

MODÈLE STANDARD ET BOSON DE HIGGS:

Une introduction

Nicolas Morange
JRJC 2015

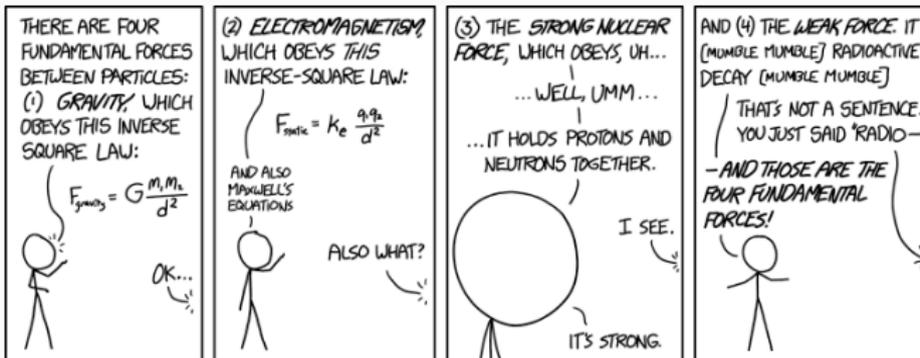


EN THÉORIE (VUE PAR UN EXPÉRI-
MENTATEUR)

Une théorie pour décrire

- Tout le contenu en matière de l'univers...
- Toutes les interactions fondamentales...
- Leptons, quarks, bosons
- Spins, masses

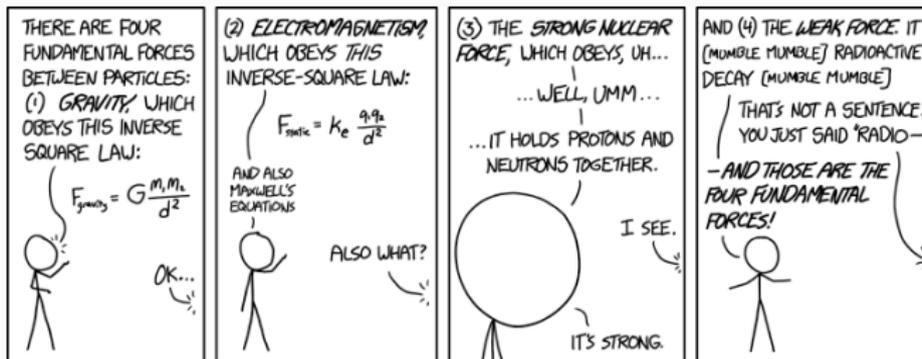
FERMIONS	LEPTONS (insensibles à la force forte)	QUARKS (sensibles à toutes les forces)		
1 ^{ère} Génération (matière ordinaire)	Electron Neutrino Electronique	Up	Down	
2 ^{ème} Génération	Muon Neutrino Muonique	Strange	Charmed	
3 ^{ème} Génération	Tau Neutrino Tauonique	Bottom	Top	
BOSONS DE GAUGES	Photon (électromagnétisme)	8 Gluons (force forte)	W ⁺ W ⁻ Z ⁰ (force faible)	Higgs (masse)

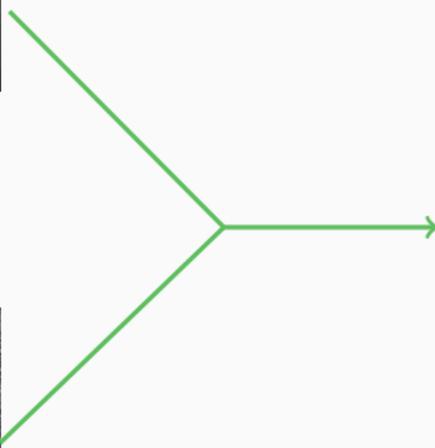
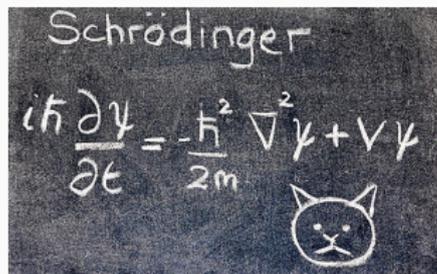
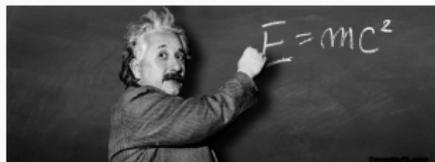


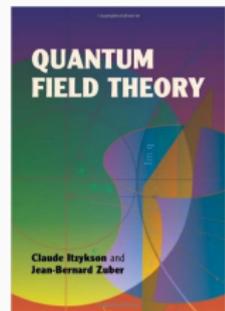
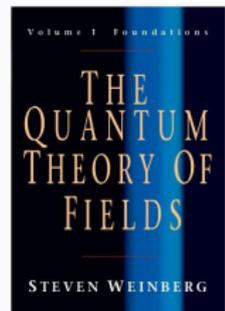
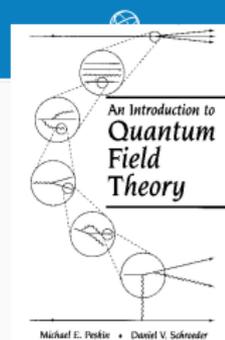
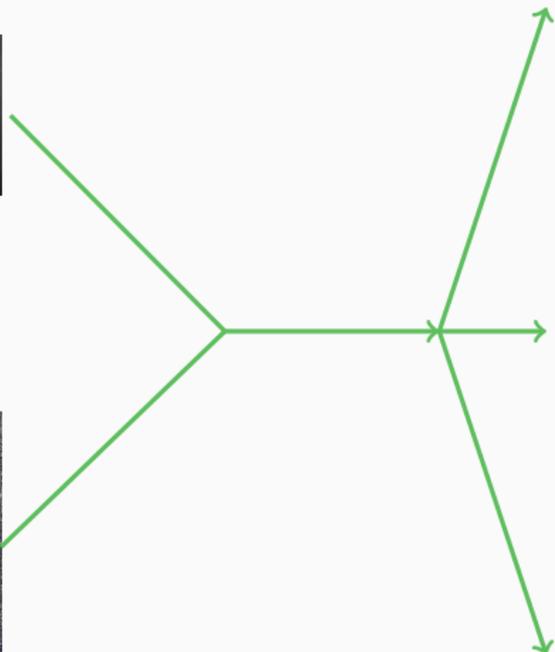
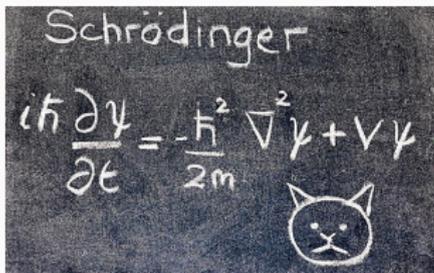
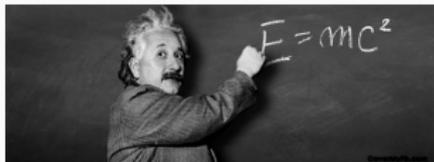
Une théorie pour décrire

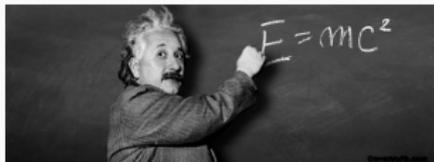
- Tout le contenu en matière de l'univers...
 - ... enfin presque
- Toutes les interactions fondamentales...
 - ... enfin presque
- Leptons, quarks, bosons
- Spins, masses

FERMIONS	LEPTONS (<i>insensibles à la force forte</i>)	QUARKS (<i>sensibles à toutes les forces</i>)		
1 ^{ère} Génération (matière ordinaire)	Electron 	Neutrino 	Up 	Down
2 ^{ème} Génération	Muon 	Neutrino 	Strange 	Charmed
3 ^{ème} Génération	Tau 	Neutrino 	Bottom 	Top
BOSONS DE GAUGES	Photon (<i>électromagnétisme</i>) 	8 Gluons (<i>force forte</i>) 	W ⁺ W ⁻ Z ⁰ (<i>force faible</i>) 	Higgs (<i>masse</i>)

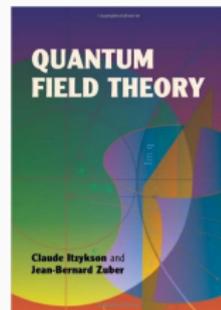
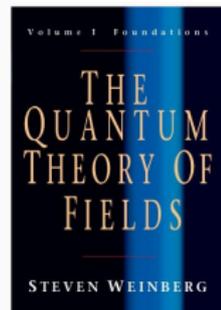
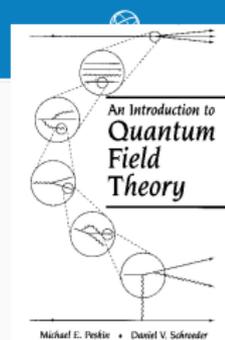
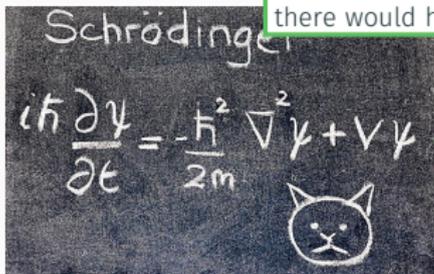








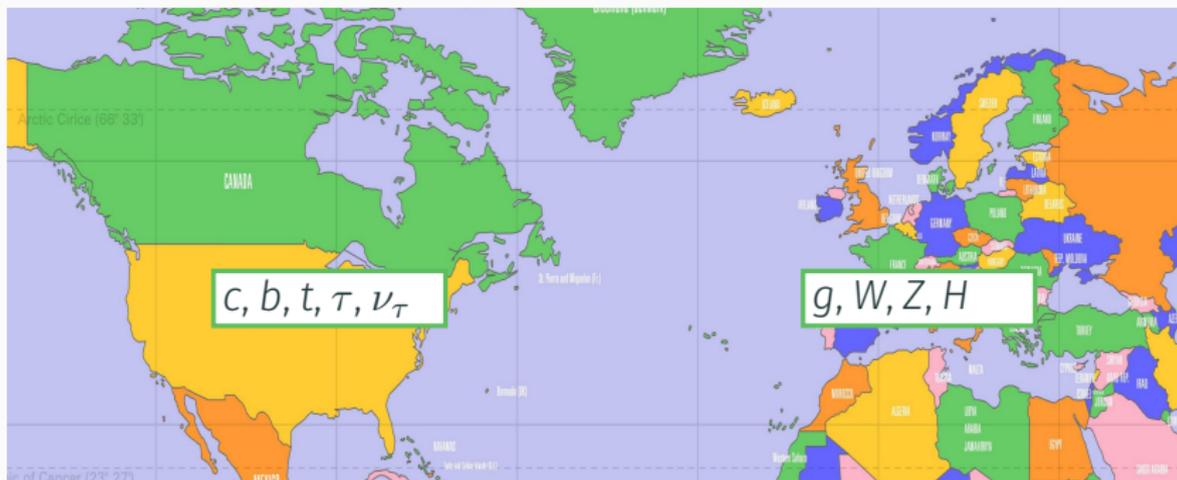
The little groups $SO(2, 1)$ and $SO(3, 1)$ for $p^2 > 0$ and $p^\mu = 0$ have no non-trivial finite-dimensional unitary representations, so if there are any states with a given momentum p^μ with $p^2 > 0$ or $p^\mu = 0$ that transform non-trivially under the little group, there would have been an infinite number of them.



- Relation symétries \Leftrightarrow lois de conservation
- Invariance de Lorentz
- Symétries de jauge
- Symétries exactes ou brisées

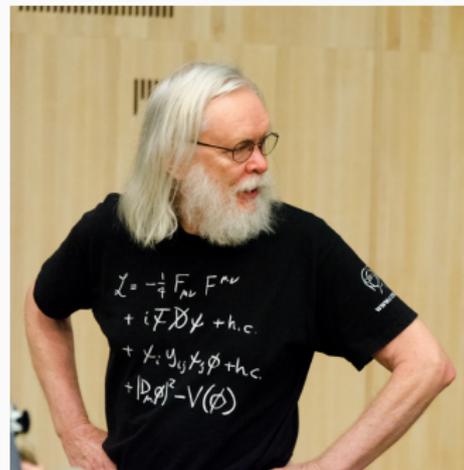


- Relation symétries \Leftrightarrow lois de conservation
- Invariance de Lorentz
- Symétries de jauge
- Symétries exactes ou brisées



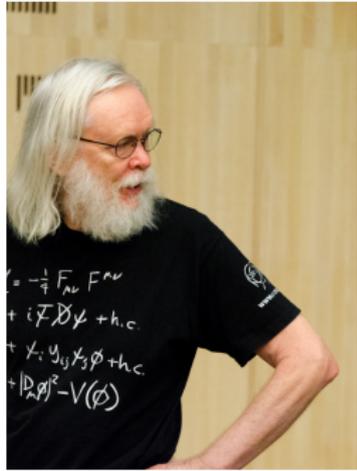
- Formulation lagrangienne
- Contrainte par les symétries
 - Aucune masse sauf celle du Higgs
 - 27 paramètres libres
- Contient la QCD et la théorie EW
- Renormalisable
- Calculs par diagrammes de Feynman

- Formulation lagrangienne
- Contrainte par les symétries
 - Aucune masse sauf celle du Higgs
 - 27 paramètres libres
- Contient la QCD et la théorie EW
- Renormalisable
- Calculs par diagrammes de Feynman
- Tient sur un t-shirt moche



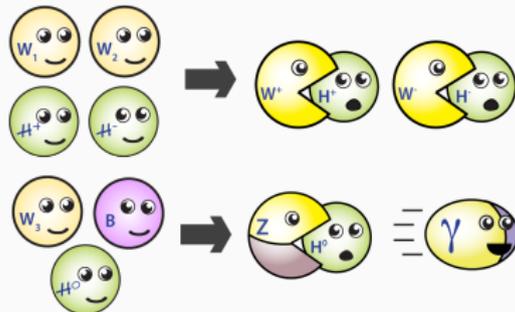
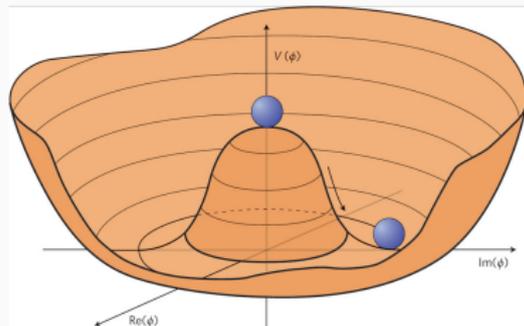
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\nu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{4}ig_s^2 (\bar{q}^i \gamma^\mu q^j) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_f f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w} M \phi^0 \phi^0 - \beta_1 [\frac{2M^2}{g^2} + \\
 & \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - ig_{cw} [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+ - \\
 & W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^-)] - ig_{sw} [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{2c_w^2}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\partial^\mu \phi^0 \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\partial^\mu \phi^0 \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{2c_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{sw} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig_{sw} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 \frac{2c_w^2}{c_w} W_\mu^+ [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{2c_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{2c_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{2c_w^2}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - e^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) e^\lambda - \bar{\nu} \lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) u_j^2 + \\
 & \bar{d}_j^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) d_j^2 + ig_{sw} A_\mu [-(e^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^2 \gamma^\mu u_j^2) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^2 \gamma^\mu d_j^2)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu} \lambda \gamma^\mu \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^2) + (\bar{d}_j^2 \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu} \lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\nu} d_j^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(e^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^2 C_{\lambda\nu}^+ \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} M [-\phi^+ (\bar{\nu} \lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} [H (e^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (e^\lambda \gamma^\mu e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_\nu^2 (\bar{u}_j^2 C_{\lambda\nu} (1 - \gamma^5) d_j^2) + \\
 & m_\nu^2 (\bar{d}_j^2 C_{\lambda\nu} (1 + \gamma^5) d_j^2)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\nu^2 (\bar{d}_j^2 C_{\lambda\nu}^+ (1 + \gamma^5) u_j^2) - m_\nu^2 (\bar{u}_j^2 C_{\lambda\nu}^+ (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^2)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^2 u_j^2) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{d}_j^2 d_j^2) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^2 \gamma^5 u_j^2) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{c_w} \phi^0 (\bar{d}_j^2 \gamma^5 d_j^2) + X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + X^- (\partial^2 - M^2) X^- + X^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

- Formulation lagrangien
- Contrainte par les symétries
 - Aucune masse
 - 27 paramètres libres
- Contient la QCD et l'électrodynamique
- Renormalisable
- Calculs par diagrammes de Feynman
- Tient sur un t-shirt



Brisure de symétrie

- Groupe de jauge $SU(2) \otimes U(1)$
- Champ de Higgs: doublet de champs scalaires complexes, potentiel $V(\phi^\dagger \phi) = -m^2 \phi^\dagger \phi + \lambda(\phi^\dagger \phi)^2$
 ⇒ VEV non-nulle
- Brisure de symétrie
 ⇒ Bosons W , Z , et γ
 ⇒ Masses des bosons
 ⇒ Degré de liberté restant: boson de Higgs



Masses des fermions

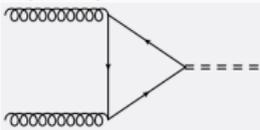
- Termes de Yukawa: $y_i \bar{\psi} \phi \psi$
- Masses grâce à la vev
- Hiérarchie de masse ⇒ Hiérarchie de couplages

Prédictions du MS

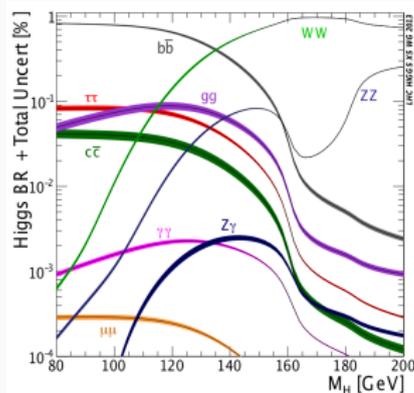
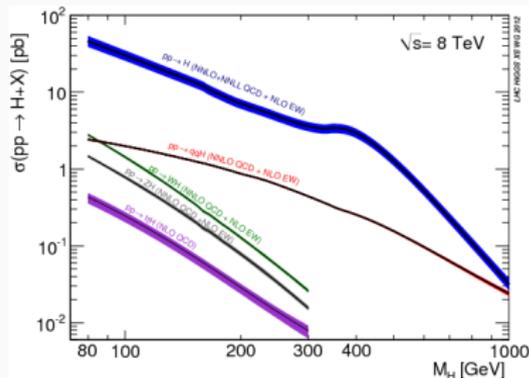
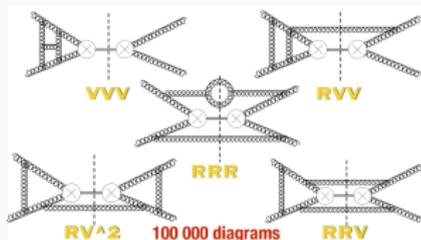
- À m_H fixé, tous les couplages sont calculables
- Modes de production
- Désintégrations

Au LHC

- Désintégration $\gamma\gamma$: boucles de top et W
- Production principale fusion de gluons:



- **Connu à NNNLO !**

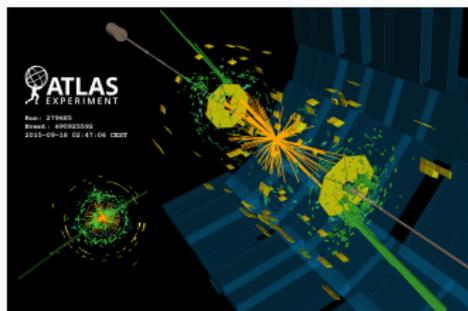


Théorie

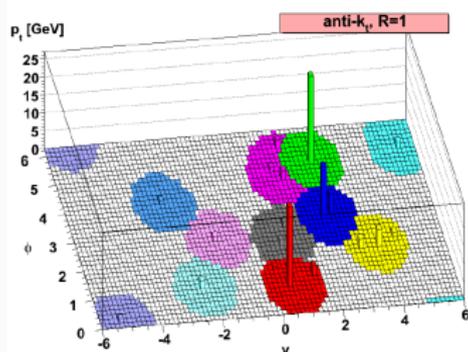
- Groupe de jauge $SU(3)$, interaction forte
- 8 gluons (self-interaction)
- Interagit avec les quarks
- Liberté asymptotique
- Confinement

Phénoménologie

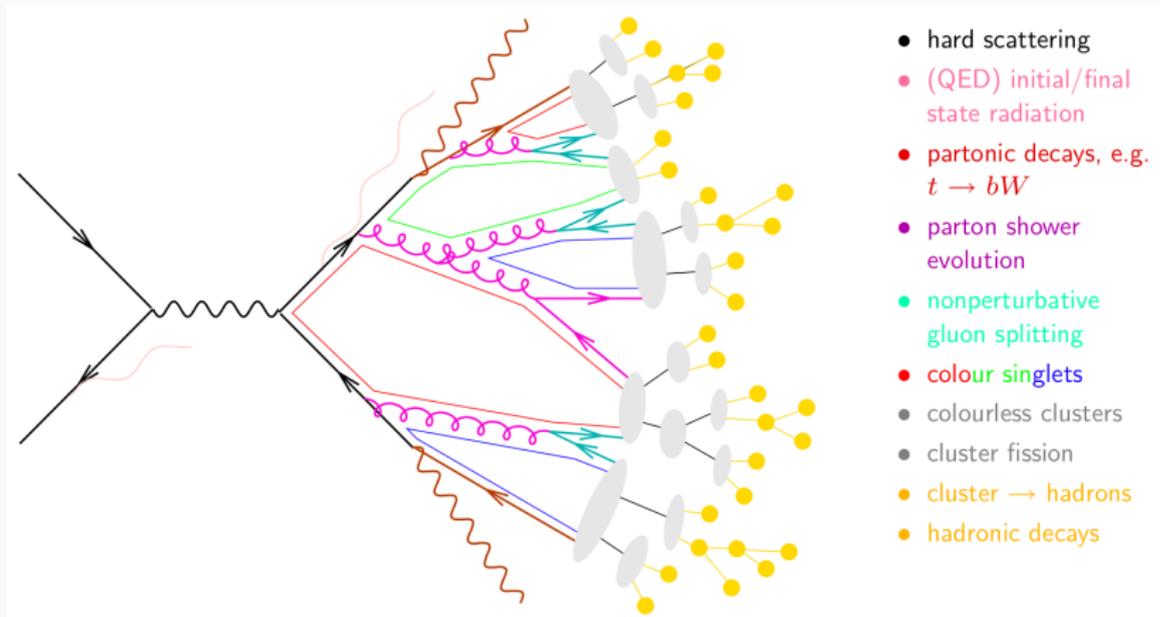
- États observables: hadrons (neutres de couleur)
- Jets
 - Conséquence des propriétés de la QCD
 - Difficile d'avoir une définition saine pour les théoriciens et les expérimentateurs
 - Algorithmes, anti-kT: infrared-safe, collinear-safe

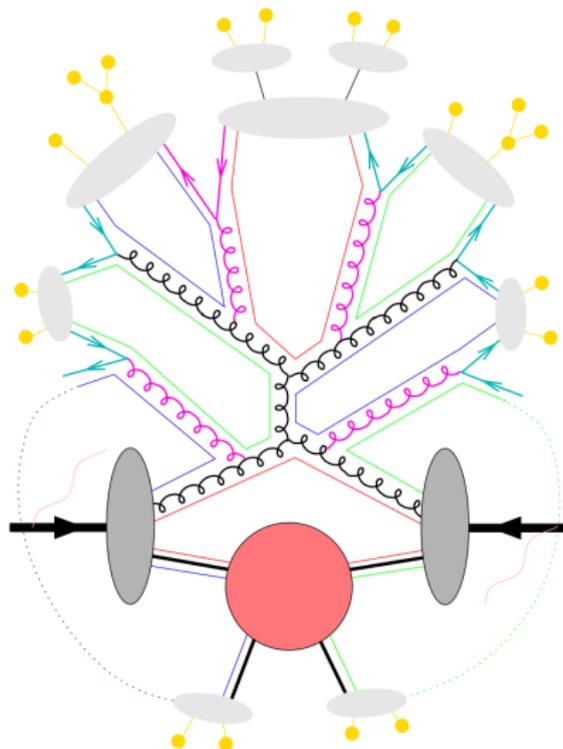


Événement dijet, $m_{jj} = 8.8$ TeV



Jet clustering



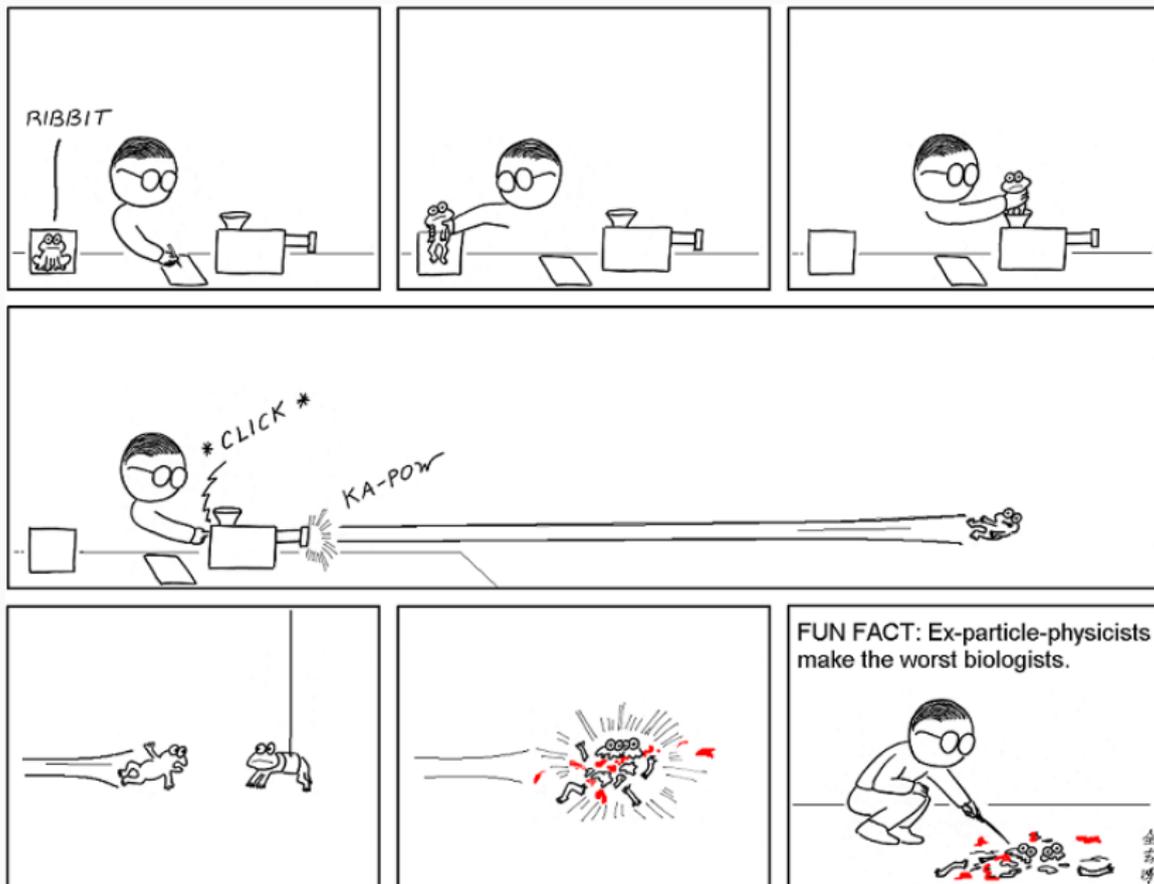


- hard scattering
- (QED) initial/final state radiation
- parton shower evolution
- nonperturbative gluon splitting
- colour singlets
- colourless clusters
- cluster fission
- cluster \rightarrow hadrons
- hadronic decays

and in addition

- + backward parton evolution
- + soft (possibly not-so-soft) underlying event

EN PRATIQUE

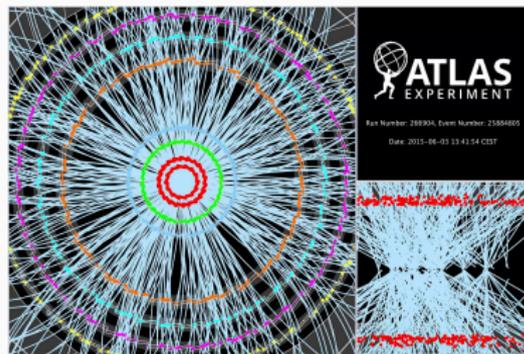
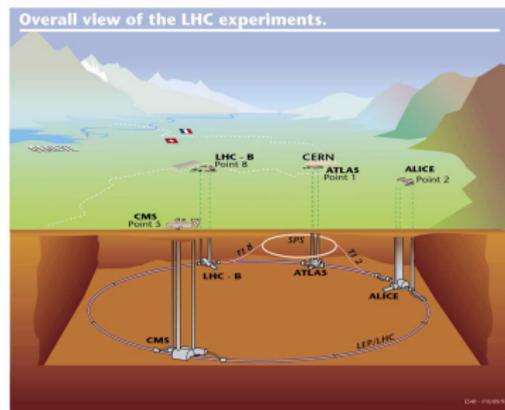


Le LHC:

- Collisionneur $p-p$ de 27 km de circonférence situé au CERN
- Collisions:
 - Tevatron: 10 fb^{-1} en 10 ans
 - 7 TeV (2010,2011): $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$
 - 8 TeV (2012): $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$
 - 13 TeV (2015-): $\sim 4 \text{ fb}^{-1}$
 - Objectif: 100 fb^{-1} d'ici 2019, 300 fb^{-1} d'ici 2023, puis 3000 fb^{-1}
- Espacement entre paquets:
 - 50 ns (2010-2012)
 - 25 ns (2015-)
- ⇒ Taux de collision 40 MHz
- Empilement
 - À chaque croisement de faisceau, multiples interactions pp
 - 15-20 jusqu'à présent, 140 dans le futur

Quatre expériences majeures:

ALICE, CMS, LHCb, et ATLAS



Spectromètre à muons: ($|\eta| < 2.7$)

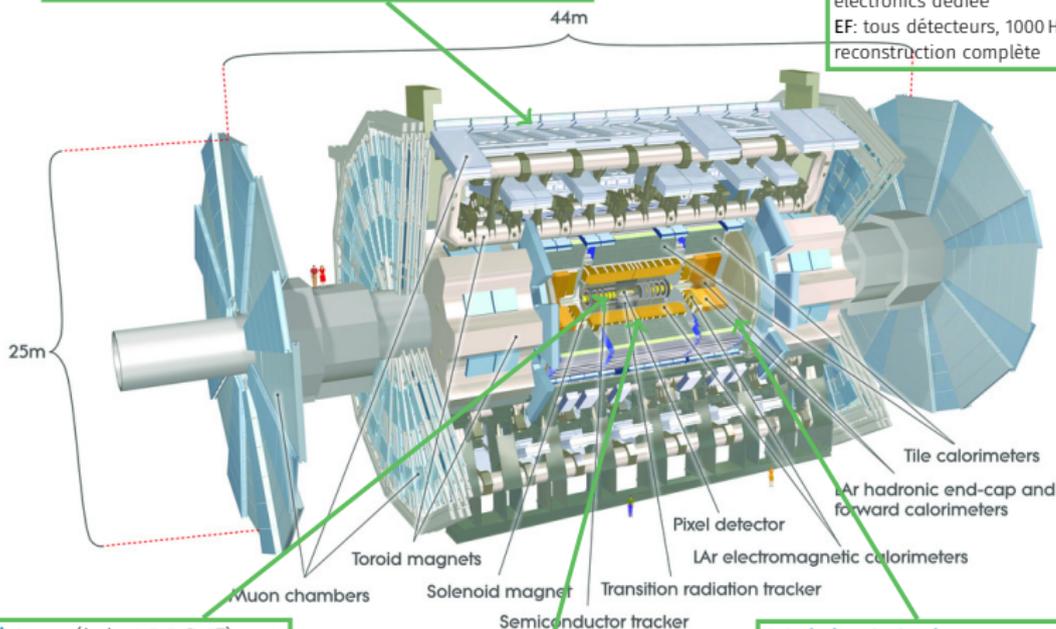
Toroïde à air avec chambres à dérive, fournit déclenchement μ et mesure de l'impulsion
résolution $< 10\%$ jusqu'à $p \sim 1 \text{ TeV}$

Système de déclenchement:

3 niveaux

L1: calo et muons, 100 kHz
électronique dédiée

EF: tous détecteurs, 1000 Hz
reconstruction complète



Détecteur interne: ($|\eta| < 2.5, B=2T$)

Pixels Si, Pistes Si, TRT
Trajectographie de précision,
reconstruction des vertex,
séparation e/π
 $\sigma/p_T \sim 3.8 \cdot 10^{-4} p_T \oplus 0.015$

Calorimètre EM: ($|\eta| < 3.2$)

Pb-LAr, structure en accordéon
fournit déclenchement sur e/γ ,
identification et mesure
 $\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$

Calorimètre hadronique:

Tuiles Scint/Fe dans le tonneau ($|\eta| < 1.7$)
W/Cu-LAr vers l'avant ($|\eta| < 4.9$)
fournit déclenchement et mesure des jets,
 $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$
énergie transverse manquante

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
 Overall diameter : 15.0 m
 Overall length : 28.7 m
 Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
 12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
 Pixel (100x150 μm) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
 Microstrips (80x180 μm) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
 Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

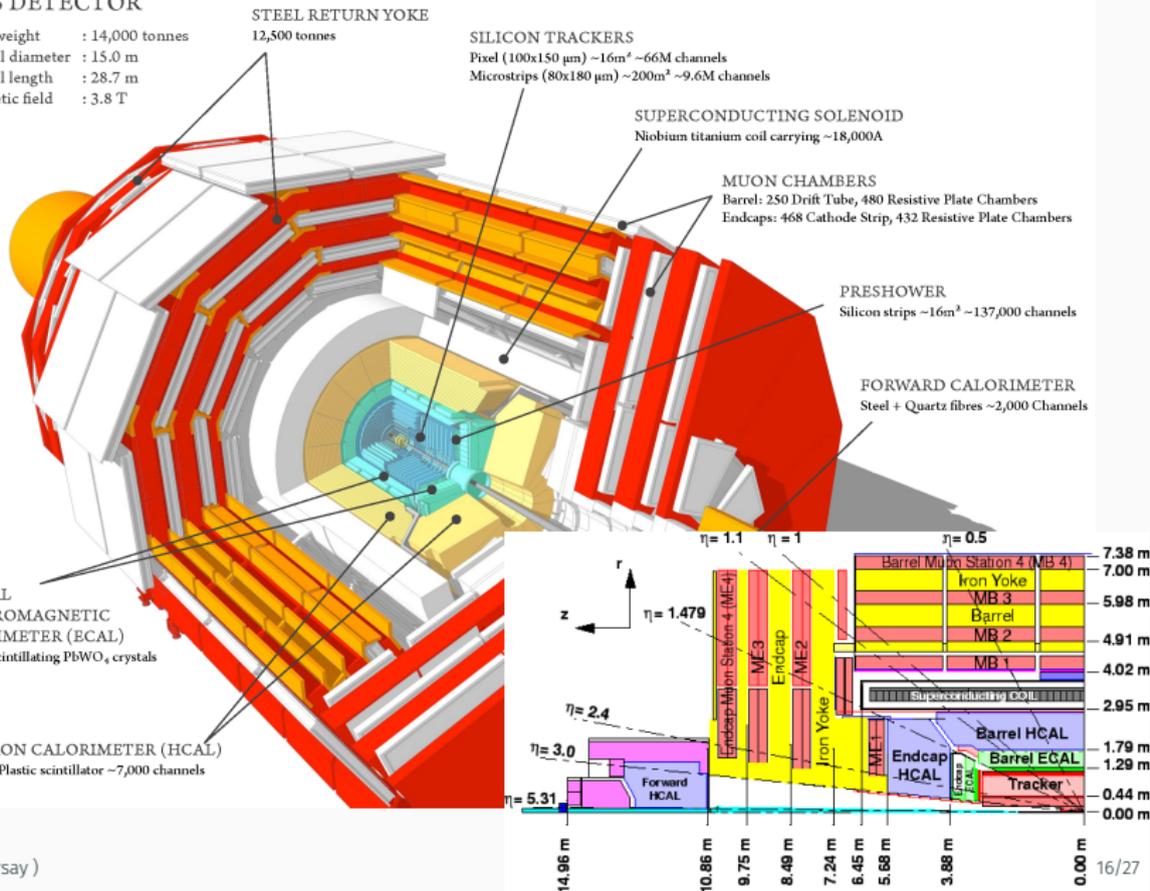
MUON CHAMBERS
 Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
 Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
 Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
 Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
 Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



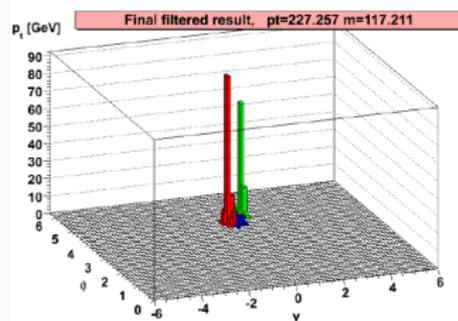
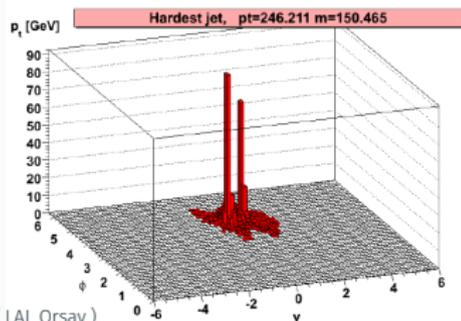
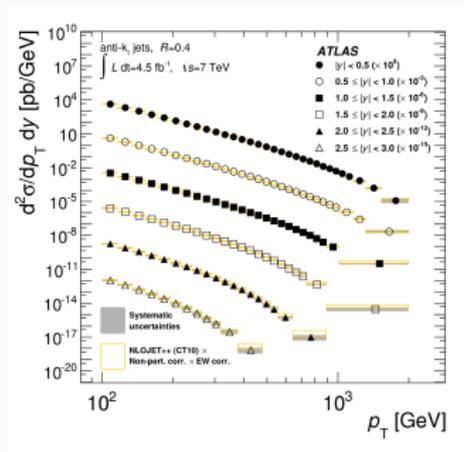
Jets “traditionnels”

- QCD perturbative très précise
- Tests des PDF
- Calibrations précises au %

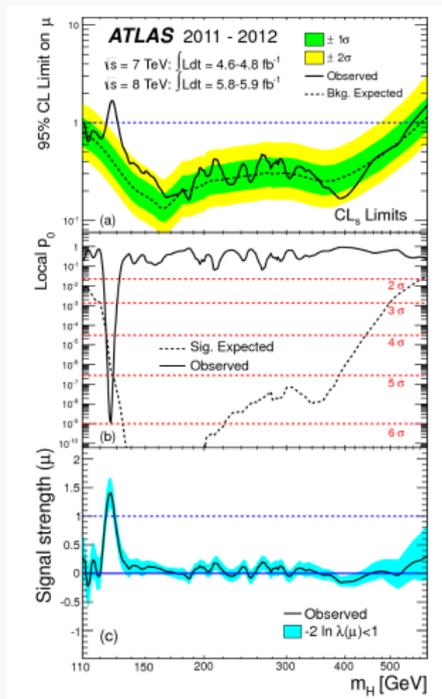
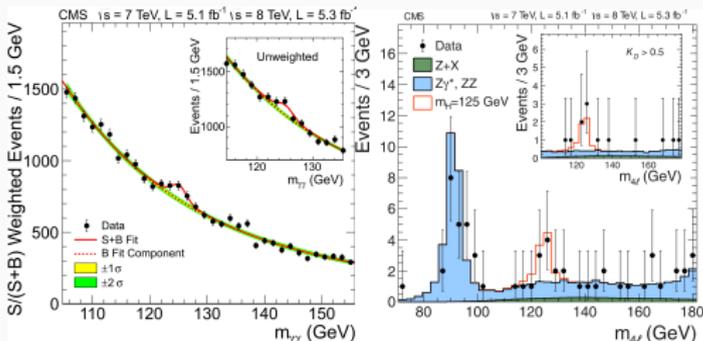
Sous-structure

- Nouveau au LHC: haute énergie \Rightarrow régime boosté
- Désintégrations d'un W, d'un top, H... dans 1 jet
- Jets “larges” + algorithmes pour étudier la sous-structure
- Domaine très actif
- Très puissant pour certaines analyses de mesure ou de recherche

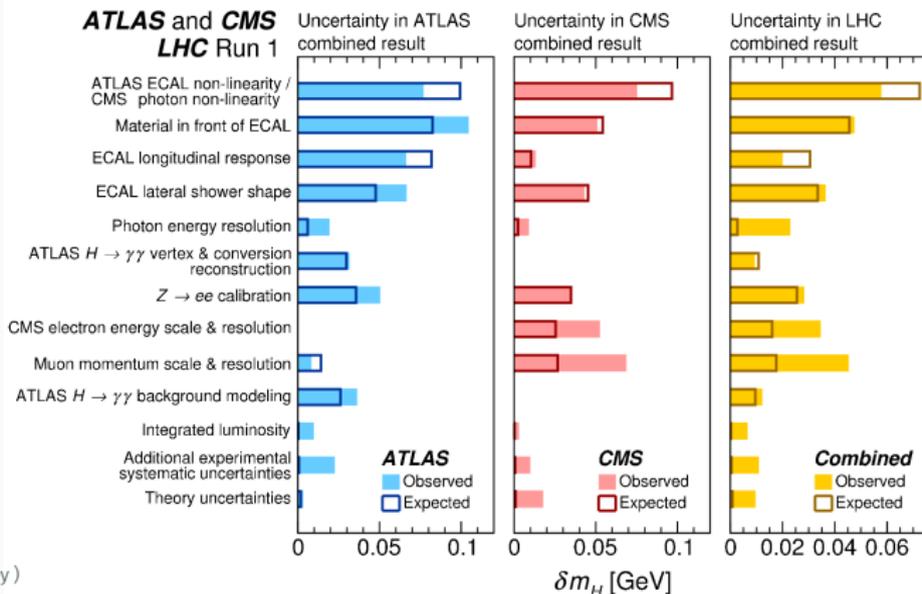
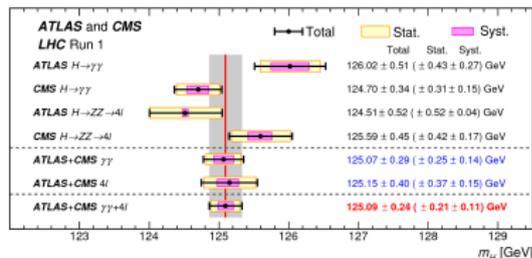
Présentation de Lais



- Découverte juillet 2012 avec $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$ de données
- Principalement $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ et $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Début d'un vaste programme de recherche



- Mesure de masse combinée déjà précise à 3 pour mille !
- Impact des systématiques sera d'autant plus grand au Run2
- Importance de la calibration des leptons et photons
- Présentations de Christophe et Pierre

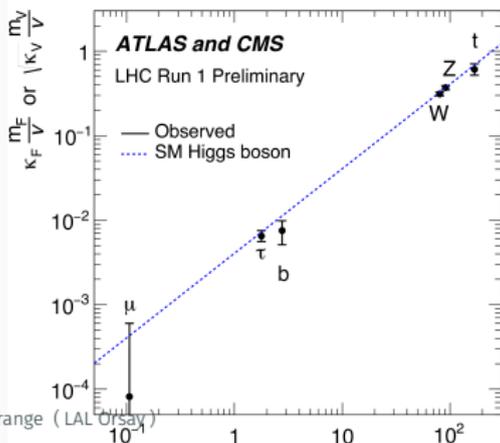
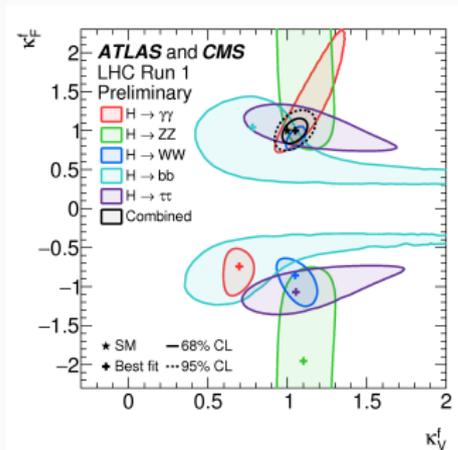


Des résultats fantastiques

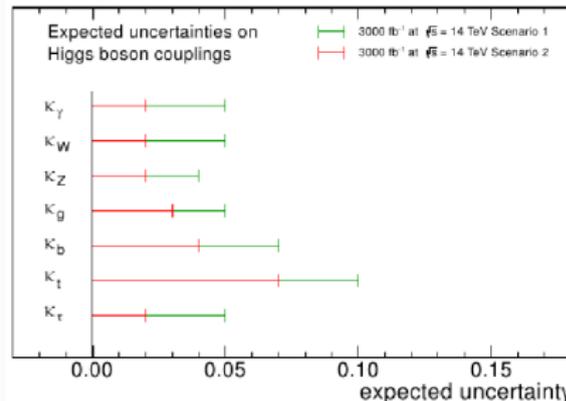
- Couplages au W , Z , τ mesurés directement
- Couplage au top mesuré indirectement
- Présentations de Martina, Thomas

Encore un long chemin

- Run2: mesures directes couplages au top, au b , au μ
- Présentations de Thomas, Arthur
- long terme: mesures à quelques %

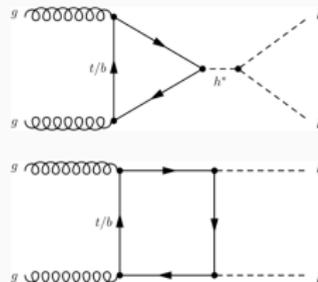


CMS Projection



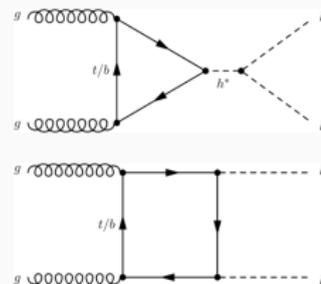
Mesure des événements à 2 Higgs

- Étude de la forme du potentiel de Higgs
 - Canaux $bbbb$, $bb\gamma\gamma$, $bb\tau\tau$...
 - Faibles S/B, petite section efficace
- ⇒ Recherche à long terme



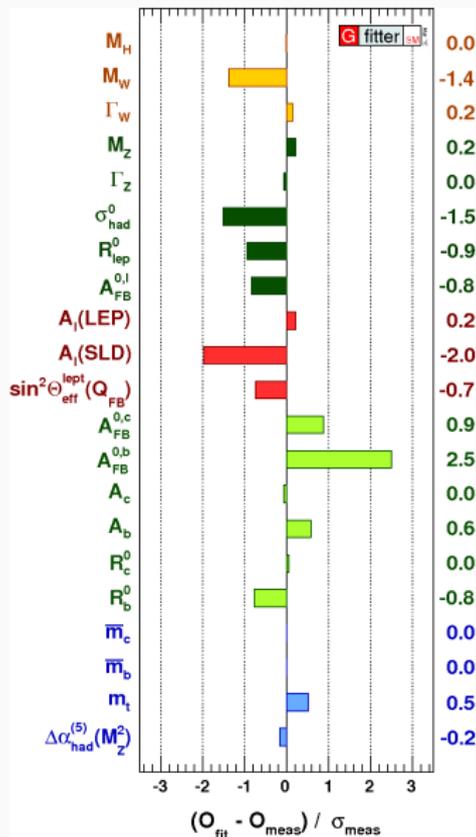
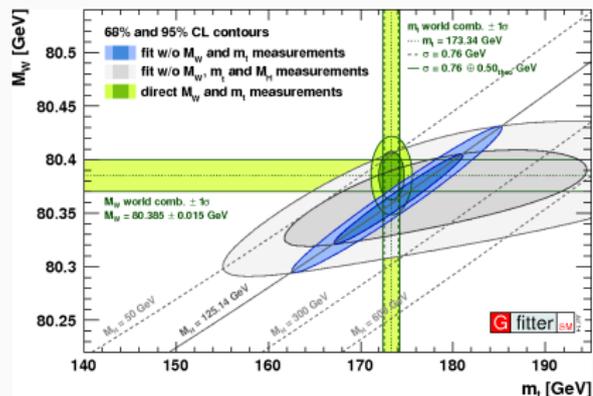
Mesure des événements à 2 Higgs

- Étude de la forme du potentiel de Higgs
 - Canaux $bbbb$, $bb\gamma\gamma$, $bb\tau\tau$...
 - Faibles S/B, petite section efficace
- ⇒ Recherche à long terme



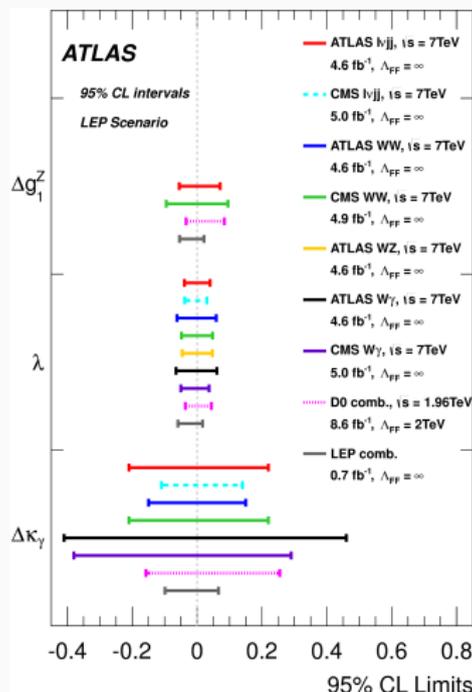
Tests de cohérence

- MS: beaucoup de mesures pour un modèle avec peu de paramètres
- Puissants tests de cohérence
- En particulier: masses du top, W , et Higgs
- Analyses de mesure de masses au LHC très importantes !



Étude des processus rares

- LHC: haute énergie + haute luminosité
- Accès à des processus rares: productions multi-bosons
 - Diboson: $WW, WZ, ZZ...$
 - Triboson: $W\gamma\gamma...$
 - Cinématique particulière: vector boson scattering
 - [Présentation de Philipp](#)
- Contraintes sur les vertex de bosons (couplages anomaux)



Un très grand succès

- Extrêmement prédictif
- Extrêmement robuste
- Que ce soit en QCD ou dans le secteur électrofaible
- Le LHC permet des tests de précision

Physique du Higgs: un nouveau champ de recherche

- Mesures de précision des propriétés
- Détermination des couplages

