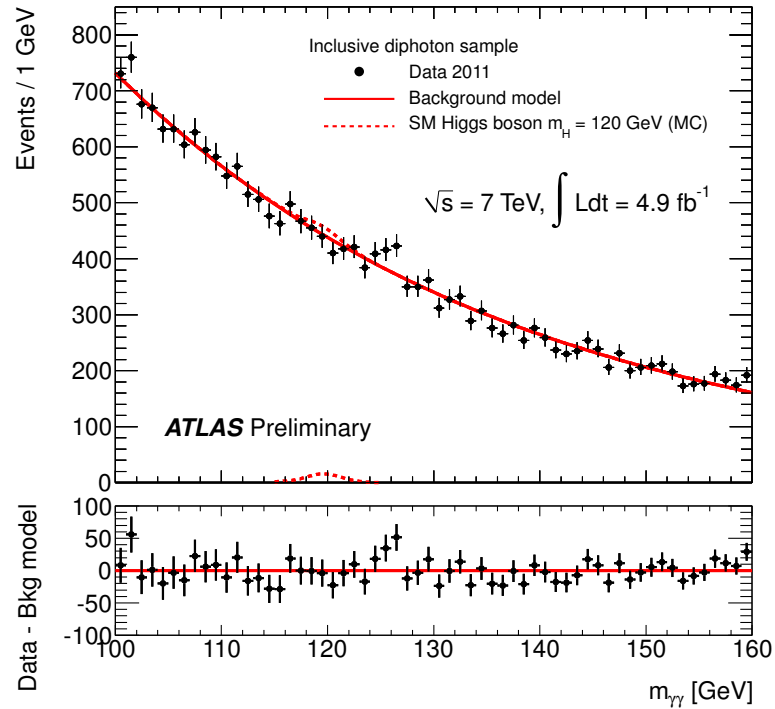
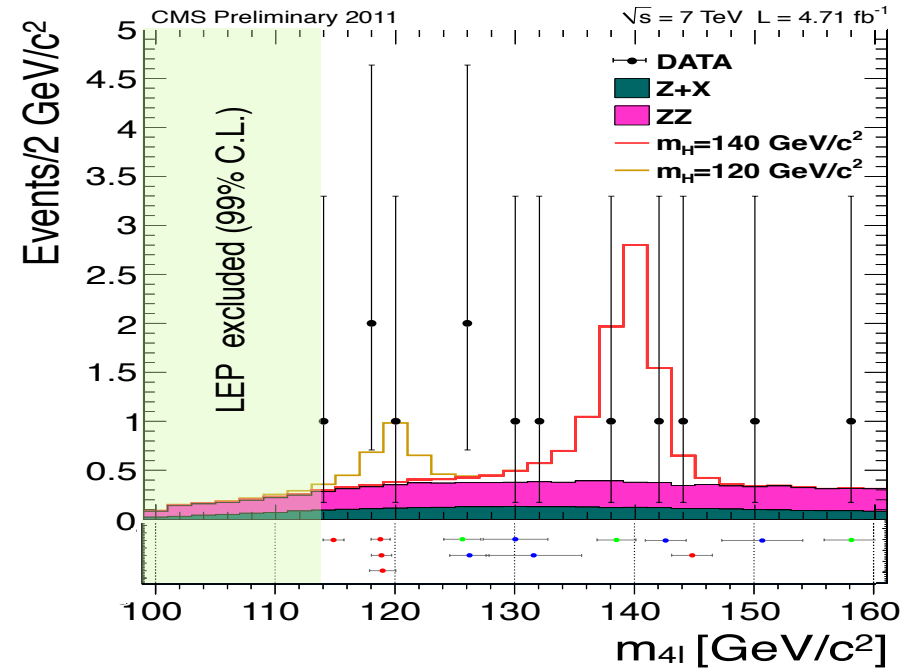
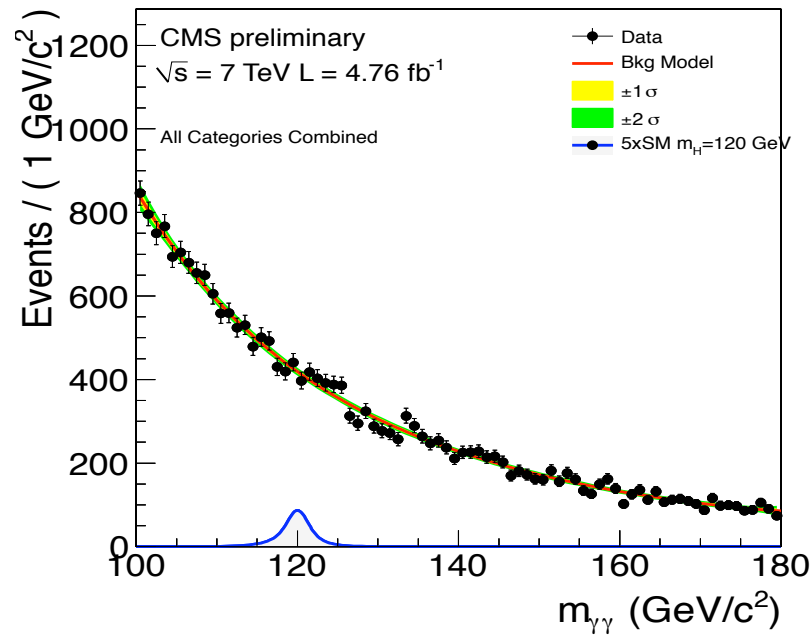


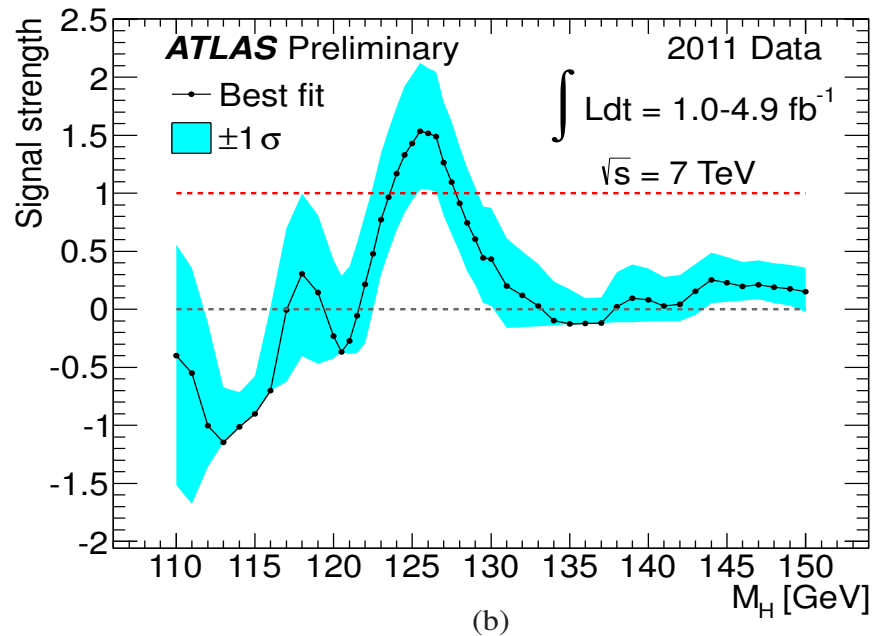
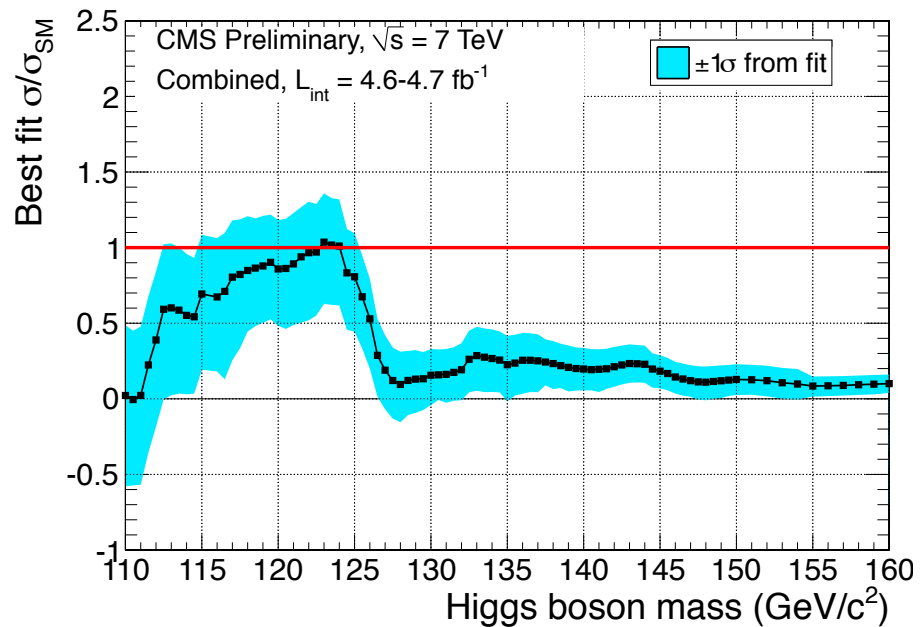
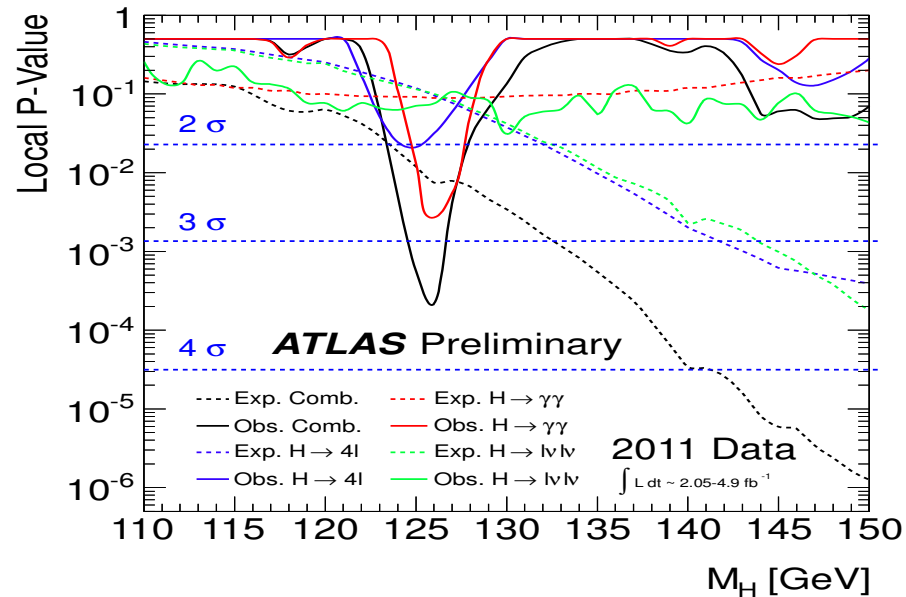
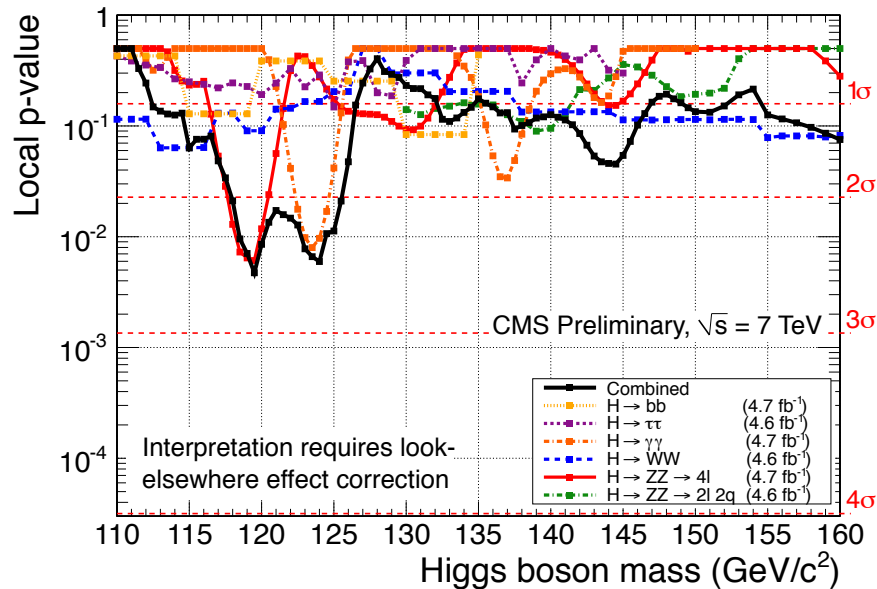
Boson de Higgs: Production et désintégration



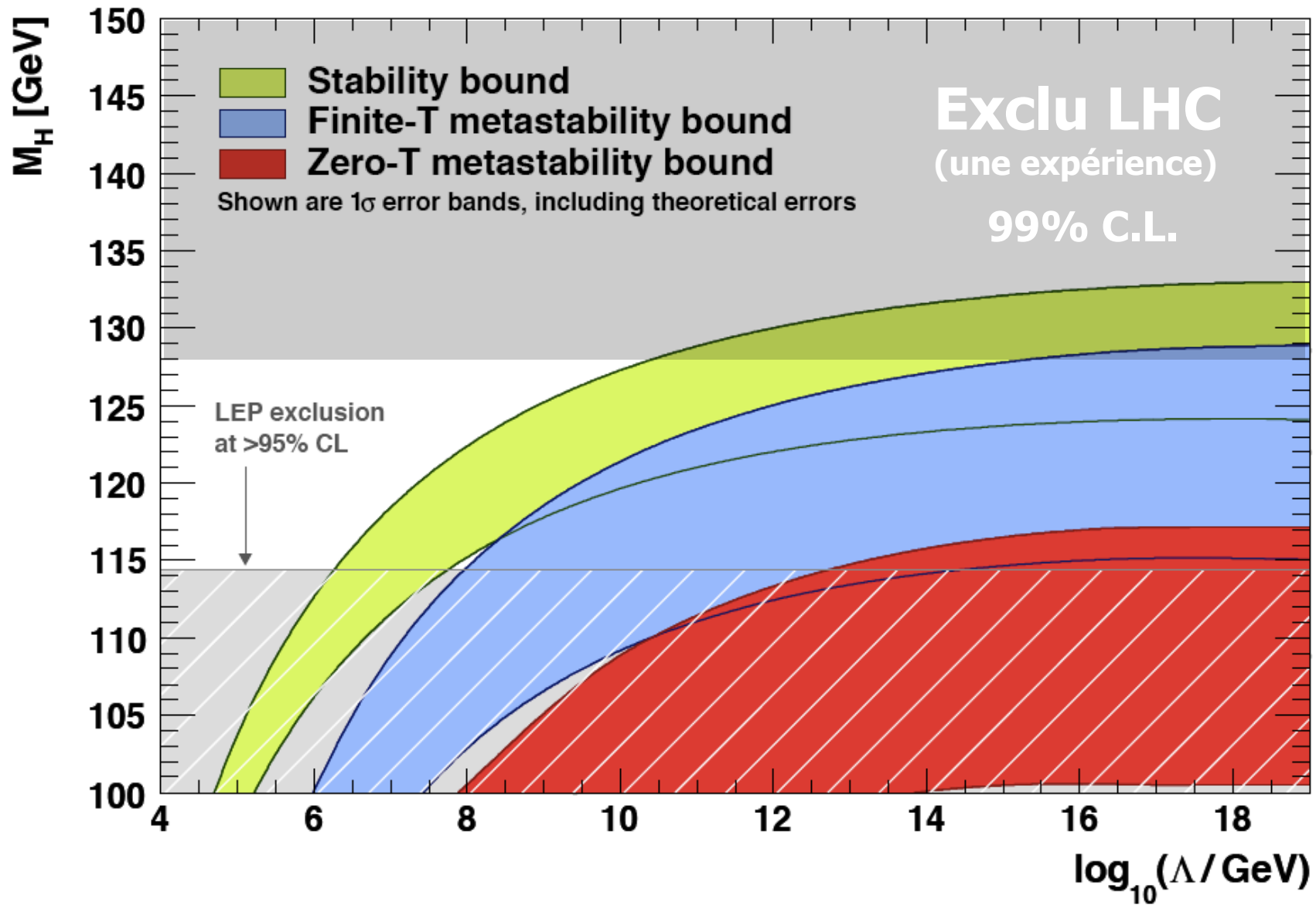


Zone permise pour le boson de Higgs du modèle standard

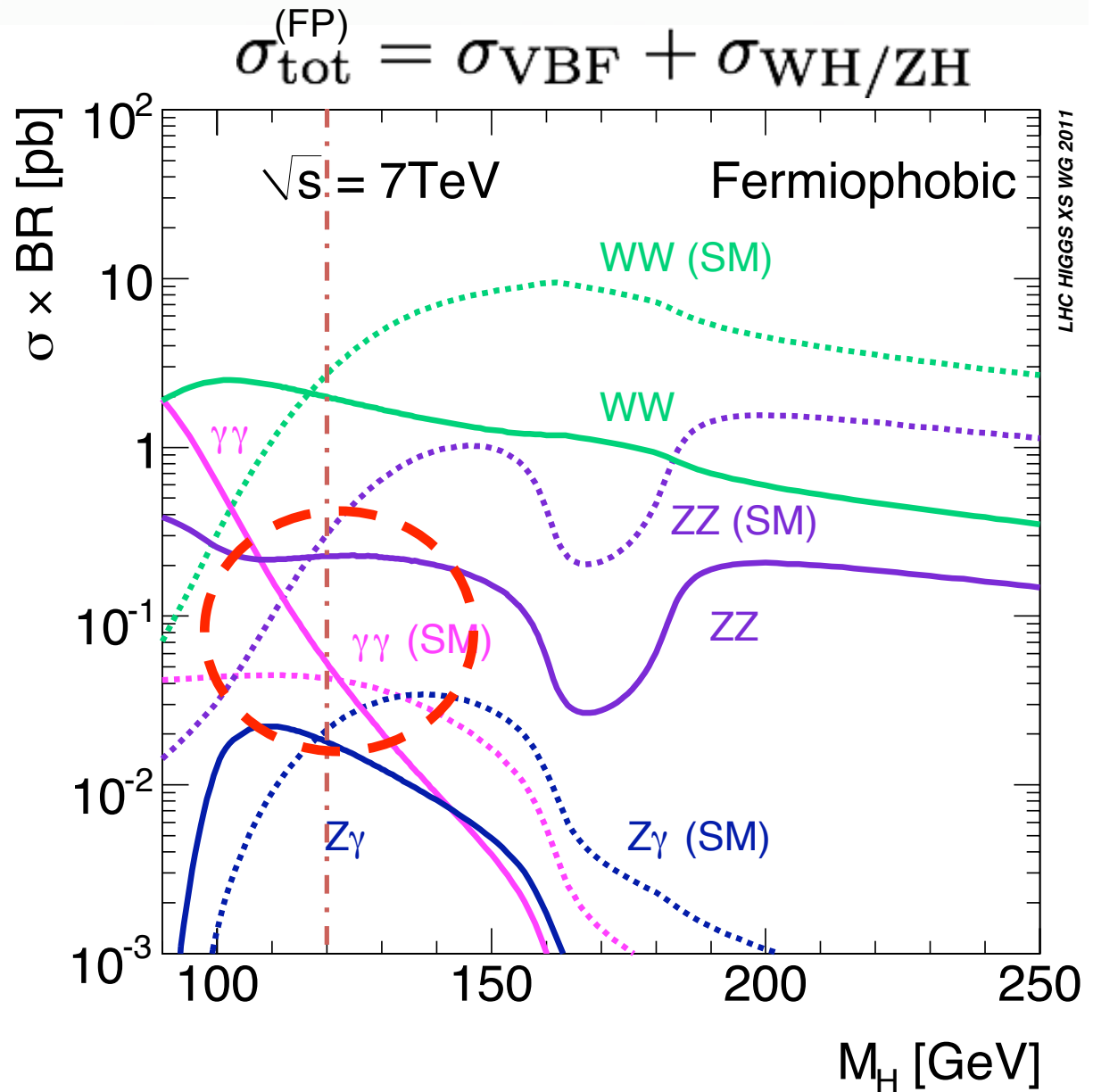
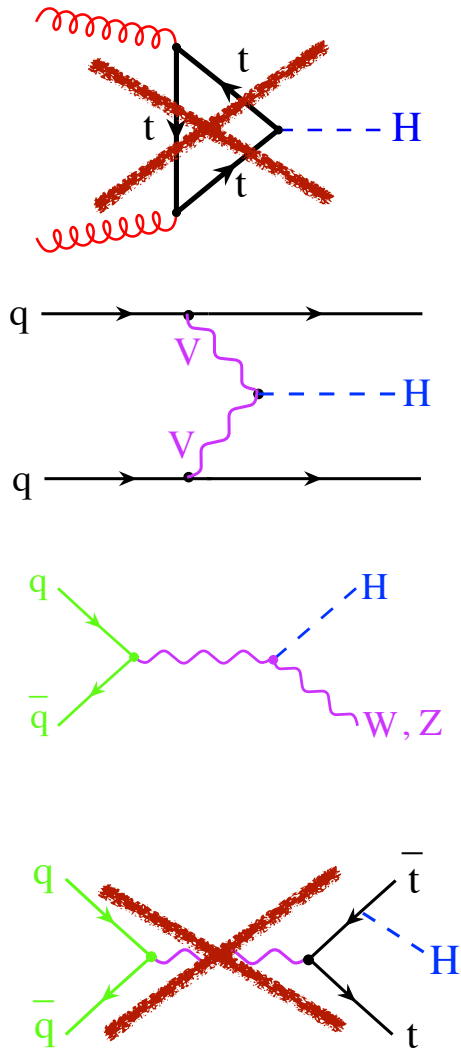




(b)

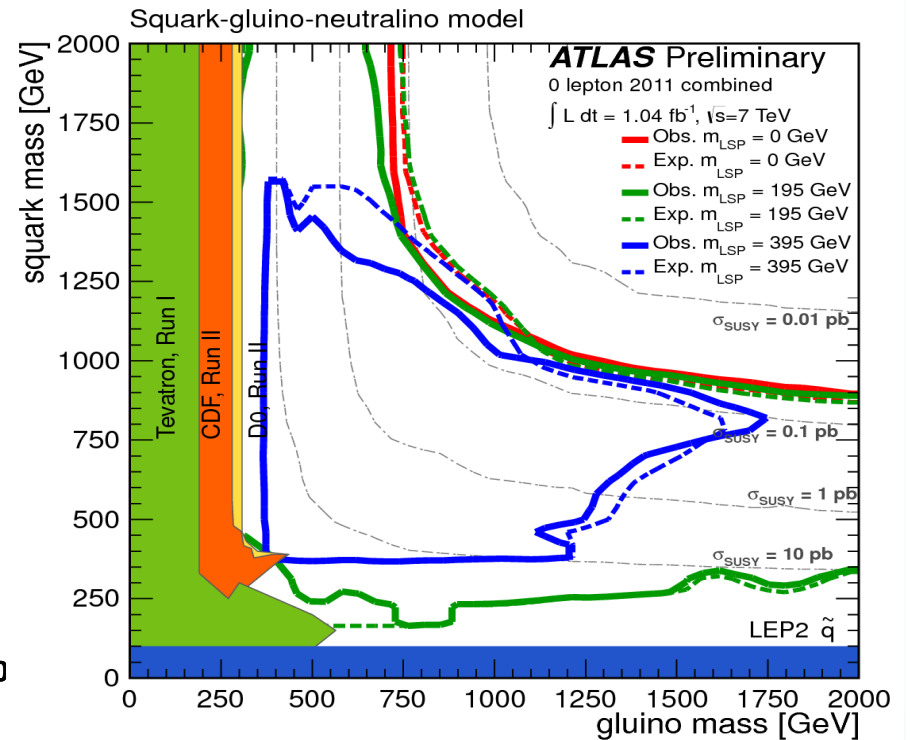
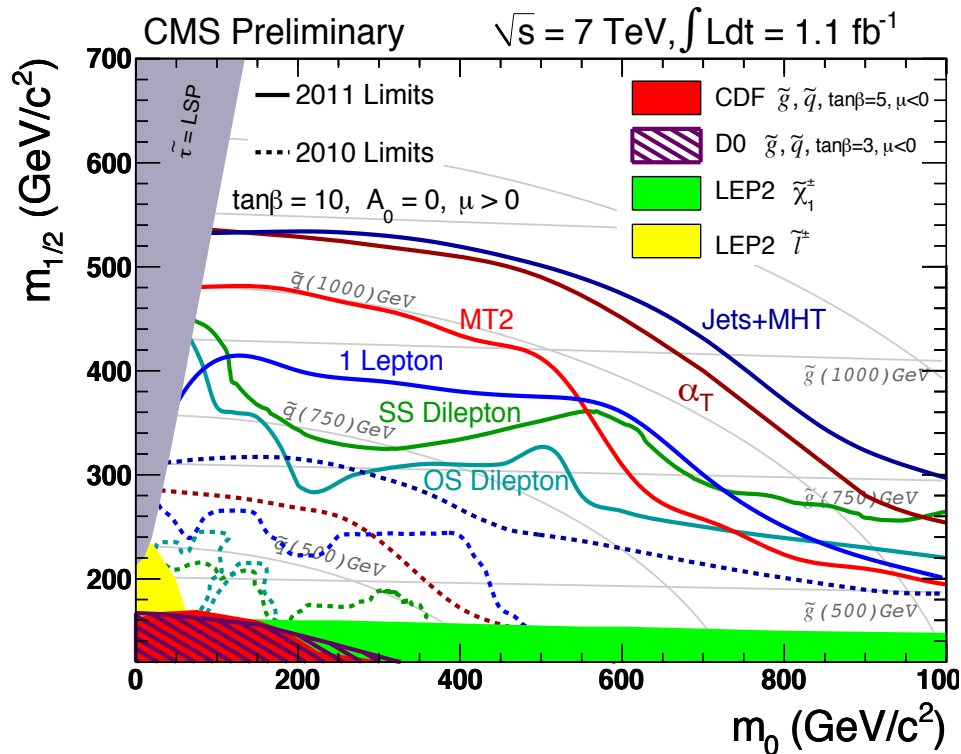


Modèle Standard ou Fermiophobic ?



Au-delà du modèle Standard ?

e.g. Supersymétrie



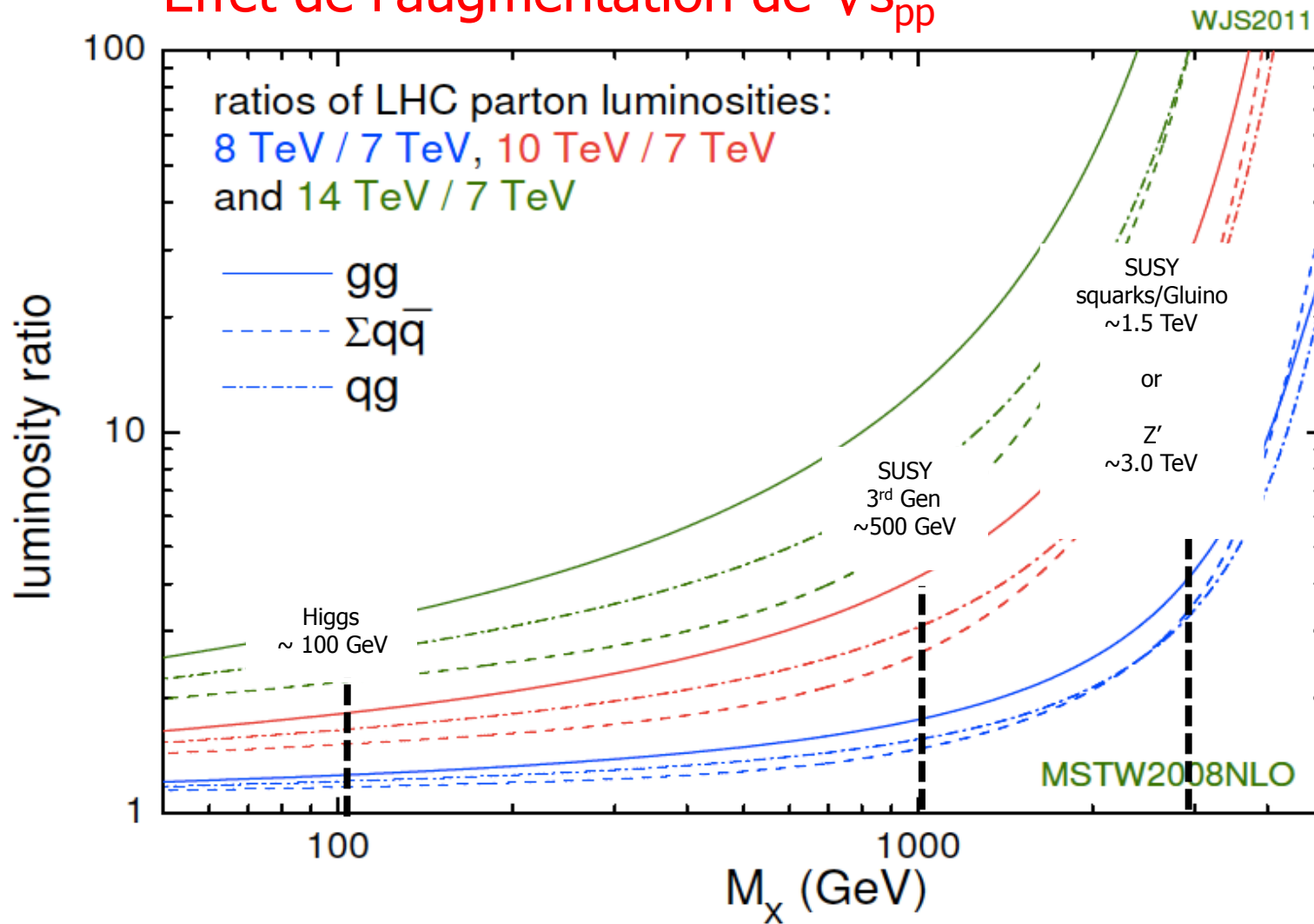
Exclusion jusqu'au $\sim \text{TeV}$ des squarks et des gluinos

e.g. Recherche de résonances au TeV (di-leptons, di-jets)

Exclusion Graviton RS ($\sim 2 \text{ TeV}$), CI ($\sim 10 \text{ TeV}$),
 Z'_{SSM} ou W'_{SSM} ($\sim 2 \text{ TeV}$), etc.

Ce n'est que le début de l'aventure ...

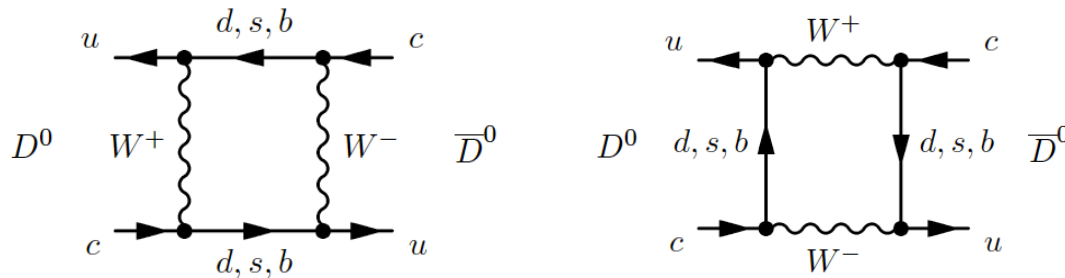
Effet de l'augmentation de \sqrt{s}_{pp}



Désintégration du quark charmé

1^{ère} évidence de violation CP en désintégration

- Intérêt augmenté depuis l'observation du mélange D^0



- La physique « charmée » conserve CP au premier ordre

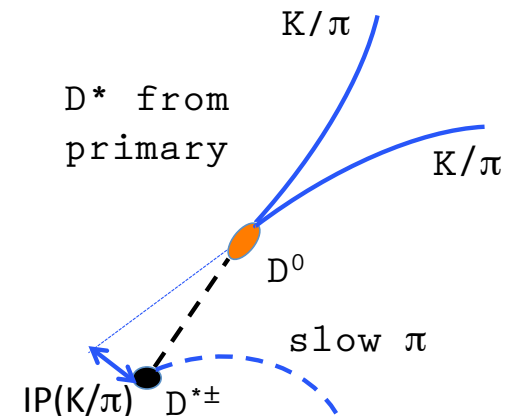
Triangle d'unitarité pour le charm $V_{ud}V_{cd}^* + V_{us}V_{cs}^* + V_{ub}V_{cb}^* = 0$
 $\sim \lambda \quad \sim \lambda \quad \sim \lambda^5$

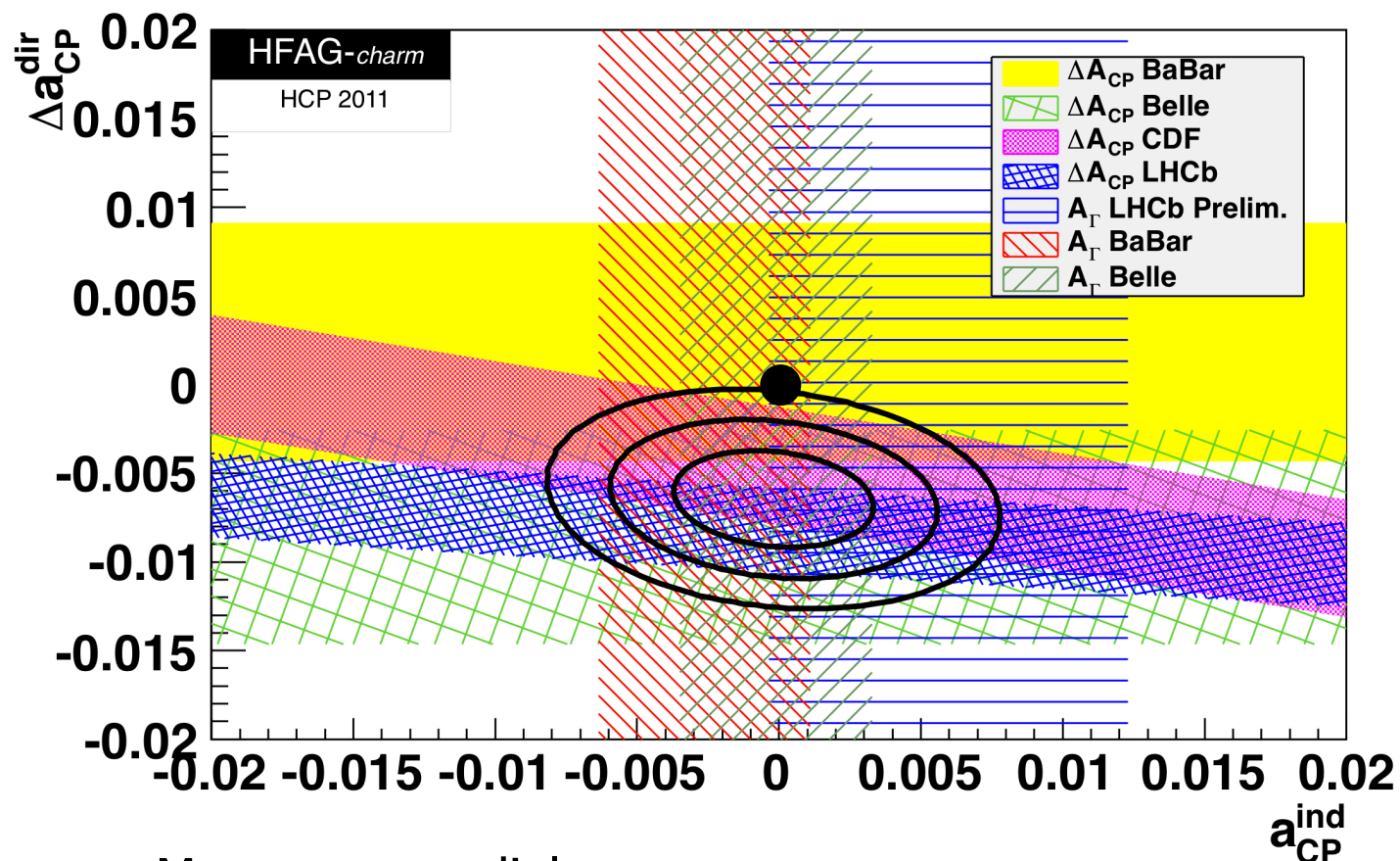
- La physique au-delà du modèle standard peut augmenter la sensibilité des observables de la violation CP

⇒ Recherche « directe » via

$$A_{CP}(f) = \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow f)}{\Gamma(D^0 \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow f)}$$

↔ KK or ππ





Moyenne mondiale:

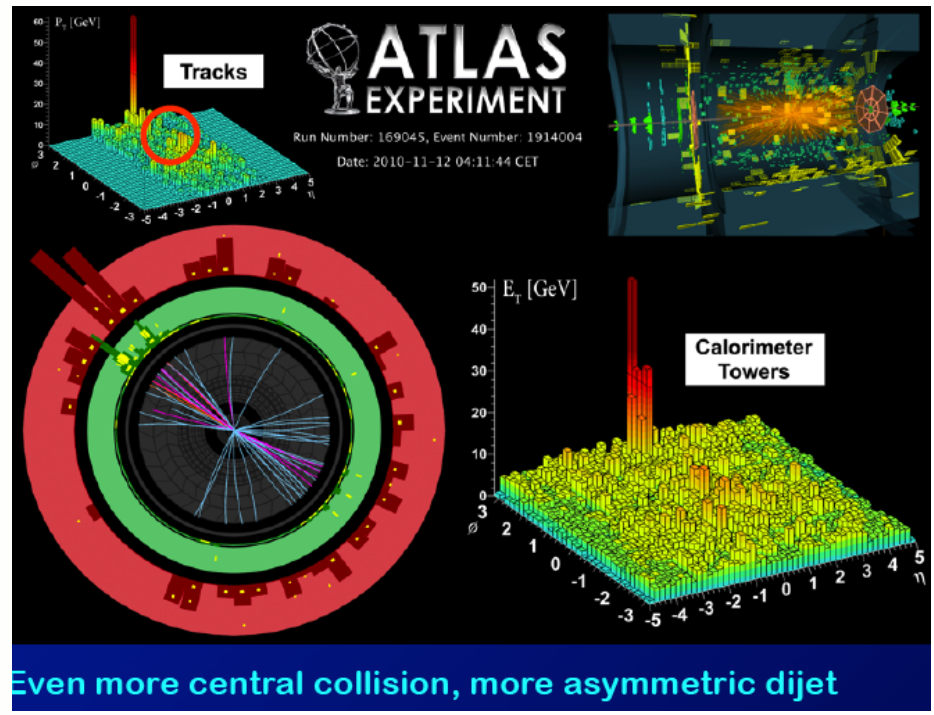
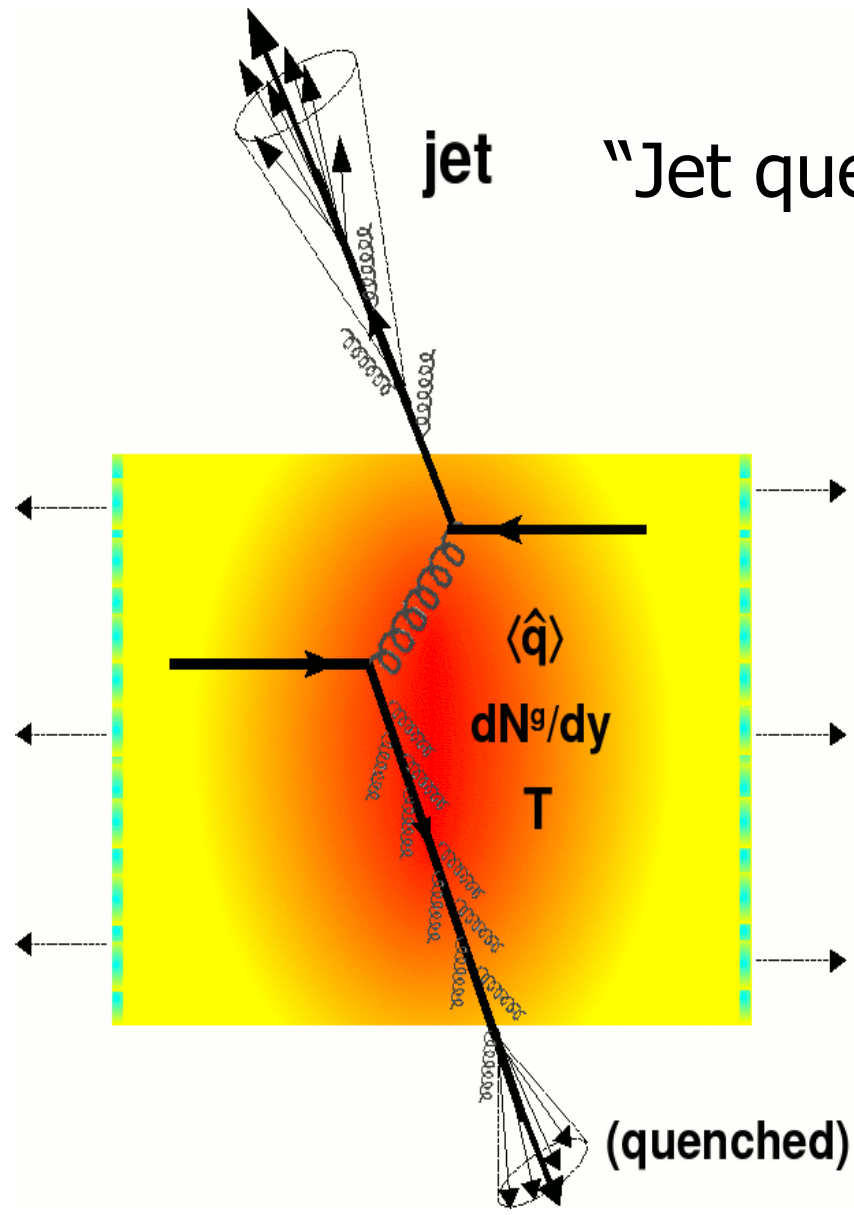
$$a_{CP}^{ind} = (-0.02 \pm 0.23)\% \quad \Delta a_{CP}^{dir} = (-0.65 \pm 0.18)\%$$

Résultat LHCb:

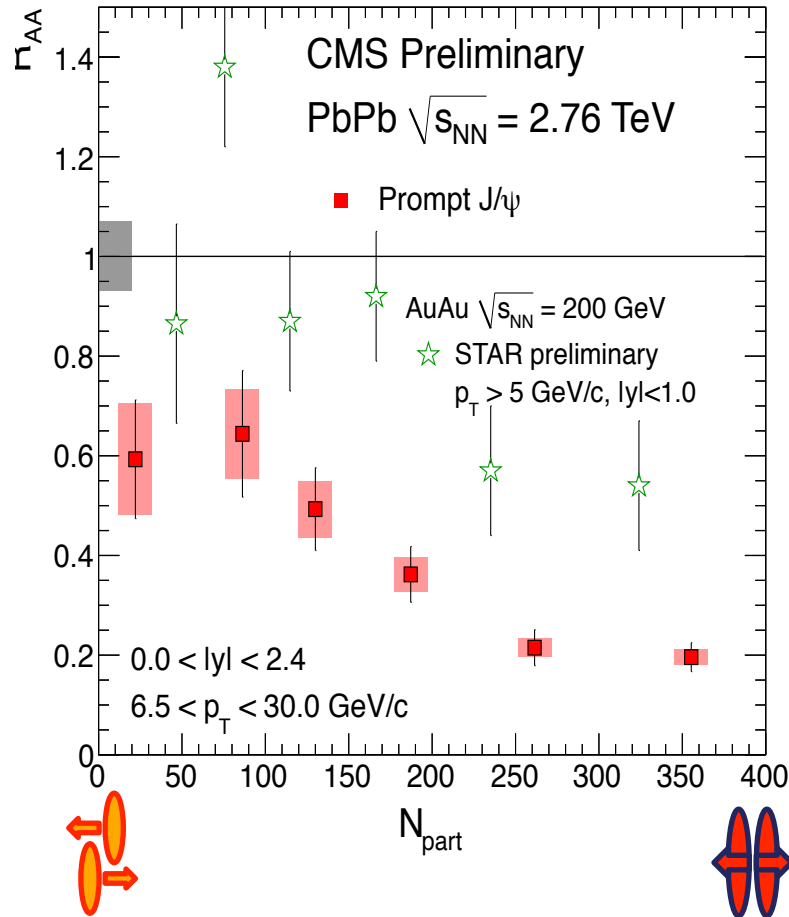
$$\Delta A_{CP} = [-0.82 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{sys.})] \%$$

Significance: 3.5 σ

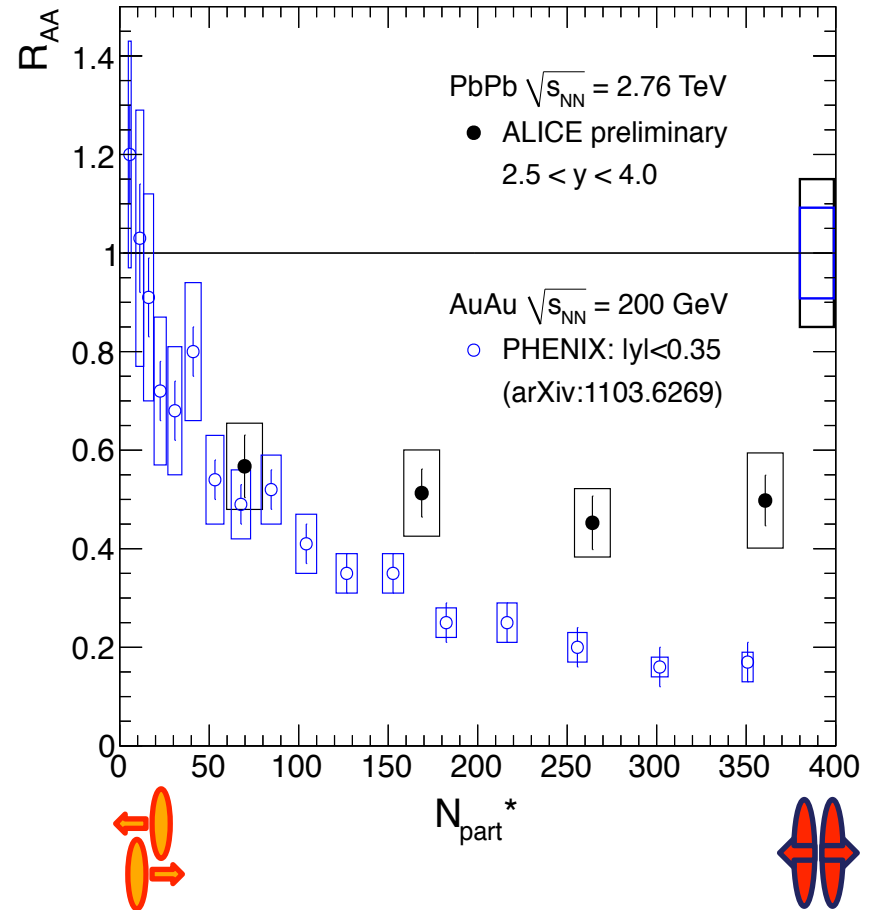
jet "Jet quenching"



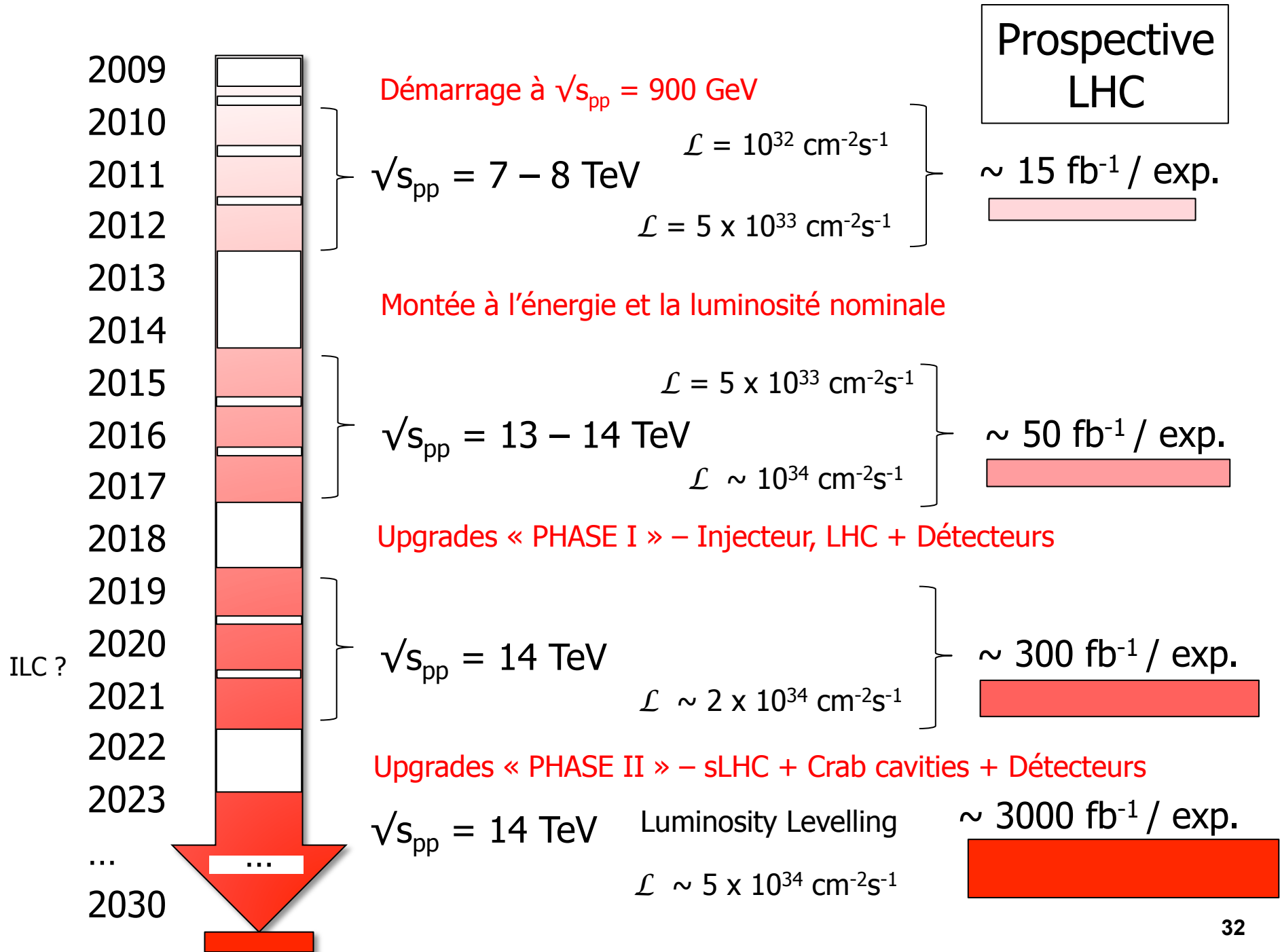
"Quarkonia"



Les J/ ψ de grand p_T sont plus
 plus fortement supprimé qu'au
 RHIC



Indication d'une régénération des
 J/ ψ ?



Conclusions

CONCLUSIONS

- Une moisson très importante de données furent collectées au LHC en 2011 ($140 \times L^{pp}_{2010}$, $15 \times L^{PbPb}_{2010}$)
- Déjà plus de 225 publications par les quatre expériences utilisant des données de collisions et couvrant tout le programme du LHC
- Plus de 500 papiers (avec revue interne) pour résultats préliminaires ("Conference Notes", "Physics Analysis Summaries", "Conference Contributions" ...)
- L'année 2012 devrait être décisive pour la découverte (ou l'exclusion) définitive du boson de Higgs ... seule une zone de basse masse reste compatible avec le modèle standard.
- L'aventure ne fait que commencer pour la recherche de supersymétrie et autres particules exotiques à l'échelle multi-TeV (gain en \sqrt{s} attendu en 2014)