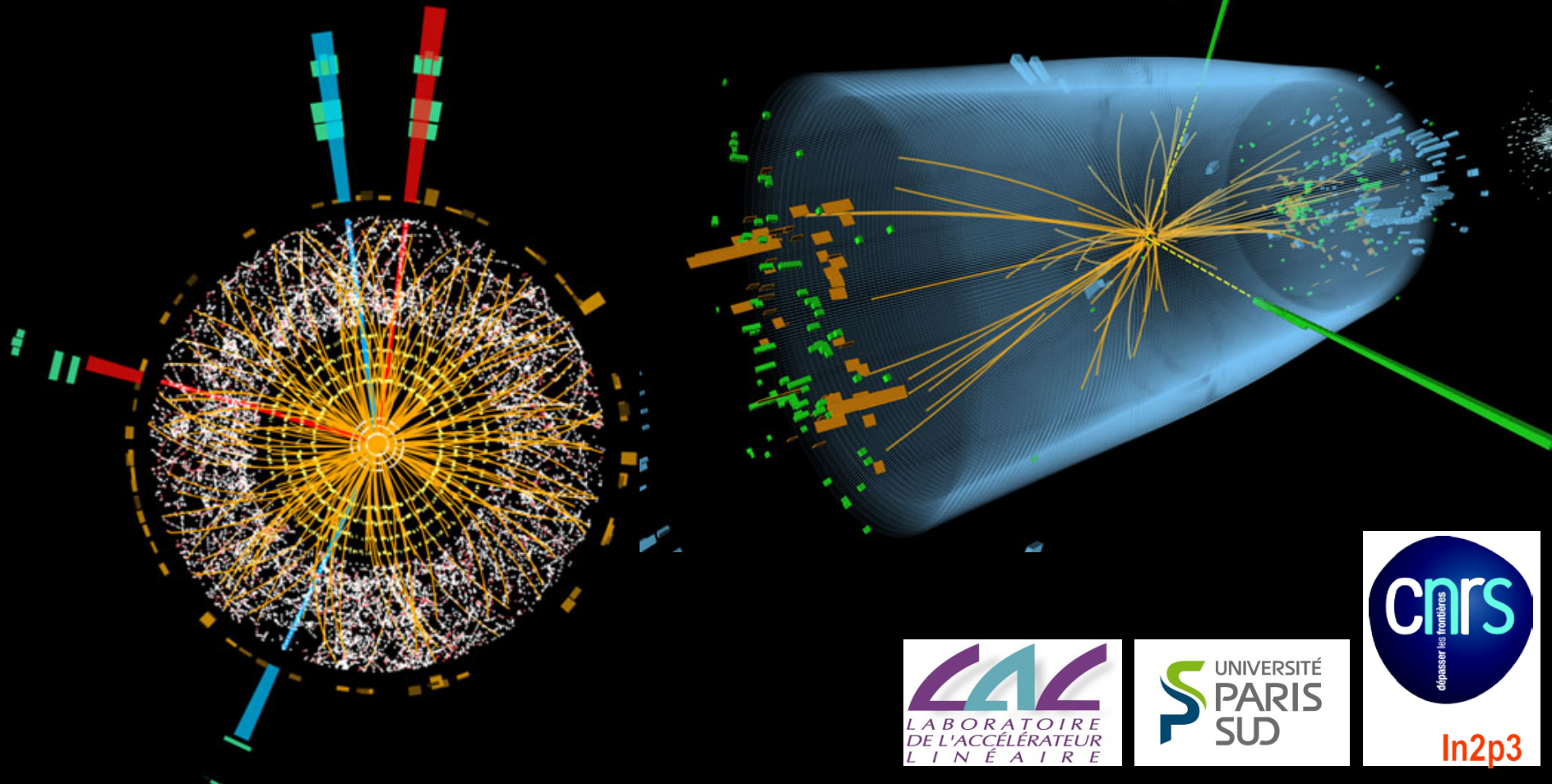


La découverte du boson de Higgs au LHC

Nikola Makovec



Prix Nobel de Physique 2013

- Le Prix Nobel de Physique 2013 a été décerné à **François Englert** et **Peter Higgs** "pour la découverte théorique du mécanisme qui contribue à notre compréhension de **l'origine de la masse des particules subatomiques**, et qui a été récemment confirmée par la **découverte de la particule fondamentale prédite**, par les expériences **ATLAS** et **CMS** auprès du **grand accélérateur de hadrons (LHC) du CERN**



Plan de l'exposé

■ Le Modèle Standard

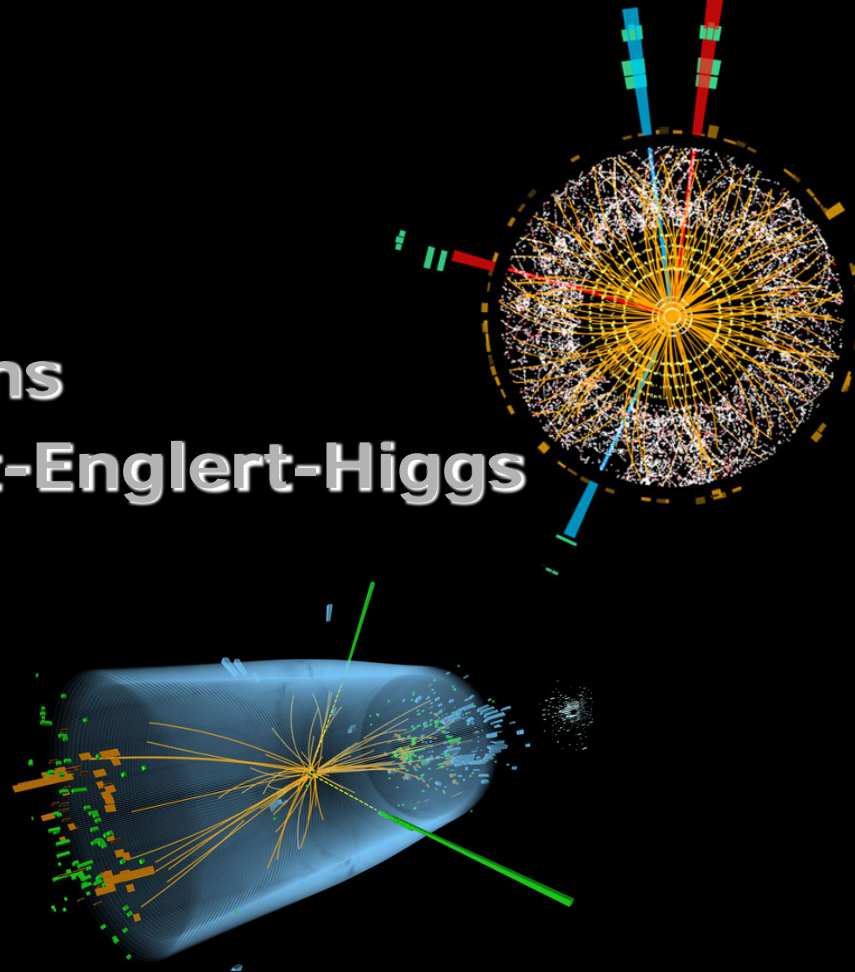
- Particules et interactions
- Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

■ Le défi expérimental

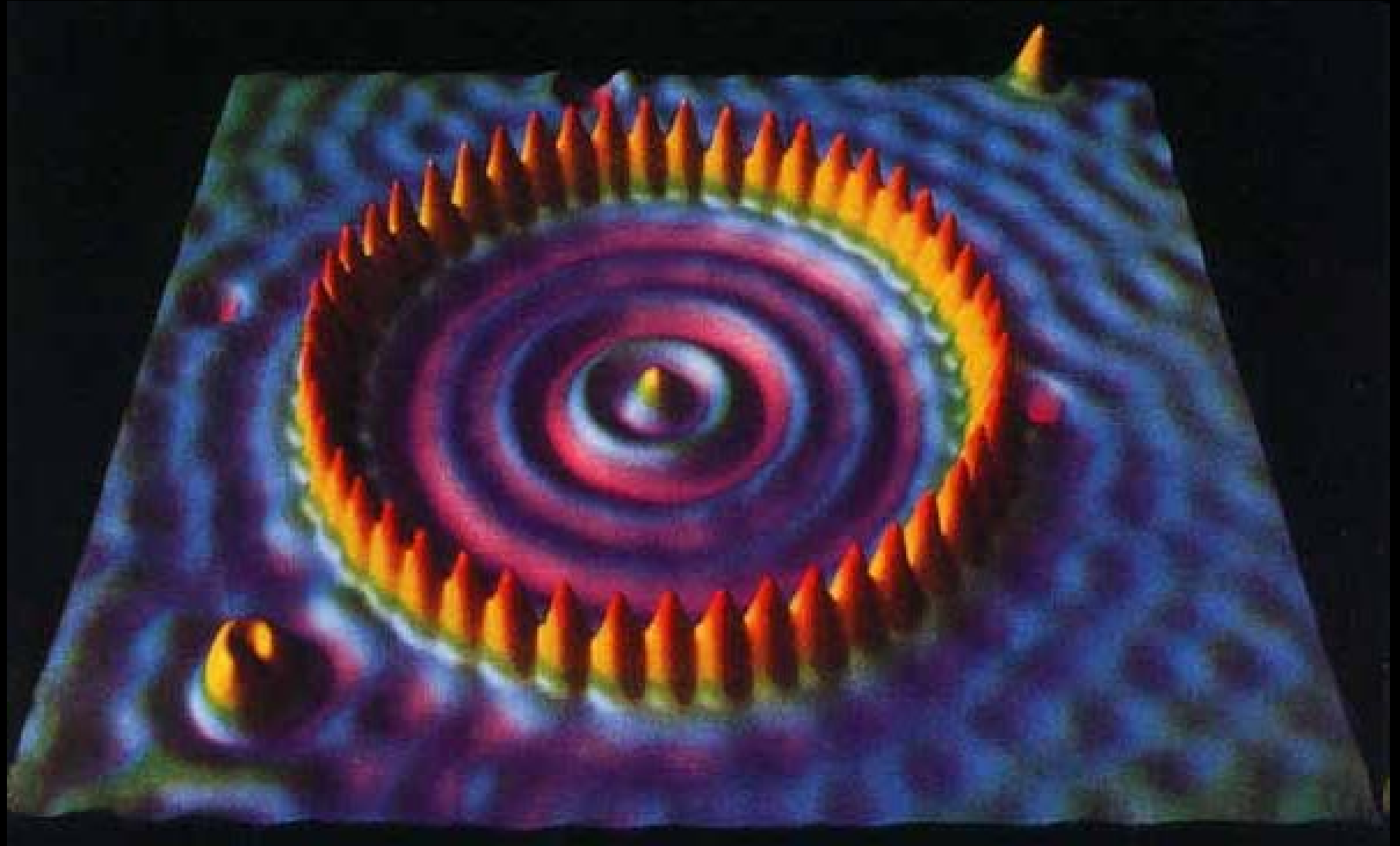
- Le LHC
- Les détecteurs

■ La découverte du boson de Higgs

- Stratégie de recherche
- Résultats



L'atome

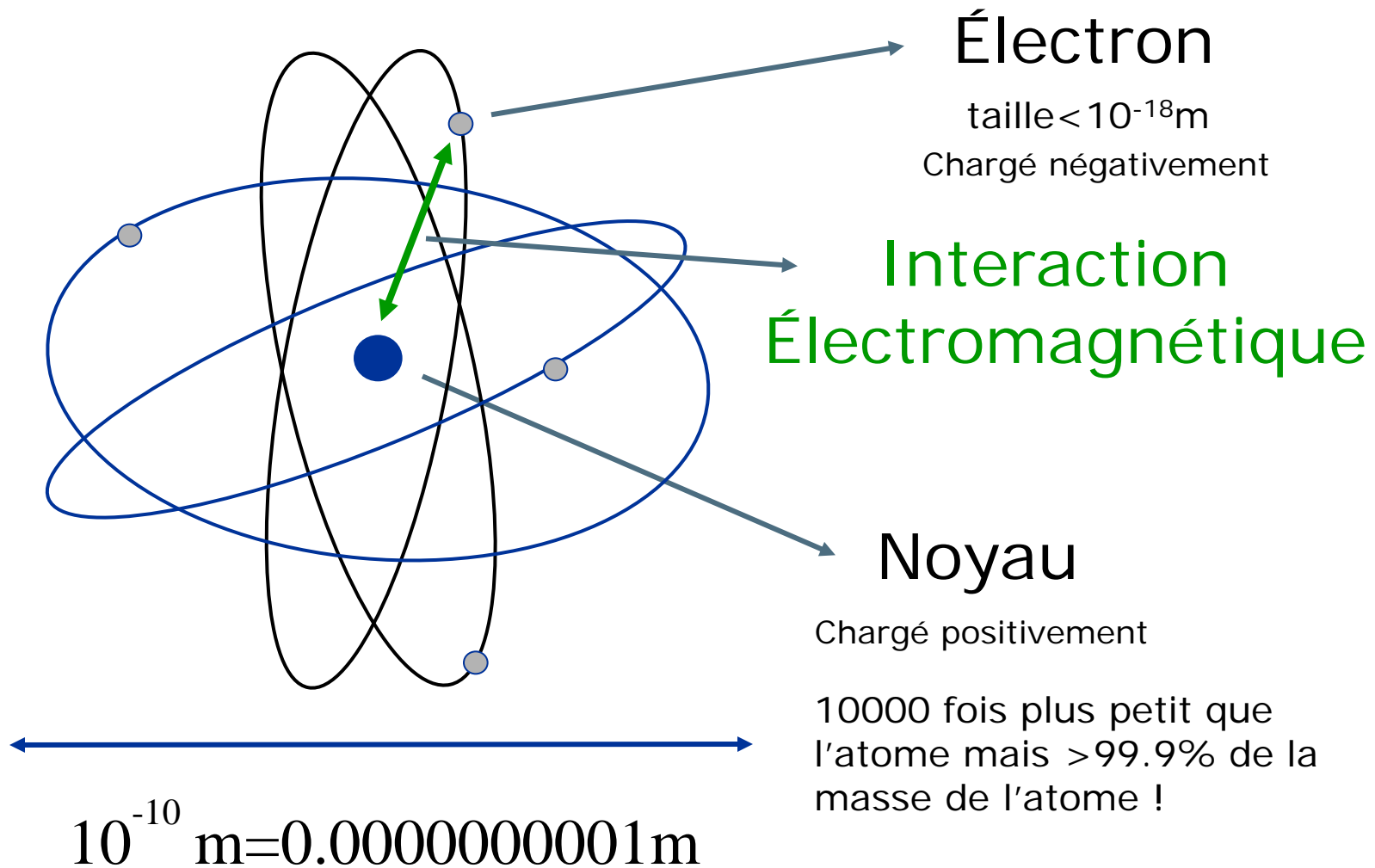


Taille d'un atome: 10^{-10} m = 0.0000000001 m

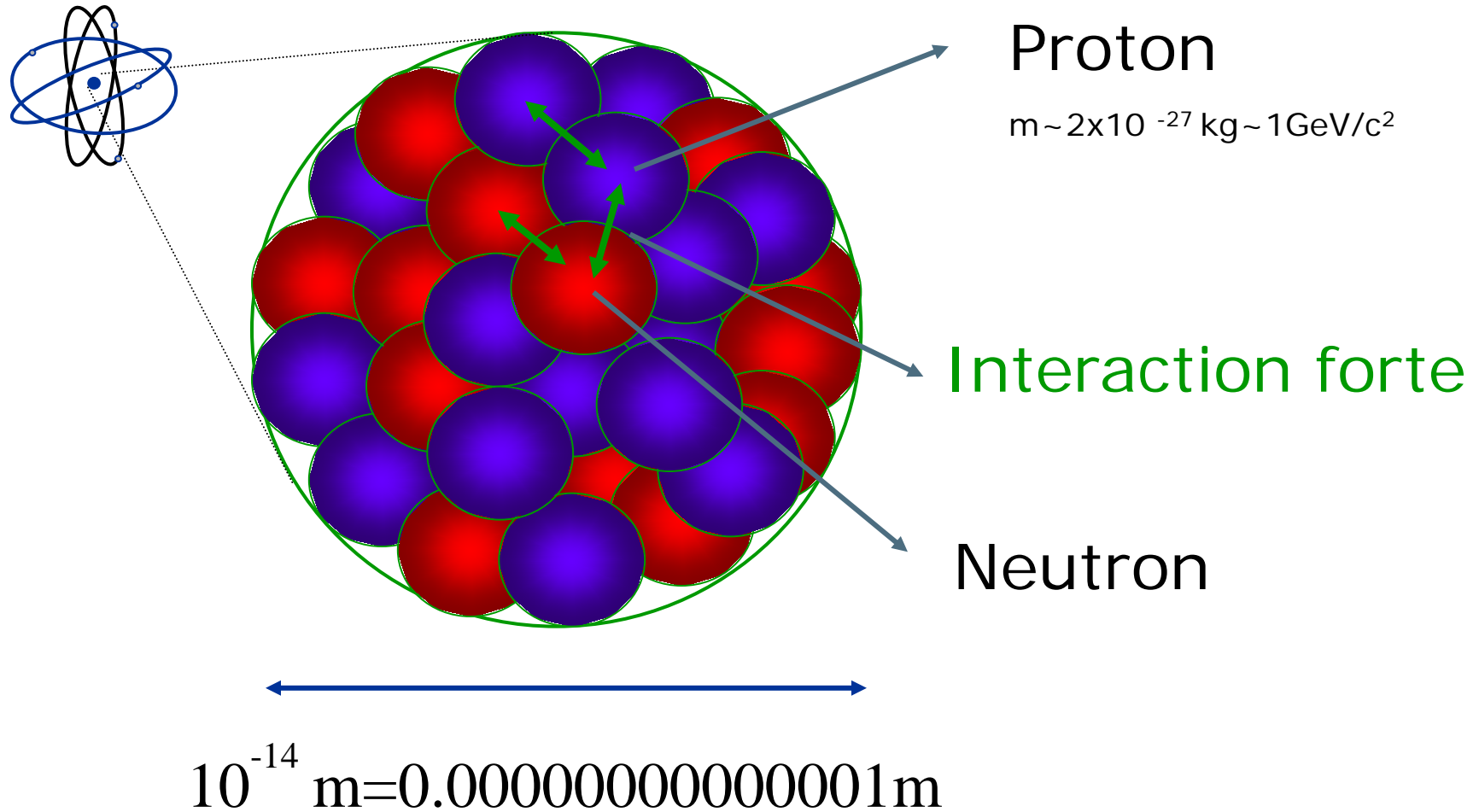
10 millions de fois plus petit qu'une fourmi
10 milles fois plus petite qu'une bacterie



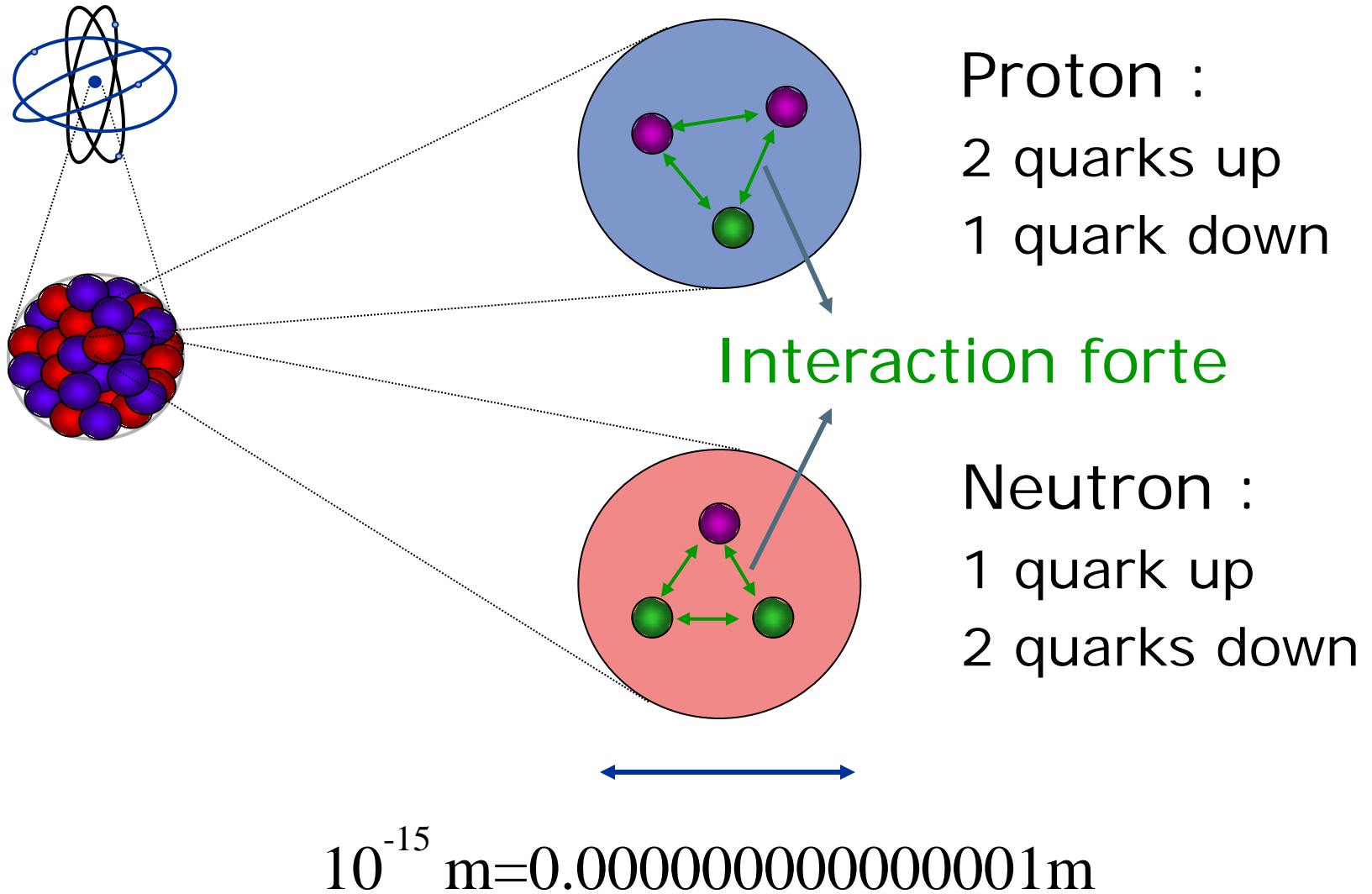
Structure de l'atome



Structure du noyau

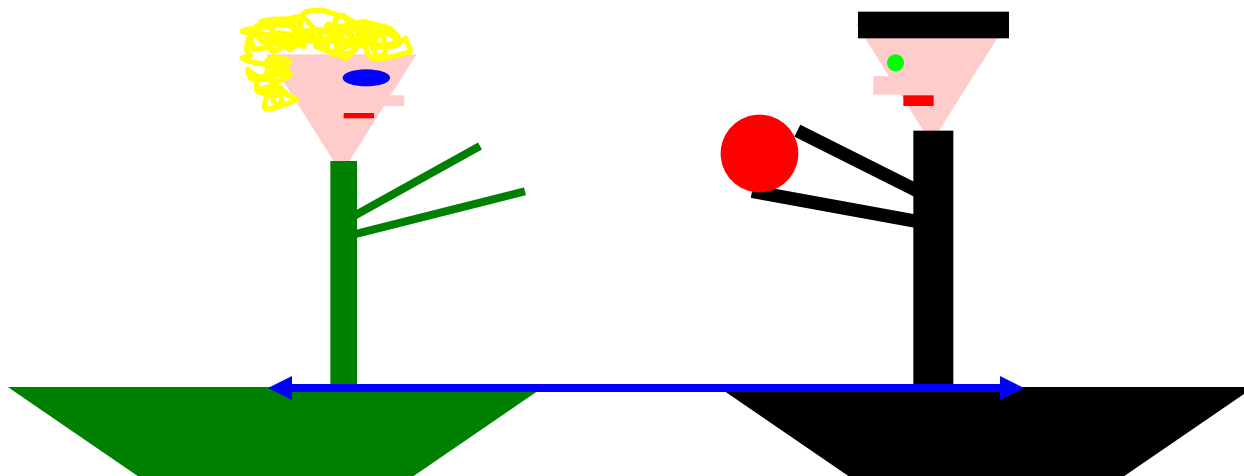
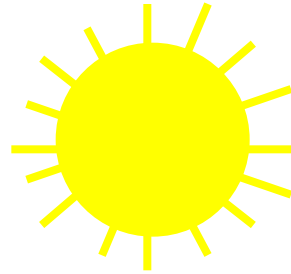


Structure des protons et des neutrons



Les interactions

Interagir = échanger une particule



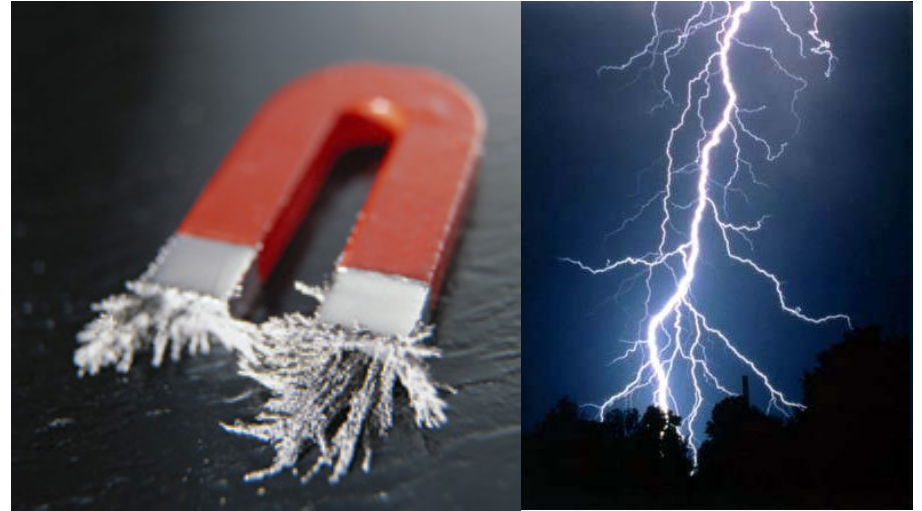
- Les **ballons** sont les **médiateurs** de la force qui écarte les 2 bateaux.
- La **portée** dépend de la **masse** du ballon

Bosons de jauge : médiateurs des interactions fondamentales



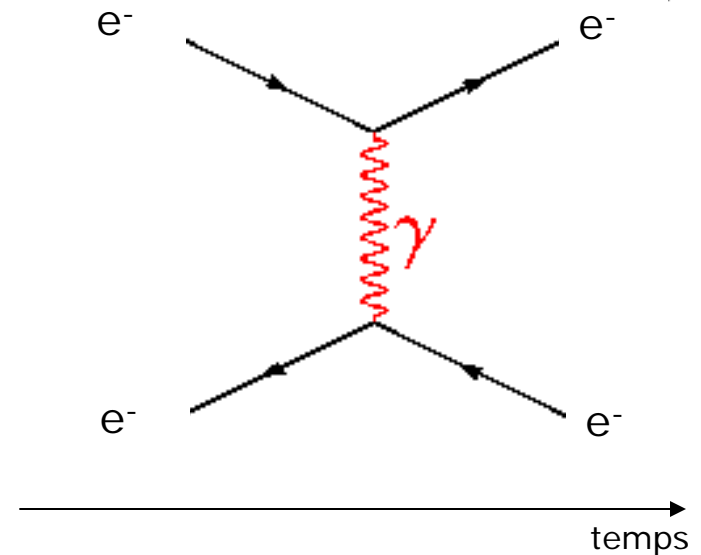
L'interaction électromagnétique

Responsable des phénomènes **électriques et magnétiques** :
aimantation, lumière, cohésion des atomes,...



Médiateur : **photon**

$m=0$ (vitesse= c)
portée infinie



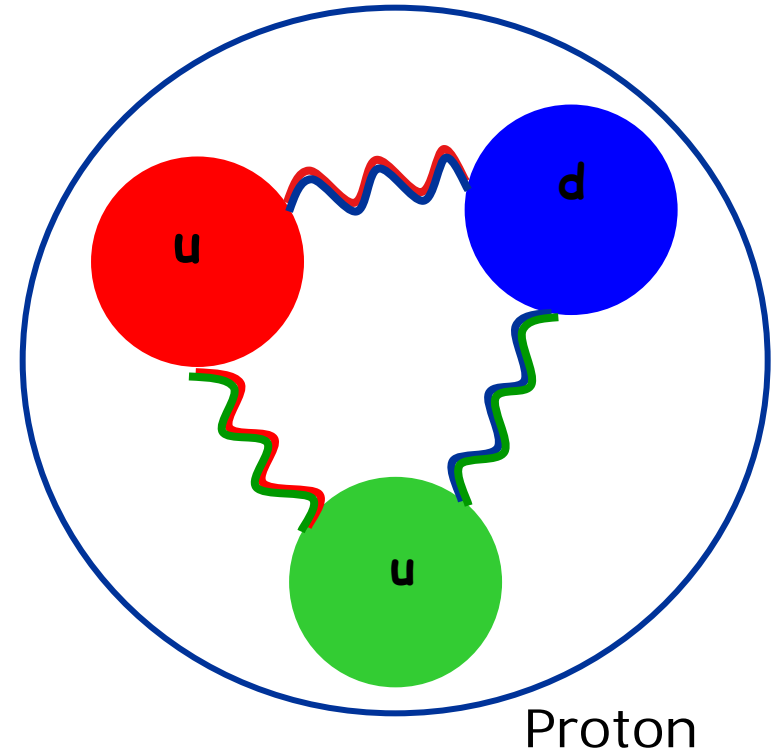
L'interaction nucléaire forte

Responsable de la stabilité des noyaux ainsi que du proton

Médiateurs: **8 gluons**

$m=0$

Portée 10^{-15}m

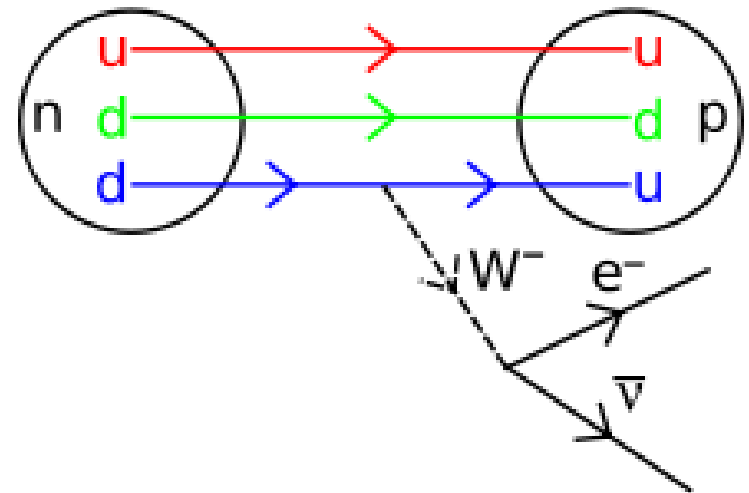


Les quarks n'existent pas à l'état libre: ils sont confinés à l'intérieur de **hadrons** (assemblages de quarks) collés par les **gluons**

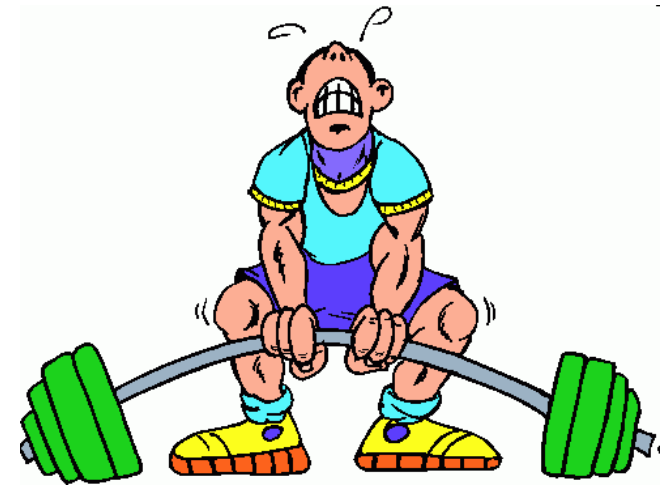
L'interaction nucléaire faible

- Responsable de:
 - Radioactivité β
 - Participe aux réactions nucléaires au coeur du Soleil

Médiateurs : W^+ , W^- et Z^0

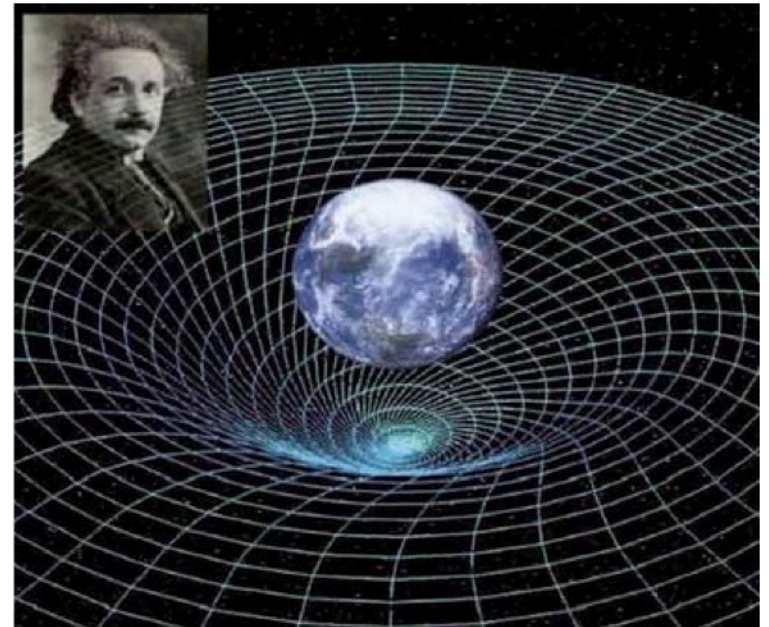


- 10,000 fois plus faible que l'interaction forte
- Portée: 10^{-18}m
 - Expliquée par la grande masse des bosons de jauge de l'interaction faible.



La gravitation

- Responsable de la pesanteur, des marées, des mouvements des astres, ...
- Force complètement négligeable à l'échelle du noyau
 - 10^{-33} fois plus faible que l'interaction faible
 - Mais portée infinie et interaction uniquement attractive
⇒ dominante à grande échelle
- Décrite par la relativité générale
 - La gravitation est issue d'une déformation de l'espace temps



Médiateur hypothétique : **graviton**

Matière

Leptons

Quarks



Matière

Leptons

Quarks



Matière

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

stable

instable

Matière

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

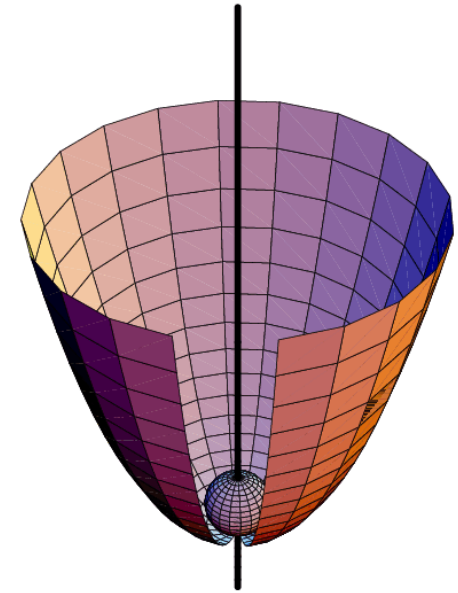
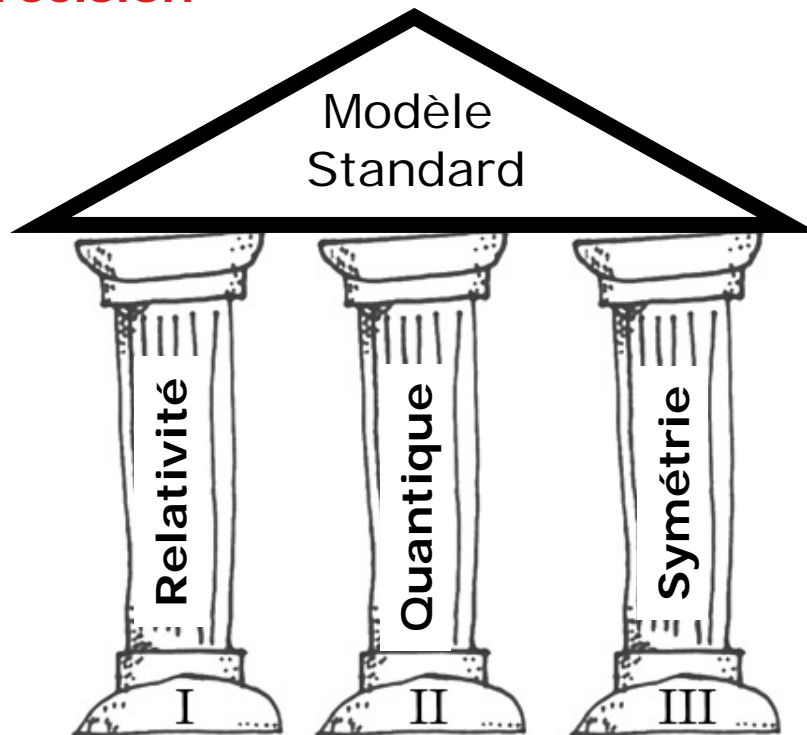
Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^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}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c \\
& -\partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu \Lambda_\nu \partial_\mu \Lambda_\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^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
& -igc_w \left[\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -igs_w \left[\partial_\nu \Lambda_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \Lambda_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \Lambda_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -\frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \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_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) \\
& +g^2 s_w c_w [\Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\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{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
& -\frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [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{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w M \Lambda_\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^+) + igs_w \Lambda_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 \\
& +2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w \Lambda_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
& +\frac{1}{2}ig^2 s_w \Lambda_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 \Lambda_\mu \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda \\
& -\bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w \Lambda_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] \\
& +\frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_c^\lambda}{M} \left[-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_c^\lambda}{M} \left[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) \right] \\
& -\frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{\chi}^+ (\partial^2 - M^2) \chi^+ + \bar{\chi}^- (\partial^2 - M^2) \chi^- \\
& +\bar{\chi}^0 \left(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) \chi^0 + \bar{\Upsilon} \partial^2 \Upsilon + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{\chi}^0 \chi^- - \partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{\Upsilon} \chi^- - \partial_\mu \bar{\chi}^+ \Upsilon) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^0 - \partial_\mu \bar{\chi}^0 \chi^+) \\
& +igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{\chi}^- \Upsilon - \partial_\mu \bar{\Upsilon} \chi^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^+ - \partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^-) + igs_w \Lambda_\mu (\partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^+ - \partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{\chi}^+ \chi^+ H + \bar{\chi}^- \chi^- H \\
& +\frac{1}{c_w^2} \bar{\chi}^0 \chi^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM[\bar{\chi}^+ \chi^0 \phi^+ - \bar{\chi}^- \chi^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{\chi}^0 \chi^- \phi^+ - \bar{\chi}^0 \chi^+ \phi^-] + igMs_w[\bar{\chi}^0 \chi^- \phi^+ - \bar{\chi}^0 \chi^+ \phi^-] \\
& +\frac{1}{2}igM[\bar{\chi}^+ \chi^+ \phi^0 - \bar{\chi}^- \chi^- \phi^0]
\end{aligned}$$

Le Modèle Standard

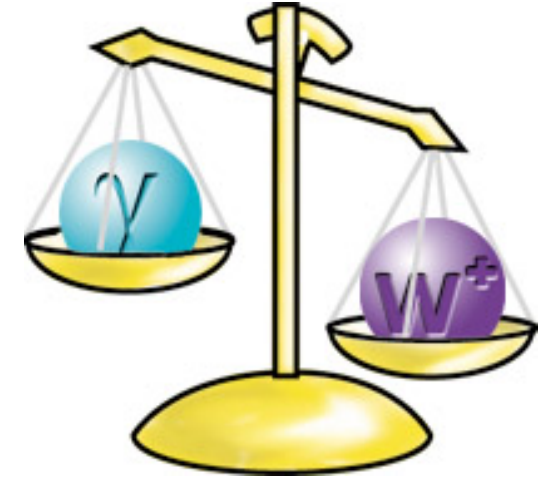
- Elaboré dans les années 1960-70
- Décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et les **interactions forte et électrofaible**
 - Mais pas la gravitation!
- Testé expérimentalement avec **grande précision**



- Un système est symétrique quand on le transforme en laissant sa forme inchangée.
- Groupe de symétrie (Invariance de jauge) détermine complètement la structure de l'interaction!

Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- La masse quantifie l'inertie du corps
 - Plus un objet est massif plus il est difficile à mettre en mouvement



- Invariance de jauge

⇒ masse=0 ⇔ v=c

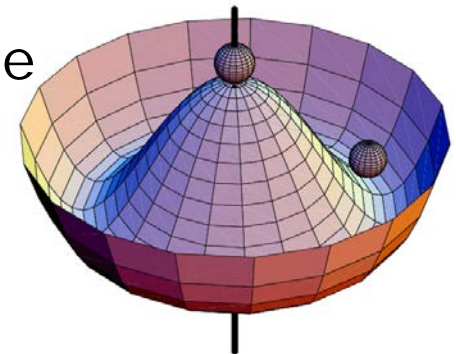
⇒ contradiction avec l'expérience

- Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- La masse n'est pas une propriété intrinsèque des particules, mais le résultat de l'interaction de la particule avec le champ de Brout-Englert-Higgs

- Découvert en 1964 par:

- R. Brout and F. Englert
- P. Higgs
- G. Guralnik, C. R. Hagen, and T. Kibble





Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Le photon: masse nulle



L'électron: petite masse



Le boson Z: grande masse



Plus difficile à mettre en mvt

L'action du champ de Higgs est équivalent à une sorte de viscosité du vide

Le boson de Higgs

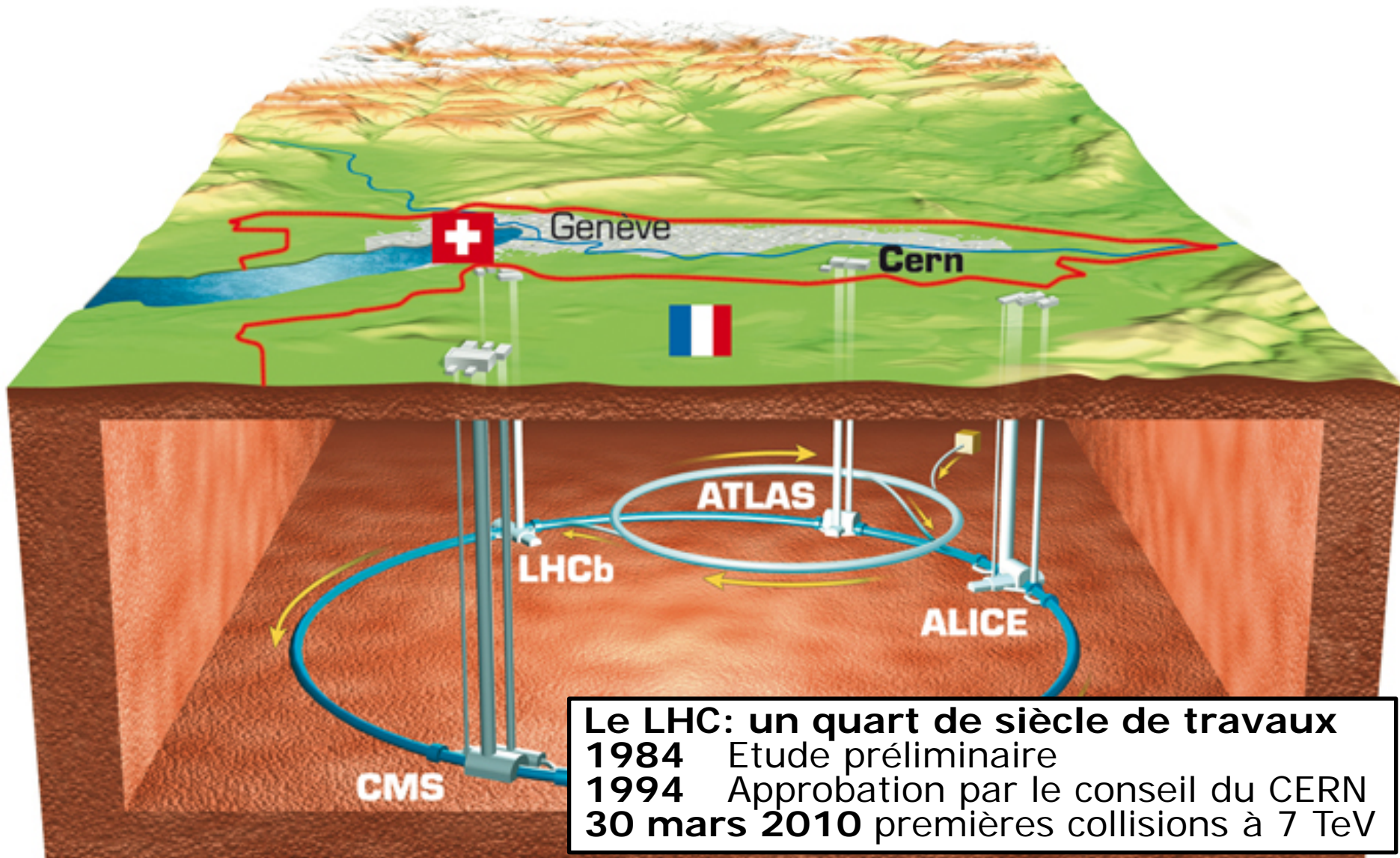
Boson de Higgs = quanta du champ de Higgs



Le boson de Higgs joue un rôle central dans le mécanisme qui explique la masse des particules élémentaires



- L** ("Large" en anglais) signifie grand: un anneau de 27 km de circonférence.
- H** ("Hadron") implique l'accélération de protons et ions (Plomb).
- C** ("Collider" en anglais) indique que les hadrons entrent en collisions frontales.



Le LHC: la machine de tous les records!

❖ La plus grande "machine" du monde

- 27 km de circonférence;
- > 9000 aimants supraconducteurs.
- Champ magnétique: 8.3 T (200000 fois le champ magnétique terrestre !)

❖ Le plus grand "réfrigérateur" connu

- Refroidissement du système d'aimants supraconducteurs à l'hélium superfluide à -271°C (1.9 K)
- Plus froid que l'espace intersidéral !

❖ L'espace le plus vide du Système Solaire

- Une pression 10 x plus faible que l'atmosphère lunaire

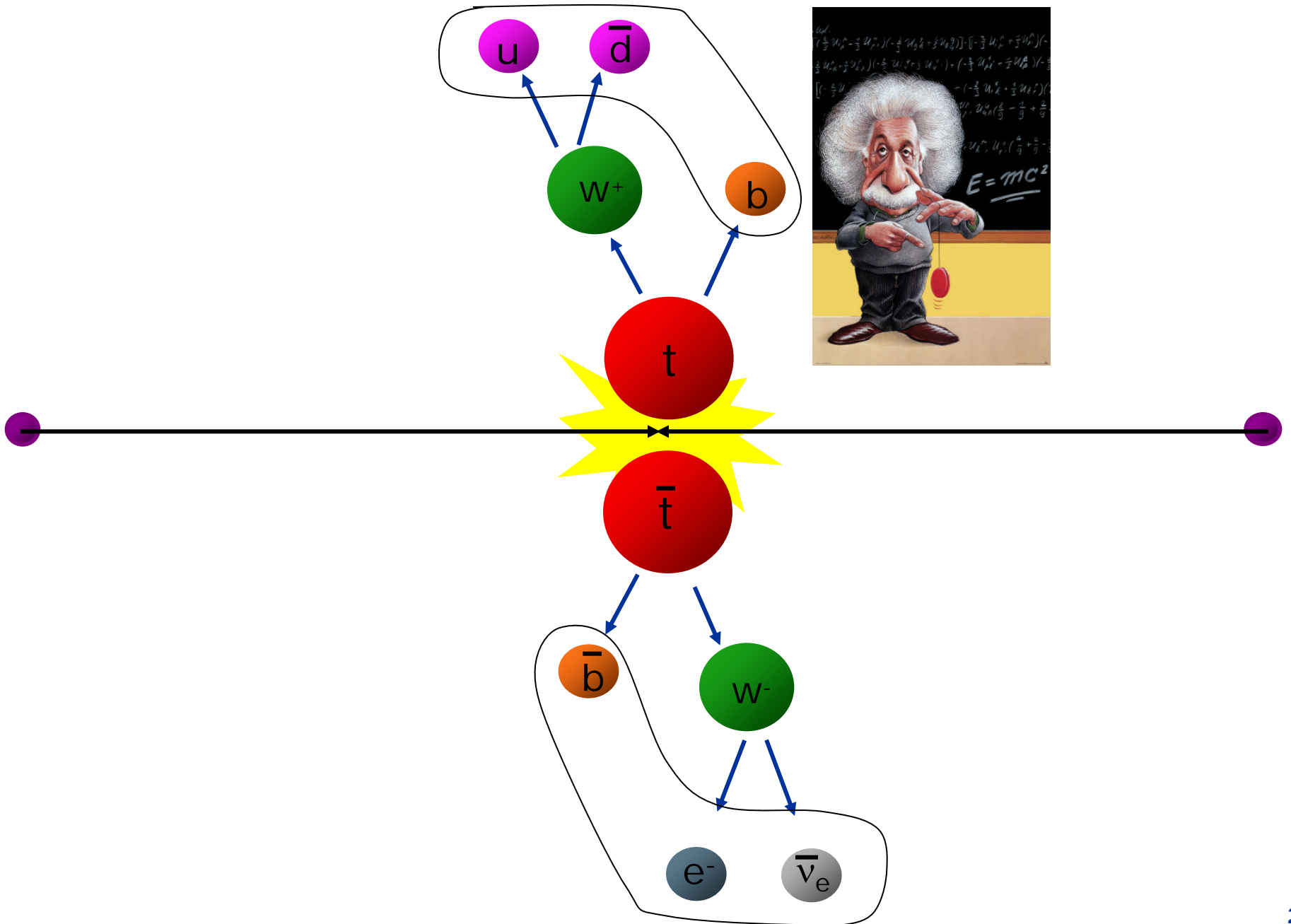
❖ Un circuit ultra-rapide

- Les protons circulent à 99.9999993% de la vitesse de la lumière.
- Faisceaux de protons de 4 TeV
- 362 MJ de stocké par faisceau (Airbus A320 à l'atterrissage)

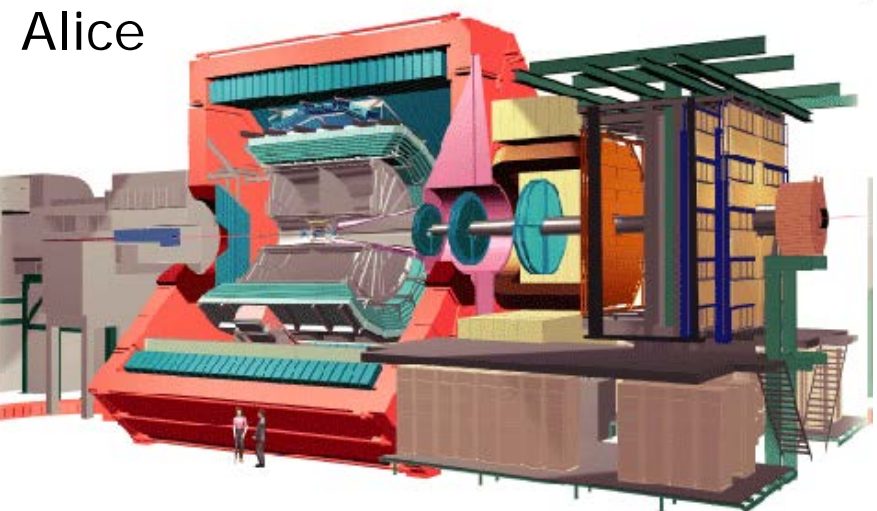
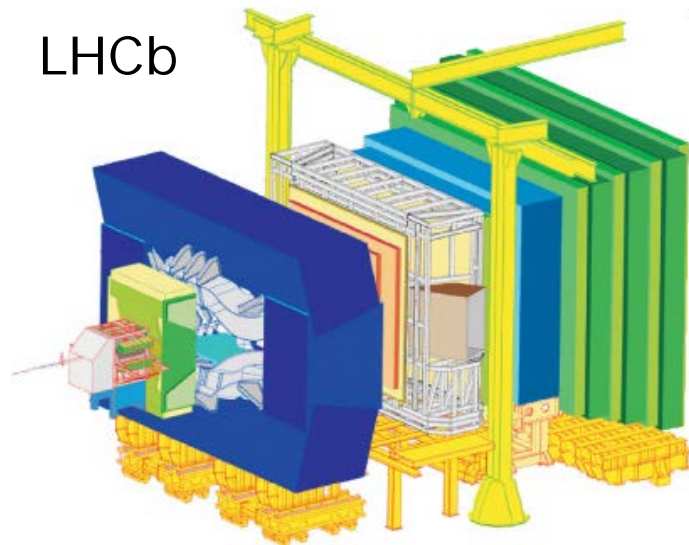
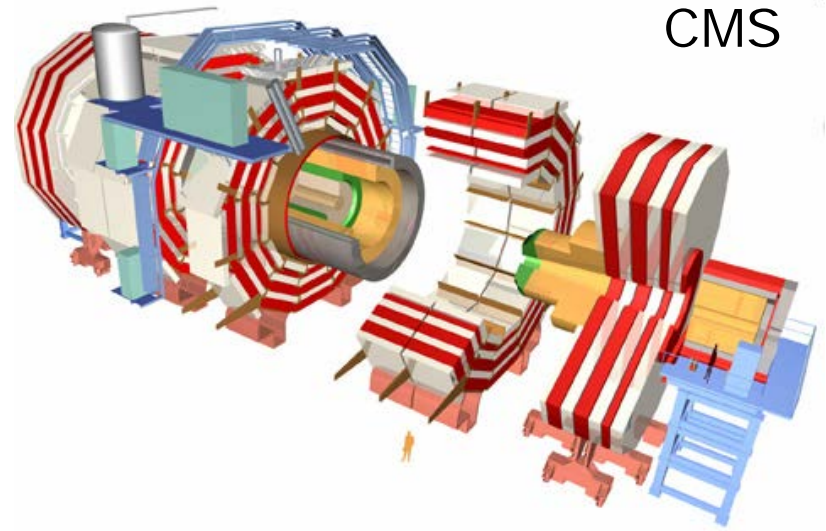
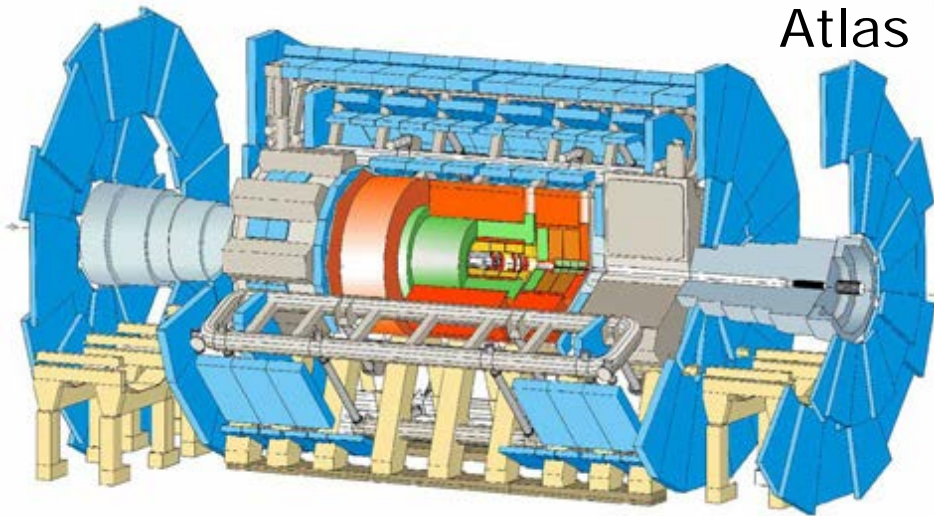
❖ Une machine de précision

- Croisement de paquets de protons toutes les 50 nano-secondes
- Des faisceaux de 10 microns (10^{-6} m) aux points de croisement !

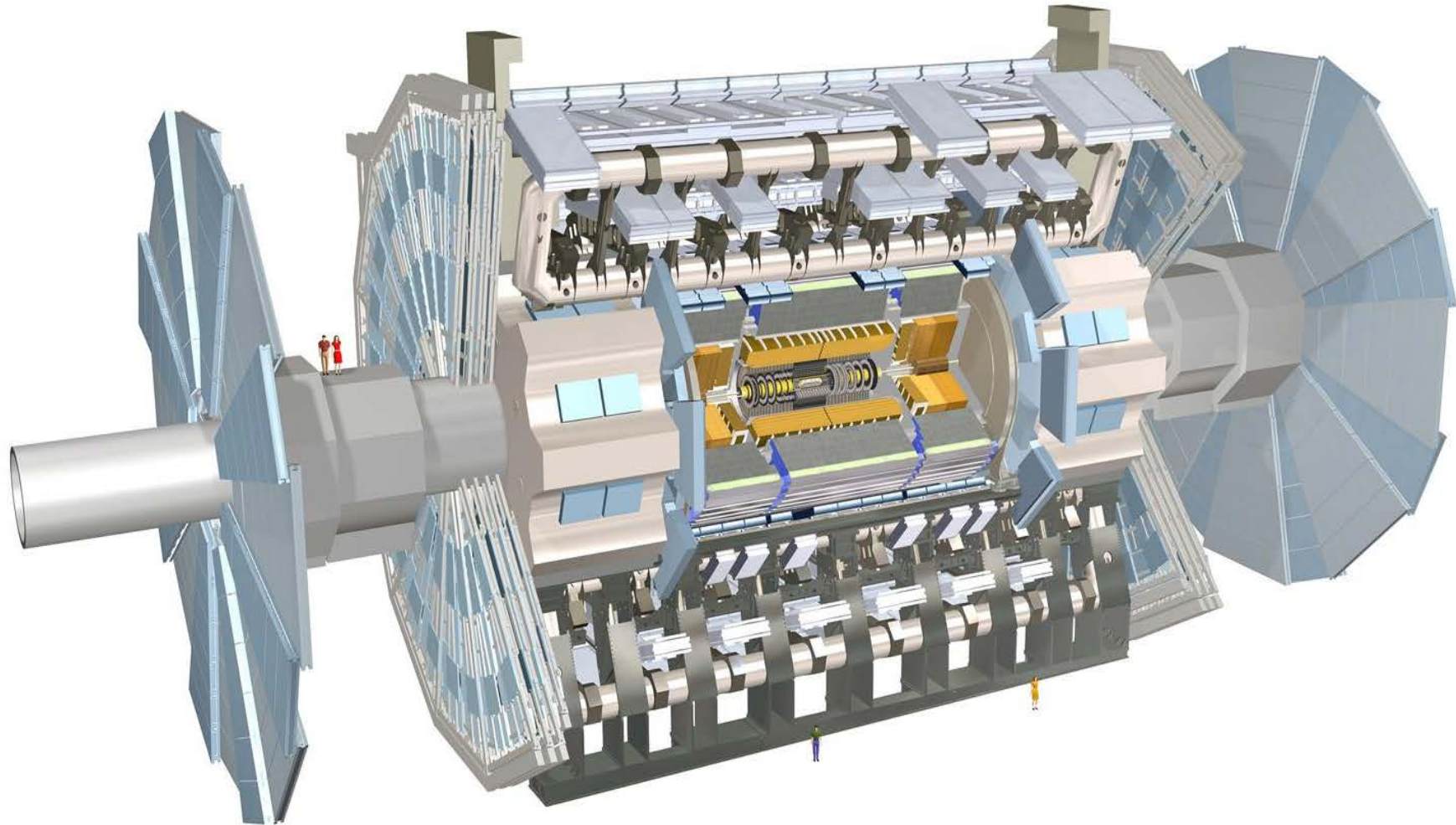
Collision de particules



Des géants pour traquer l'infiniment petit



Le détecteur Atlas



Diameter: 25m

Longueur: 46m

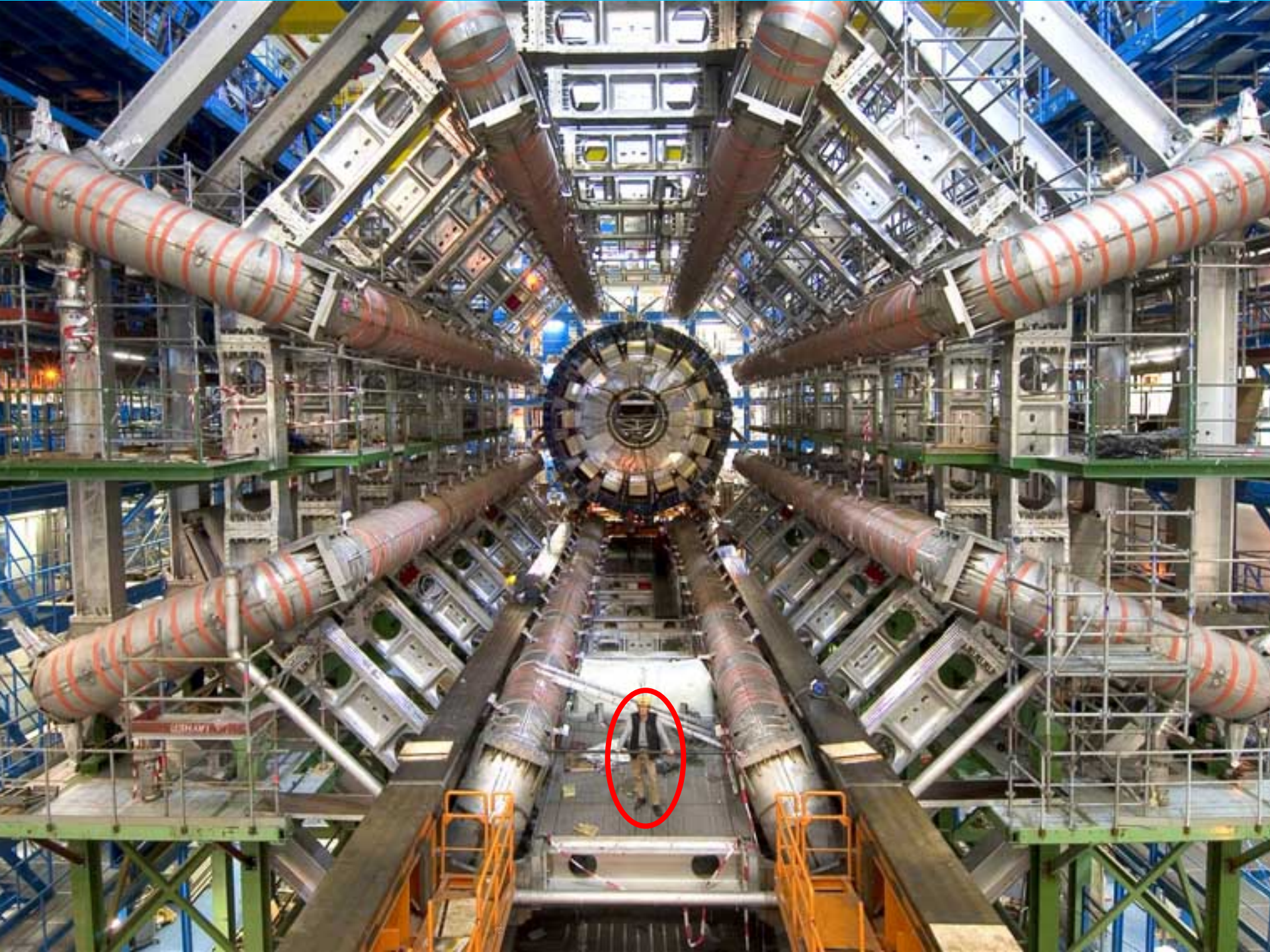
Poids: 7000 tonnes

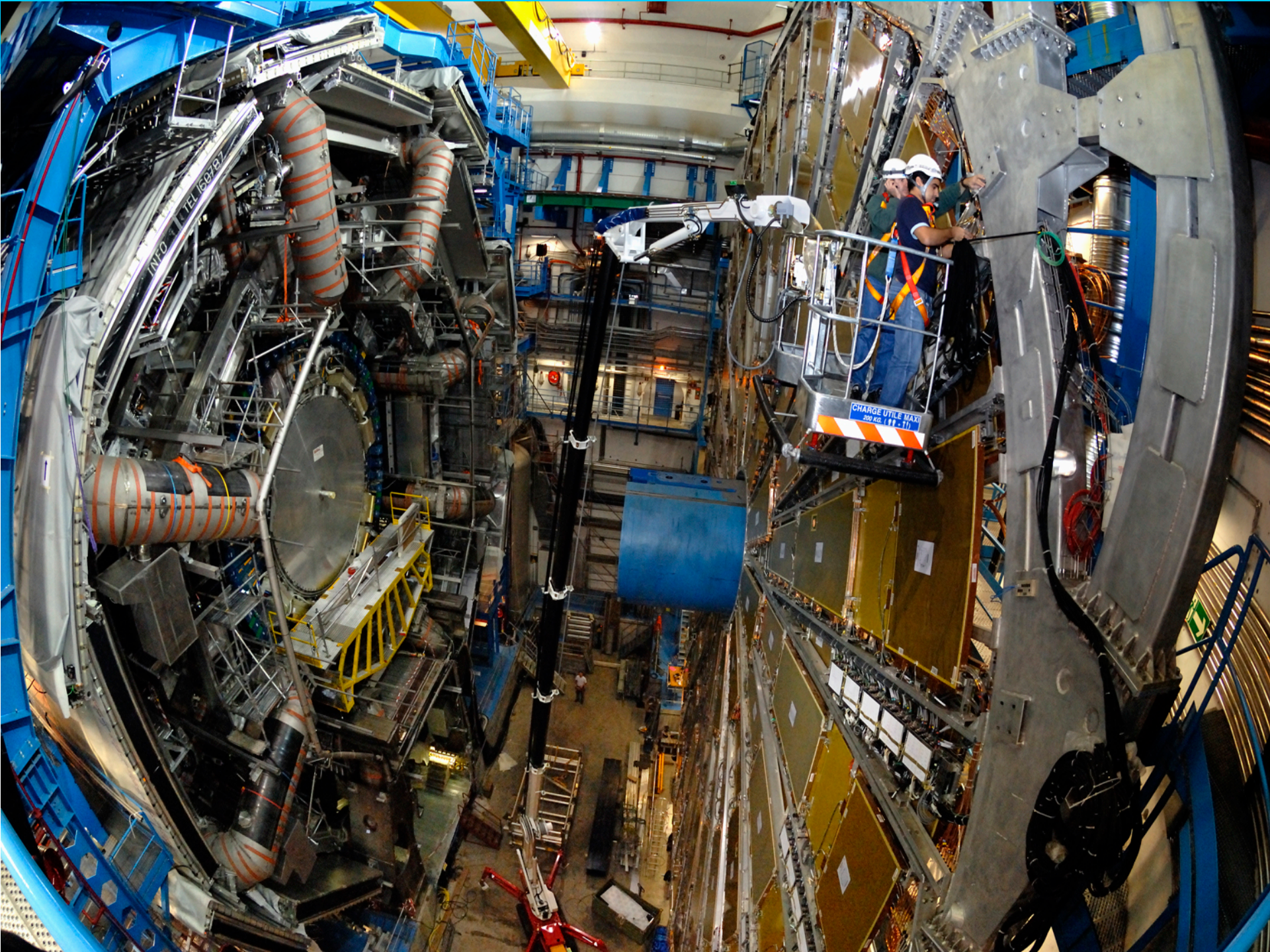
3000 km de cables

100 millions de canaux

38 pays

3000 auteurs





Structure d'un détecteur



■ Comment voit-on les particules?

- On ne les voit pas!
- On détecte le résultat de leurs interactions avec la matière qu'elles traversent

■ Structure des détecteurs en poupée russe

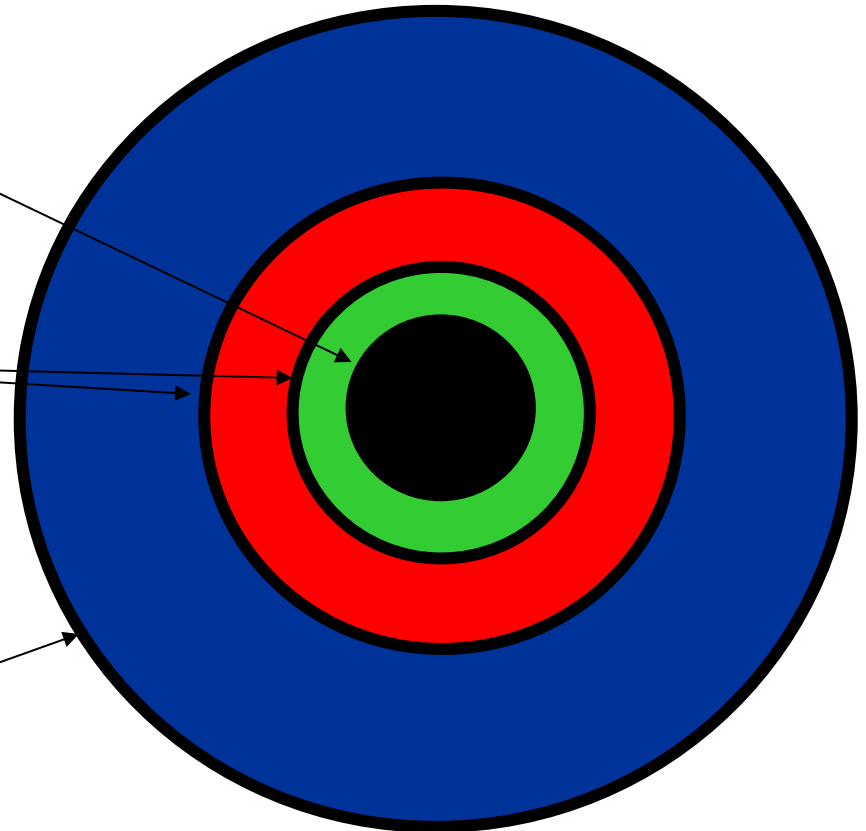
■ Trajectographes

- Suivent les particules chargées

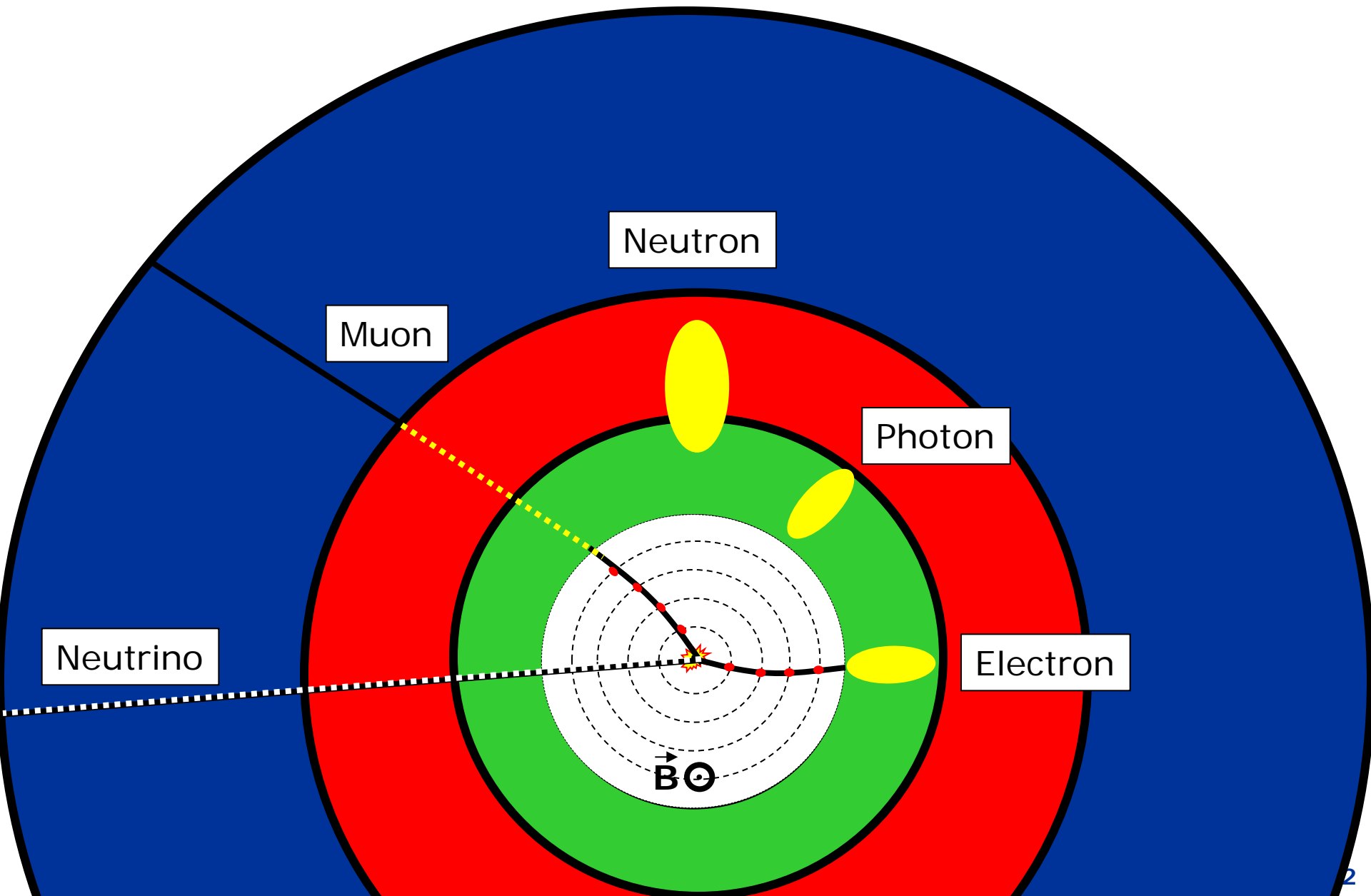
■ Calorimètre(s)

- Mesurent les énergies des particules (sauf muons et neutrinos)

■ Détecteurs de muons



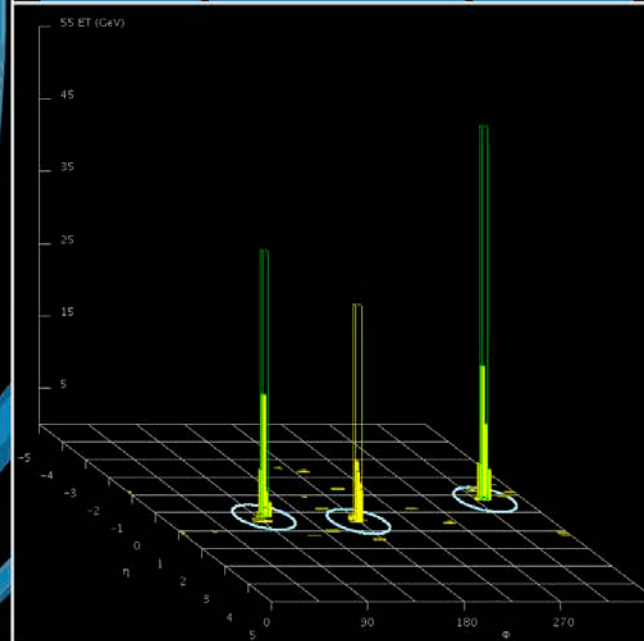
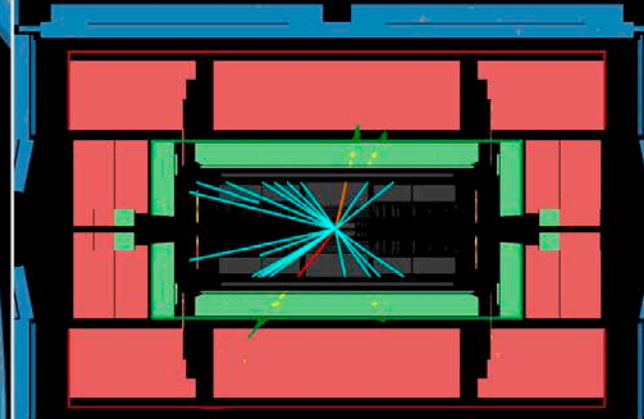
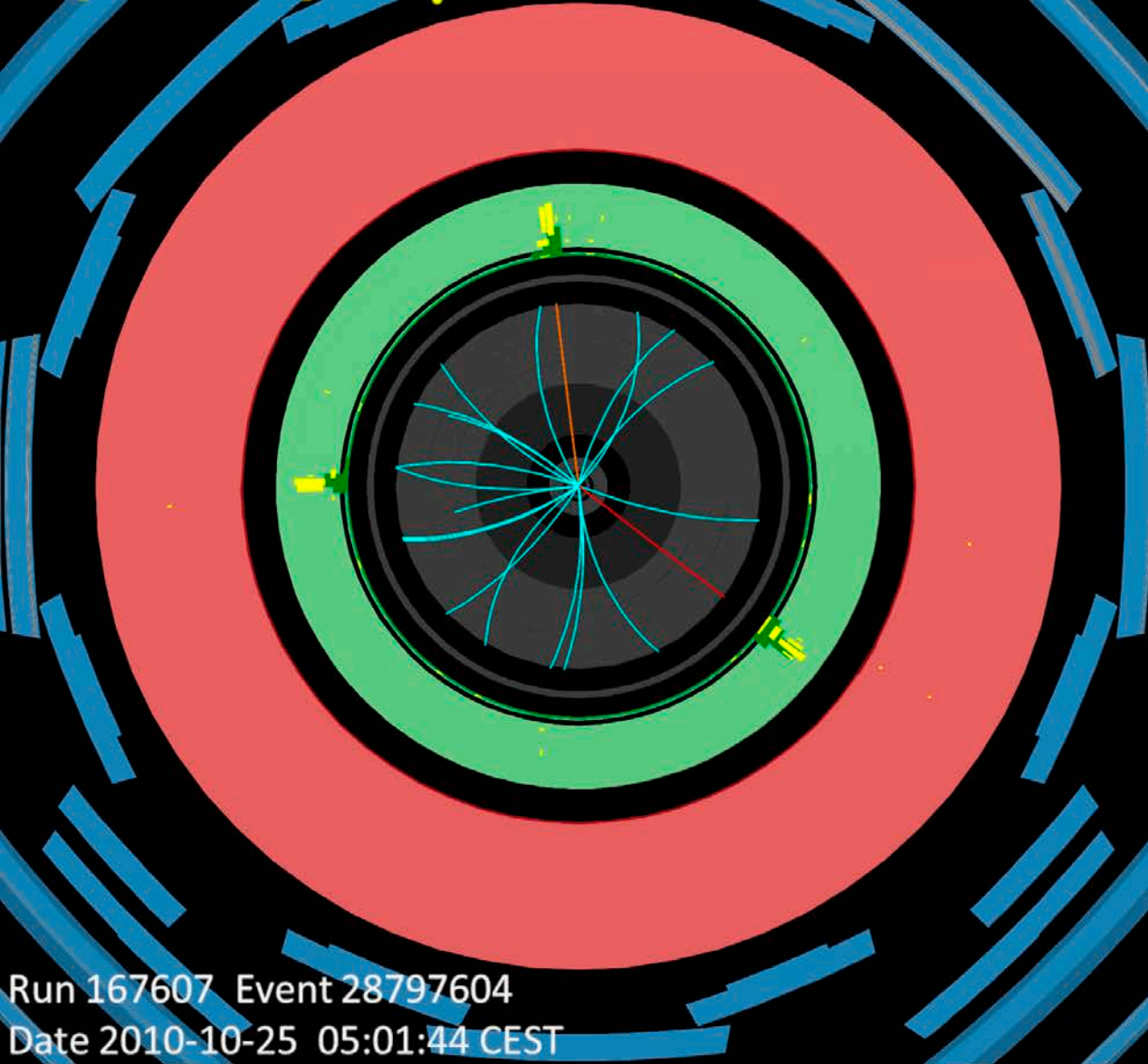
Détection des particules



$Z(\rightarrow ee) + \gamma$ Candidate



ATLAS EXPERIMENT

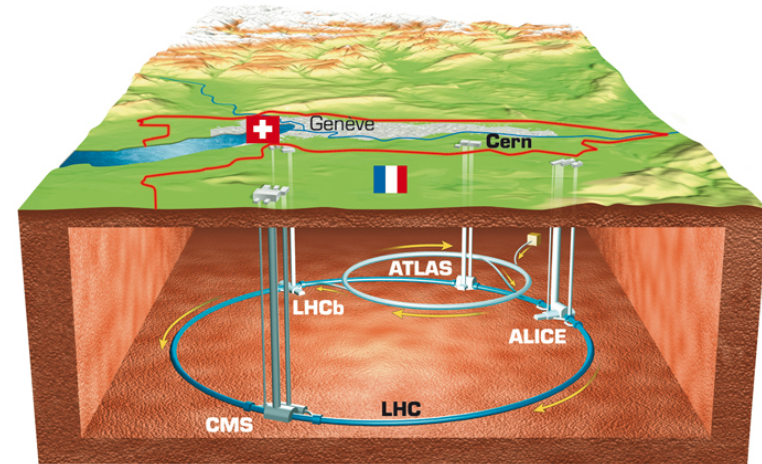


Run 167607 Event 28797604
Date 2010-10-25 05:01:44 CEST

- **Collision de protons avec 2 photons dans l'état final**
 - <http://www.atlas.ch/multimedia/2-photon-event.html>

Le boson de Higgs au LHC

- 1 boson de Higgs ($m=125\text{GeV}$) produit pour 5 milliards de collisions
- $\approx 500\,000$ bosons Higgs attendus au LHC
- Le boson de Higgs est instable et se désintègre en particules stables
 - Ex: $H \rightarrow \gamma \gamma$
 - BR: 2/1000
 - 1000 événements attendus



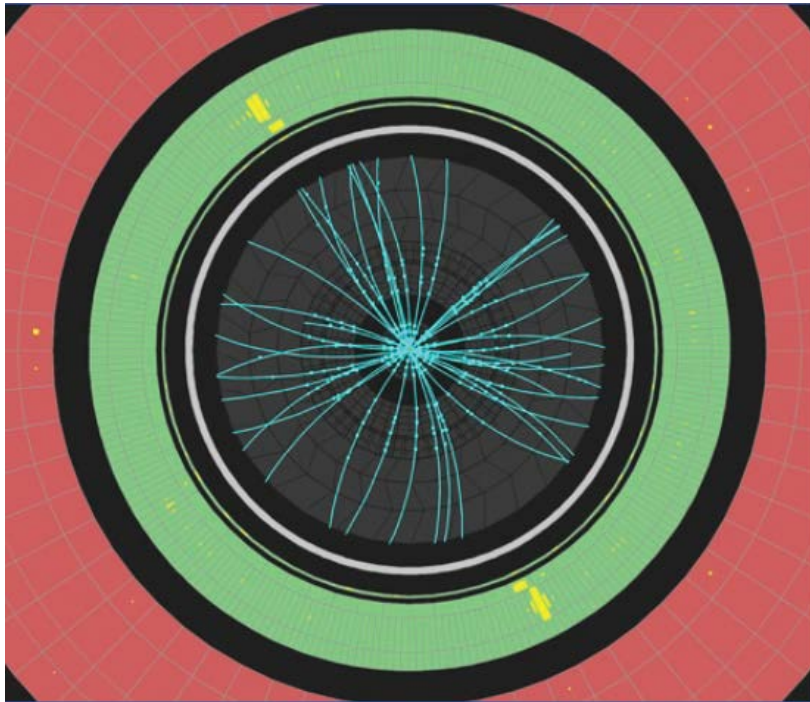
Probabilités de désintégration prédites pour une masse de 125 GeV

$H \rightarrow b\bar{b}$	58%
$H \rightarrow W^+W^-$	21%
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.4%
$H \rightarrow Z^+Z^-$	2.7%
$H \rightarrow \gamma\gamma$	0.2%

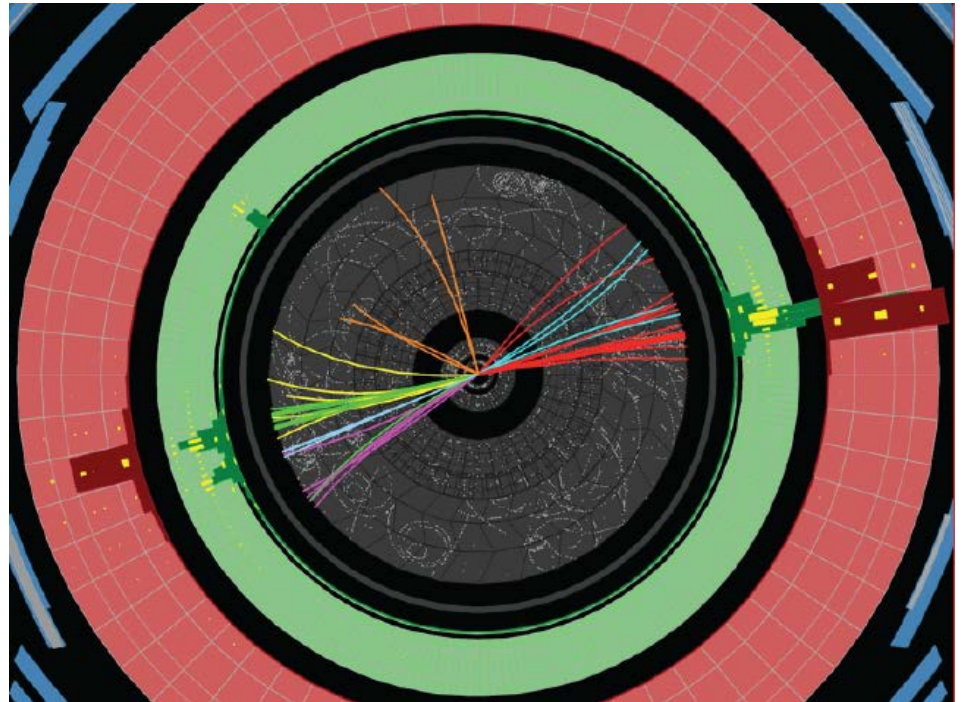
Stratégie de recherche

1 - Sélectionner toutes les collisions avec 2 photons

Signal



Bruit de fond



1 boson de Higgs ($m=125\text{GeV}$) produit pour 5 milliards de collisions



Le défi informatique

- Quelques chiffres:
 - Taux de croisement: 20Mhz
 - 20 TO/s
 - Impossible de tout enregistrer
 - Besoin de faire une sélection en ligne
 - ~200 enregistrés/s \Rightarrow 200MO/s
 - 7TO/jour
 - Par exemple, en 2011:
 - 1.3 milliard de collisions d'enregistrés
 - 1.3 PO (200 000 DVD)



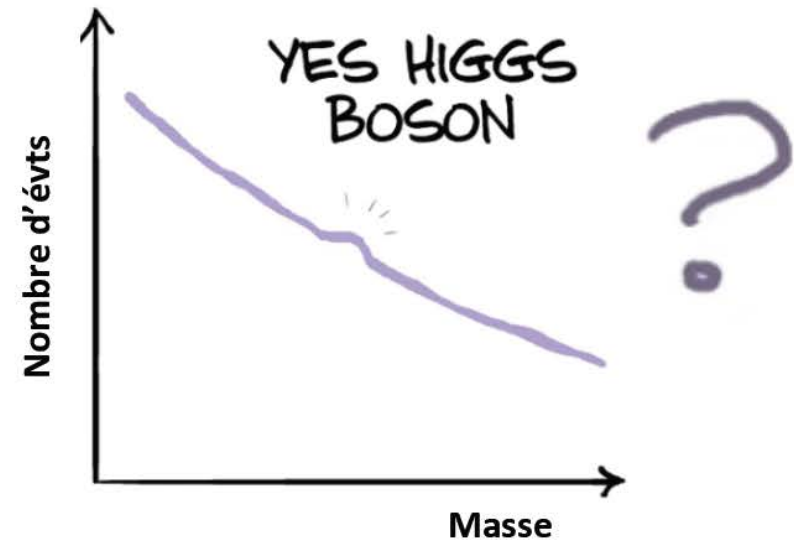
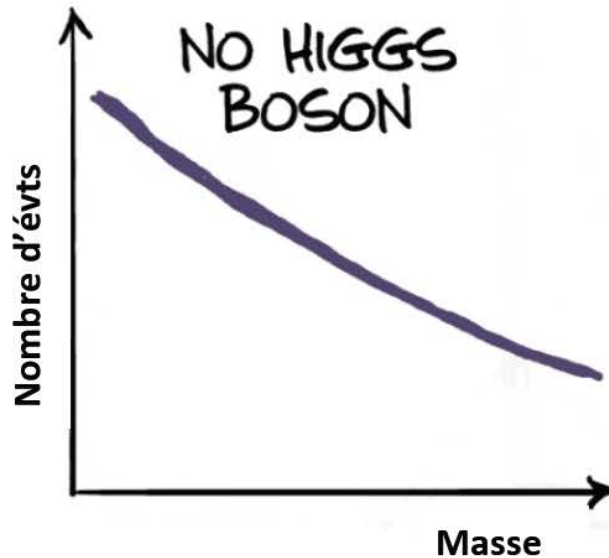
- Le logiciel d'ATLAS est à la hauteur de la complexité du détecteur ATLAS (4 millions de lignes de code). Il permet à partir des signaux électriques enregistrés d'identifier les particules produites lors des collisions et de mesurer leurs propriétés
- Une **grille de calcul** exploite la puissance de calcul (processeurs, mémoires, ...) d'environ 100000 ordinateurs mis en réseau afin de donner l'illusion d'un ordinateur virtuel très puissant.

Stratégie de recherche

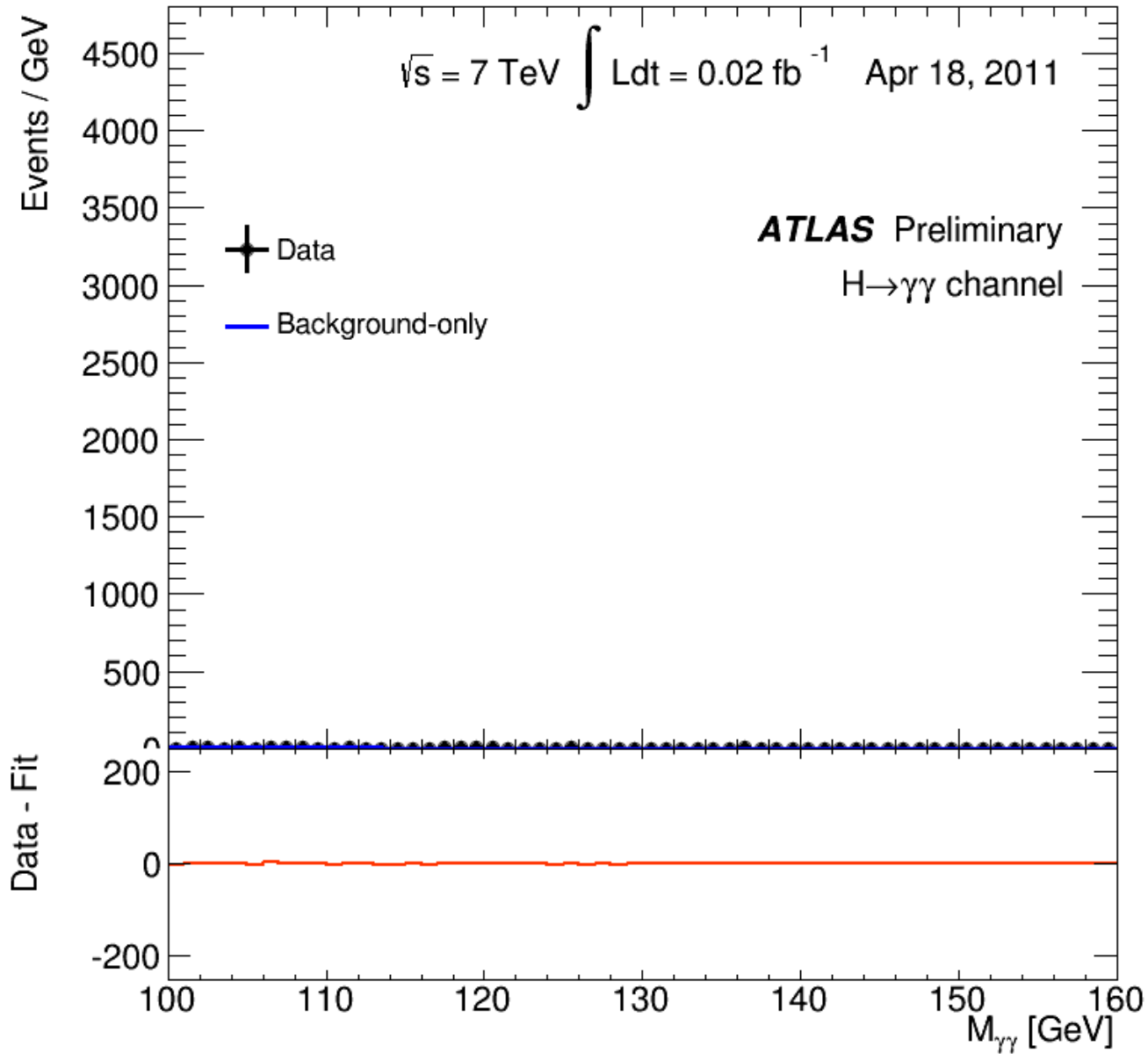
- 1 - Sélectionner toutes les collisions avec 2 photons
- 2 - Faire la distribution de la masse invariante des 2 photons

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

- 3 – Rechercher une bosse



Résultat



1 Giga eV = 1.8×10^{-27} kg \sim masse d'un proton

Découverte d'un nouveau boson

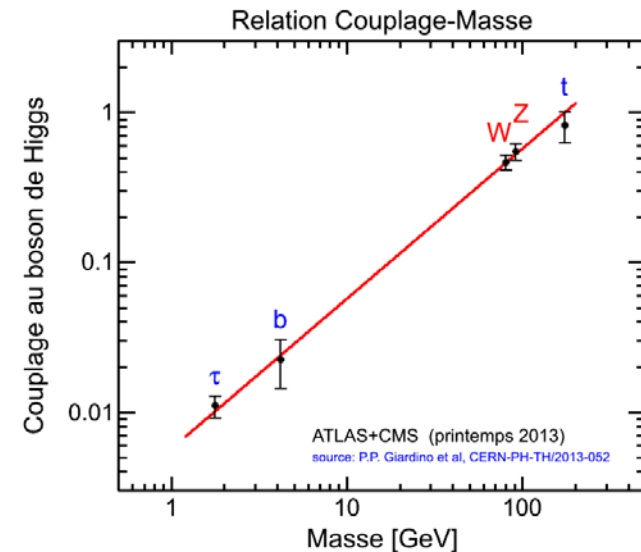
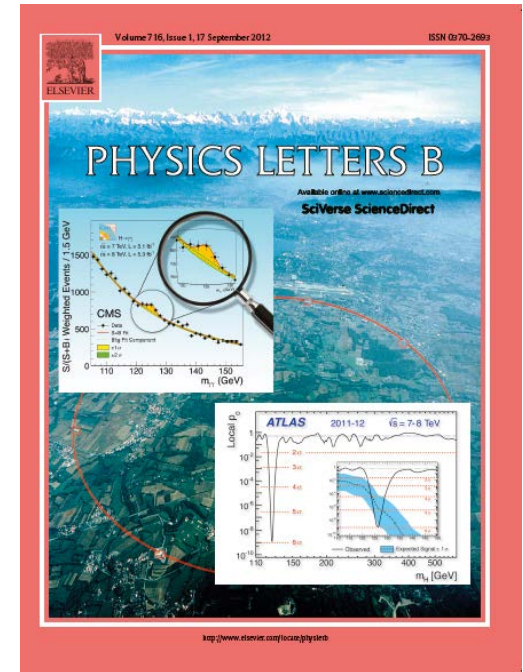
- D'autres canaux de recherche pointent vers le même résultat
 - $H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4$ leptons
 - $H \rightarrow W W \rightarrow l\nu l\nu$
 - ...

⇒ Les expériences ATLAS et CMS ont **découvert une nouvelle particule** ayant une masse de 125-126 GeV

- C'est **un boson** car un signal est observé dans le canal à deux photons

- **S'agit-il bien du boson de Higgs?**

- C'est **UN** boson de Higgs.
- On ne peut pas affirmer avec certitude qu'il s'agit **DU** boson de Higgs du MS



Matière

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Forces

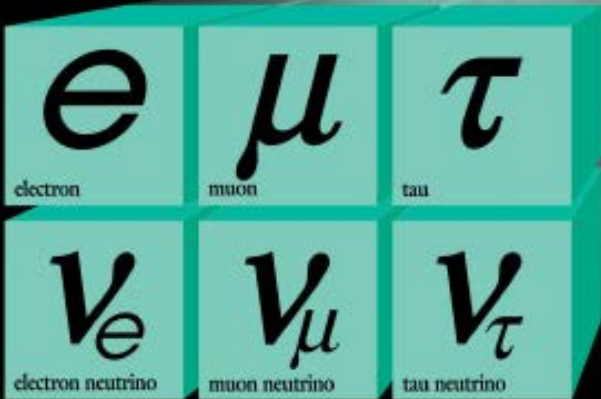
Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

Matière

Quarks



Leptons



Forces

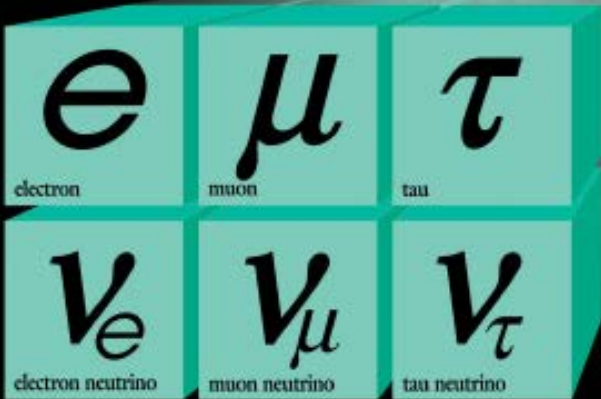


Matière

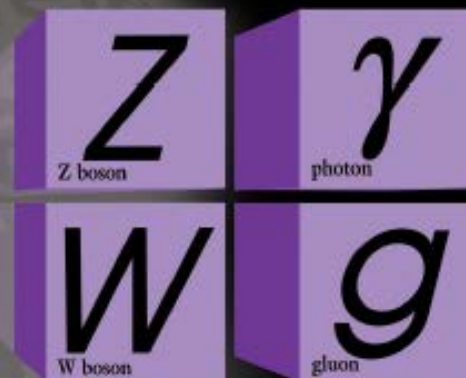
Quarks



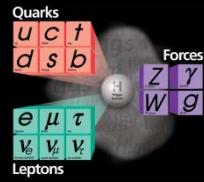
Leptons



Forces



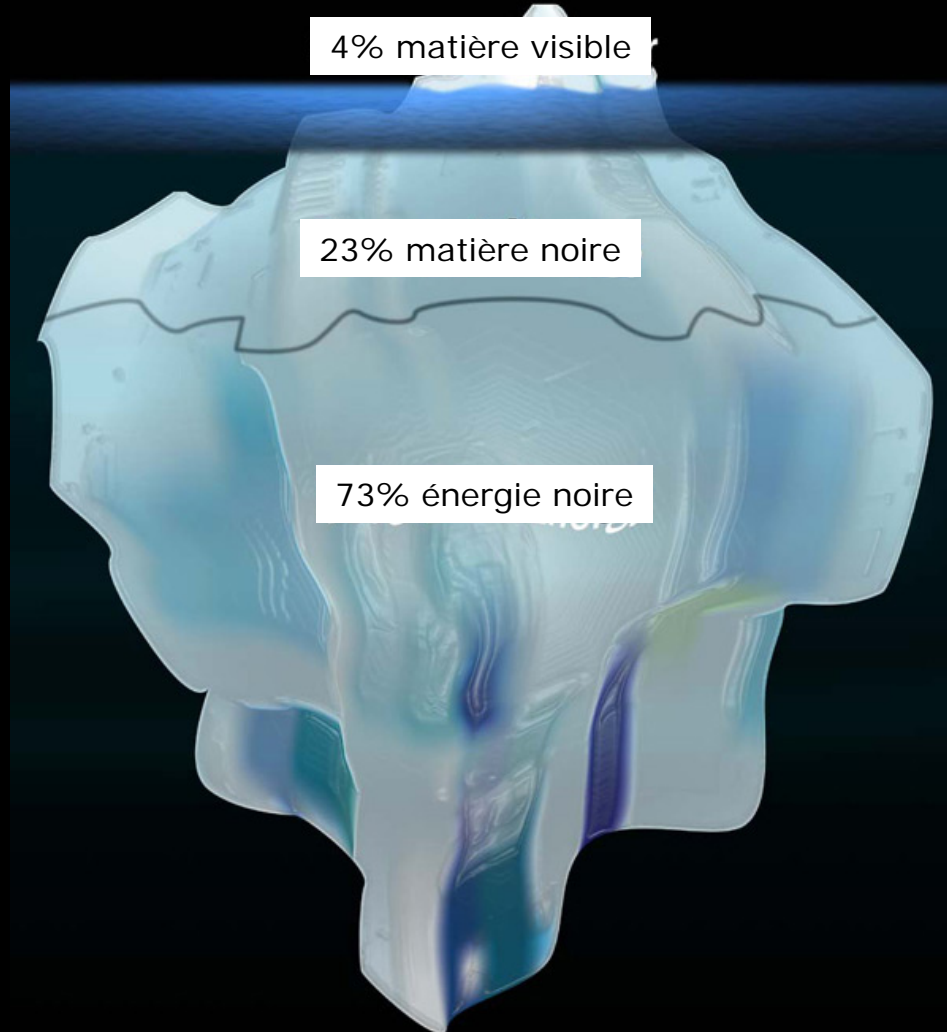
4 % Visible Matter



4% matière visible

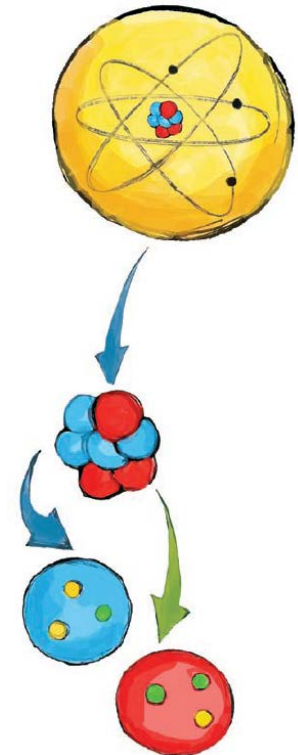
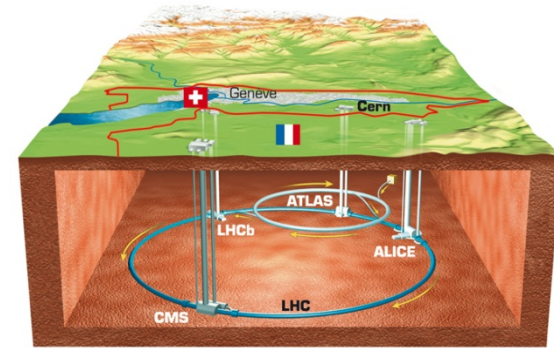
23% matière noire

73% énergie noire



Conclusion

- Le LHC est une fantastique machine pour étudier les secrets de la matière
- Découverte d'une nouvelle particule compatible avec le tant attendu boson de Higgs
- Signaux de nouvelle physique au LHC?
 - Redémarrage prévu en 2015 à pleine puissance (14TeV)
- Plus d'information sur le LHC à:
 - www.lhc-france.fr/



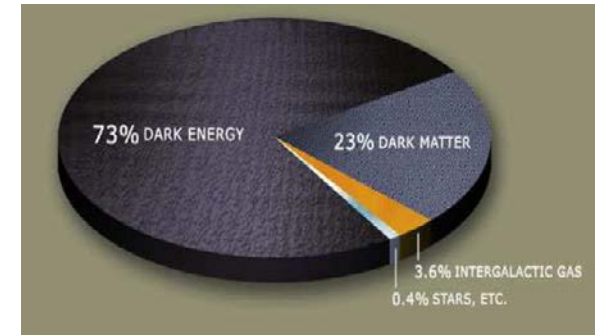


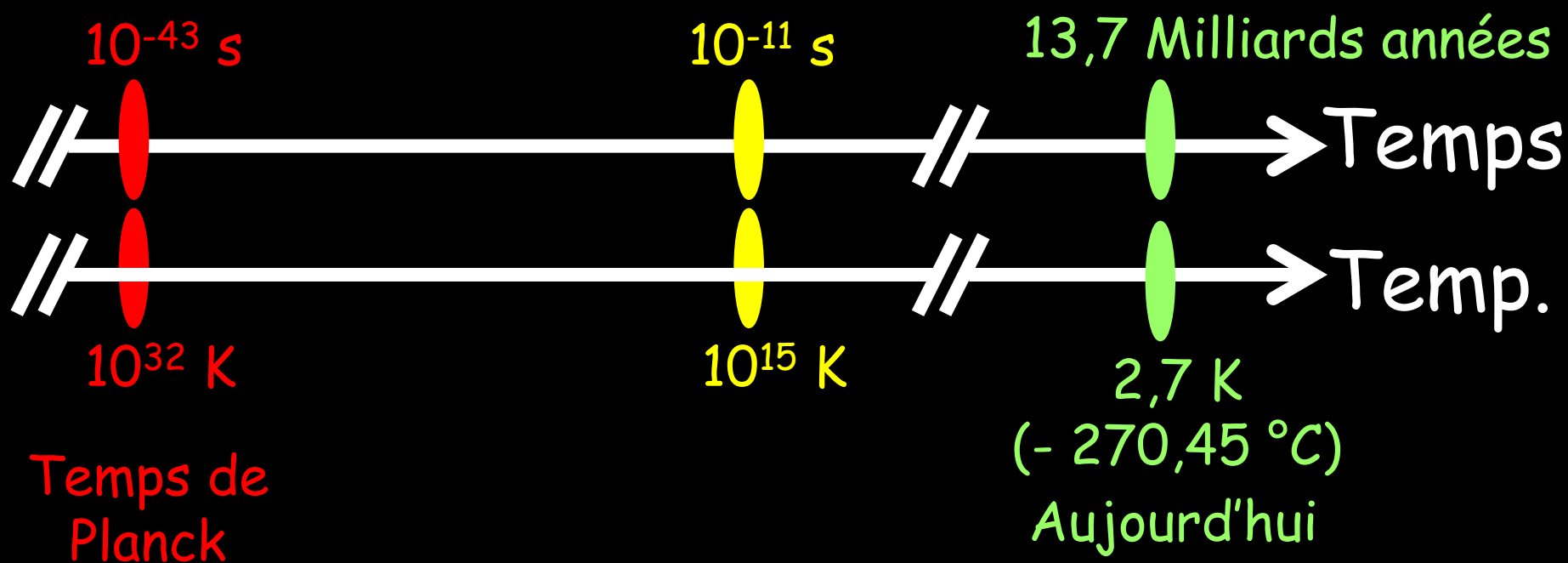
That's all Folks!

Une partie du matériel présenté a été empruntée à: Nicolas Arnault, Yann Coadou, Christophe Ochando, Gauthier Hamel de Monchenault, David Rousseau, Francois Vazeille,...

Questions ouvertes

- Les forces de la nature ont-elles une origine commune?
- Comment décrire introduire la gravité dans le Modèle Standard?
- Pourquoi l'antimatière est-elle si rare ?
- Quelle est la composition de l'univers?
 - On ne comprend que 4% du contenu énergétique de l'univers
- D'où vient la masse des neutrinos?
- ...

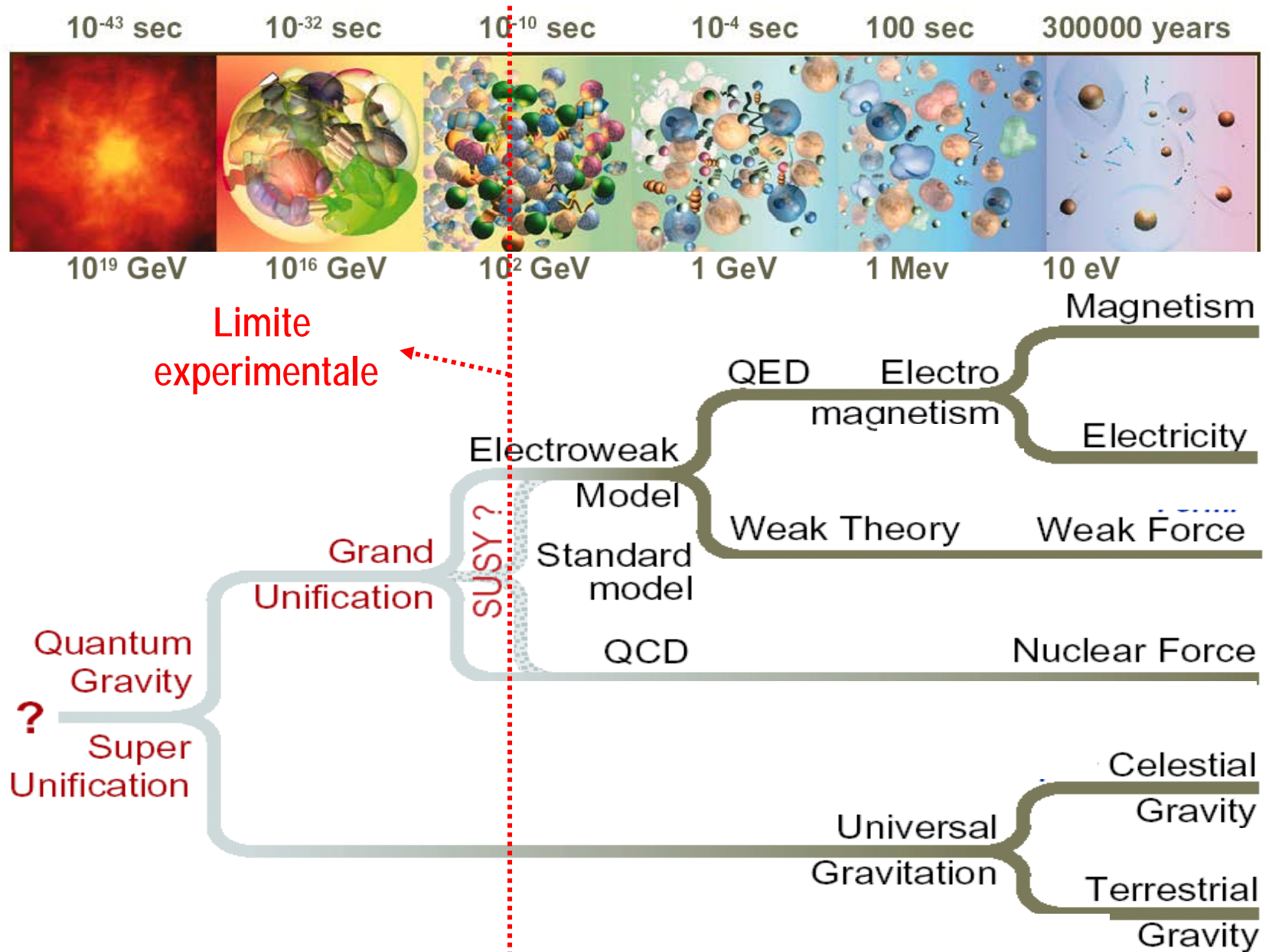




Les particules n'ont pas de masse

Les particules sont massives

Unification des forces



Les unités de masse et d'énergie

- Les particules élémentaires sont très légères:
les unités courantes (le kilogramme, etc.) ne conviennent pas
⇒ choix adapté à la discipline.

- Tirer partie de la relation célèbre $E = M c^2$

Particule de masse M et d'énergie E ,
avec c = vitesse de la lumière dans le vide $\approx 300\,000$ km/s

- **Conventions**

◇ Nous posons $c = 1 \Rightarrow E = M$ **masse = énergie.**

◇ **Unité d'énergie:** celle acquise par un électron accéléré par une tension de 1 Volt = 1 électron-volt ou eV

⇒ Multiples: KeV = 10^3 eV soit 1 millier eV

MeV = 10^6 eV soit 1 million eV

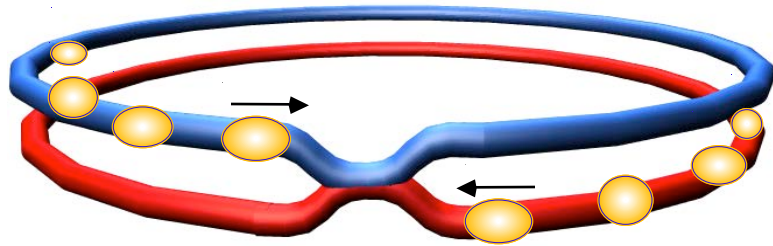
GeV = 10^9 eV soit 1 milliard eV

TeV = 10^{12} eV soit 1000 milliards eV

◇ *Exemples:* - Un électron a une masse de 511 KeV.

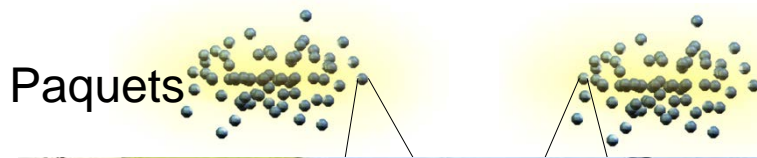
- Un proton a une masse de 938 MeV soit presque 1 GeV.

Les collisions de protons au LHC



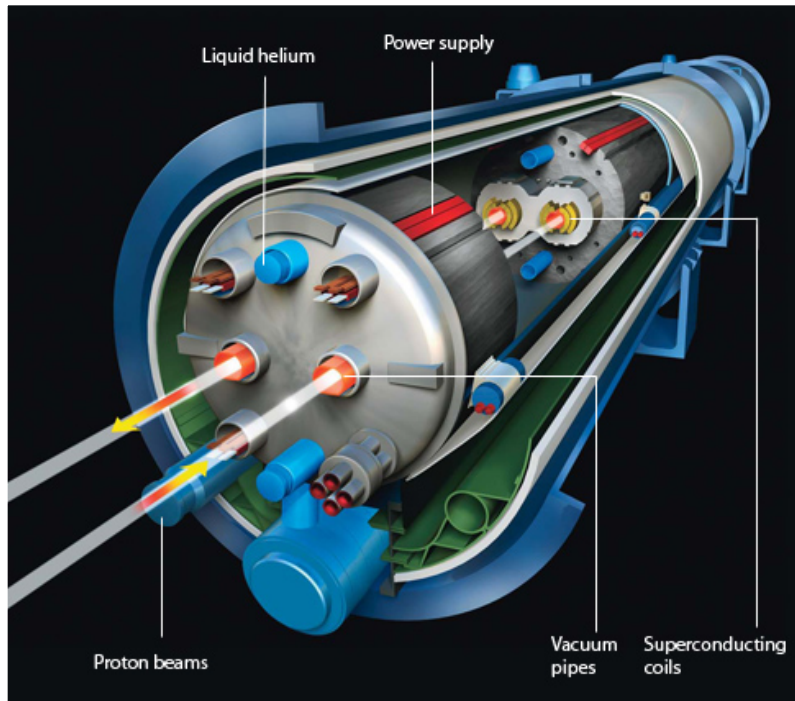
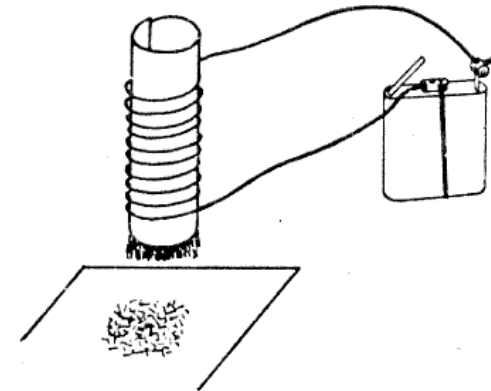
3000 paquets de protons
100 milliard de protons par paquet
Croisements de faisceaux: 20 MHz

~ 20 collisions de protons
par croisement des faisceaux



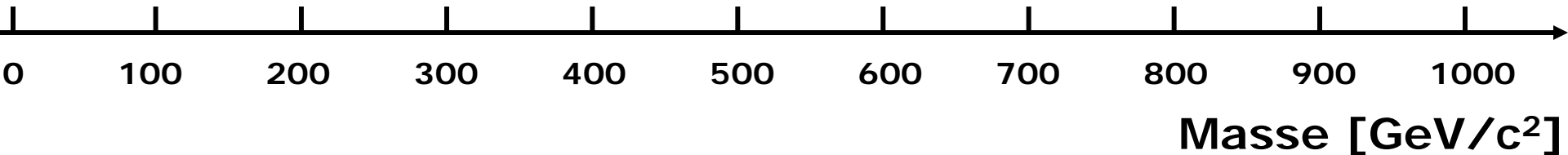
Les aimants du LHC

- Champ magnétique pour courber les faisceaux de protons
 - 8.3 Tesla: $\sim 200\,000$ fois plus grand que le champ magnétique terrestre
- Aimants supraconducteurs refroidis à -271°C (1.9K)
 - Supraconductivité: propriété de certains matériaux de présenter une résistivité nulle en dessous d'une certaine température critique



La chasse au boson de Higgs

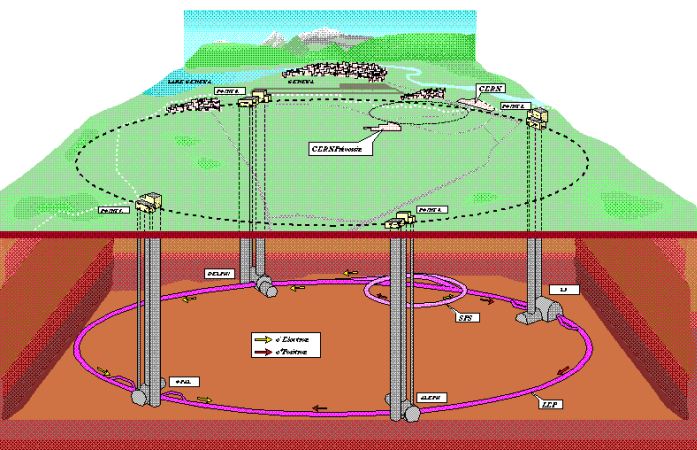
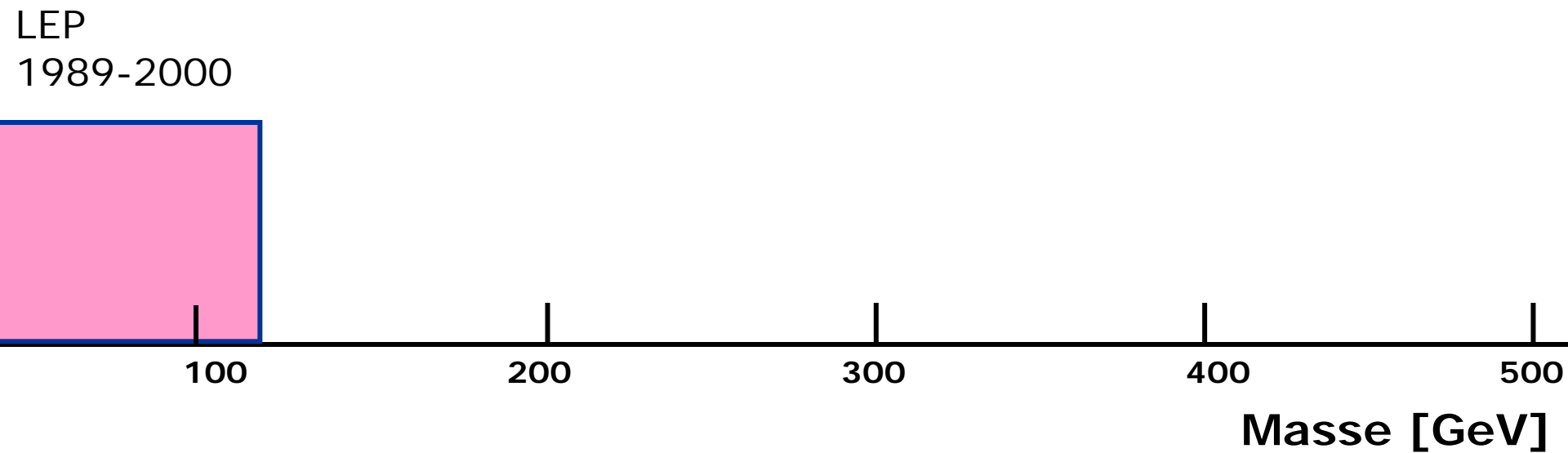
?



- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par le Modèle Standard sauf sa masse
- Seule contrainte: $m_H < 1000 \text{ GeV}/c^2$

$$1 \text{ Giga eV}/c^2 = 1.8 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

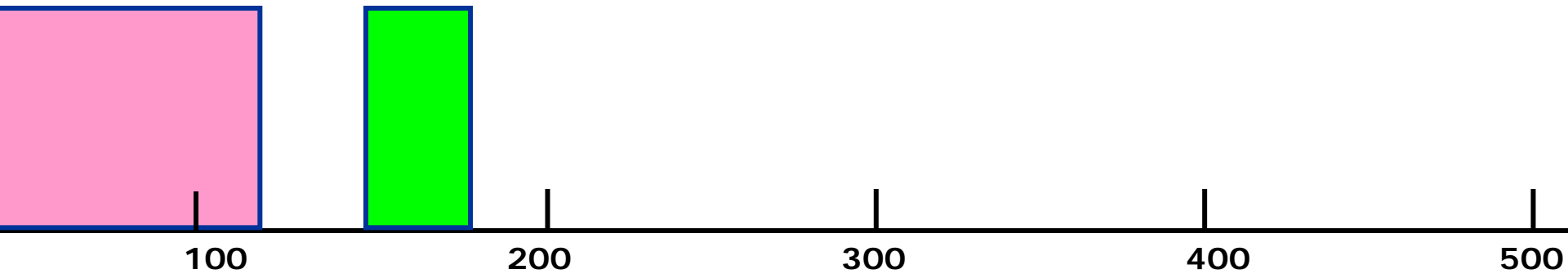
La chasse au boson de Higgs



Le LEP au cern
(pres de Genève)

La chasse au boson de Higgs

TeVatron
1983-2011

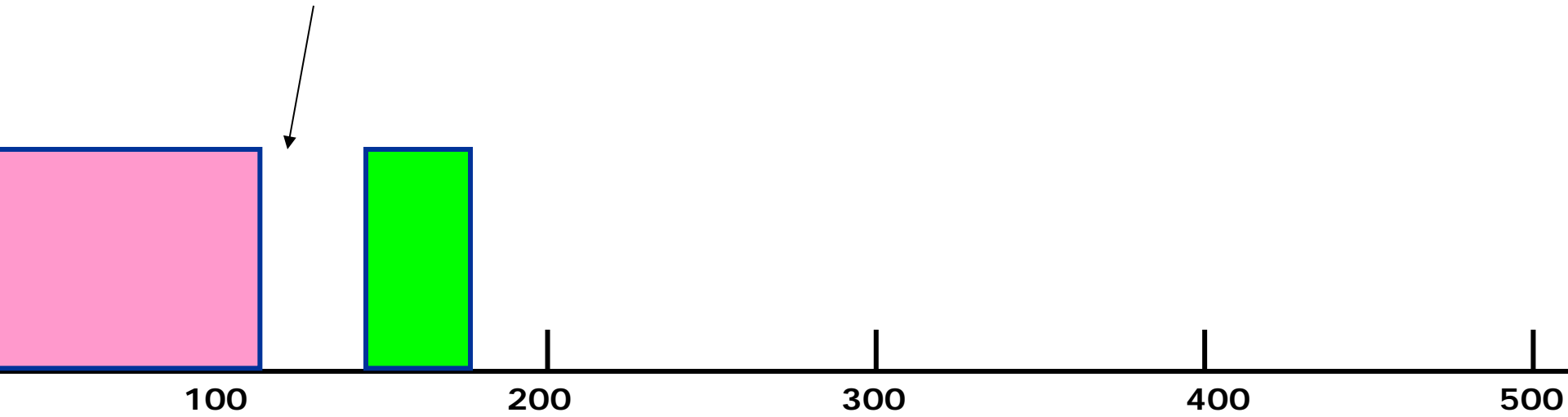


Le TeVatron à Fermilab
(pres de Chicago)



La chasse au boson de Higgs

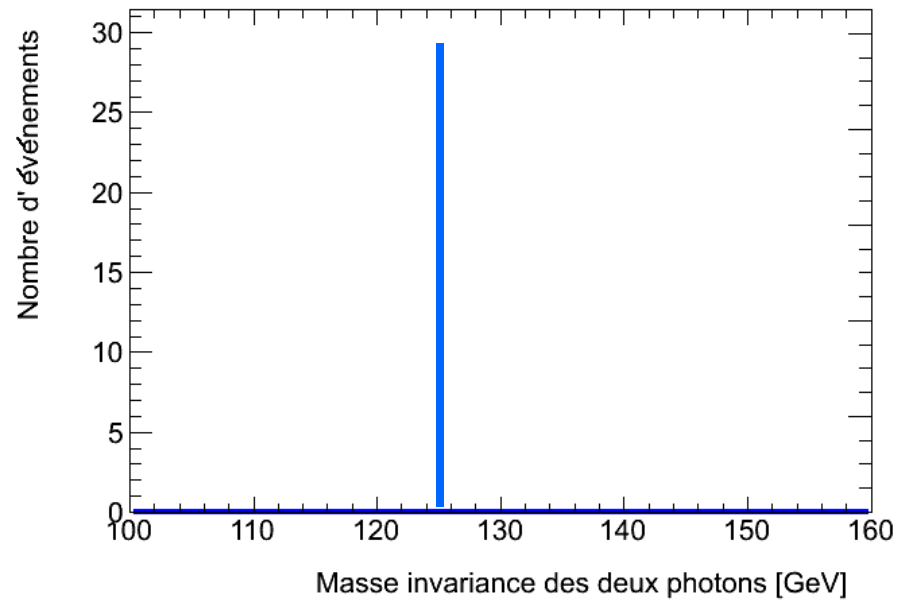
Région préférée pour des raisons de consistance du Modele Standard



Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

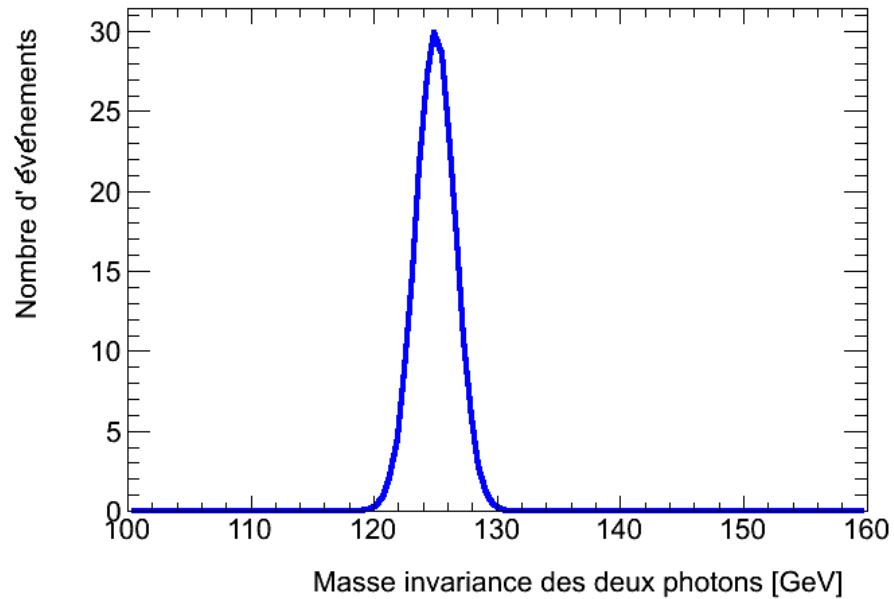
Higgs ($m_H = 125\text{GeV}$)



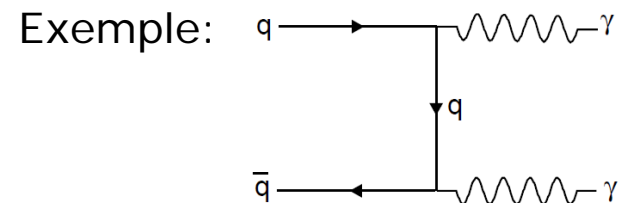
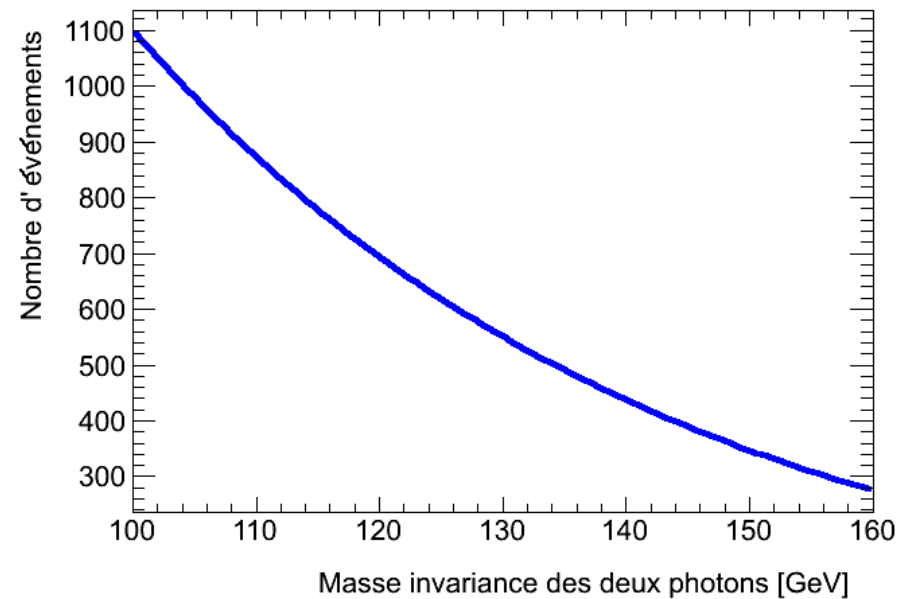
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

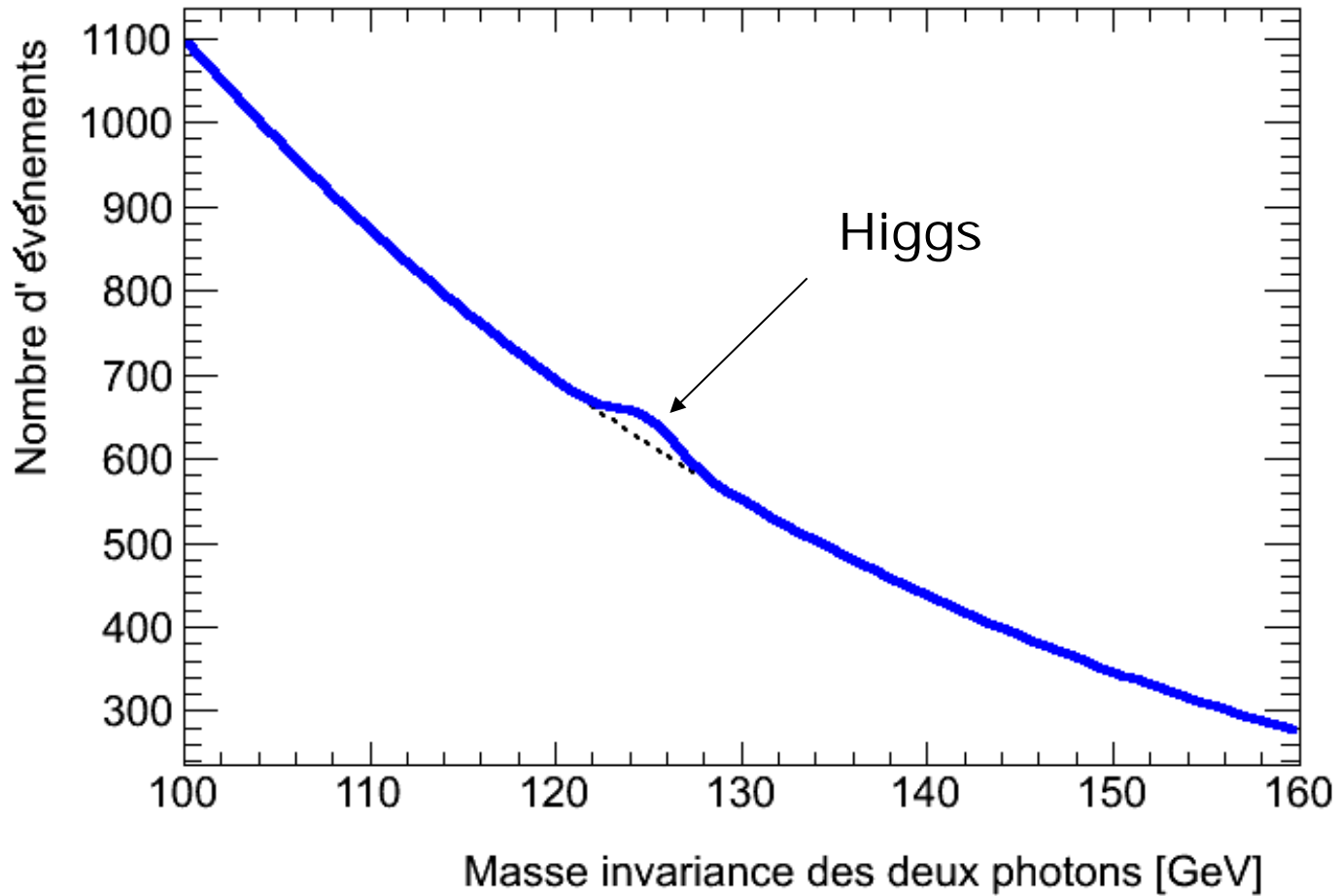
Higgs ($m_H = 125\text{GeV}$)



Bruit de fond



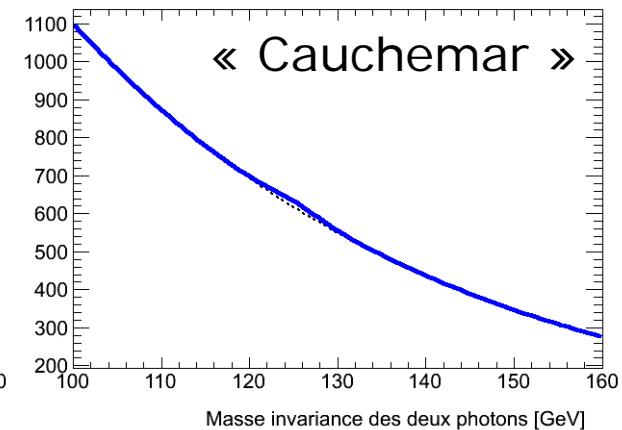
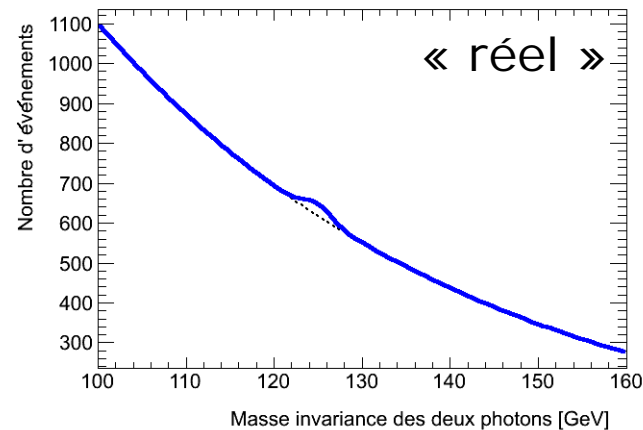
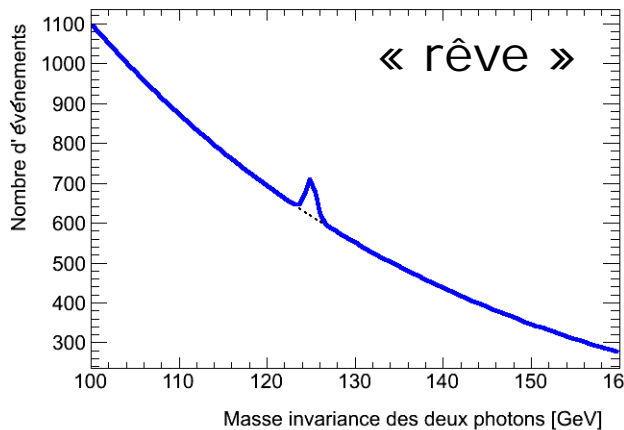
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$: simulation



Bosse = boson de Higgs

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$: simulation

Dégradation de la résolution



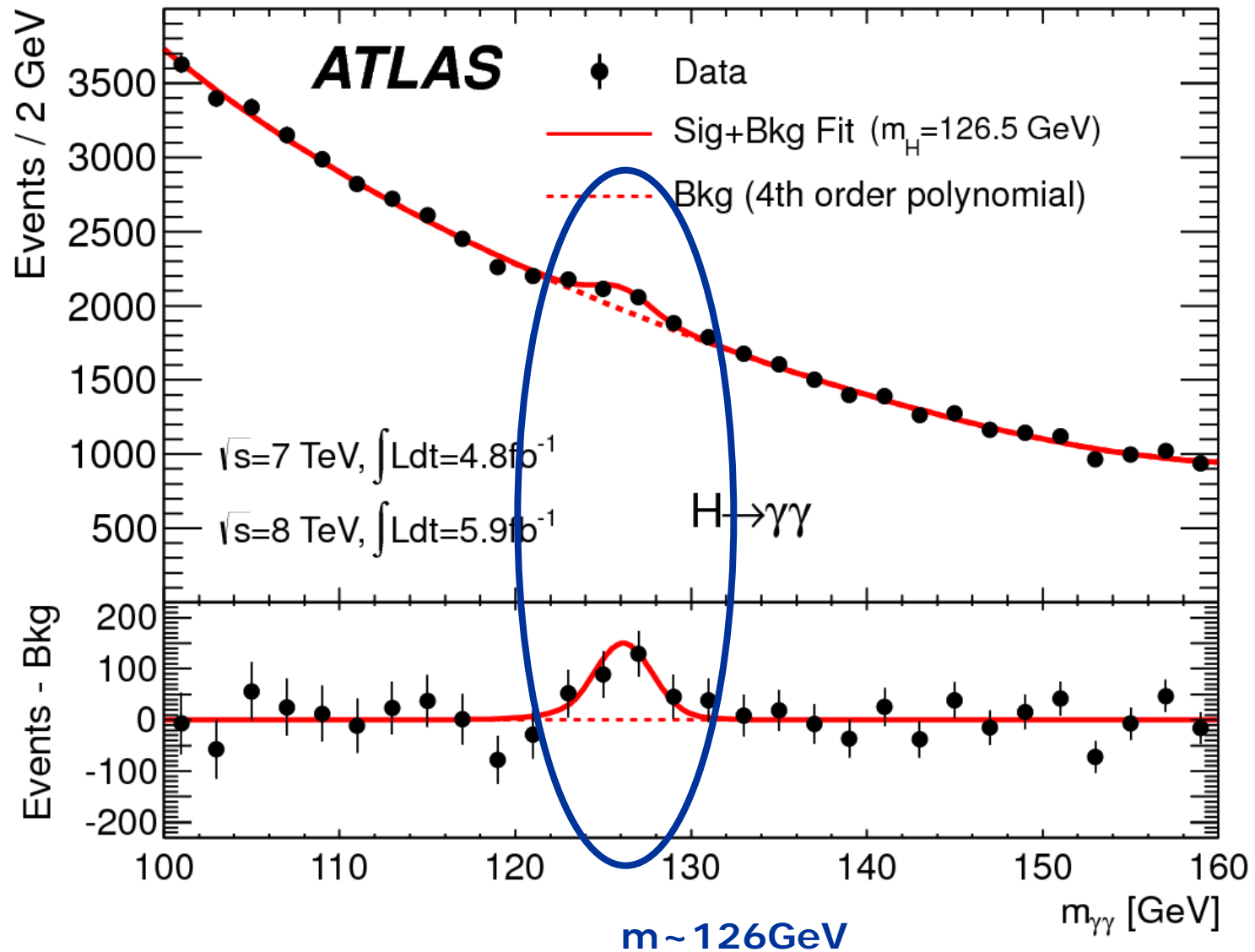
Impossible de voir
le boson de Higgs

Une très bonne résolution en énergie du
calorimètre électromagnétique est nécessaire

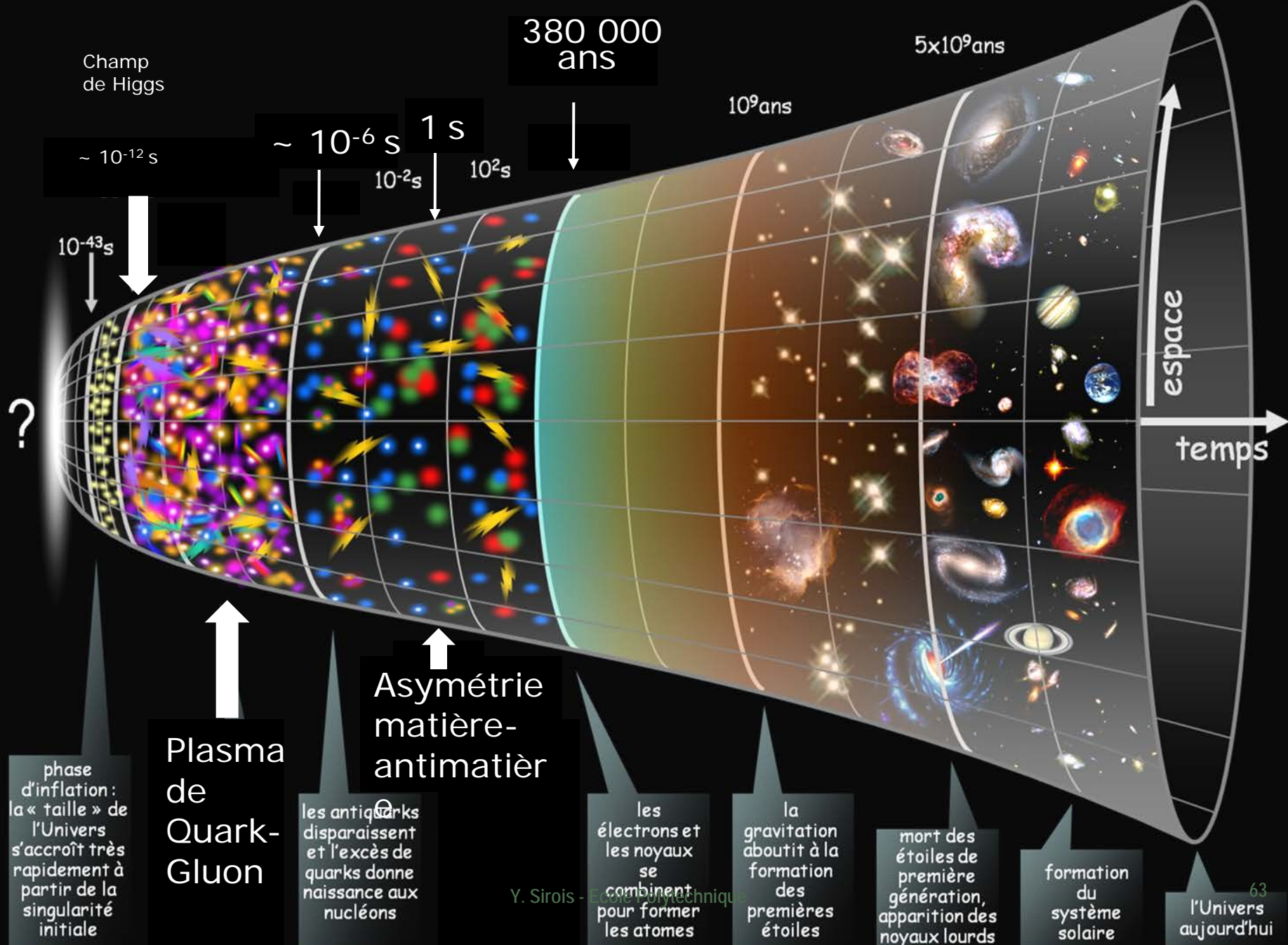
Il faut des détecteurs très précis!!!

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$: les vrais données

~ 1000 milliard de collisions



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



Champ de Higgs

380 000 ans

5x10⁹ans

10⁹ans

~ 10⁻¹²s

~ 10⁻⁶s

1 s

10⁻²s

10²s

10⁻⁴³s

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

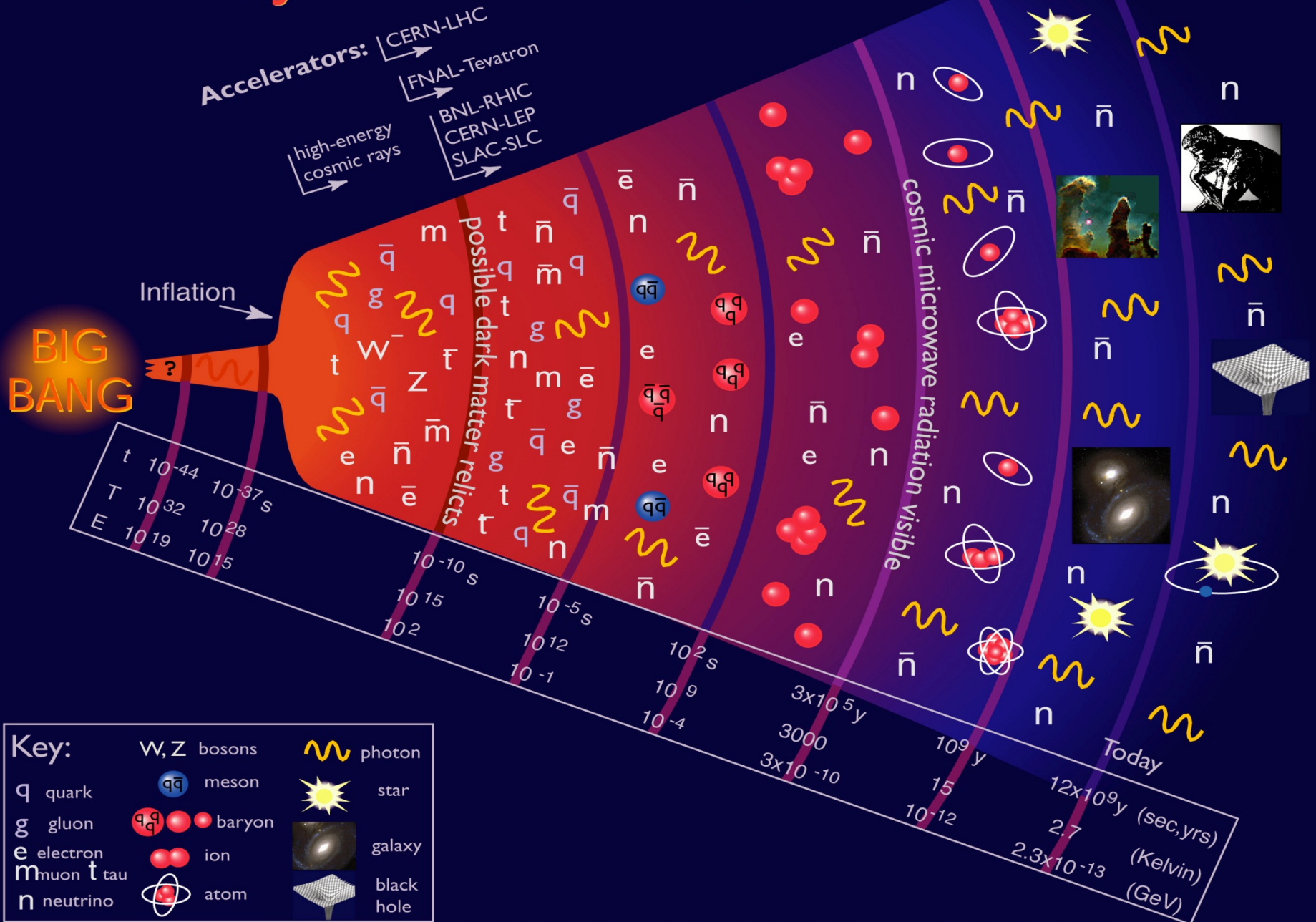
mort des étoiles de première génération, apparition des noyaux lourds

formation du système solaire

l'Univers aujourd'hui

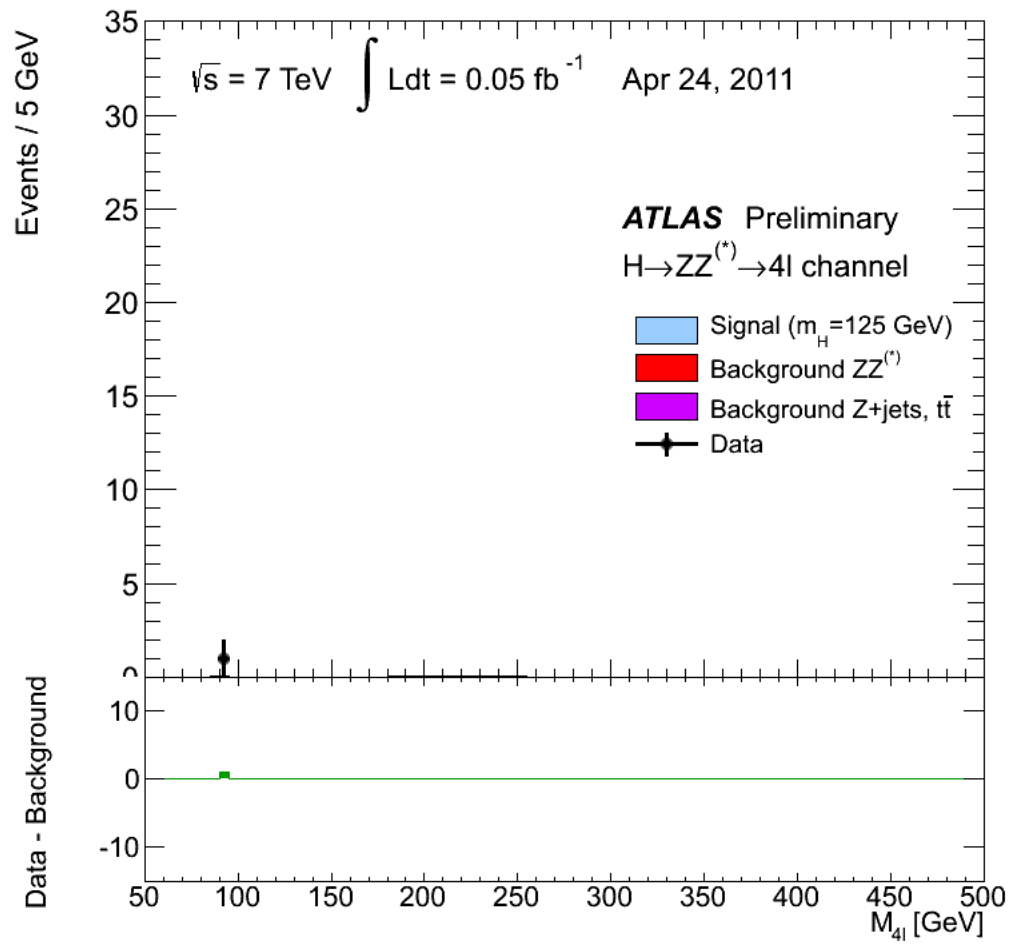
Y. Sirois - Exo-physique

History of the Universe





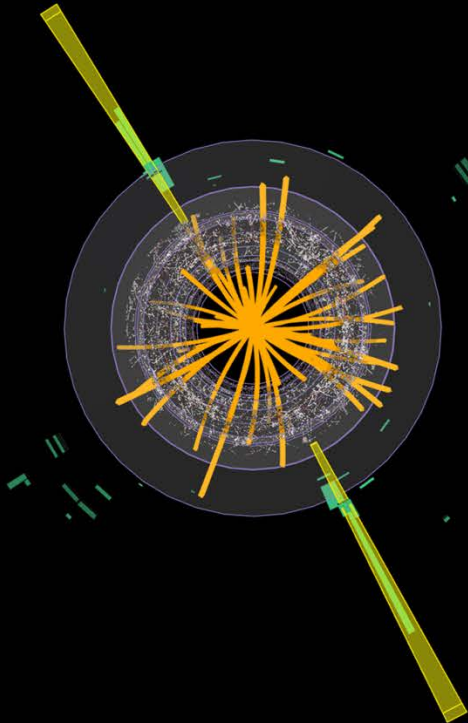
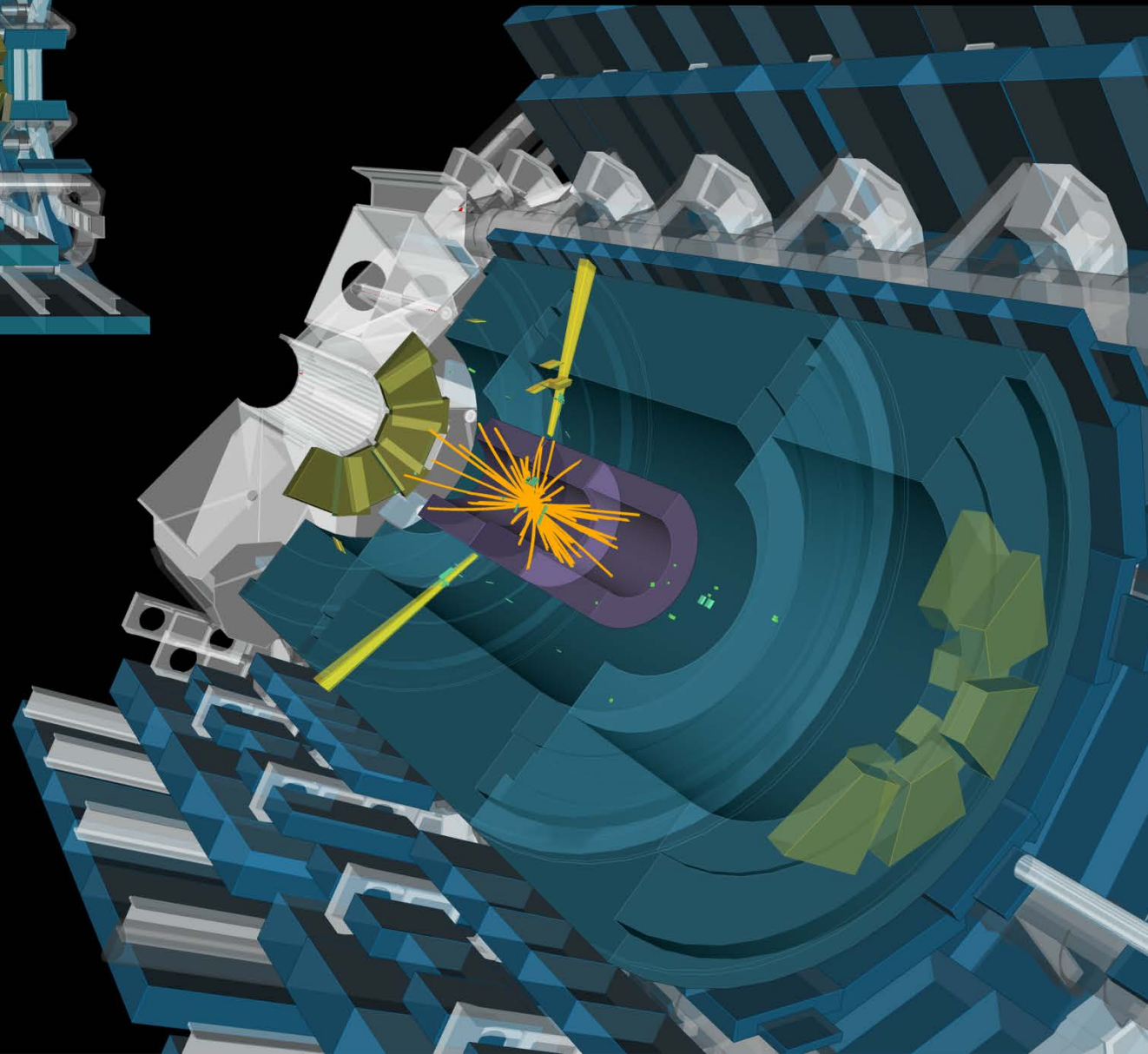
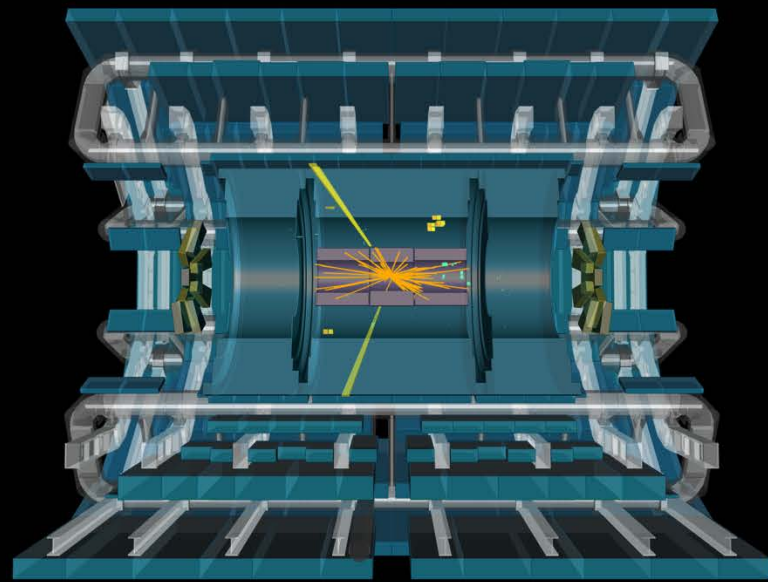
<http://cds.cern.ch/record/1053676>

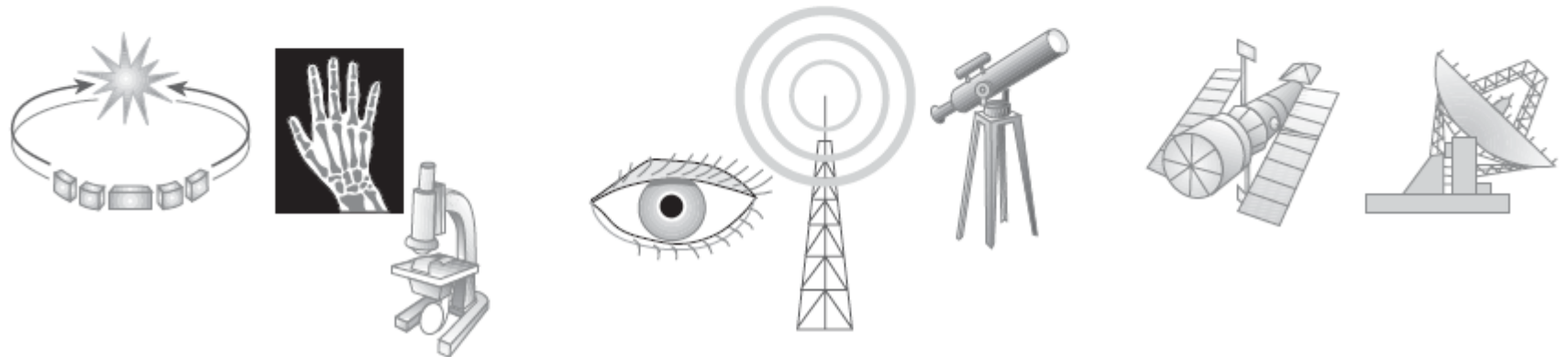
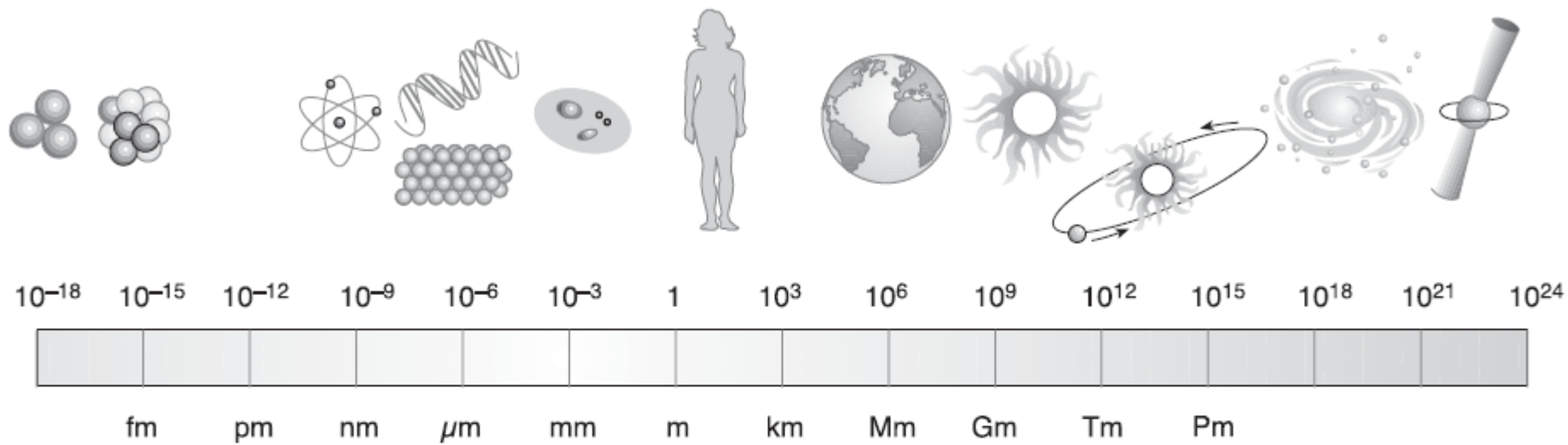






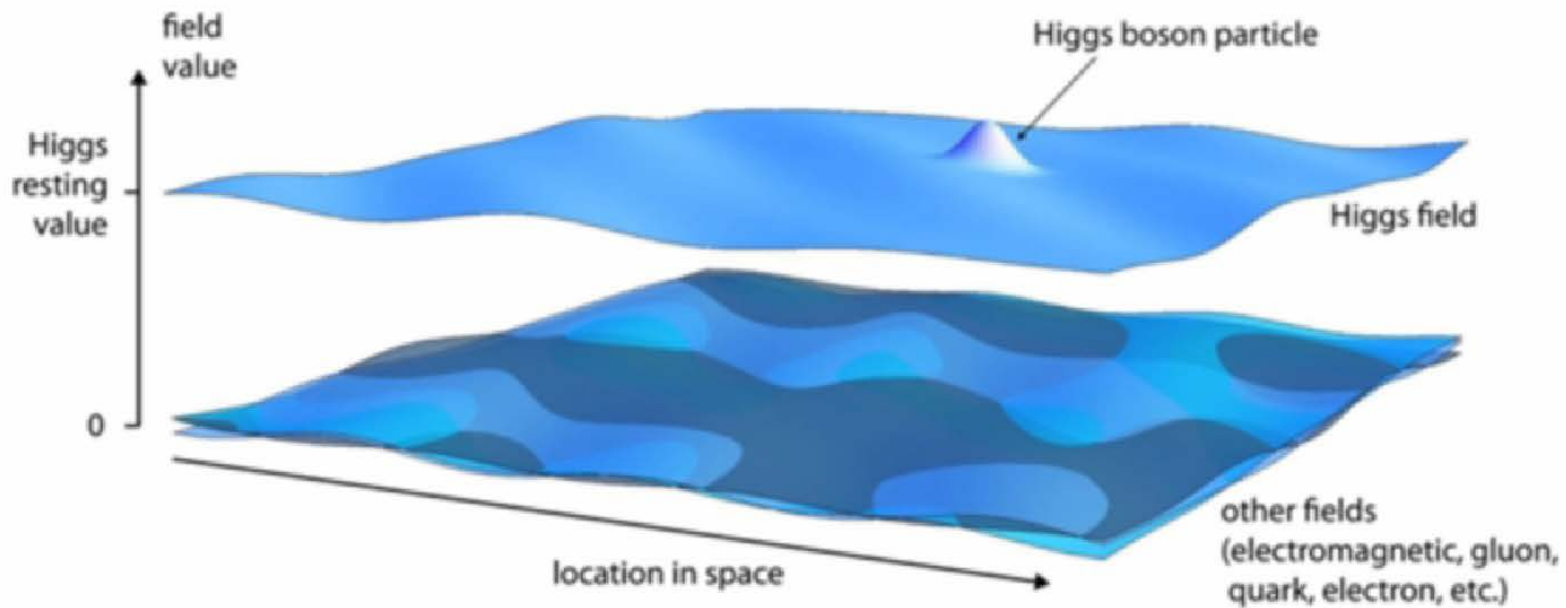
Run: 191426
Event: 86694500
2011-10-22 17:30:29 CEST







Secret of the weak interactions:
The Higgs field is nonzero even in empty space.






Le Modèle Standard

Les quarks

Les leptons

Matière stable
Matière instable

 up	 down	 electron	 neutrino e
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ

 photon
 gluon
 $Z^0 W^\pm$

Les fermions

Les bosons

Particules élémentaires : blocs fondamentaux sans structure interne qui constituent l'ensemble de la matière



Matière

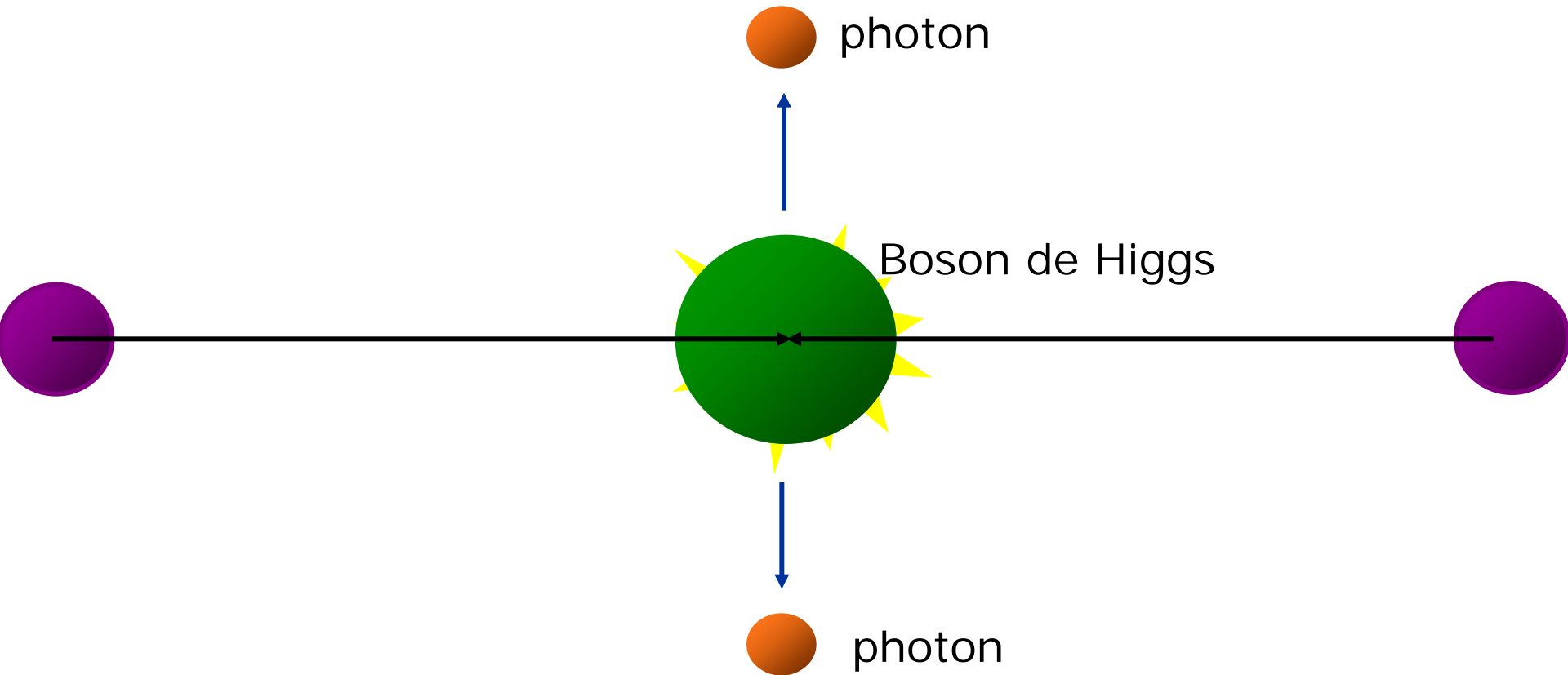
Leptons

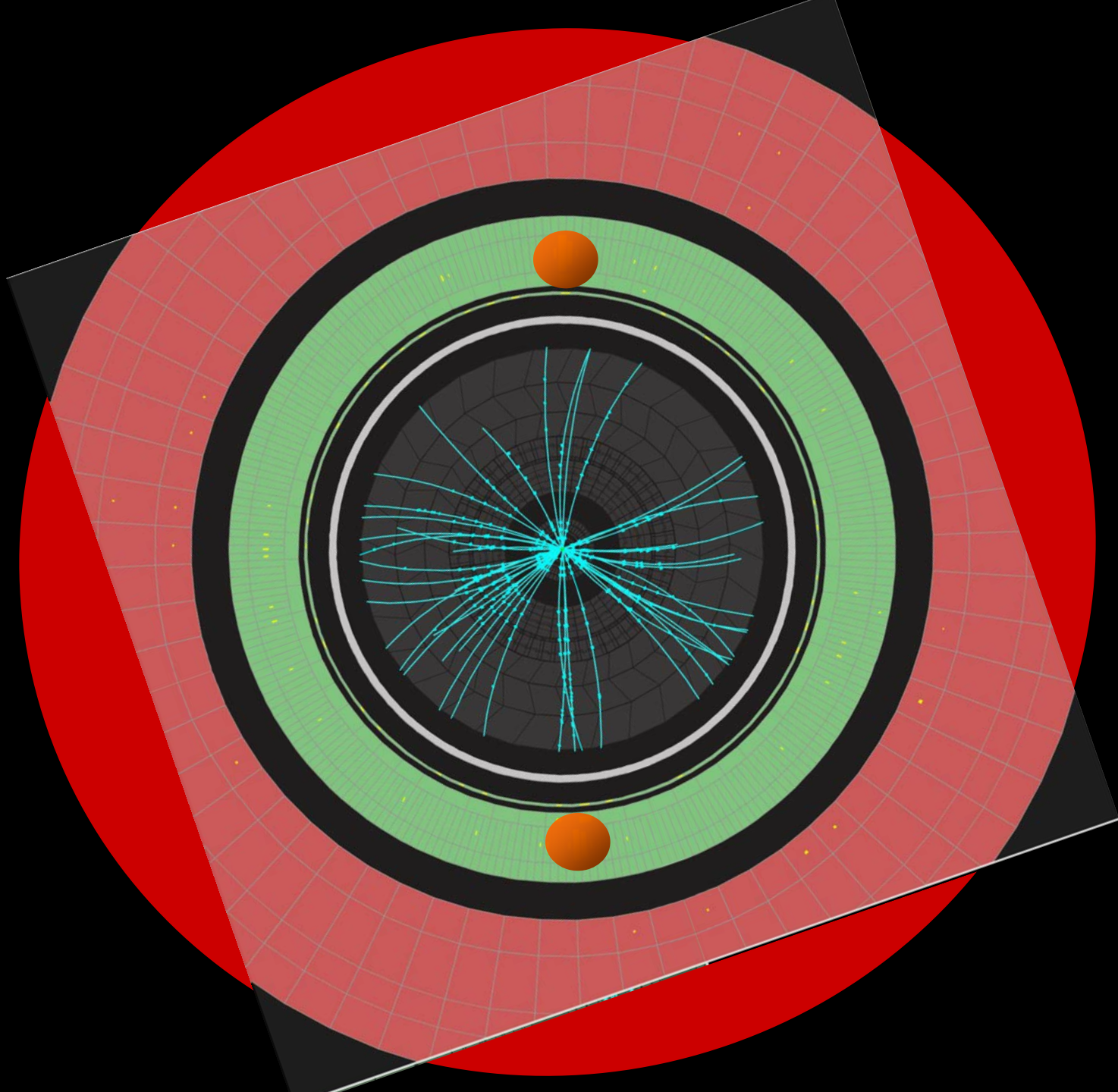
Quarks

e electron	μ muon
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino

u up	c charm
d down	s strange

Collision de particules

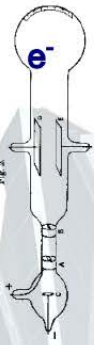




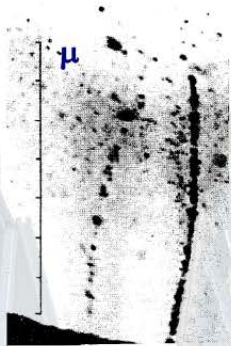
Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

Découverte historique



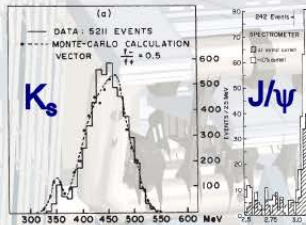
1897



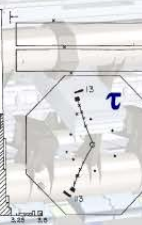
1937



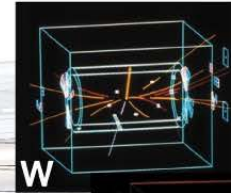
1947



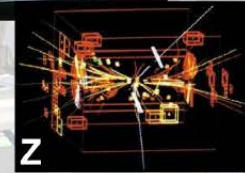
1964



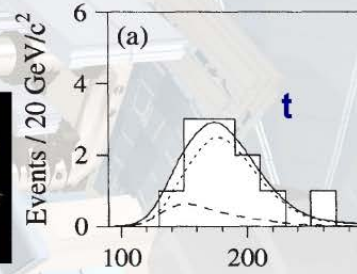
1974



1976



1983

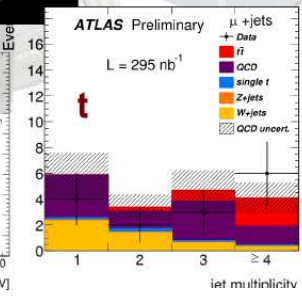
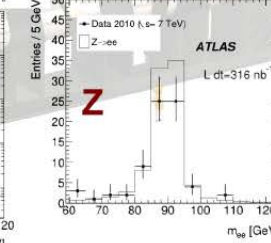
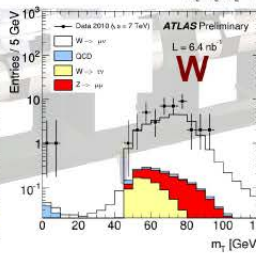
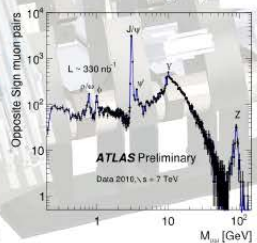
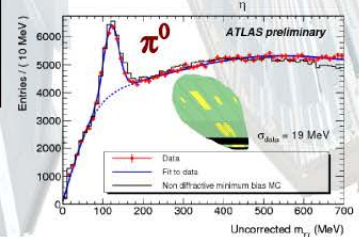
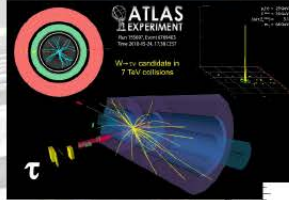
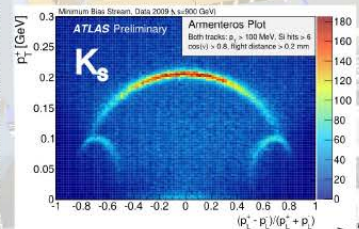
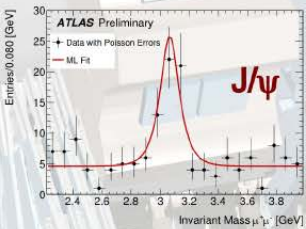
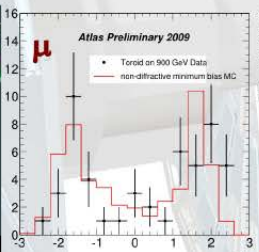


1995

déc 2009

août 2010

Redécouverte par ATLAS



La collaboration Atlas



Argentina	Morocco
Armenia	Netherlands
Australia	Norway
Austria	Poland
Azerbaijan	Portugal
Belarus	Romania
Brazil	Russia
Canada	Serbia
Chile	Slovakia
China	Slovenia
Colombia	Spain
Czech Republic	Sweden
Denmark	Switzerland
France	Taiwan
Georgia	Turkey
Germany	UK
Greece	USA
Israel	CERN
Italy	JINR
Japan	

ATLAS
Collaboration

38 pays
174 institutions
3000 auteurs