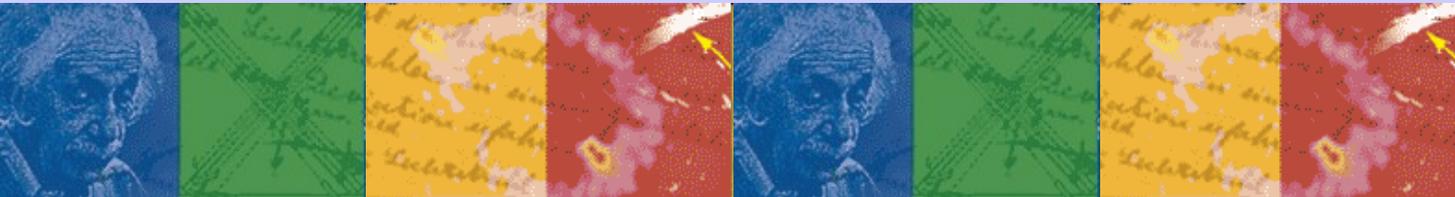
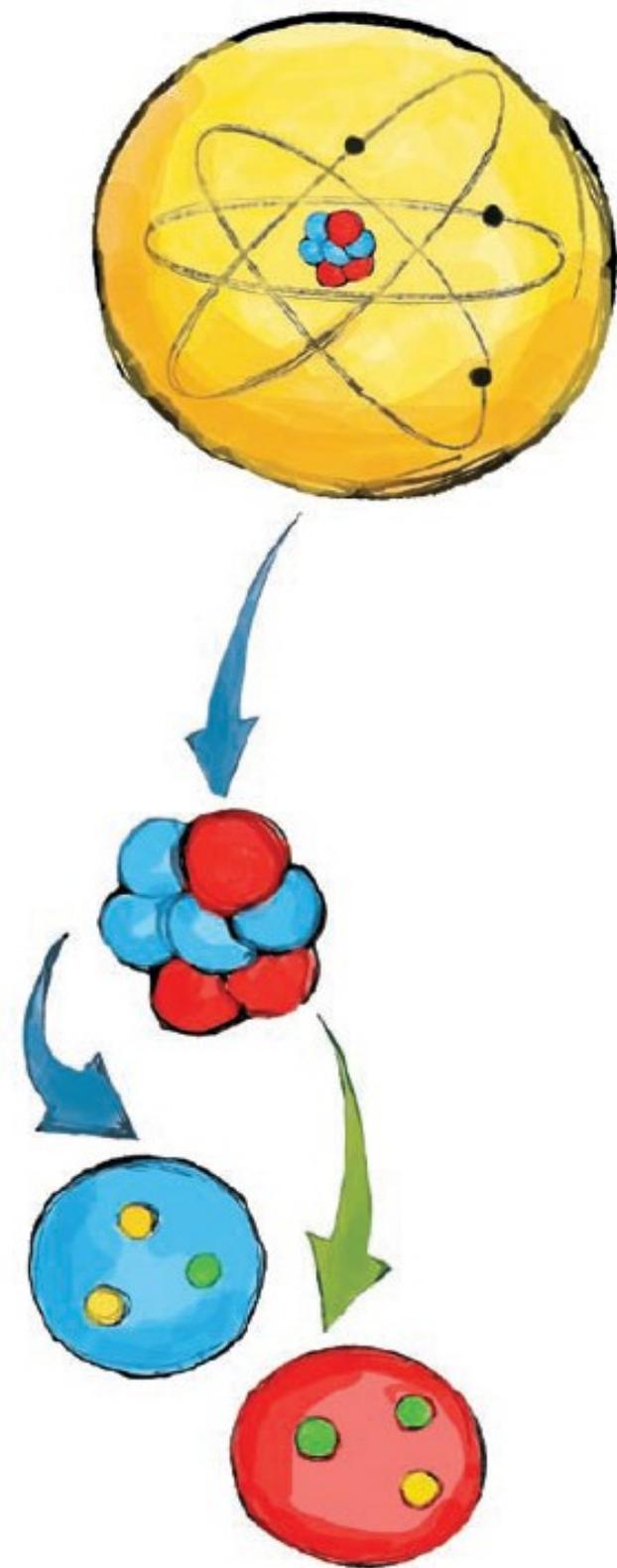


Notre compréhension de l'univers

De l'infiniment petit à l'infiniment grand

Frédéric Machefert
Séminaire LAL

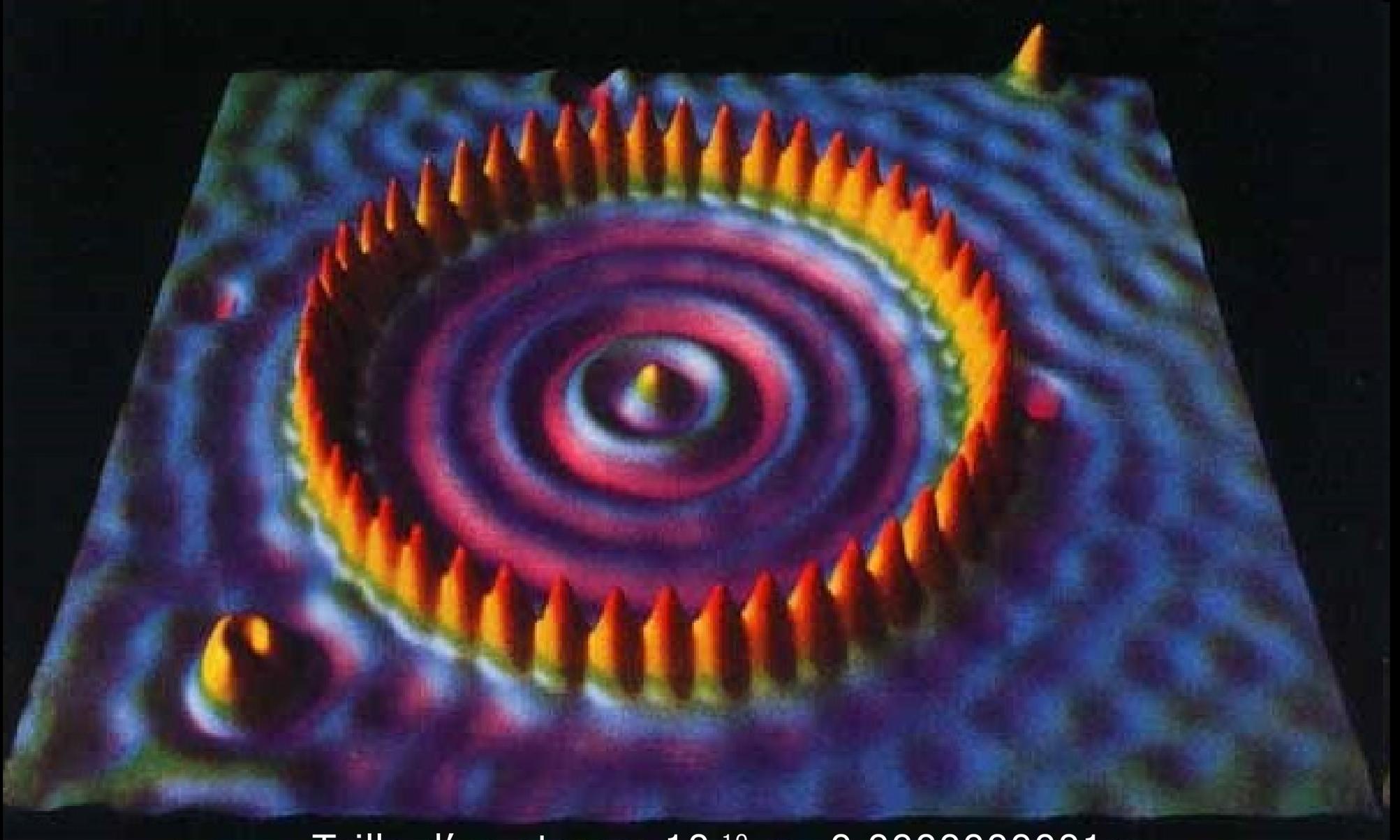
LAL / IN2P3 / CNRS
Université Paris-Sud



Les particules élémentaires sont les pièces fondamentales (sans structure interne) qui constituent l'ensemble de la matière



Les échelles

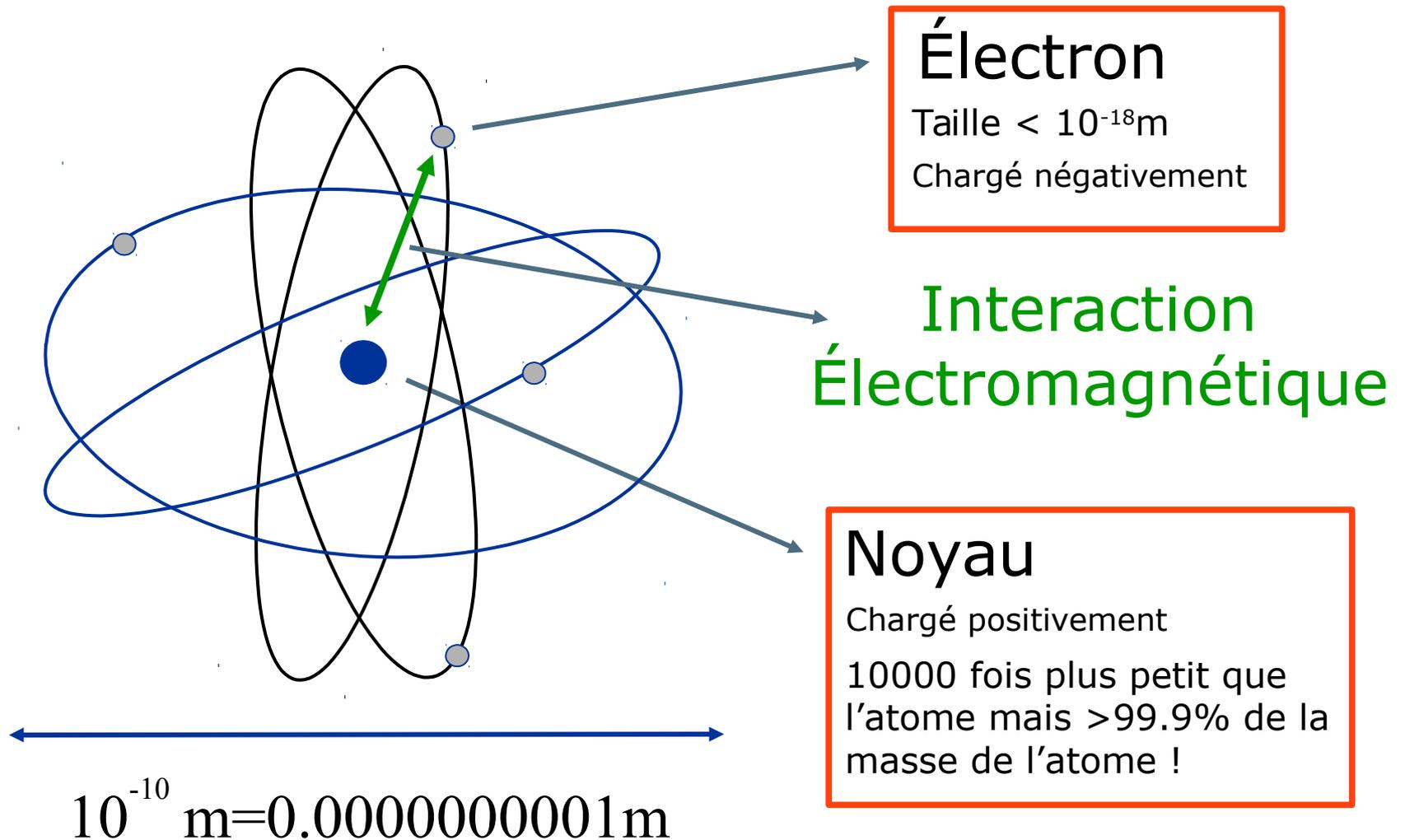


Taille d'un atome: 10^{-10} m = 0.0000000001m

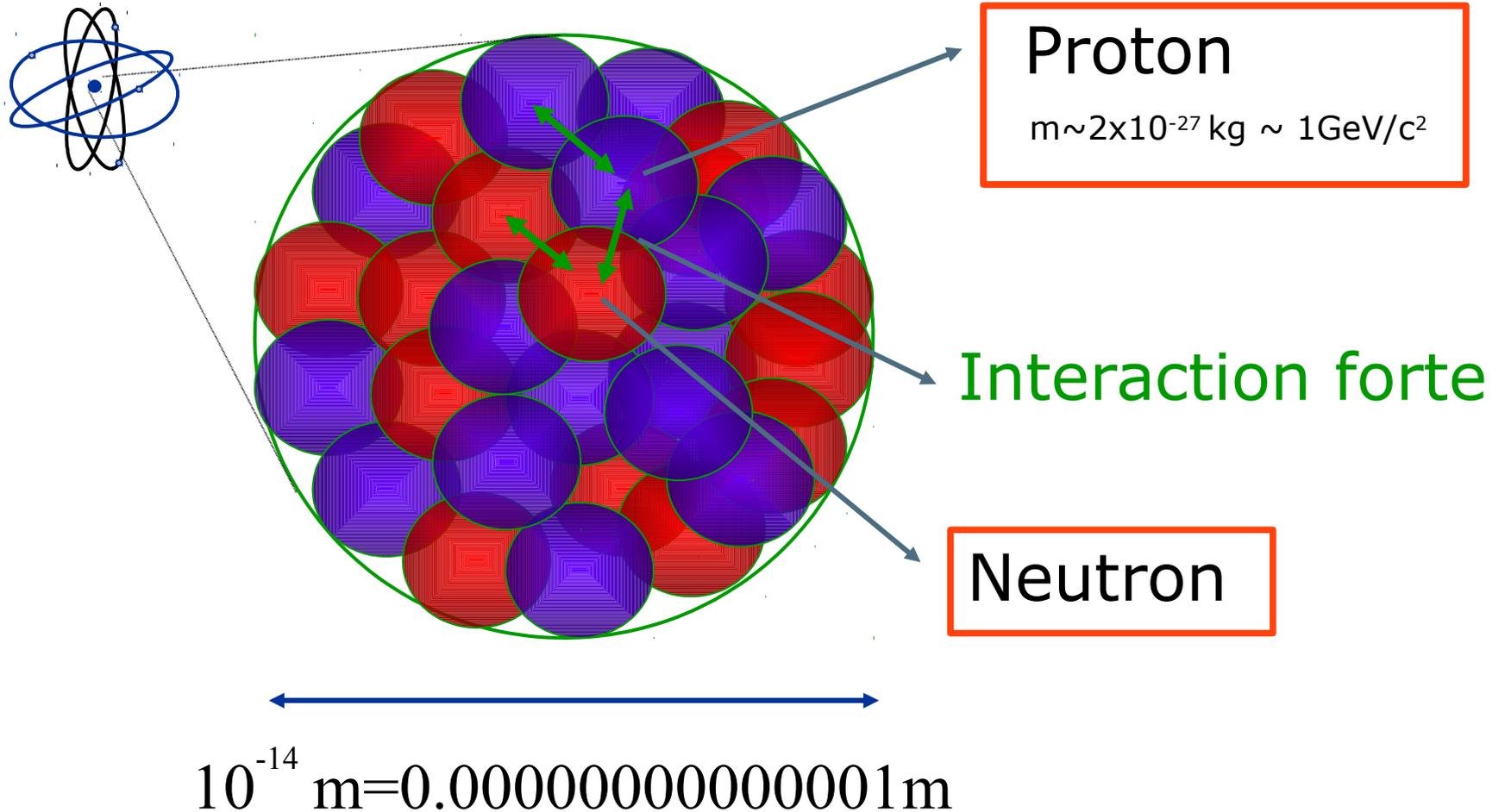
10 millions de fois plus petit qu'une fourmi
10 mille fois plus petit qu'une bacterie



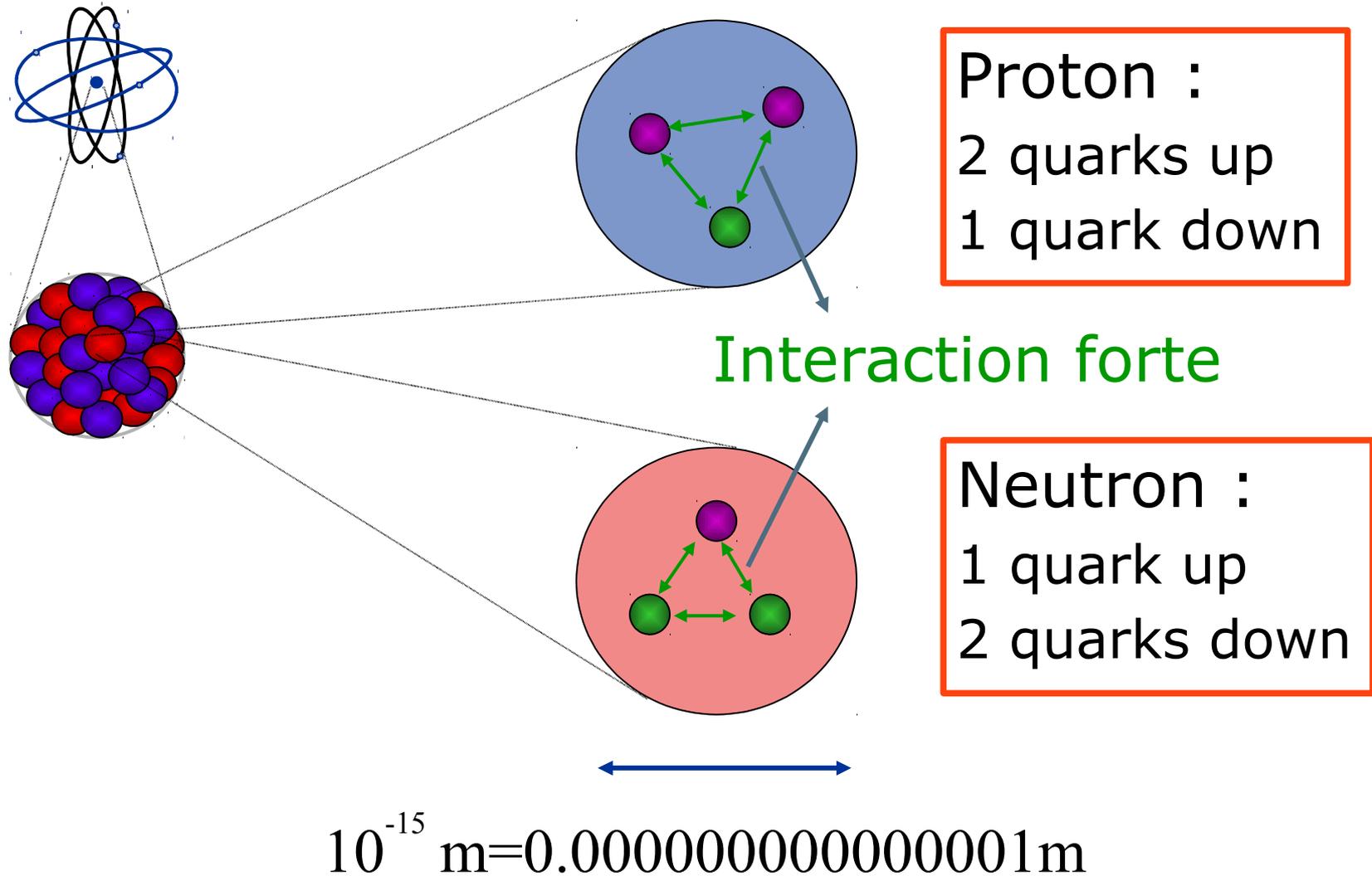
La structure de l'atome



La structure du noyau

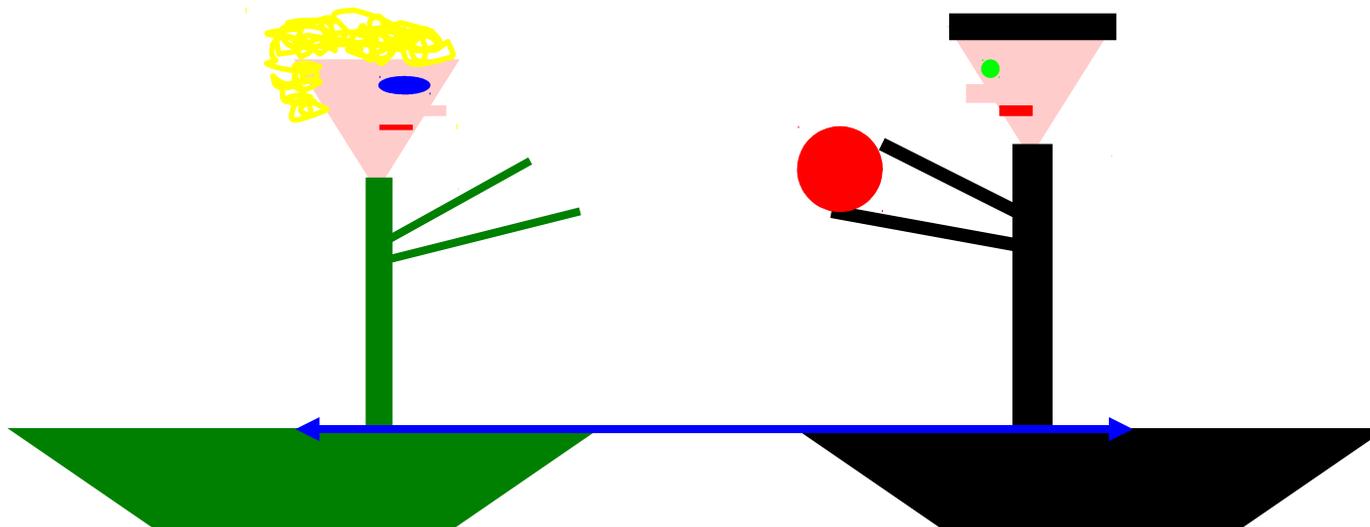
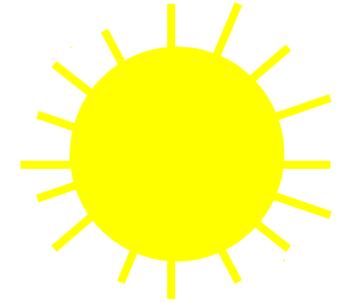


La structure des nucléons : protons, neutrons



Les interactions (forces)

Interagir, c'est échanger des particules



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

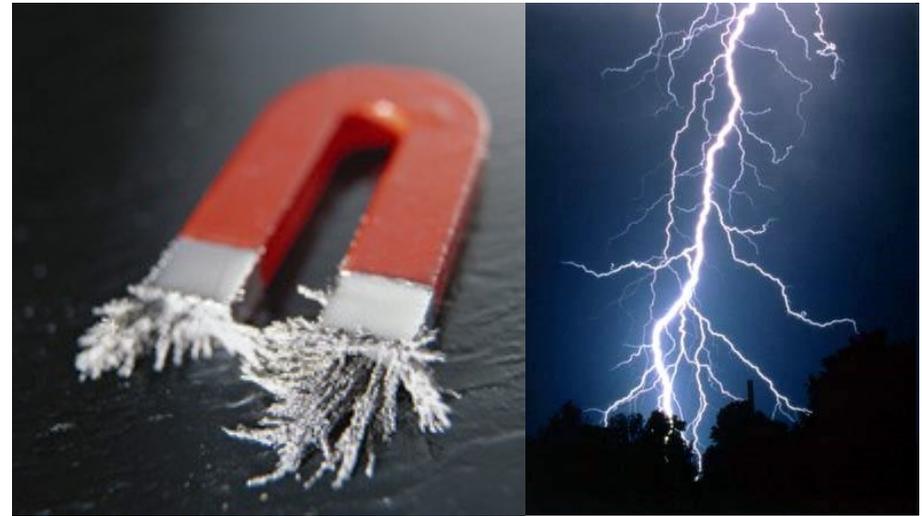
Bosons de jauge : médiateurs des interactions fondamentales



L'interaction électromagnétique

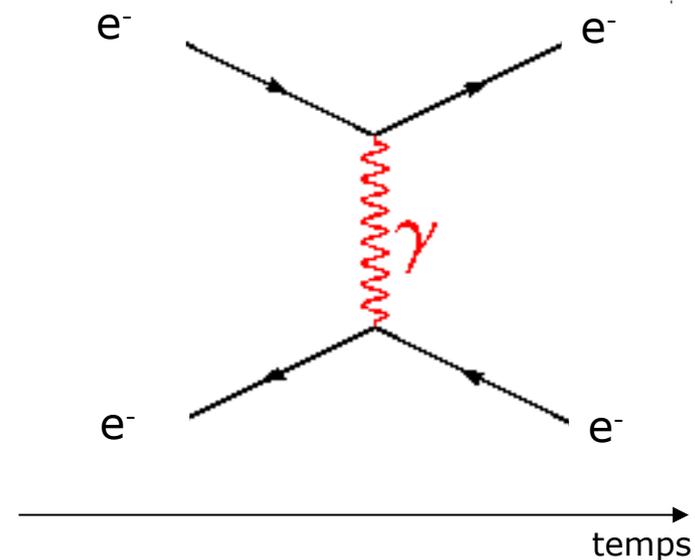
Responsable des phénomènes électriques et magnétiques

- Aimantation
- Cohésion des atomes
- La lumière



Le médiateur est le **photon**

Masse nulle = 0 (\rightarrow vitesse c)
Portée infinie de l'interaction

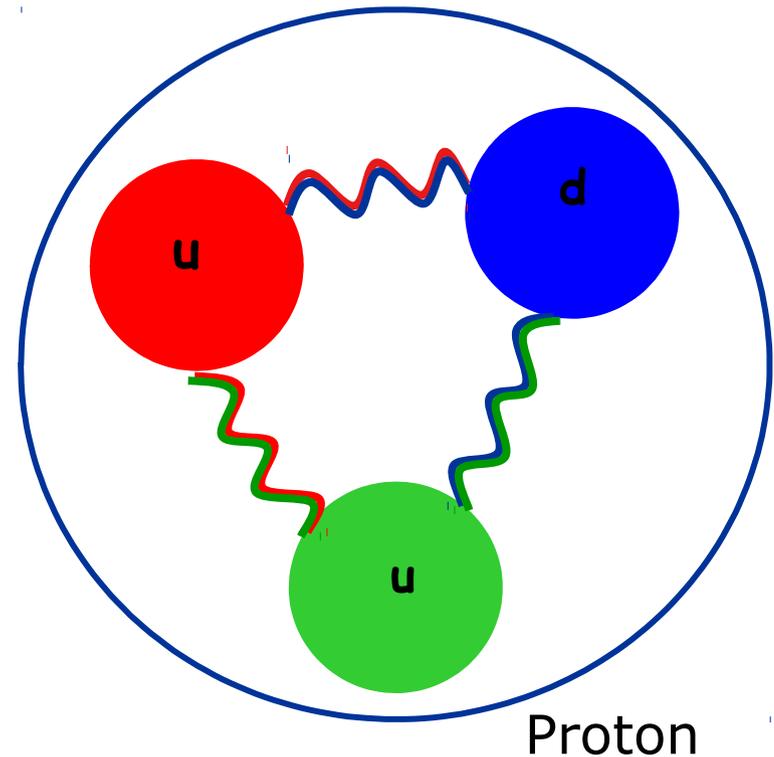


L'interaction forte

Responsable de la stabilité des noyaux ainsi que du proton

Le médiateur est le **gluon**

Masse nulle = 0
Portée $\sim 10^{-15}$ 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 faible

A l'origine de la radioactivité β

Participe aux réactions au cœur du soleil

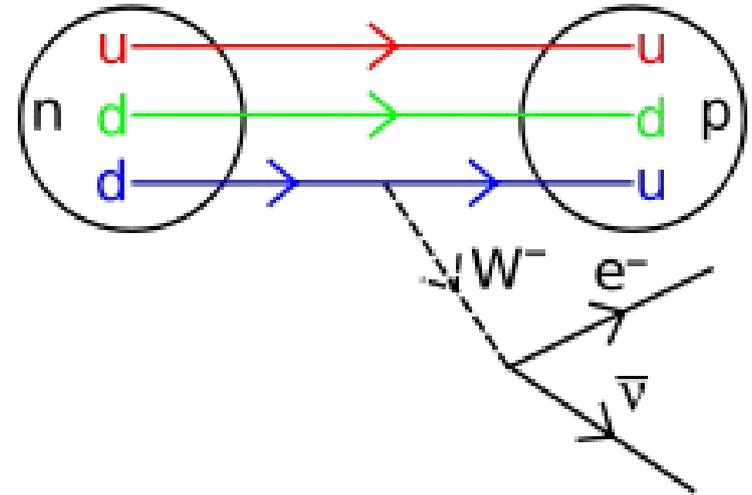
Les médiateurs sont le W^+ , W^- et le Z^0

Masse importante

Interaction de courte portée $\sim 10^{-18}$ m

10000 fois plus faible que l'interaction forte

Nous avons peu conscience de son existence



La gravitation

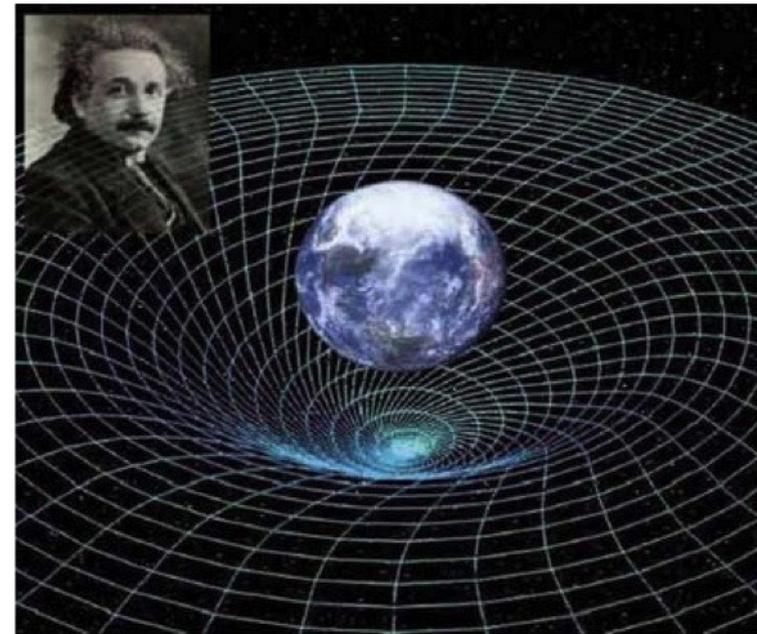
La gravitation est responsable de la pesanteur, des mouvements célestes, des marées, etc...

Pourtant, cette force est totalement négligeable aux petites échelles

- 10^{33} fois plus faible que l'interaction faible
- Mais de portée infinie
- Uniquement attractive

La force qui domine aux grandes échelles

Décrite par la relativité générale comme une déformation de l'espace temps



Son médiateur hypothétique : le **graviton**

Matière

Leptons

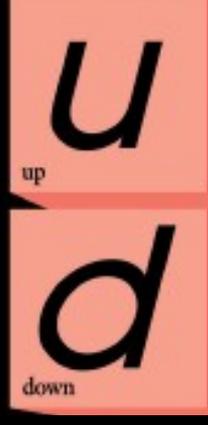
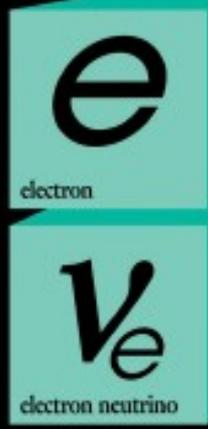
Quarks



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

Le modèle standard

Il s'agit de l'édifice mathématique qui décrit notre connaissance de l'infiniment petit

- Les particules
- Les interactions électrofaible et forte

La gravitation n'en fait pas partie !

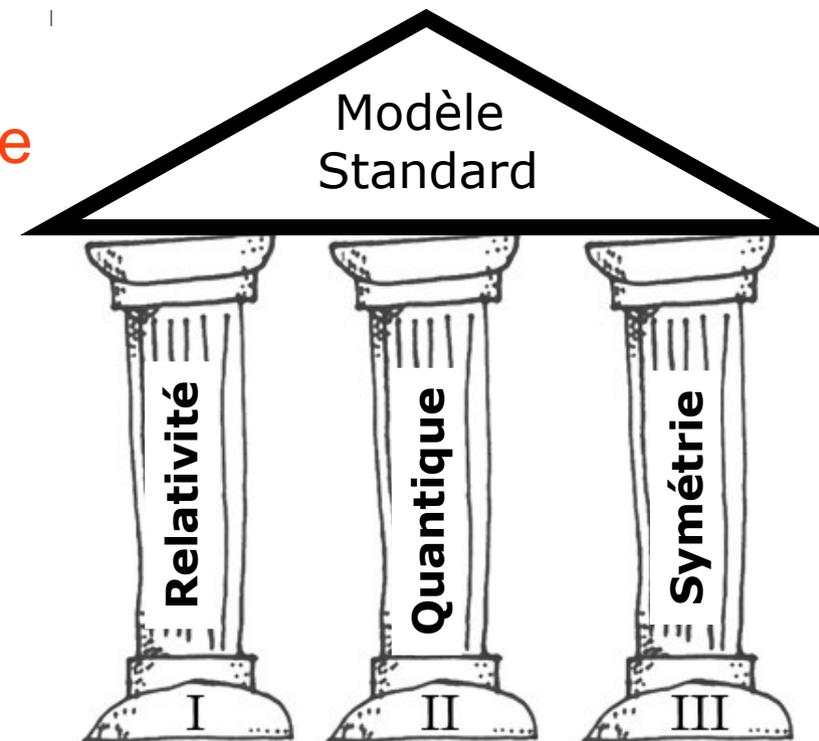
Fruit de la physique du XXIème siècle :

- Des objets petits → **mécanique quantique**
- Des objets qui vont vite
→ **relativité restreinte**

Basé sur des principes de **symétrie**

- Les phénomènes ne dépendent pas des coordonnées, de l'orientation, ...

Testé avec une exceptionnelle précision



$$\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 \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 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^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 A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\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 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) \\
& +g^2 s_w c_w \left[A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] \\
& -\frac{1}{8}g^2 \alpha_h \left[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 \right] - 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 \left[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2}g \left[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
& +\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 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^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \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 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{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\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 A_\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_e^\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_e^\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^\kappa (\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^\kappa (\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{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- \\
& +\bar{X}^0 \left(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) \\
& +igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w 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^2} \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}$$

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

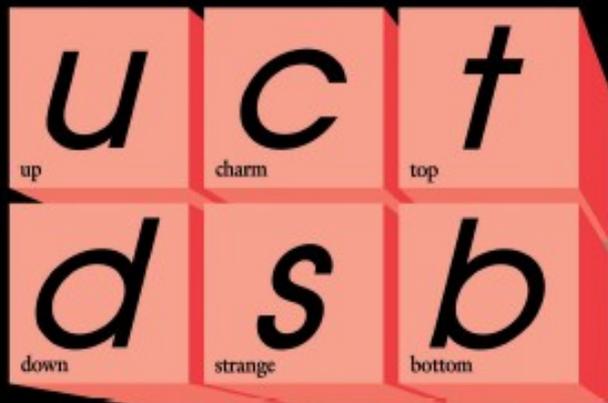
Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

4 Juillet 2012

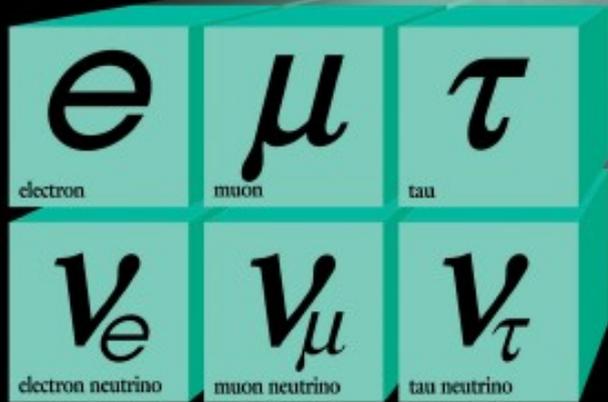


Matière

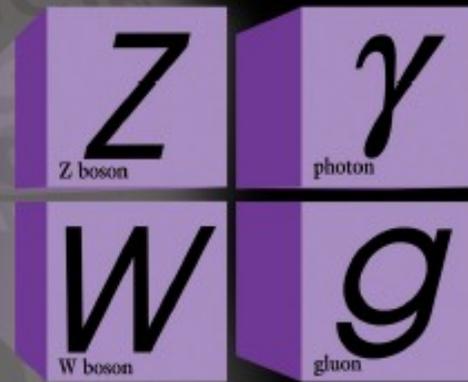
Quarks



Leptons



Forces



Le vide n'est pas cela

Le vide c'est cela !



Le Higgs et la masse dans le Modèle Standard

- La masse quantifie l'inertie d'un corps, la difficulté de le mettre en mouvement

Le photon: masse nulle



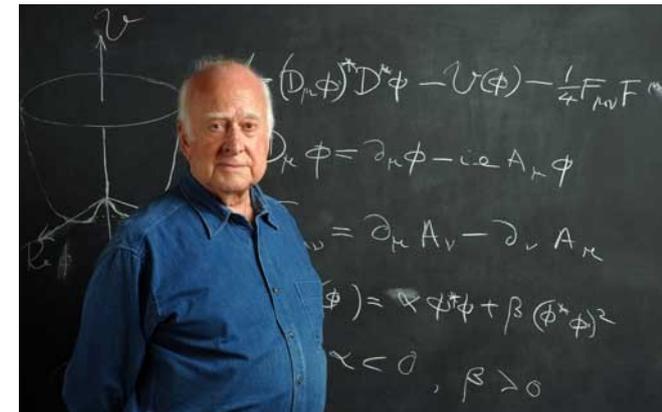
L'électron: petite masse



Le boson Z: grande masse

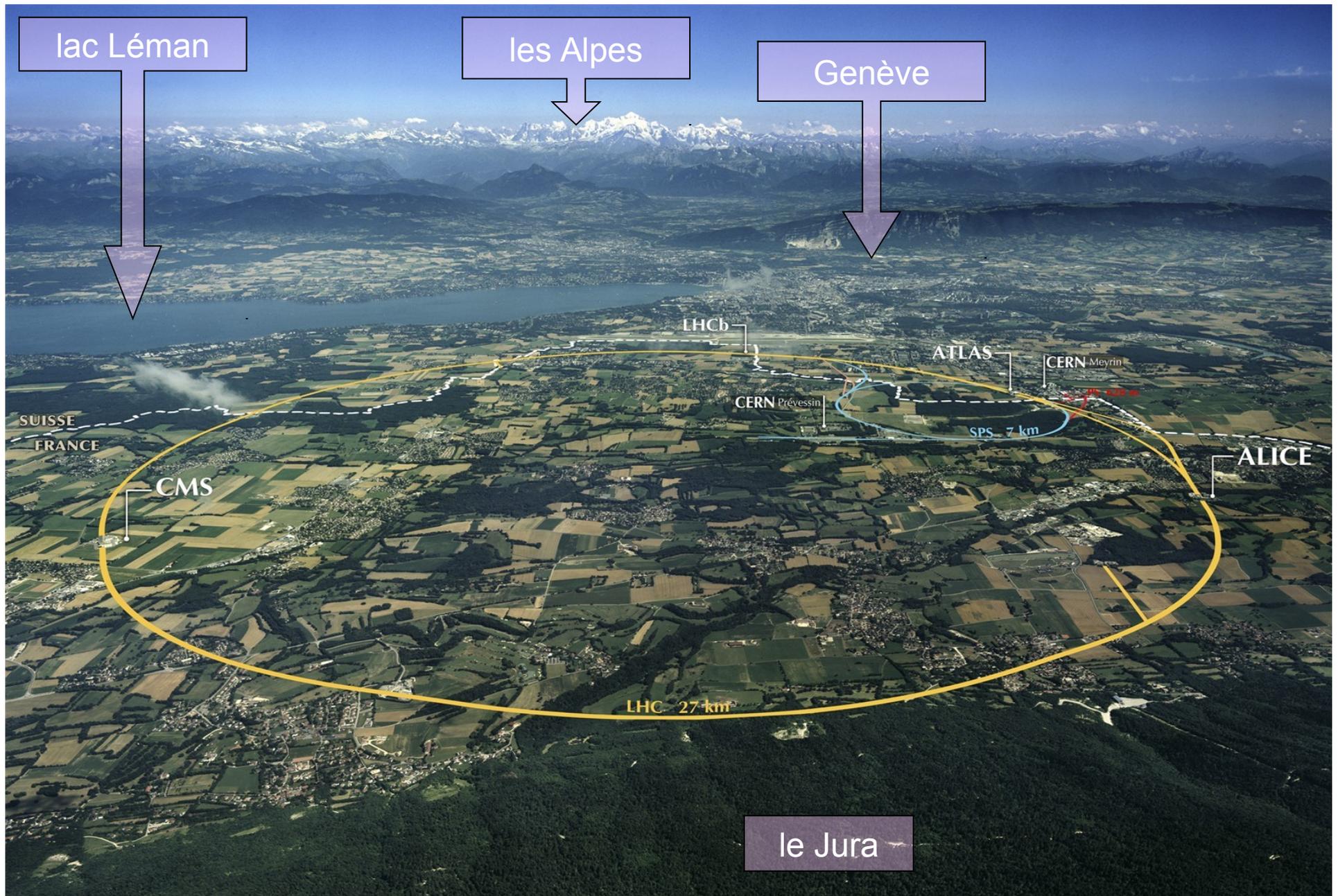


Plus difficile à mettre en mvt



- La masse n'est plus une propriété intrinsèque des particules, mais le résultat de l'interaction des particules avec le champ de Higgs dans lequel elles baignent
- Le champ de Higgs rend le vide plus ou moins "visqueux" en fonction de leur masse

Comment étudie-t-on l'infiniment petit ?



Le CERN



Le Conseil devient en 1954 l'Organisation Européenne pour la recherche nucléaire
Plus communément appelé le Laboratoire européen pour la Physique des Particules
Installée à Genève, pas de recherche militaire, les résultats sont publics

- Missions:

recherche: questions concernant l'Univers

technologie: faire reculer les limites

collaboration: rassembler les nations autour de la science

éducation: formation des scientifiques

- Conseil du CERN (assisté du Conseil des initiatives scientifiques et du conseil des finances) : 2 délégués et 1 voix par état, décisions à la majorité simple.
Le directeur général (actuellement: R. Heuer) nommé pour 5 ans par le Conseil.

Les participants au CERN

- **21 états membres** (votent au Conseil, contribuent au budget : accélérateurs, fonctionnement, ~2000 personnes)

l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Bulgarie, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, Israël, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède et la Suisse.

- **observateurs** (assistent aux réunions du Conseil)

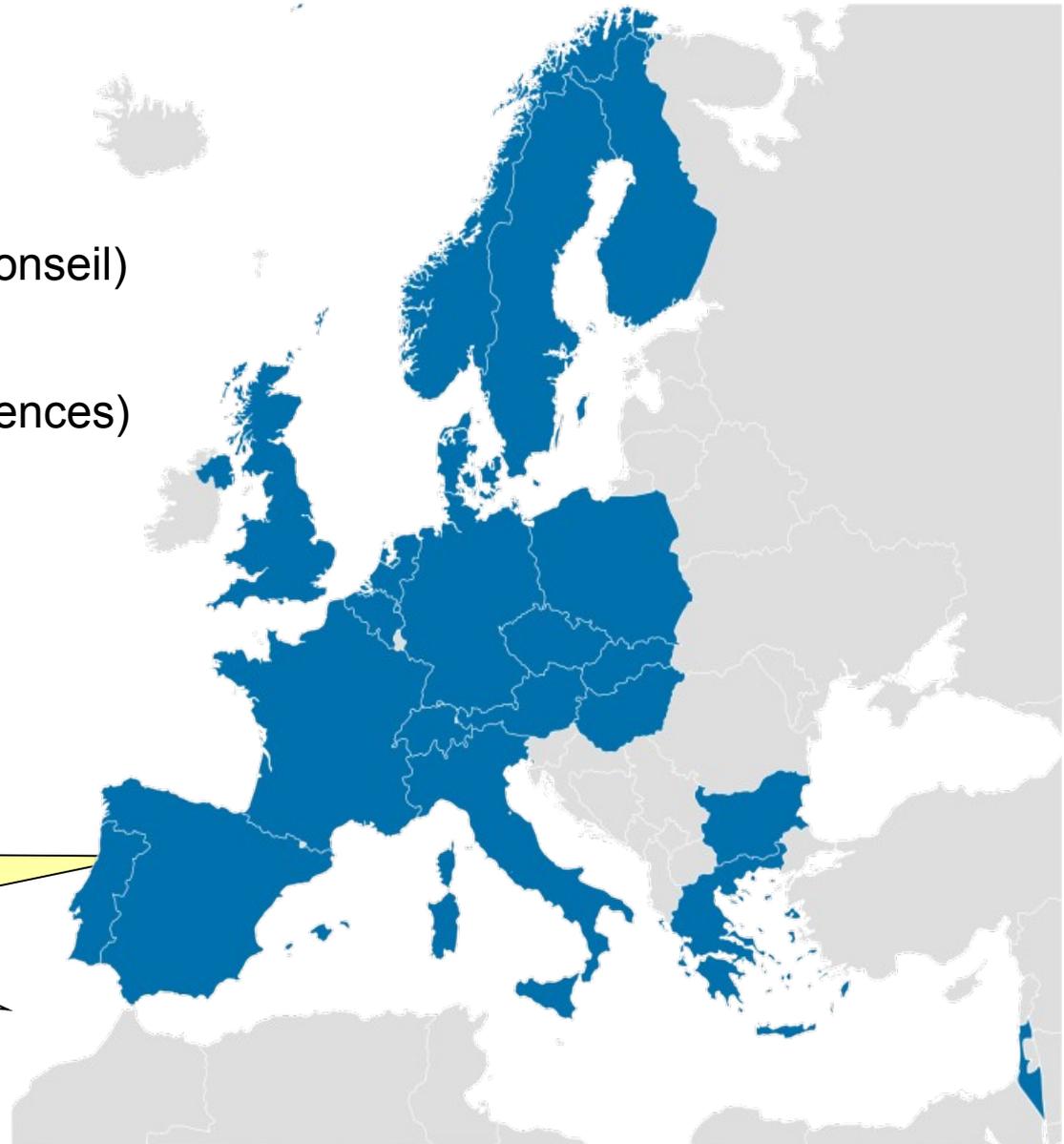
Commission européenne, l'Inde, Israël, le Japon, la Fédération de Russie, la Turquie, l'UNESCO et les États-Unis d'Amérique

- **états non-membres** (participent aux expériences)

une trentaine d'états

- les physiciens, ingénieurs, techniciens assurent la construction et l'exploitation des expériences (le CERN a une contribution minoritaire dans les expériences ~15-20%)

10 000 utilisateurs
608 instituts, 113 nationalités



Le CERN a fêté ses 60 ans en 2014 !

- Événements organisés par le CERN pour commémorer deux dates clefs
1^{er} juillet 1953 : accord à l'Unesco (Paris) entre les 12 états fondateurs
du CERN sur la convention créant ce nouveau laboratoire
29 septembre 1954 : ratification de ladite convention – le CERN est né !
- Exposition temporaire au Palais de la Découverte :
« Le Grand Collisionneur LHC » (→ 20 juillet 2015)
- Web documentaire « CERN expérience 360 » : une visite virtuelle du CERN
- Exposition de 60 portraits : « Experts en la matière : regards sur le CERN » :
Un tiers (20/60) affichés par roulement au Palais de la Découverte pendant l'expo
- Site internet du CERN dédié à cet anniversaire : <http://cern60.web.cern.ch/fr>



Le Large Hadron Collider



- Conçu dans les années 1980, approuvé en 1994. La construction débute en 1998.
- Collision de protons à 7 TeV, aimants supraconducteur ($-271,3^{\circ}\text{C}$), 600 millions de collisions par seconde
- La plus grande machine du monde 9300 aimants, 10000 tonnes d'azote, 120 tonnes d'hélium

- Les protons effectuent ~ 11000 tours / s ($v \sim c$)
- Vide très poussé de la chambre à vide $\sim 1/10$ de la pression sur la lune
- Les points les plus chauds (~ 100000 fois la température interne du soleil, à la collision) dans un anneau plus froid que le vide sidéral



Les faisceaux de protons

Jusqu'à 2800 paquets contenant chacun 100 milliards de protons.
Chaque paquet est séparé de ses voisins immédiats par au moins 7 m.



Aimants focalisant les faisceaux
au voisinage des points de collision

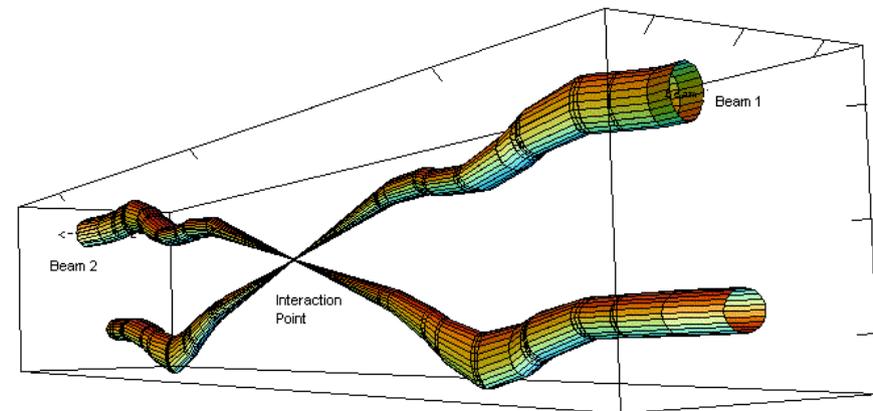
Énergie d'une collision (2015) :
 $6.5 \text{ TeV} + 6.5 \text{ TeV} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ J}$
sur une surface infime 10^{-30} m^2
 $\sim 2 \times 10^{24} \text{ J/m}^2$: **considérable**

Énergie totale des faisceaux :

$6.5 \text{ TeV} \times N(\text{protons}) \sim 400 \text{ millions de Joules} \sim 1 \text{ TGV à } 150 \text{ km/h}$

1 paquet : quelques cm de long
transversalement $\sim \text{mm}$

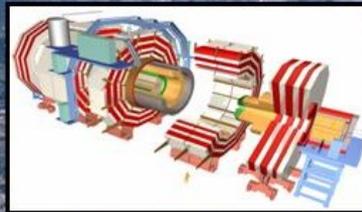
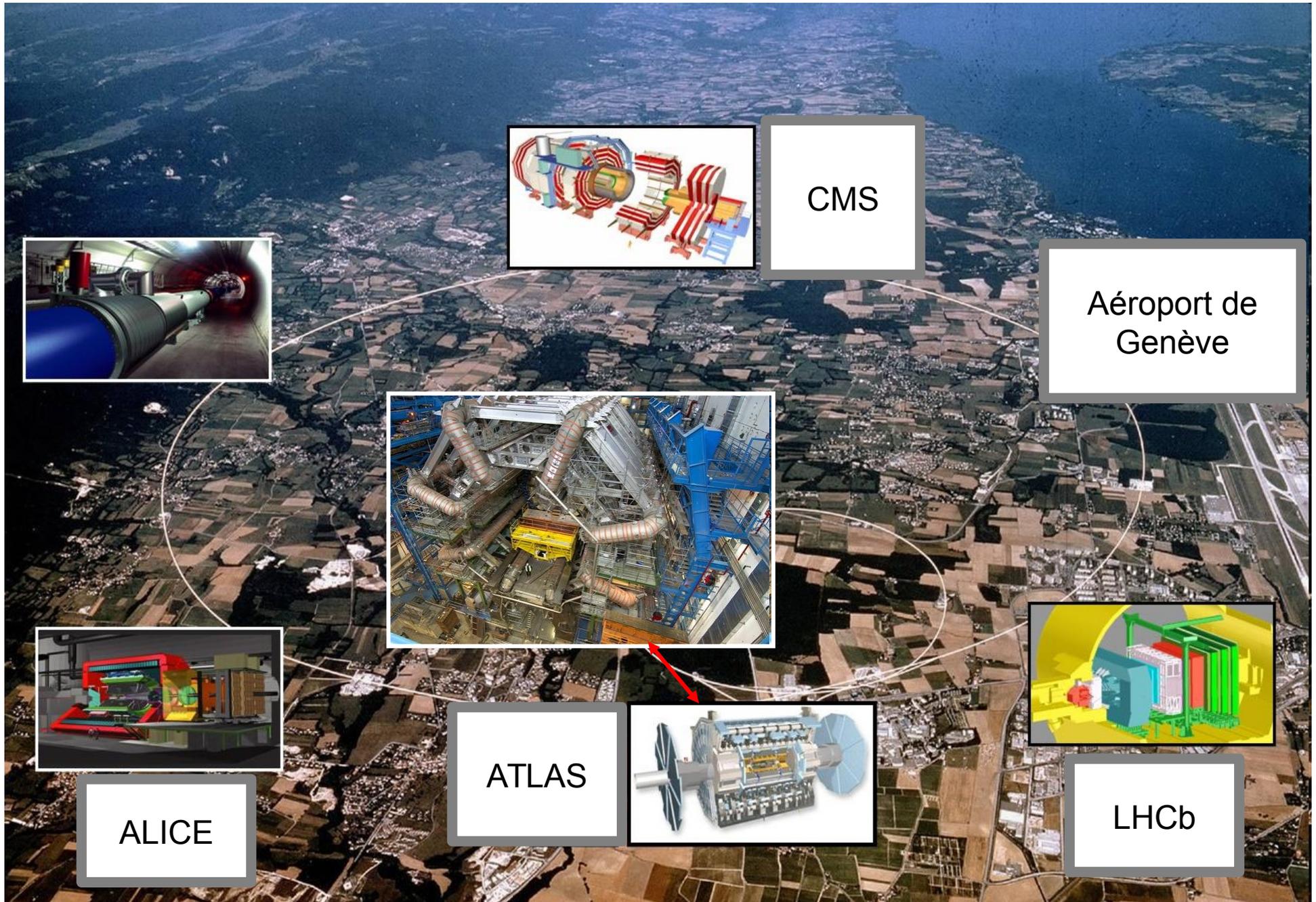
taille transverse au point de collision
(expériences) : $16 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$
 \sim **diamètre d'un cheveu**



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Croisement des faisceaux à un point de collisions

L'étude de la collision : les détecteurs

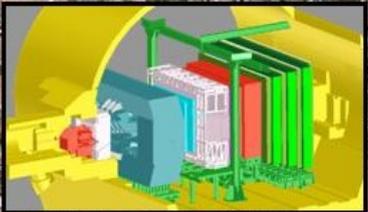


CMS

Aéroport de Genève



ATLAS

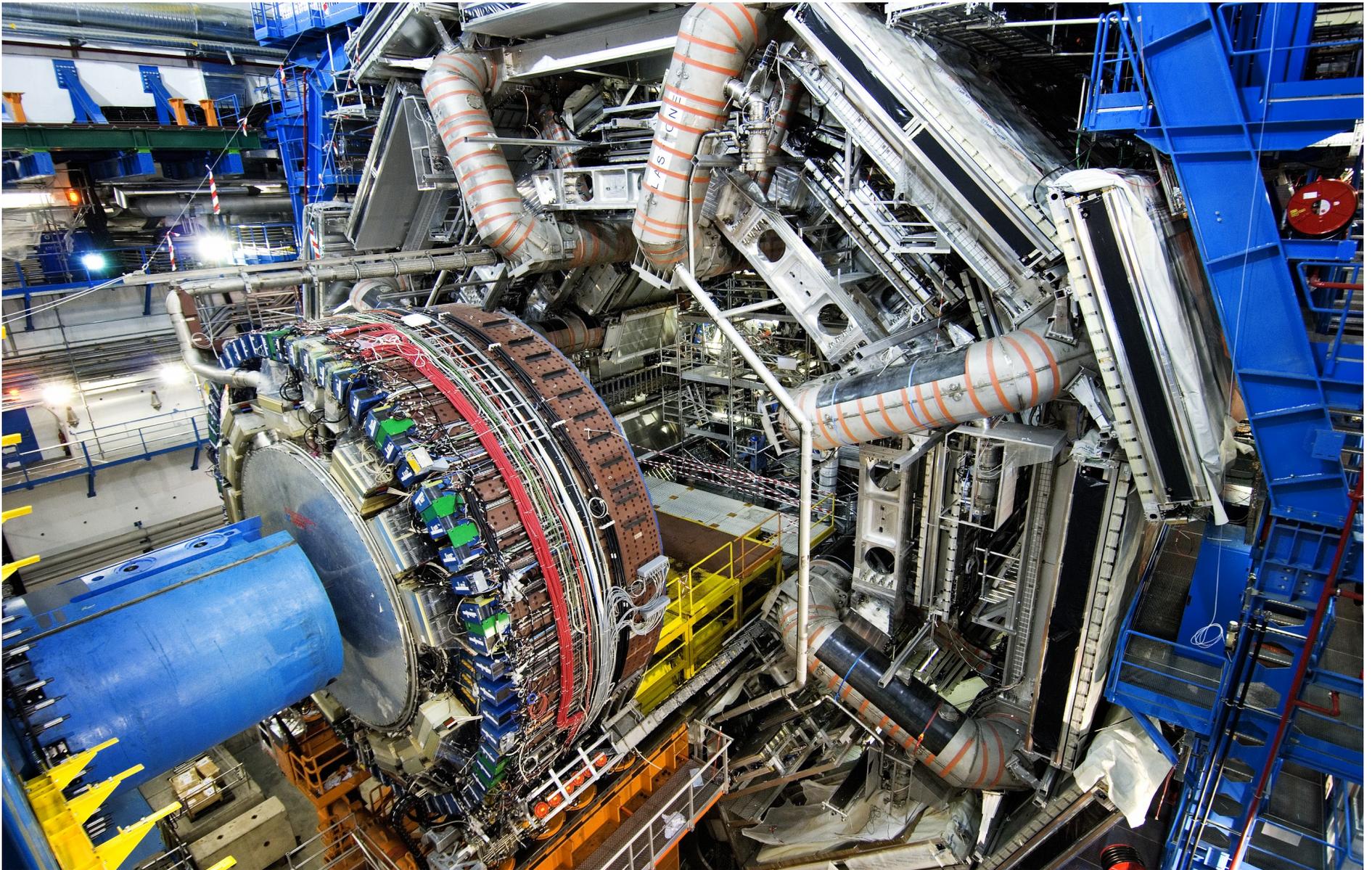


LHCb



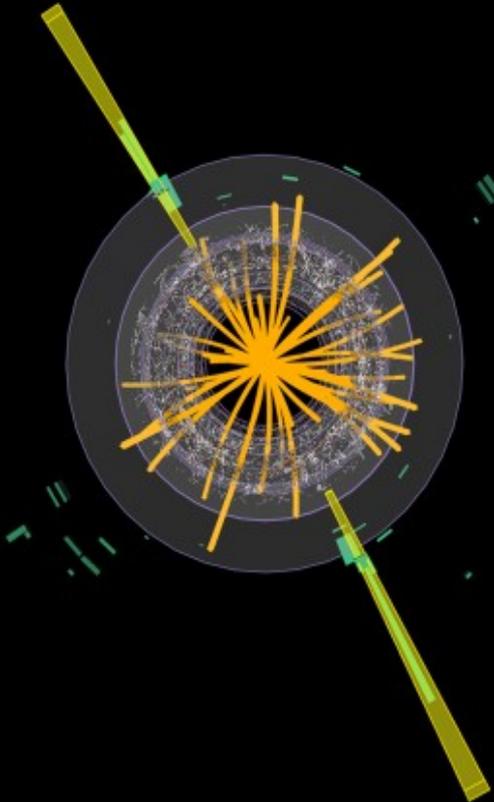
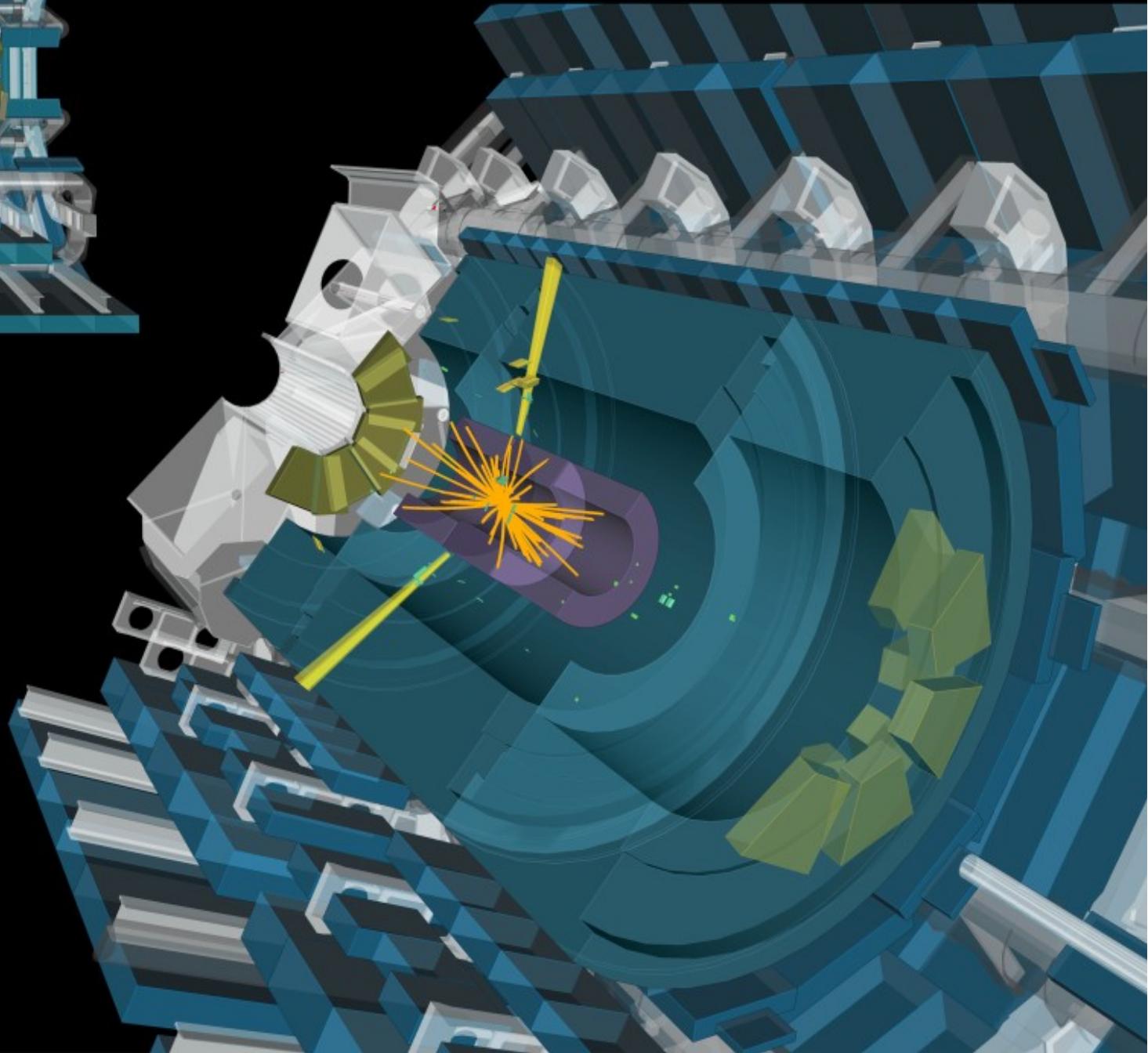
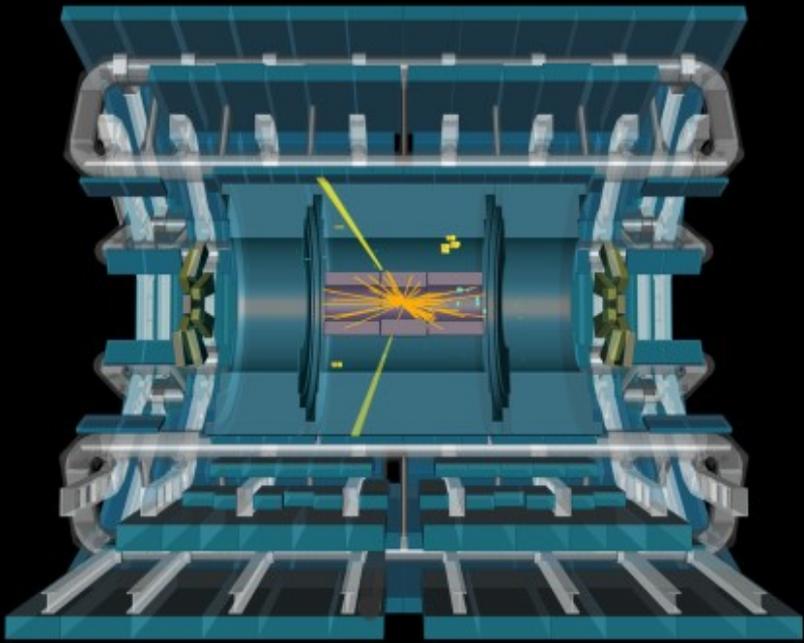
ALICE

Un détecteur : ATLAS



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

 **ATLAS**
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



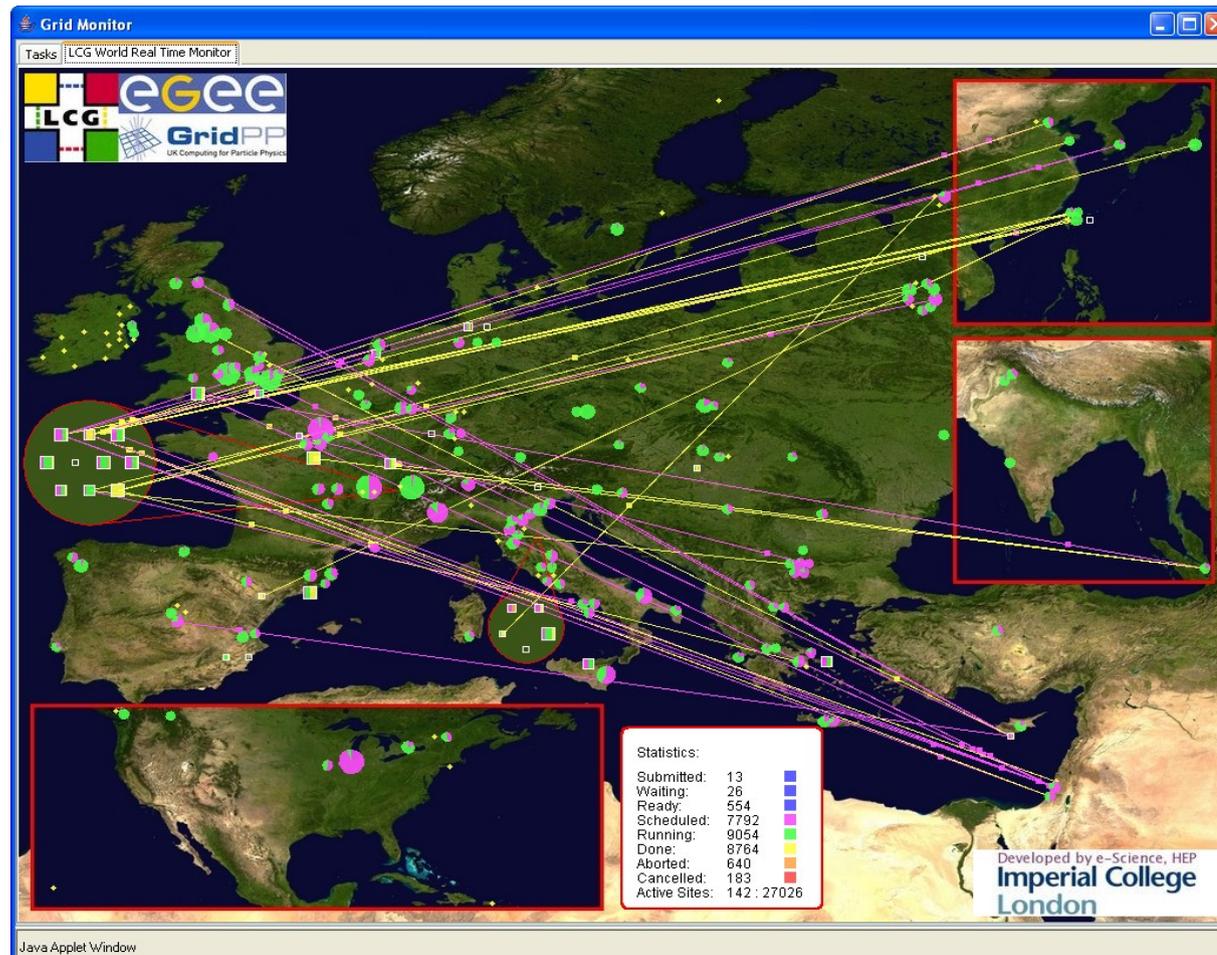
La découverte du Boson de Higgs

- Découverte du Higgs dans son mode de désintégration en une paire de bosons Z
 - Paire de Bosons Z
- Découverte du boson de Higgs dans sa désintégration en une paire de bosons W
 - Paire de Bosons W
- Découverte du boson de Higgs dans sa désintégration en deux photons
 - Désintégration en une paire de photons

La grille de calcul

- Le LHC produit 15Po de données par an (1000000 Go)
 - Où peut-on stocker ces données ?
 - Comment donner accès à ces données à plus de 8000 physiciens dans le monde ?
- Créer “un superordinateur “ mondial

La grille de calcul



Et l'infiniment grand...

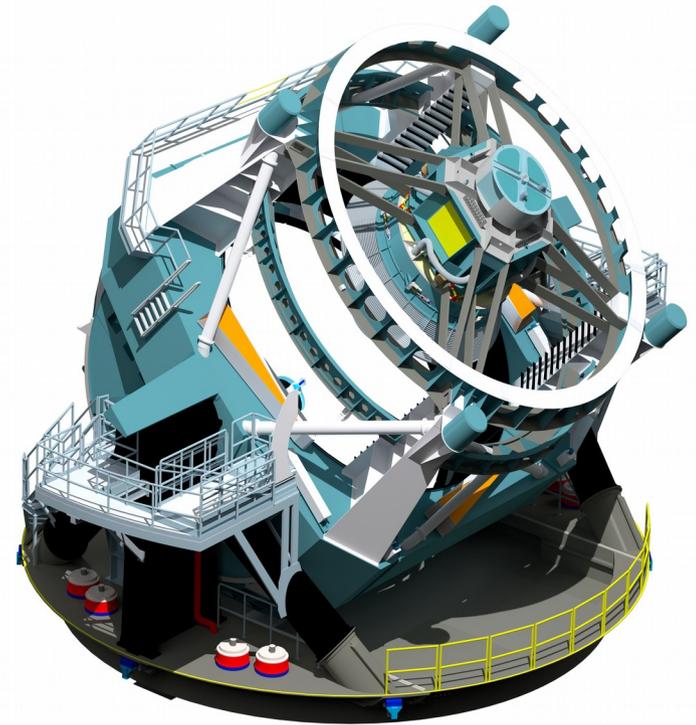
- Physique des particules se fait aussi en observant le ciel



L'interféromètre Virgo

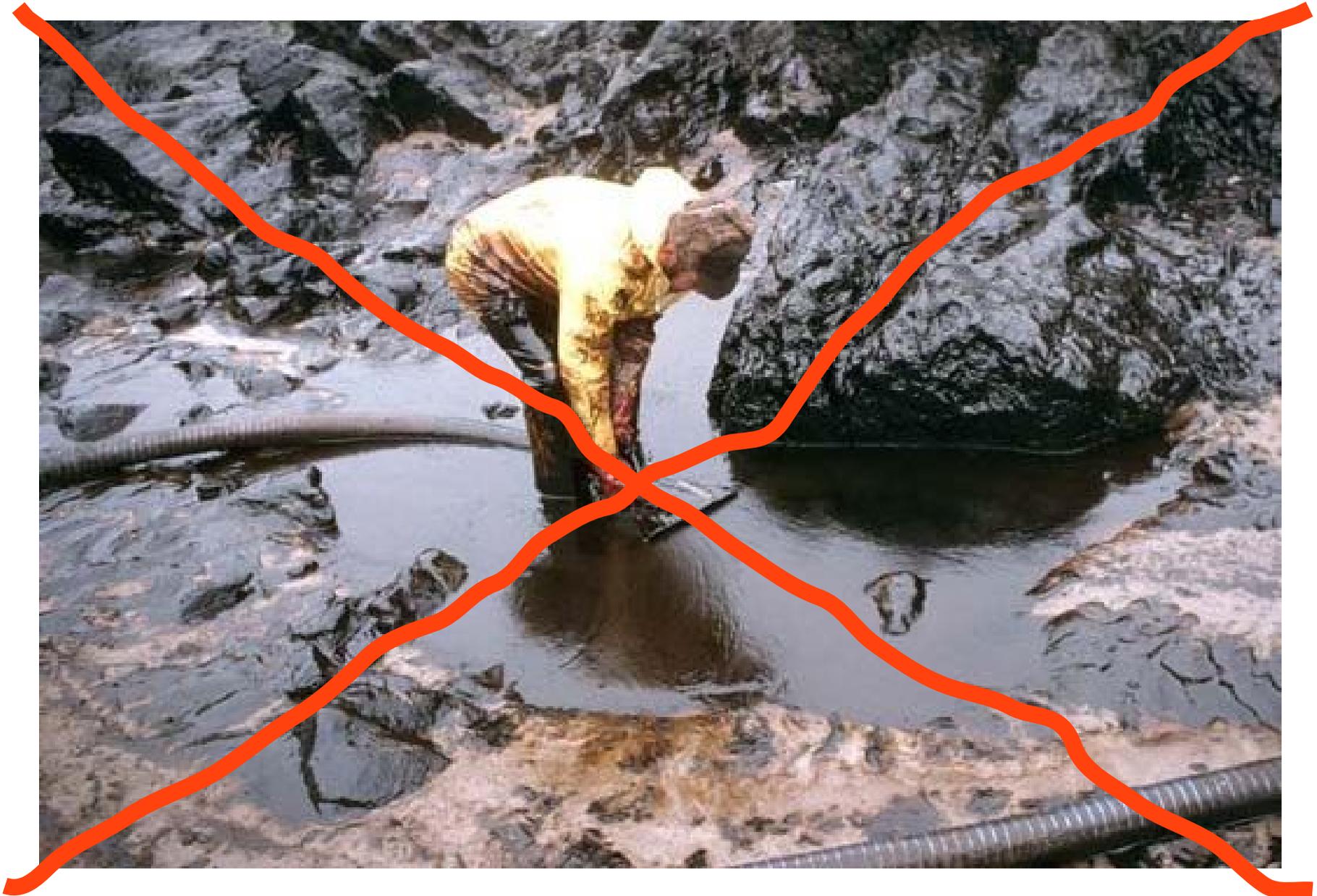


Le satellite Planck



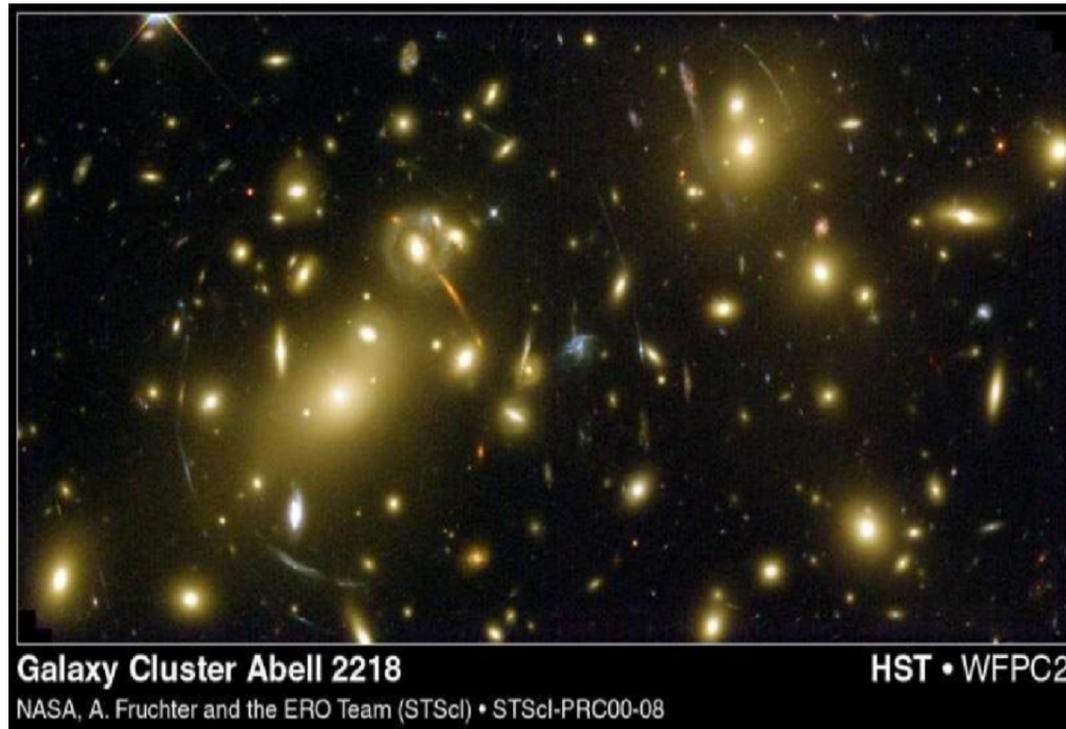
Le futur télescope LSST

La matière noire



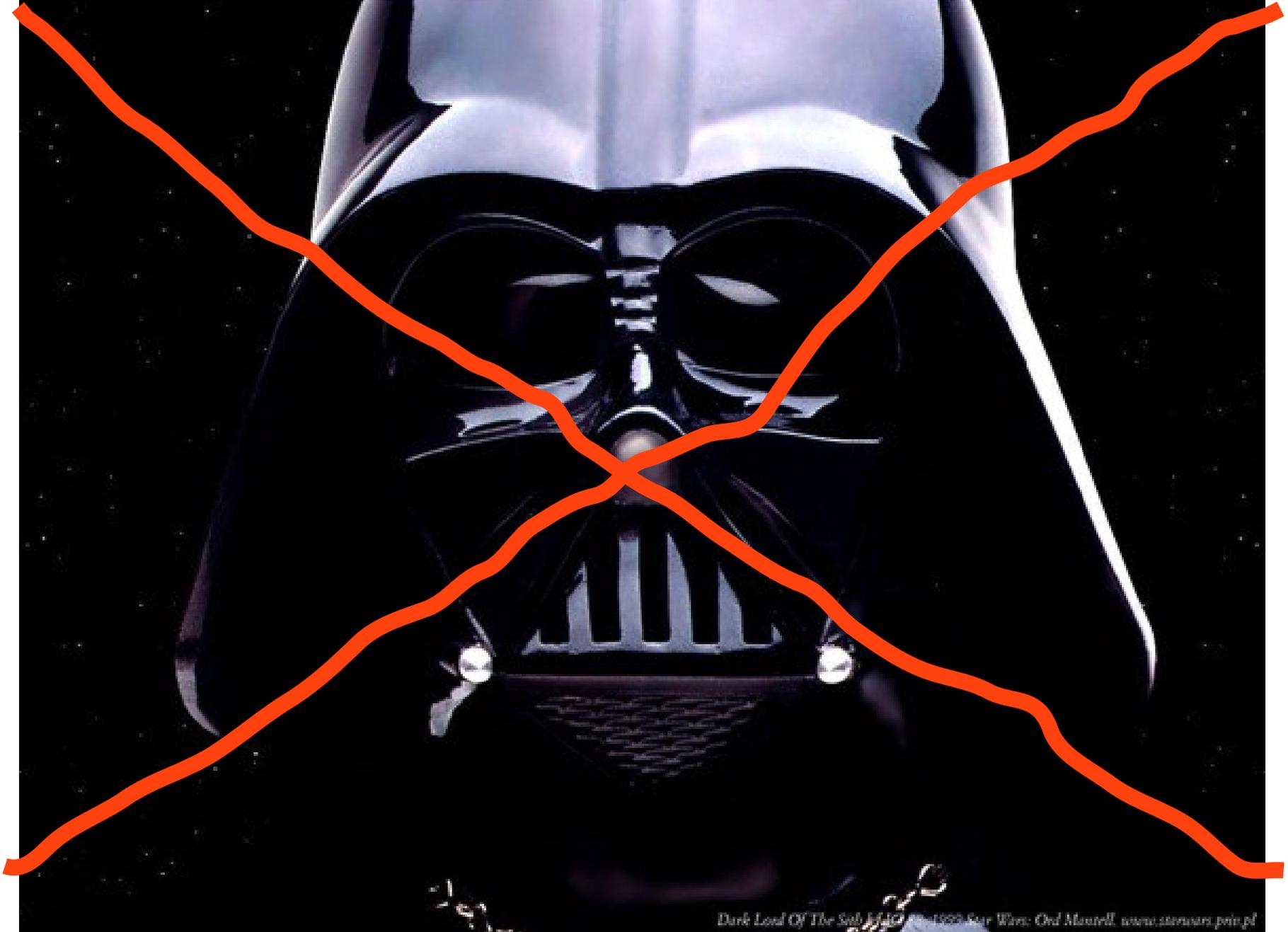
La matière “noire”

- La matière est “visible” par son effet gravitationnel
- L'observation des amas de galaxies et la rotation des galaxies semble indiquer que les objets lumineux ne sont qu'une fraction de la matière dans l'univers



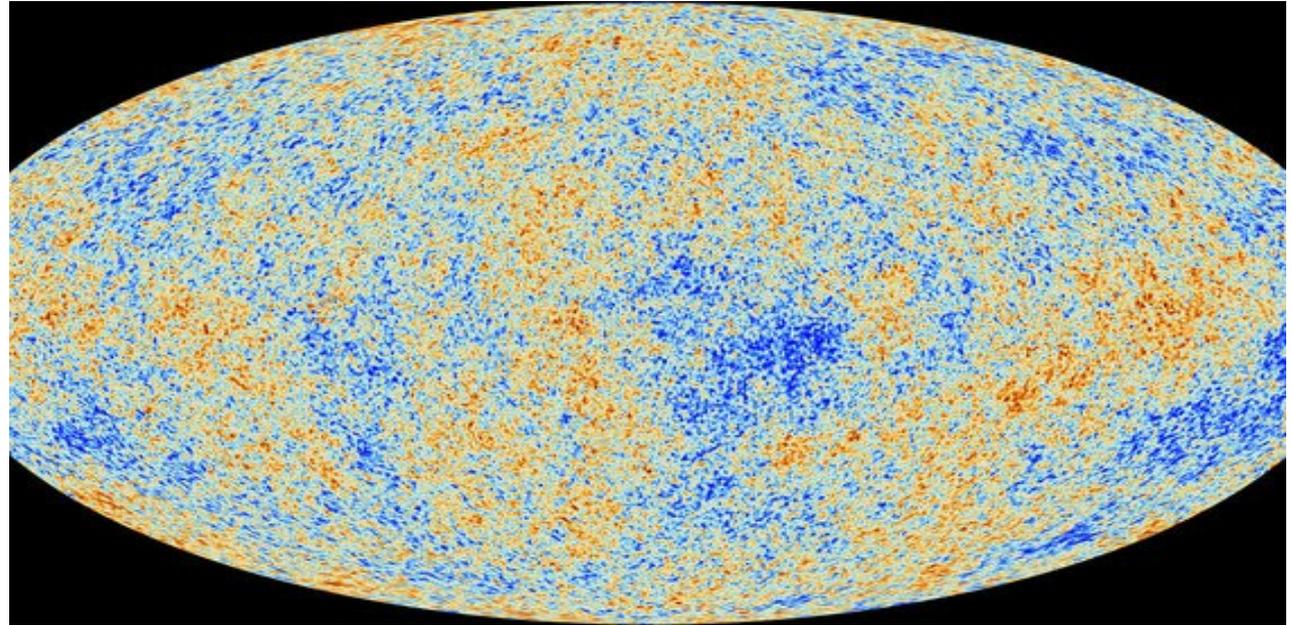
- Certains modèles prédisent que cette matière “noire” pourrait être produite et indirectement observée au LHC

L'énergie "noire"



L'énergie "noire"

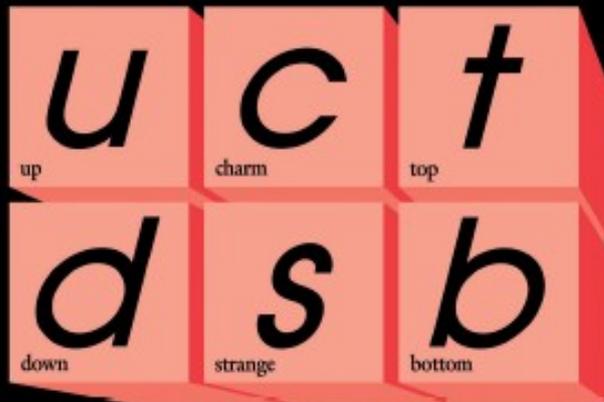
Image de l'univers après
300000 années d'existence
(Planck)



- Les données "satellite" et "télescope" semblent indiquer qu'à grande échelle, l'univers subit une force répulsive
- Contradictoire avec l'attraction due à la force gravitationnelle
 - Une forme d'énergie remplit l'univers → l'énergie noire
 - Exerce une action répulsive
 - L'univers continue son expansion au-delà de ce que l'on prédit avec la matière "habituelle" (ou "noire")
- Lié aux mesures du fond diffus cosmologique et à l'observation d'explosions d'étoiles lointaines
- 70% de l'énergie dans l'univers serait "sombre" !

Matière

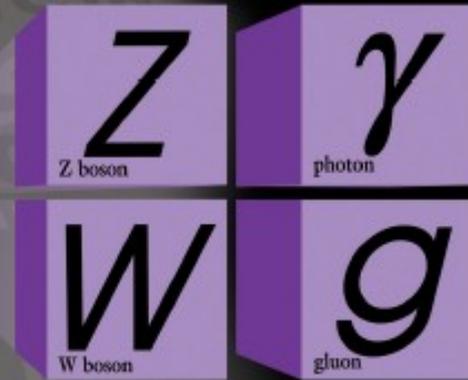
Quarks



Leptons



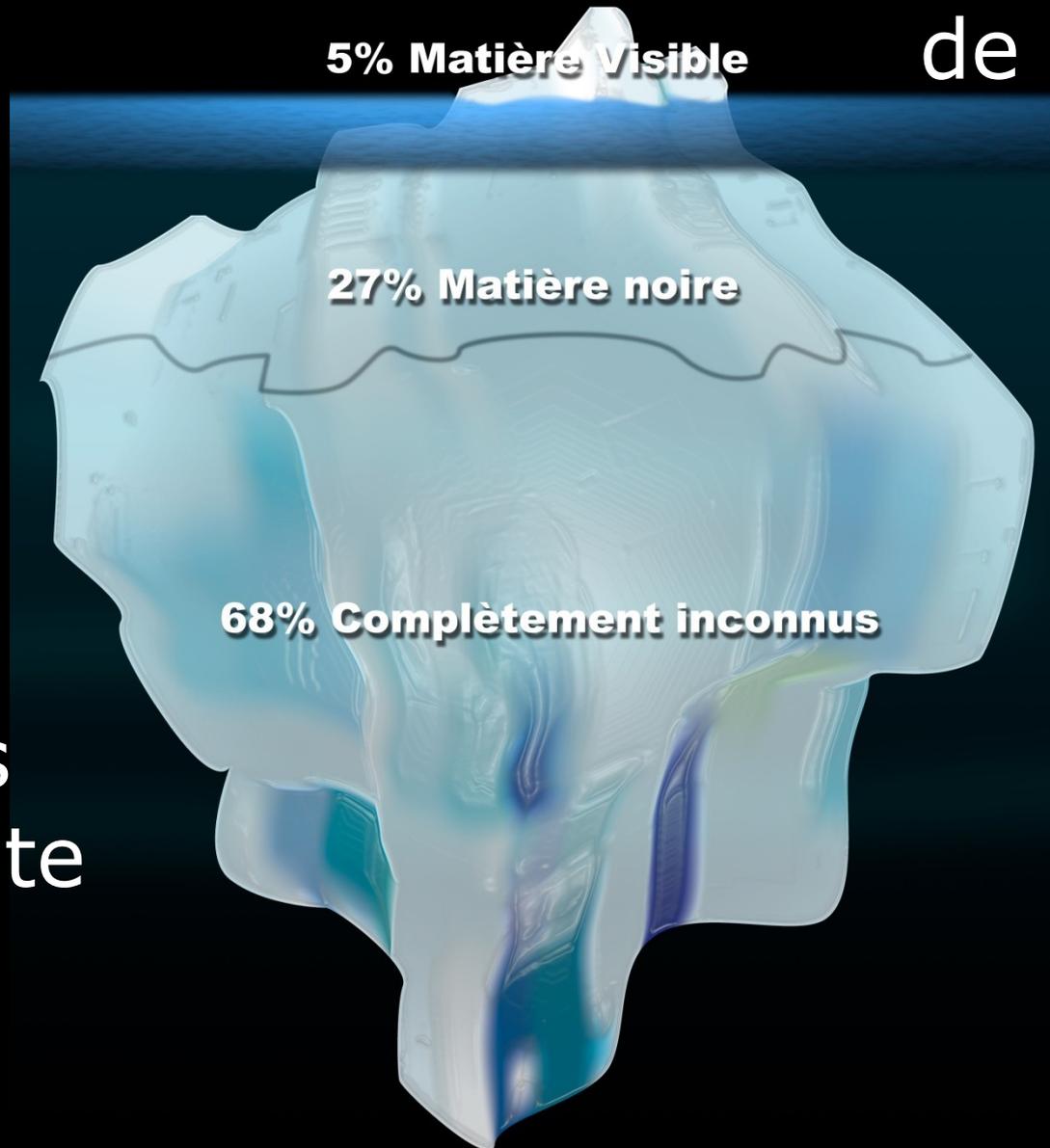
Forces



5% Visible Matter



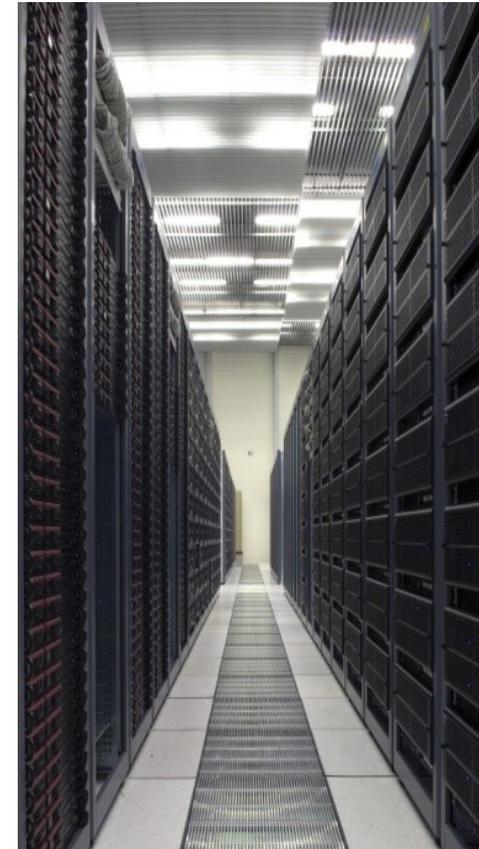
Le contenu énergétique de l'Univers



Résultats
du satellite
Planck
(2013)

Les apports pour la Société

- Besoin de comprendre notre place dans l'univers et ce que nous sommes
- Les découvertes en sciences fondamentales permettent les grandes avancées
 - Les transistors ont été inventés parce qu'on avait découvert la mécanique quantique
 - Le système de positionnement GPS utilise la relativité générale
- La recherche a des besoins spécifiques : elle développe de nouvelles technologies
- Le “world wide web” inventé au CERN
- Actuellement, plus de 8000 physiciens analysent les données du LHC
 - Elles représentent l'équivalent d'une pile de CD de 20 km de hauteur chaque année
 - De nouveaux moyens de stockage et de calcul ont donc été mis au point pour les traiter : la grille de calcul
- L'imagerie médicale utilise des accélérateurs de particules et les mêmes technologies de détection que la physique des particules.



“ferme” de PC au CERN