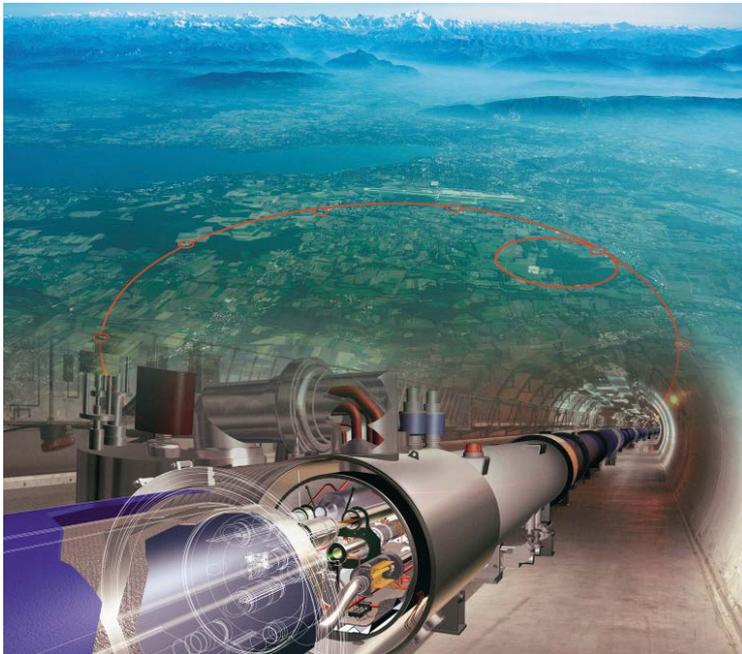
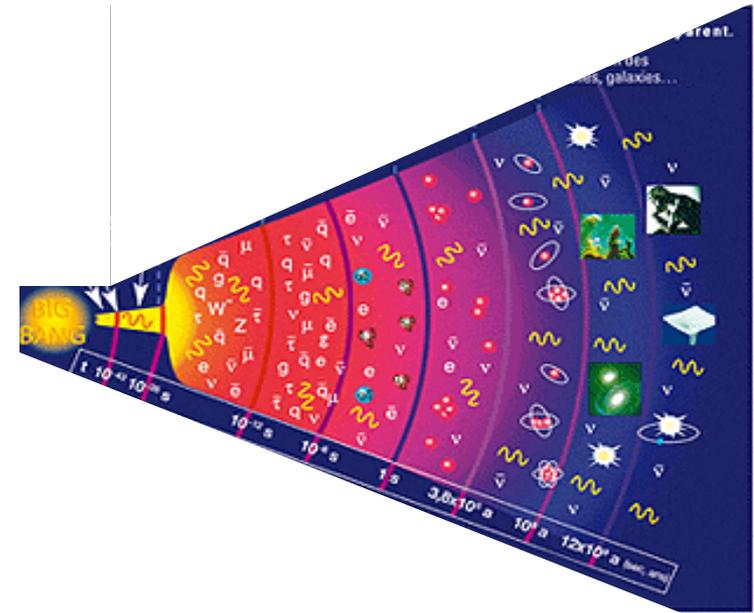


# Introduction

## la physique des particules

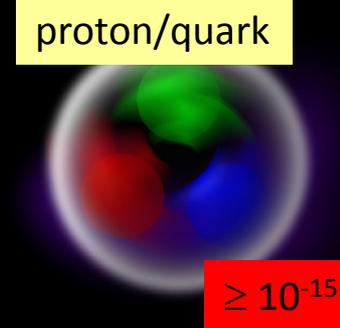
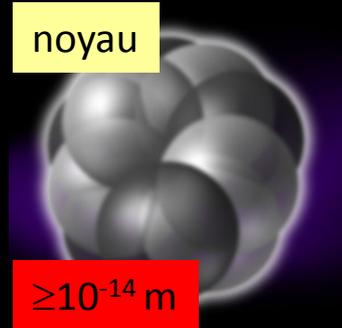
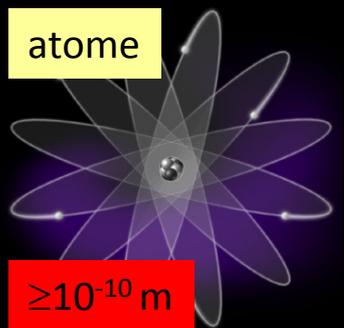
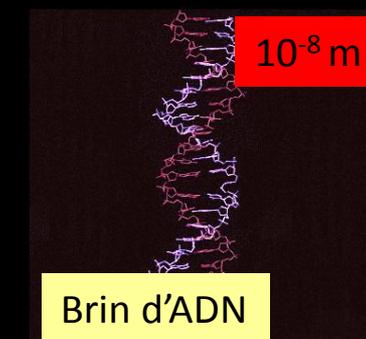
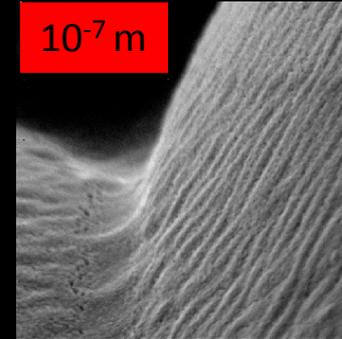
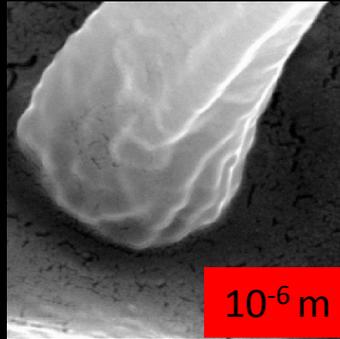
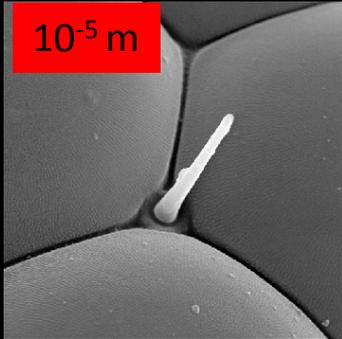
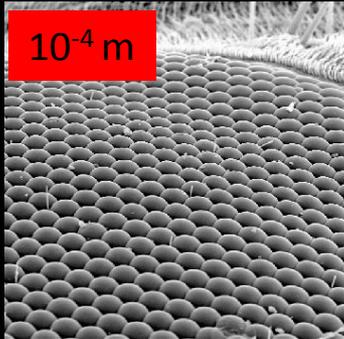
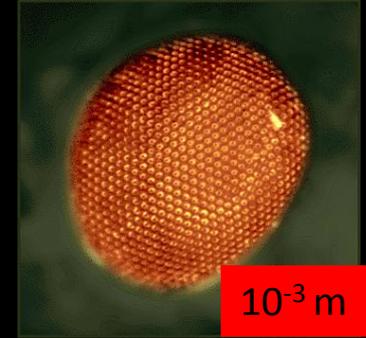
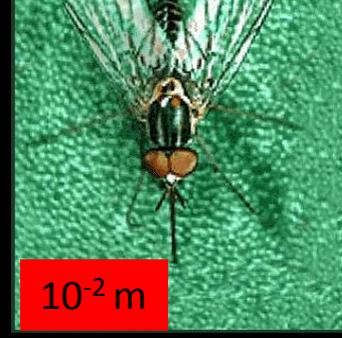
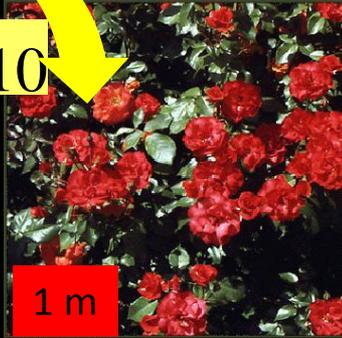
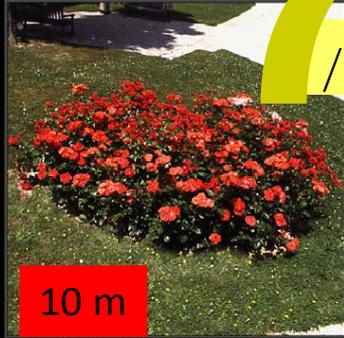
✓ Etude des particules élémentaires et de leurs interactions.

✓ Décrit la matière qui nous entoure mais aussi celle qui a pu apparaître au moment du big-bang



✓ Aussi appelée la physique des hautes énergies car elle nécessite des accélérateurs toujours plus puissants.

# La vision actuelle de la matière



© CERN

# Le modèle standard de la physique des particules

Théorie décrivant les particules élémentaires et leurs interactions

## Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

### FERMIONS

**Leptons** spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \cdot 10^{-8}$	0
$e^-$ electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
$\mu^-$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
$\tau^-$ tau	1.7771	-1

**Quarks** spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>d</b> down	0.006	-1/3
<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b>s</b> strange	0.1	-1/3
<b>t</b> top	175	2/3
<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

### Structure within the Atom

Atom Size =  $10^{-10}$  m

Nucleus Size =  $10^{-14}$  m

Quark Size <  $10^{-18}$  m

Electron Size =  $10^{-18}$  m

Neutron and Proton Size =  $10^{-15}$  m

### BOSONS

**Unified Electroweak** spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^\pm$	80.4	-1
$Z^0$	80.4	+1
$Z^0$	91.187	0

**Strong (color)** spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>g</b> gluon	0	0

**force carriers** spin = 0, 1, 2, ...

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "color charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically charged particles interact by exchanging photons, so strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and  $W$  and  $Z$  bosons have no strong interactions and hence no color charge.

**Quarks Confined in Mesons and Baryons**  
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: mesons ( $q\bar{q}$ ) and baryons ( $qqq$ ).

**Residual Strong Interaction**  
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

### PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong
		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Fundamental
Acts on:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Color Charge
Particles experiencing:		All	$W^\pm$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Quarks, Gluons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	$W^\pm$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength relative to electromagnetism for two u quarks at:		$10^{-41}$	0.8	1	25
		$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60
		$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons
					20

### Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	$sss$	-1	1.672	3/2

### Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

**Matter and Antimatter**  
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c$ ,  $\eta_s$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\rho^0$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\rho^0$ ) are their own antiparticles.

**Figures**  
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating)  $W^-$  boson. This is neutron  $\beta$  decay.

An electron and positron (antilepton) colliding at high energy can annihilate to produce  $\gamma$  and  $Z^0$  bosons. These bosons can annihilate to produce  $q\bar{q}$  and  $B^0$  mesons via a virtual  $Z^0$  boson or a virtual photon.

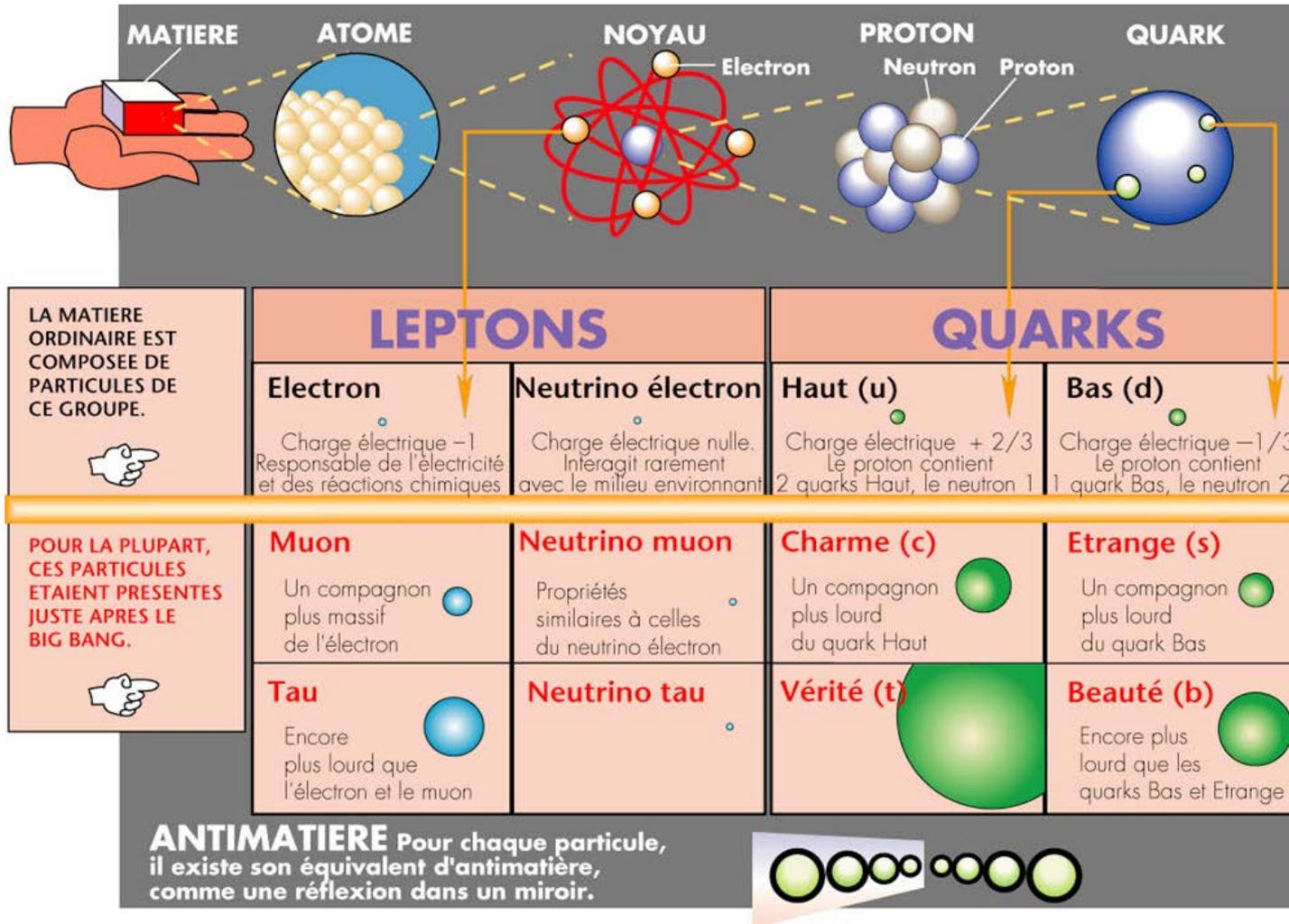
Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as  $Z^0$  bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

**The Particle Adventure**  
Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:  
U.S. Department of Energy,  
U.S. National Science Foundation,  
Lawrence Berkeley National Laboratory,  
Stanford Linear Accelerator Center,  
American Physical Society, Division of Particles and Fields,  
BURLER INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see: <http://CPEPweb.org>

# Les particules élémentaires...



6 leptons  
6 quarks  
répartis en 3 familles



de +  
en +  
massives

Beaucoup de combinaisons possibles !

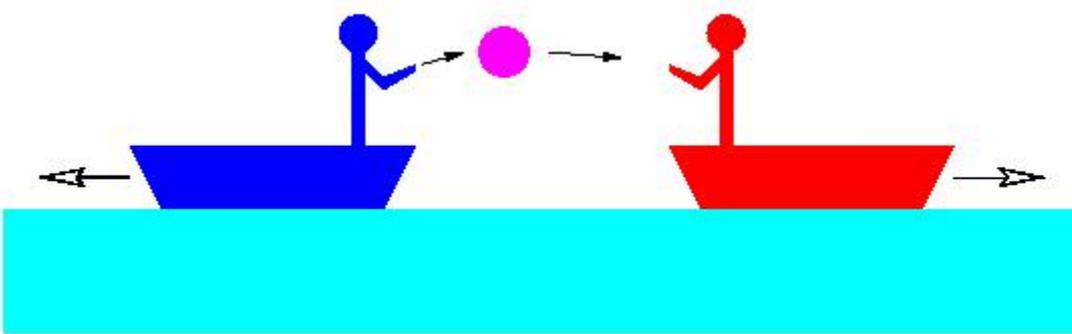
Les quarks sont liés au sein des **hadrons** { 3 quarks = **baryon**  
1 quark 1 antiquark = **méson**

2 baryons célèbres :  
**Proton : uud** et **Neutron : ddu**

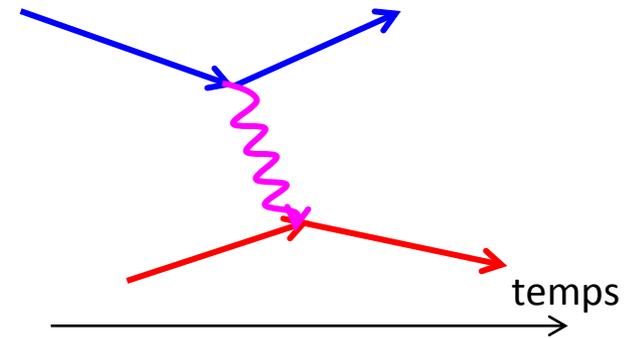
# ... et leurs interactions

Les interactions sont décrites par la **théorie quantique des champs** { mécanique quantique (infiniment petit)  
relativité (vitesse  $\leq V_{\text{lumière}}$ )

Les interactions se font via l'échange de particules appelées les **bosons vecteurs**



Vision «classique »



Représentation d'une interaction  
Graphe de Feynman

- ⇒ Les bosons vecteurs sont aussi des particules
- ⇒ La portée de l'interaction dépend de leur masse

# Les 4 interactions fondamentales

Force	Gravité (graviton ?)	Interaction Électromagnétique (photon)	Interaction forte (gluon)	Interaction faible (W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z)
Explique :	Phénomènes gravitationnels	Cohésion des atomes, des molécules, de la matière... Lumière, rayons X...	Cohésion des quarks dans les hadrons et des nucléons dans le noyau...	Radioactivité, réactions dans le soleil...
Concerne :	Objets massifs (négligeable pour les particules)	particules chargées	quarks et gluons = particules colorées	toutes les particules
Masse du Boson vecteur	$M_{\text{graviton}} = 0$	$M_{\text{photon}} = 0$	$M_{\text{gluon}} = 0$	W et Z massifs ( $\sim 90 \text{ GeV}/c^2$ )
Puissance relative <b>approximative</b> (vie de tous les jours)	$\sim 10^{-40}$	$\sim 10^{-2}$	1	$\sim 10^{-5}$

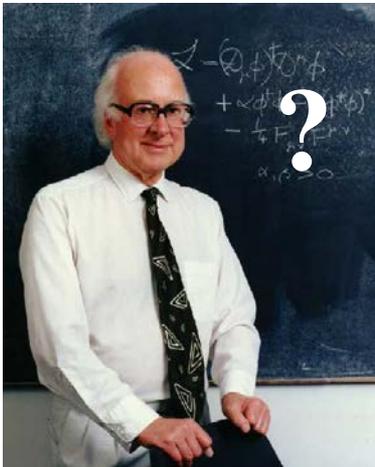
Unité énergie :  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$

# Encore un boson ? Le boson de Higgs

## La problématique de la masse des particules

- ✓ Sans le mécanisme de Higgs dans le modèle standard, pas de masses
- ✓ Avec ce modèle (1964) :

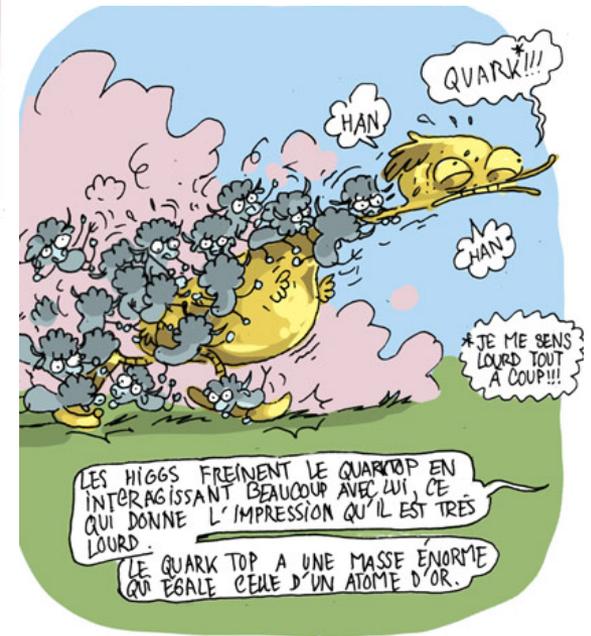
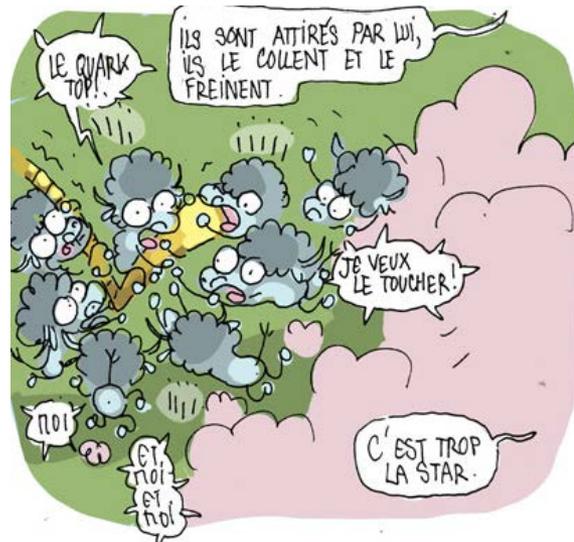
les particules acquièrent leur masse en interagissant avec le Higgs  
Intensité de l'interaction proportionnelle à la masse



BD LHC par Lison Bernet

<http://www.lhc-france.fr/aventure-humaine/bd-du-lhc>





BD LHC par Lison Bernet  
Extrait de « chasse au Higgs »



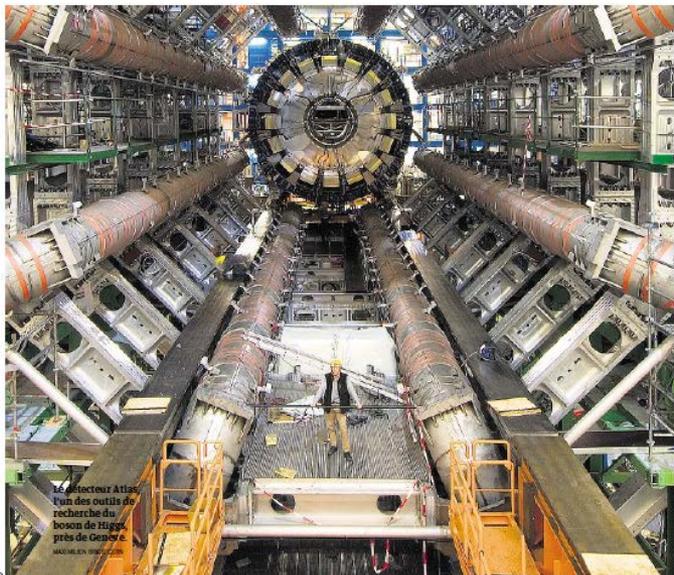
Lison Bernet

Jusqu'à présent le modèle standard n'a jamais été mis en défaut et il permet de prédire les observations avec une précision inégalée.

Le Higgs était la dernière pièce manquante du puzzle ... jusqu'au 4 juillet 2012!

## Science : la matière dévoilée

- Le boson de Higgs, particule manquante pour expliquer l'Univers, vient d'être découvert
- Les physiciens du CERN de Genève ont prouvé son existence à 99,9999 %



Le détecteur ATLAS, l'un des outils de recherche du boson de Higgs, près de Genève.

MAUREN BÉGIN/AGF



Physique des particules

## La masse est dite

Le Cern a réussi à mettre en évidence le boson de Higgs qui résout une énigme fondamentale et ouvre une nouvelle étape scientifique. PAGES 2-5

En raison d'un mouvement de grève dans les imprimeries, ce numéro de Libération n'est disponible que sous forme électronique. Toutes nos excu- sions à nos lecteurs.

## Le Cern a mis la main sur le boson de Higgs

Les capteurs de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire ont détecté le nouveau Graal de la physique.

TRISTAN VEY

**PHYSIQUE** Au terme de deux présentations historiques effectuées hier matin au Cern, à Genève, le directeur de l'organisation, Rolf Heur, se tourne vers l'auditoire, un grand sourire aux lèvres : « Je pense qu'on l'a. Qu'est-ce que vous en dites ? » Dans une grande clameur et un tonnerre d'applaudissements, les dizaines de physiciens réunis dans la salle lâchent un vibrant : « Yes ! » L'explosion de joie est à la mesure de la découverte, l'une des

cessaires à l'apparition de quelques-uns de ces bosons. Il a parfaitement rempli son office. Les deux principaux détecteurs, Atlas et CMS, aussi.

Sandrine Laplace, qui a travaillé pour le compte du CNRS sur CMS, explique la prouesse expérimentale par une analogie. « Si nous avions pu emmagasiner toute la "musique" des données fournies par le LHC pendant un an, nous en aurions pour 600 millions d'années à tout écouter. Matériellement, nous n'avons pu enregistrer que 40 ans de musique en choisissant soigneusement les morceaux qui nous paraissent

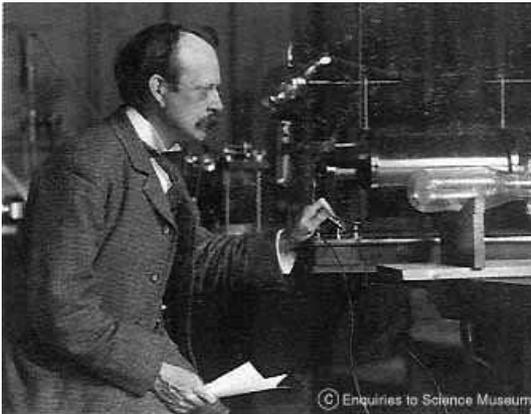


Rolf Heur, directeur de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, lors d'une présentation, mercredi, à des dizaines de physiciens au Cern, à Genève. DENIS BALBOUSE/REUTERS

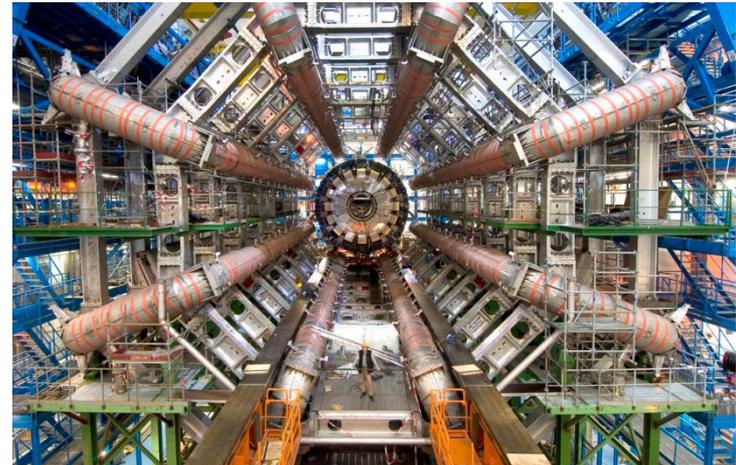


# La physique des particules : une discipline très jeune

- ✓ **1897** : électron
- ✓ En **1932** : proton (1918), photon (1923), neutron (1932), anti-électron (1932) et postulat de l'existence du neutrino
- ✓ Entre **1937 et 1948** : nouvelles particules dans les rayons cosmiques
- ✓ A partir de **1948** : ère des accélérateurs  
⇒ nombreuses particules découvertes



100 ans



# Mais des questions restent ouvertes...

- ✓ Pourquoi cette hiérarchie des masses : du photon ( $M=0$ )  
au quark top ( $M=174\text{GeV}$ ) ...
- ✓ Trop de paramètres ( $\sim 20$ ) !
- ✓ Pourquoi 3 familles ?
- ✓ Et la gravitation ?
- ✓ Où est passée l'antimatière ?

D'autres modèles théoriques sont développés pour tenter de répondre mais aucune indication ne permet encore d'en valider un...

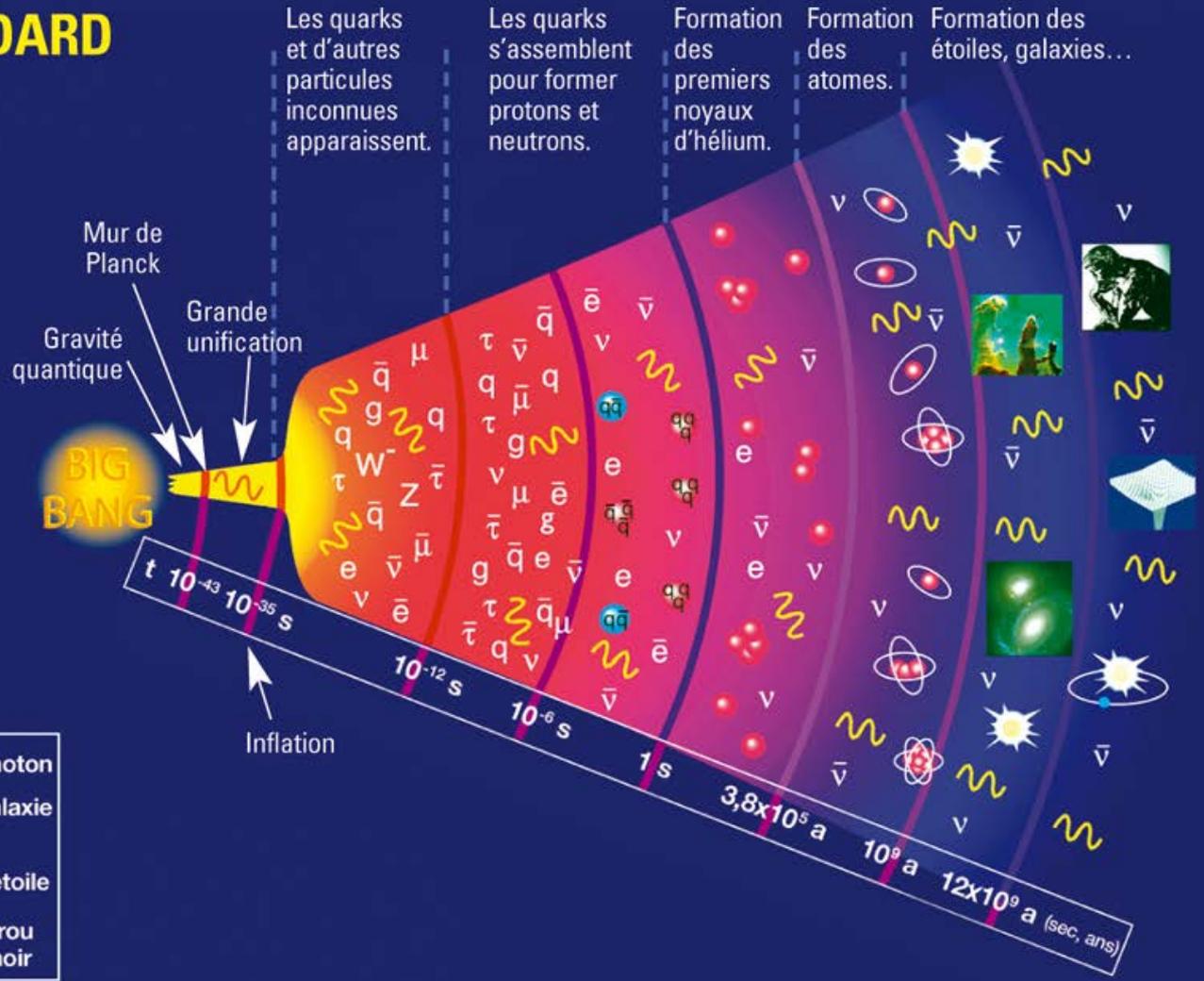


# Des particules à l'Univers : Big Bang et particules

## L'UNIVERS SELON LE MODÈLE STANDARD

Depuis le Big Bang, l'Univers primordial a franchi de nombreuses étapes durant lesquelles les particules puis les atomes et la lumière ont peu à peu émergé avant qu'étoiles et galaxies ne prennent corps. C'est cette histoire que raconte la théorie du « modèle standard » en vigueur aujourd'hui.

L'Univers devient transparent.



Légendes	
W, Z bosons	photon
q quark	meson
g gluon	baryons
e électron	ions
μ muon τ tau	atome
ν neutrino	trou noir
	galaxie
	étoile

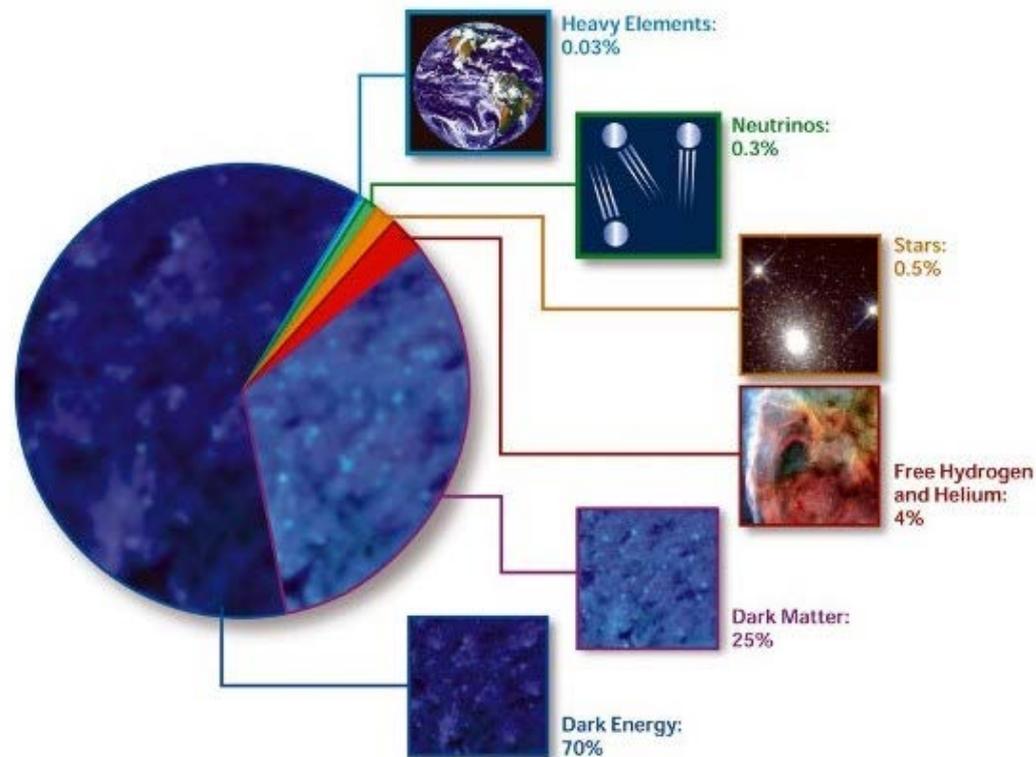
# Des particules à l'Univers : qu'est ce que la matière noire ?

Seuls **~5 %** de la composition de l'énergie et de la masse de l'Univers **sont connus**

**Il y aurait aussi :**

- **~70 % d'énergie noire**  
⇒ accélération de l'expansion de l'Univers

- **~25 % de matière noire** →



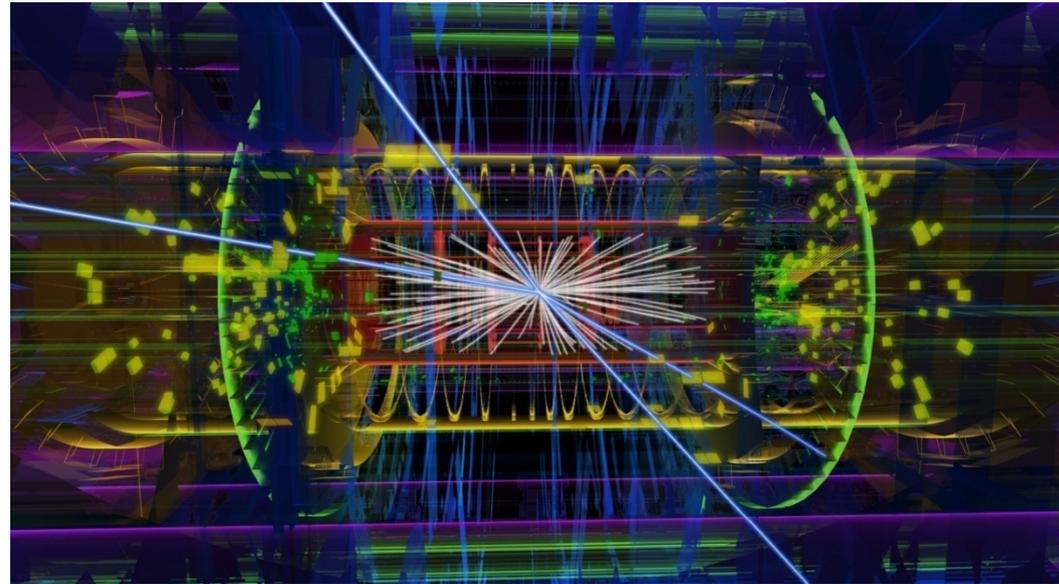
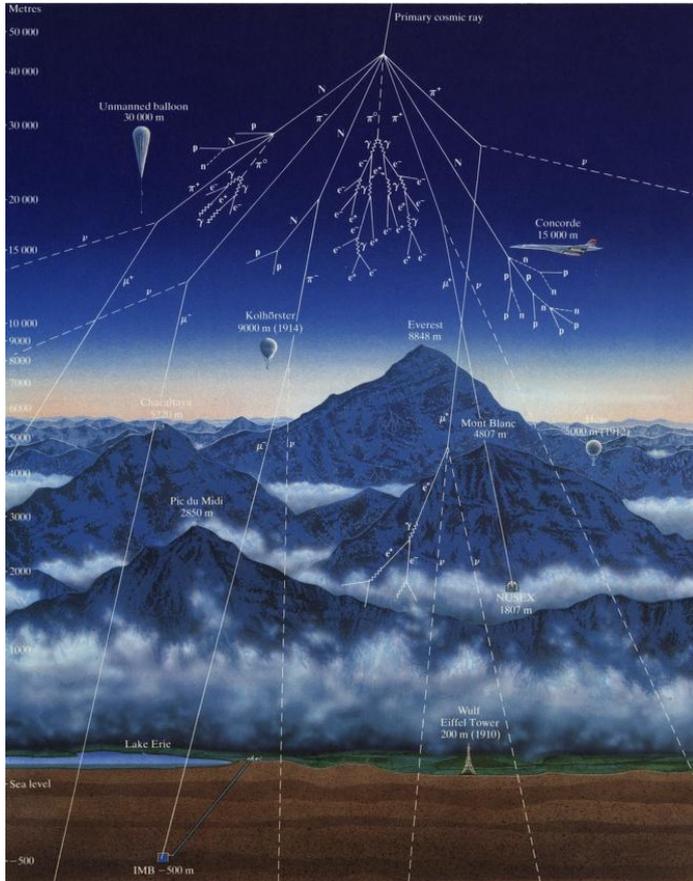
Recherche de particules qui pourraient jouer le rôle de la matière noire

# Etudier ces particules et leurs interactions

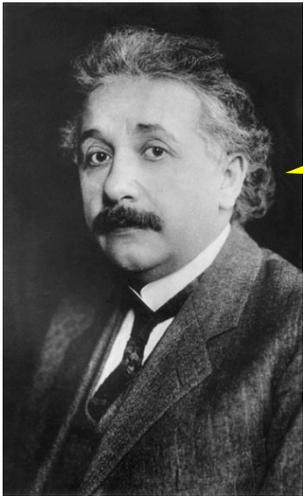
La plupart des particules n'existent pas sur terre à l'état naturel



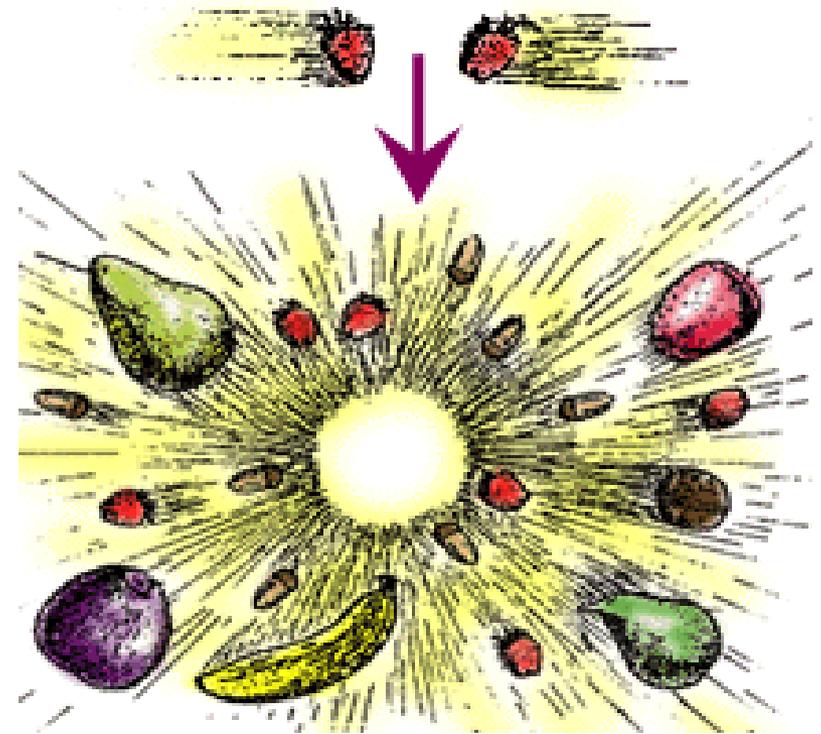
2 solutions pour les étudier :  
attendre qu'elles tombent du ciel....  
...ou les produire



# Produire des particules avec des accélérateurs



La masse est  
juste une forme  
d'énergie



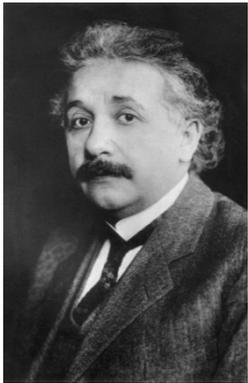
Copyright 1996 Particle Data Group.

$$E=Mc^2$$

**collision** de particules  
avec **une haute énergie**



**création** de nouvelles particules  
**plus massives**



# La relativité restreinte

Décrit les mouvements des corps ayant une très grande vitesse (vitesse proche de  $c \equiv V_{\text{lumière}}$ )

→ En relativité restreinte, les référentiels sont très importants.

Dans le réf du trottoir, les passagers du bus ont une vitesse  $\vec{v}$



Dans le réf du bus, les passagers sont au repos



- ✓ En mécanique classique, le temps s'écoule de la même façon dans tous les référentiels
- ✓ En relativité restreinte, le temps s'écoule différemment selon le référentiel considéré

Les particules vont très vite dans les accélérateurs

⇒ calculs avec la relativité restreinte

# 2 quantités très importantes : l'énergie et l'impulsion

Pour chaque particule ->  $E$  et  $\vec{p}$  associées (observables)



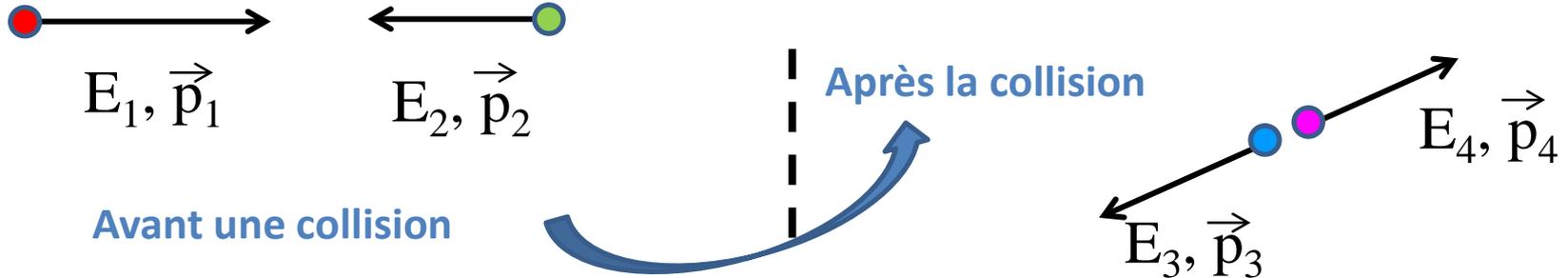
Leur valeur dépend du référentiel!

- ✓ Dans le réf au repos :  $E = M_0 c^2$  ;  $\vec{p} = \vec{0}$   
 $M_0 \equiv$  masse au repos (ou masse caractéristique de la particule)  
 $c \equiv$  vitesse lumière =  $3 \cdot 10^8$  m/s
- ✓ Réf en mouvement :  $E = M_0 c^2 + E_c$  (énergie cinétique) =  $M c^2$   
 $\vec{p} = M \vec{v} = E \vec{v} / c^2$
- ✓ Pour une particule, si on mesure  $E$  et  $p$  dans un réf donné, on a toujours :  $M^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$
- ✓ Pour un système de particules, dans un réf donné,  $E_{\text{total}}$  et  $\vec{p}_{\text{total}}$  sont conservés au cours du temps

$$E = M_0 c^2 + E_c$$

$$M^2_0 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

$E_{\text{total}}$  et  $\vec{p}_{\text{total}}$  sont conservés



Conservation de  $E_{\text{total}}$  et  $\vec{p}_{\text{total}}$   $\longrightarrow$

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 + \vec{E}_2 &= \vec{E}_3 + \vec{E}_4 \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 &= \vec{p}_3 + \vec{p}_4 \end{aligned}$$

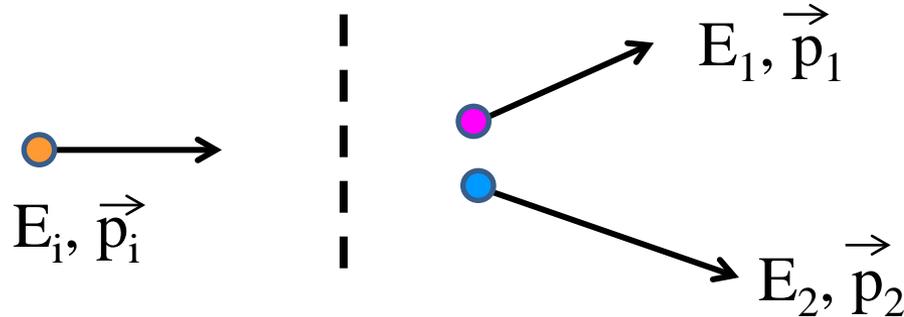
Si  $E_{c1}$  et  $E_{c2}$  sont grands,  $E_1$  et  $E_2$  aussi

$\longrightarrow$  on peut produire des particules avec une grande énergie et donc potentiellement une grande masse

$$E = M_0 c^2 + E_c$$

$$M_0^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

$E_{\text{total}}$  et  $\vec{p}_{\text{total}}$  sont conservés



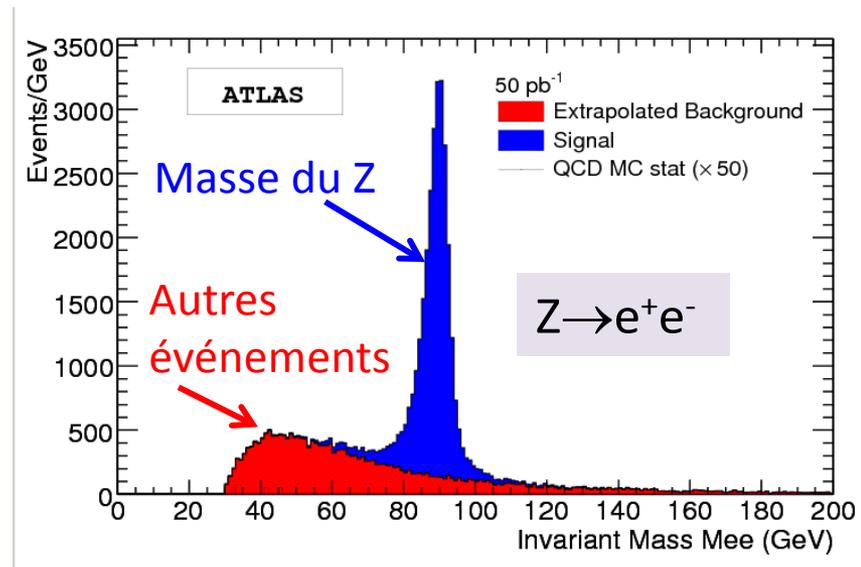
Désintégration d'une particule en  
2 particules plus légères

Conservation de  $E_{\text{total}}$  et  $\vec{p}_{\text{total}}$

$$\begin{aligned} E_i &= E_1 + E_2 \\ \vec{p}_i &= \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{aligned}$$

- ✓ Si on a mesuré  $E_1, E_2, \vec{p}_1$  et  $\vec{p}_2$   
on peut retrouver  $E_i$  et  $\vec{p}_i$
- ✓  $M_{0i}^2 c^4 = E_i^2 - p_i^2 c^2$

→ on a la masse de la particule  
initiale qui s'est désintégrée



# Principes de base d'un accélérateur

- ✓ Utilisation de **particules faciles à produire** ( $e^-$ ,  $p$ ,  $e^+$ ,  $p^-$ ...)
- ✓ Accélération  $\Rightarrow$  **champ électrique** (cavités radiofréquences)
- ✓ Courber }  
Focaliser } les faisceaux  $\Rightarrow$  **champs magnétiques**
- ✓ **Collisions** en un point



Certains sont **linéaires**...  
d'autres **circulaires**

Stanford-linear-accelerator



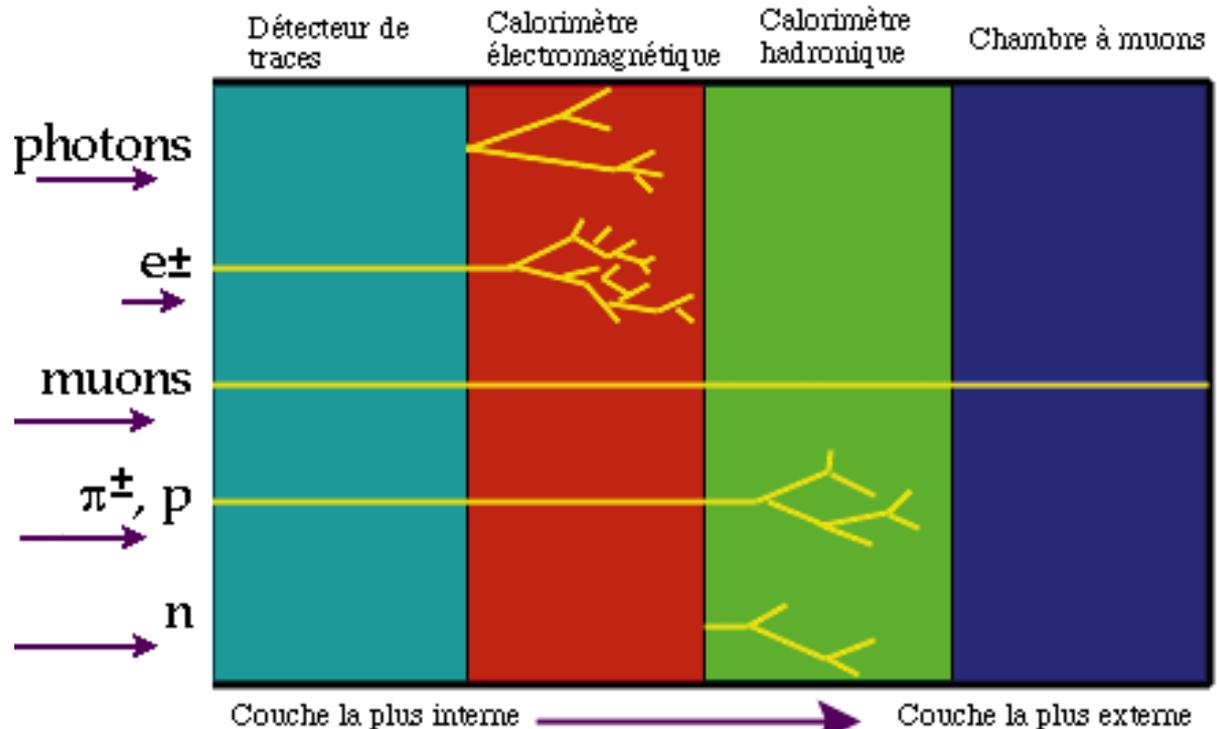
Modélisation en surface du  
tunnel LHC (sous terre) au CERN

# Détecter les particules produites au point de collision

Aux points de collisions, il y a des **détecteurs** mais ceux-ci ne « verront » pas les particules créées...

A peine produites, les particules les plus lourdes **se désintègrent vers les plus légères**  $\Rightarrow$  on ne détectera finalement que  **$n, \gamma, e, p, \mu, \pi^\pm, K^\pm$**

Les détecteurs sont composés de plusieurs **sous-détecteurs** adaptés pour chaque type de particule



# Comment savoir ce qui a été produit ?

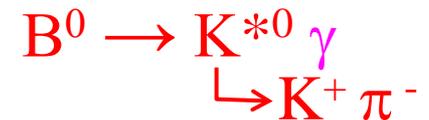
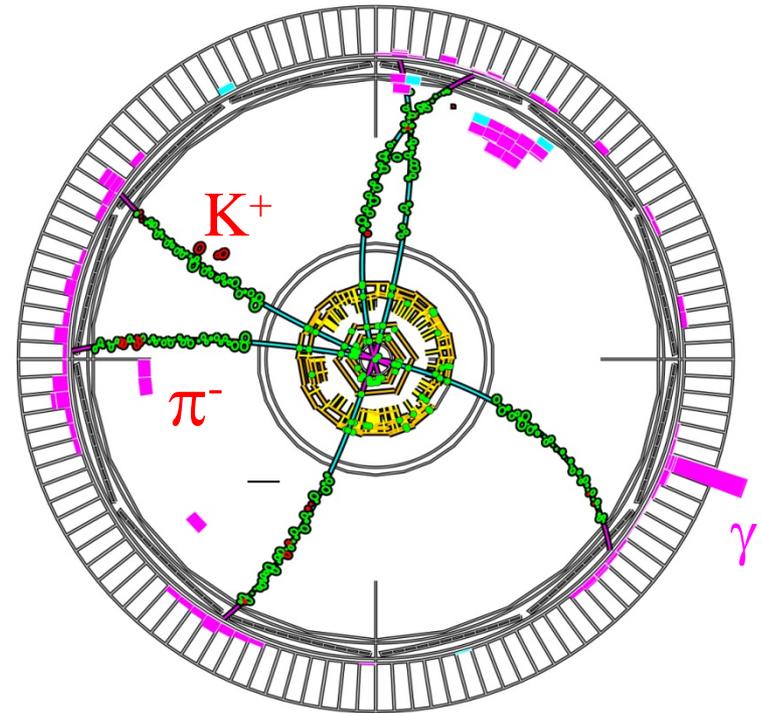
Pour chaque collision, on « **reconstruit** » les particules les plus lourdes en **recombinant** les particules détectées.

Nécessité d'énormes ressources de calcul

➔ La physique des particules est pionnière dans le traitement des données à très grande échelle

Un exemple :

« Event display » de l'expérience BaBar ( $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$ ,  $E_{CM}=10.58$  GeV)



# 2 particules spéciales : Quarks et Neutrinos

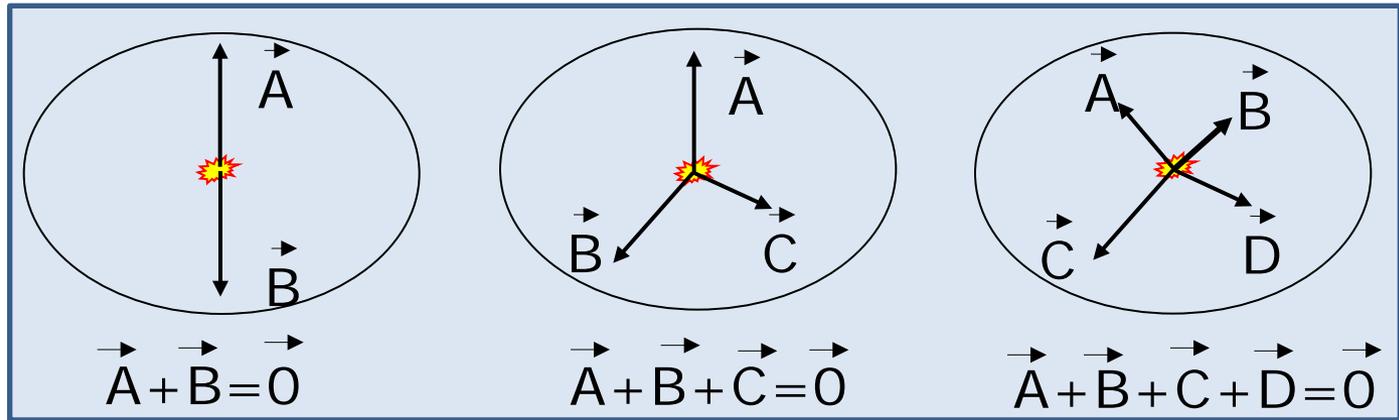
- ✓ Les **quarks** n'existent pas à l'état libre : ils sont liés dans les hadrons.

Quand un quark est produit avec beaucoup d'énergie, il **s'entoure** d'autres quarks qui forment des hadrons et qui vont tous dans la même direction  $\Rightarrow$  **jet**

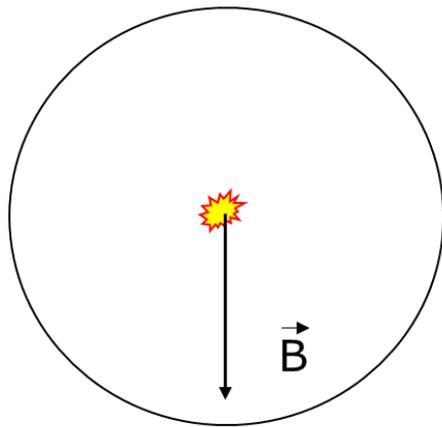
Dans le détecteur un **jet** laisse des **traces chargées** et des **dépôts d'énergie dans les calorimètres électromagnétiques et hadroniques**

- ✓ Les **neutrinos** n'interagissent presque pas  $\Rightarrow$  on ne les détecte pas  
Mais on sait que  $\vec{p}_{\text{total}}$  est conservé et que dans le plan transverse du détecteur,  $P_T=0$  avant la collision

$\Rightarrow$  donc  $P_T=0$   
après collision

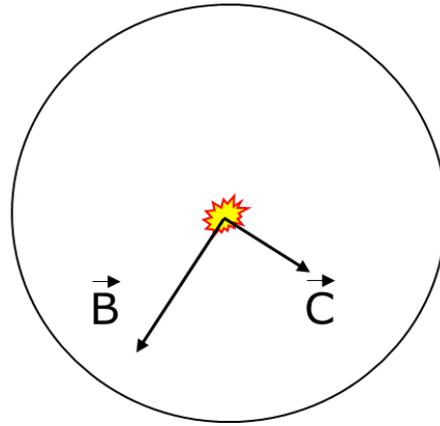


# Détecter un neutrino grâce à son absence



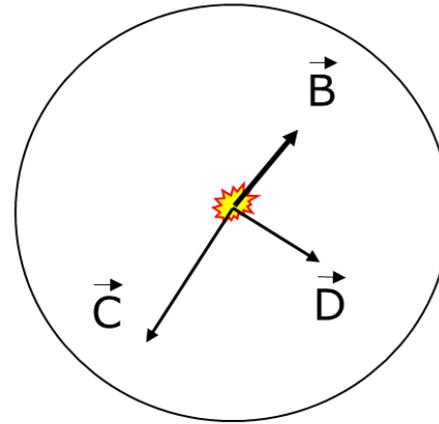
$$\vec{B} \neq 0$$

$$\vec{A} = \text{MET} = -\vec{B}$$



$$\vec{B} + \vec{C} \neq 0$$

$$\vec{A} = \text{MET} = -(\vec{B} + \vec{C})$$



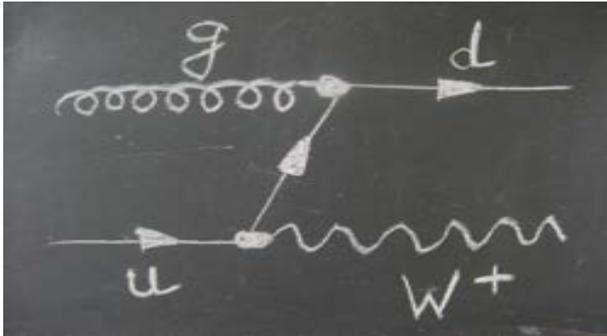
$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} \neq 0$$

$$\vec{A} = \text{MET} = -(\vec{B} + \vec{C} + \vec{D})$$

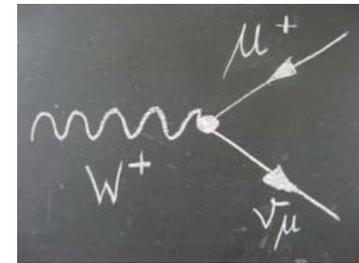
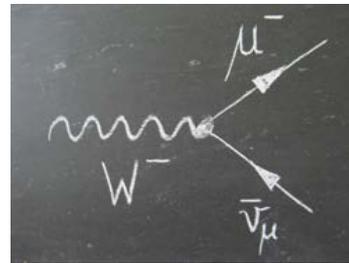
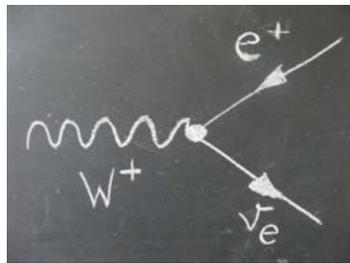
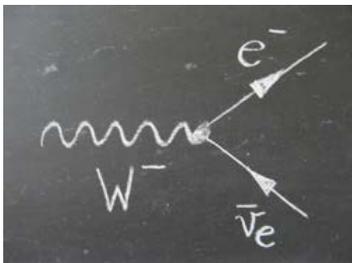
Si A était un neutrino, il manque alors des traces et de l'énergie dans le détecteur. On appelle ça l'énergie transverse manquante (**MET**).

Si  $\text{MET} \neq 0$   $\longrightarrow$  un neutrino a été produit !

# Exemples de productions et désintégrations des W



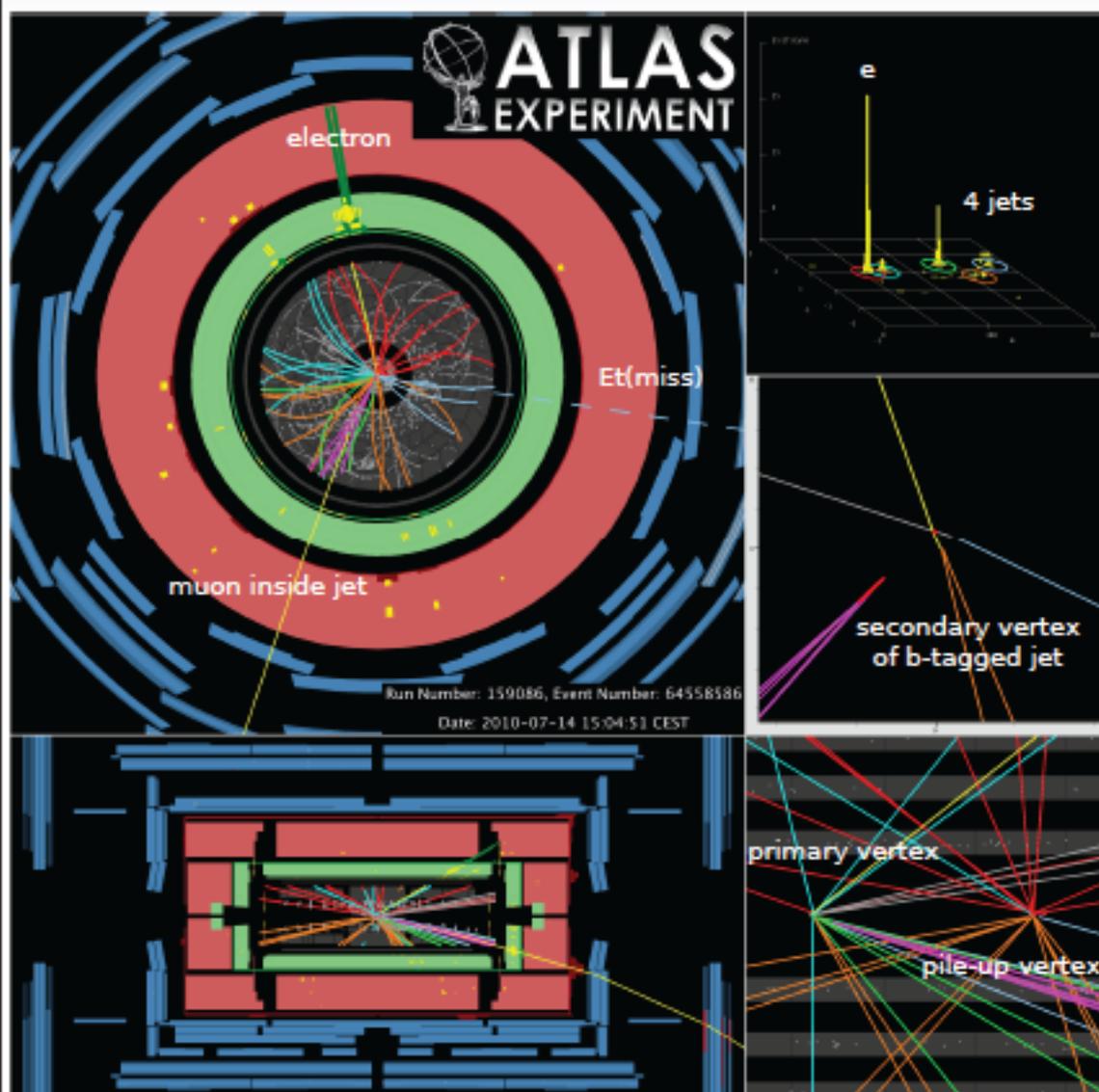
Production en association avec des quarks → jets dans le détecteur



Désintégrations en leptons chargés + neutrinos

Dans le détecteur on reconstruit les W avec de la **MET** et des **électrons** ou des **muons**  
Le plus souvent, ils sont accompagnés de **jets**.

# Un exemple avec le détecteur ATLAS

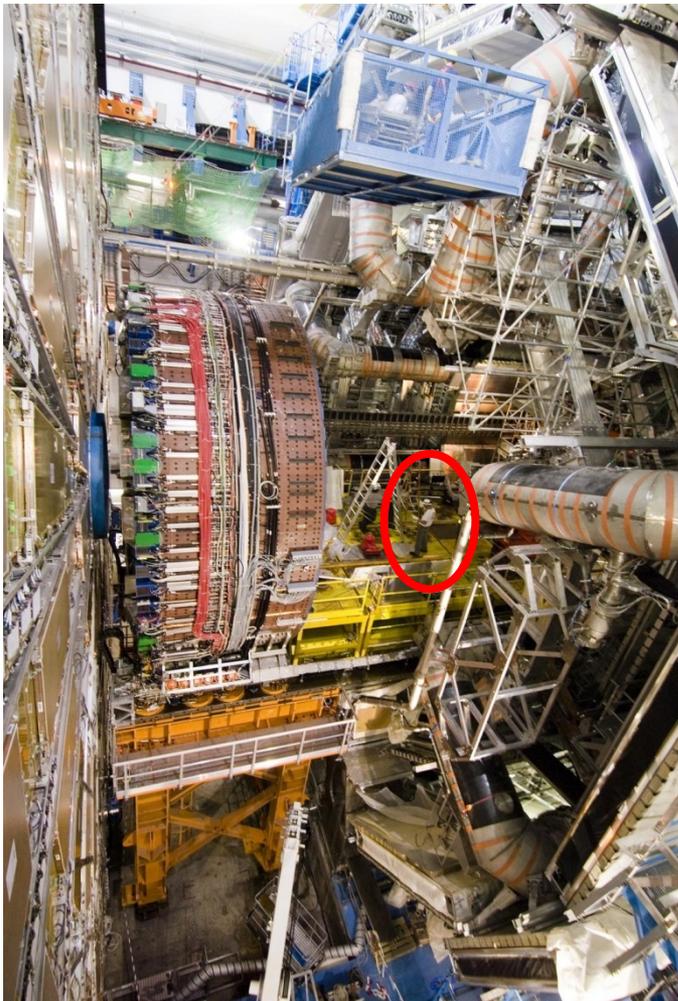


Un exemple de détection d'un événement **top-anti-top**

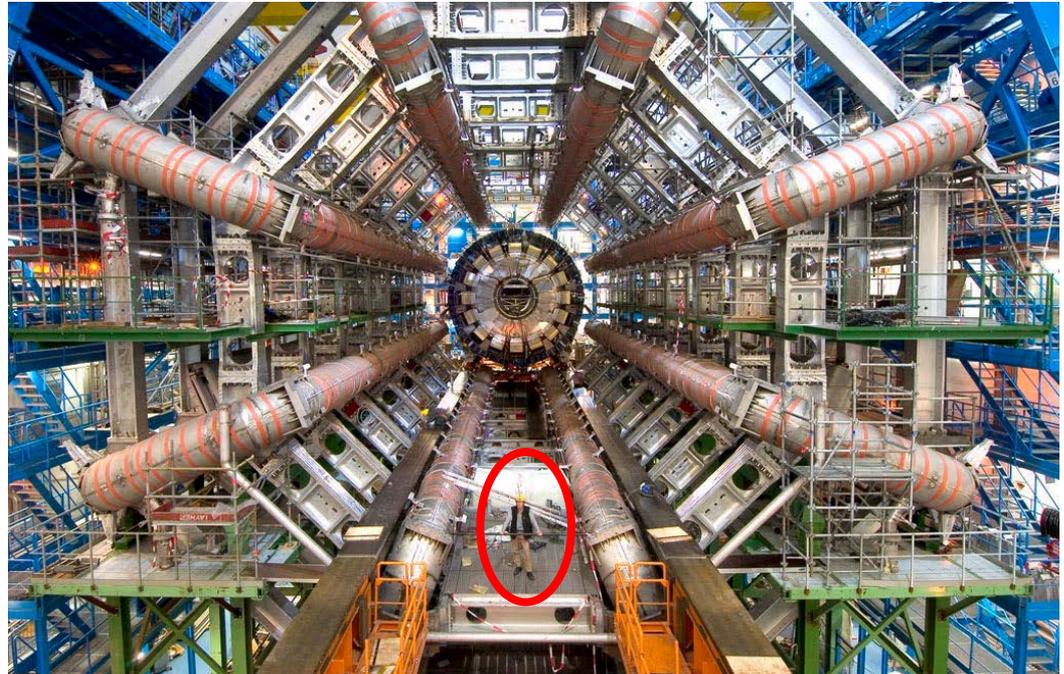
*e+jets candidate*

S. Ténac-Duvoird

# ATLAS « en vrai »



ATLAS Experiment © 2012 CERN



S. Trincaz-Duvoid

ATLAS Experiment © 2012 CERN

# Le LHC au CERN

Le CERN est l'un des plus grands et prestigieux laboratoires scientifiques du monde.

Fondé en 1954, situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse (à Genève).

Une des premières organisations à l'échelle européenne (20 États membres).

Environ la moitié des physiciens de particules du globe travaillent sur des expériences basées au CERN (~10000 personnes)



La dernière réalisation au CERN : **le Large Hadron Collider**

collisionneur protons-protons

énergie et nombre d'événements par seconde encore jamais atteints

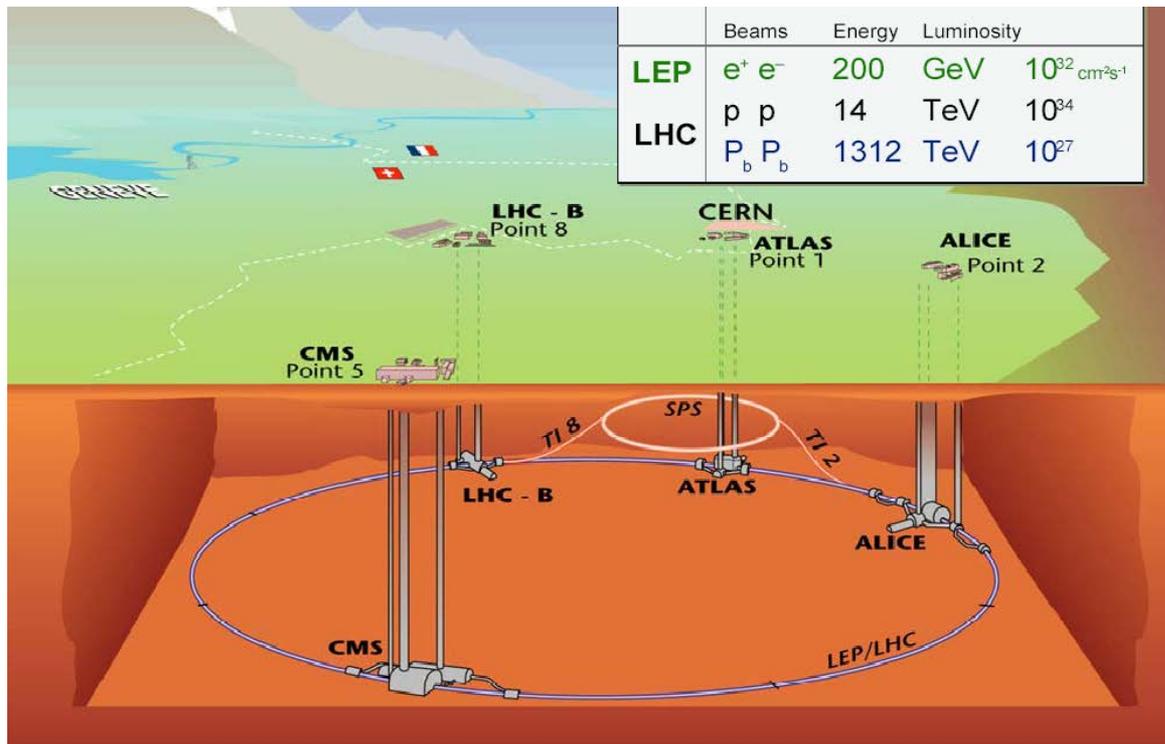
# Le LHC

Buts : ✓ Trouver le Higgs

✓ Pousser le modèle standard dans ses retranchements

✓ Répondre aux points qu'il laisse inexplicés

✓ Chercher de nouvelles particules (matière noire, supersymétrie...)



© CERN

- ✓ 100 m sous terre
- ✓ 27 km de circonférence
- ✓ 4 points de collisions instrumentés de détecteurs
- ✓ Collisions Plomb-Plomb 1 mois/an

Mis en fonctionnement en 2008 puis 2009

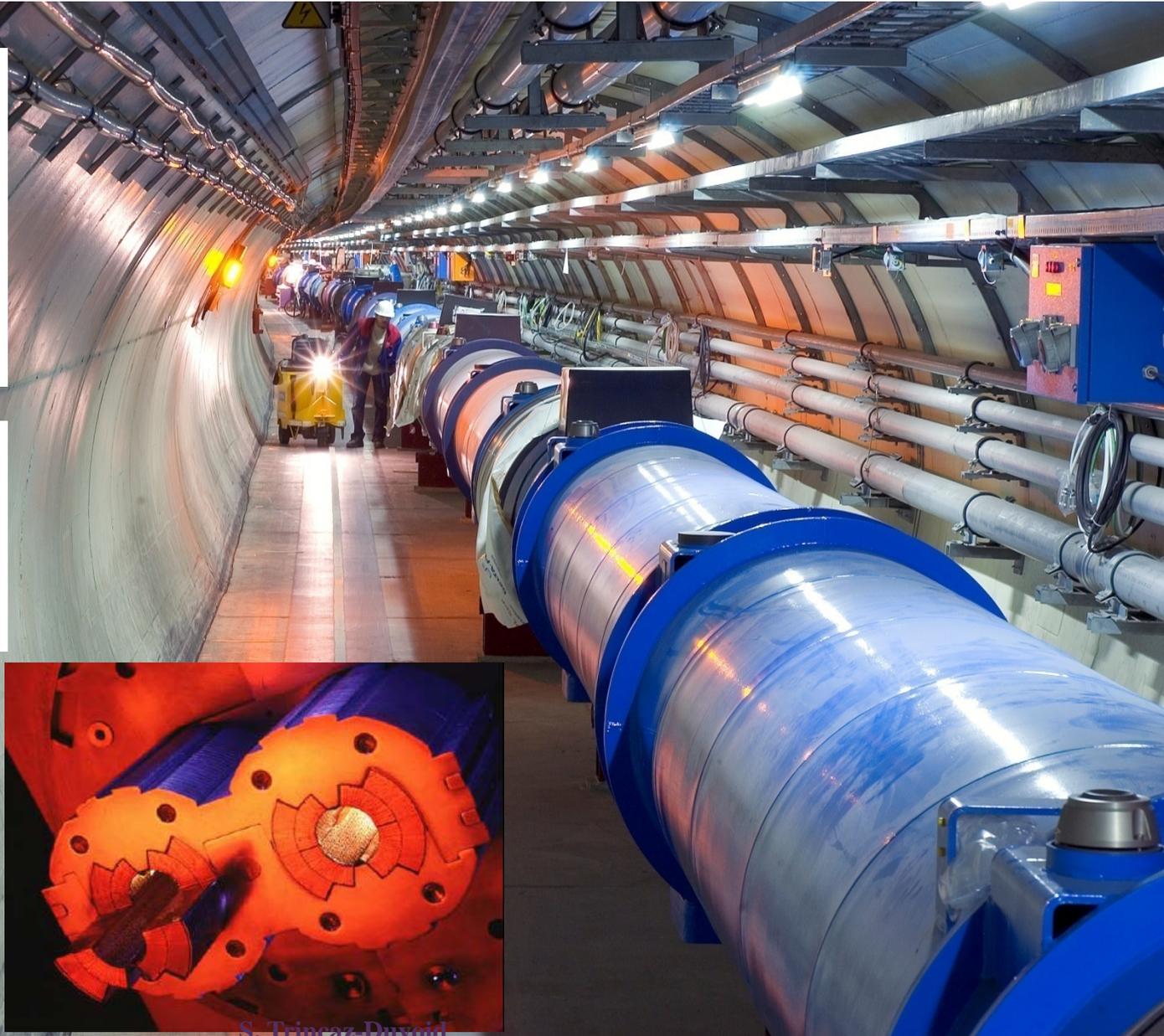
# Dans le tunnel

Des milliers d'aimants supraconducteurs pour courber les faisceaux  
Température  $\sim 2\text{K}$   
Champs : 8,4 T

Accélération par des cavités dont le champ électrique atteint  
5 millions volts /mètre

700 000 litres  
Hélium liquide

12 Millions litres  
d'Azote liquide



S. Trincas-Duvold

# La machine de tous les superlatifs

- Genèse du projet en 1984 - démarrage en 2009 ⇨ 25 ans !
- Les protons font 1 AR terre-neptune toutes les 10h (11 000 tours par seconde)
- Il y a 300 000 000 000 000 protons en même temps dans le LHC
- Les protons se croiseront ~ 40 millions de fois par seconde dans les détecteurs et chaque interaction produira ~ 20 collisions proton-proton
- Température de -271°C ⇨ plus froid que l'espace intersidéral !
- Aux points de collisions la T° est 100 000 fois plus chaude qu'au cœur du soleil !
- Endroit le plus vide du système solaire ( $10^{-13}$  atm)
- Le champ magnétique y est 200 000 fois supérieur à celui de la terre
- L'énergie stockée dans le faisceau équivaut à celle de 60 kg de TNT
- $10^{-12}$  secondes après le big bang

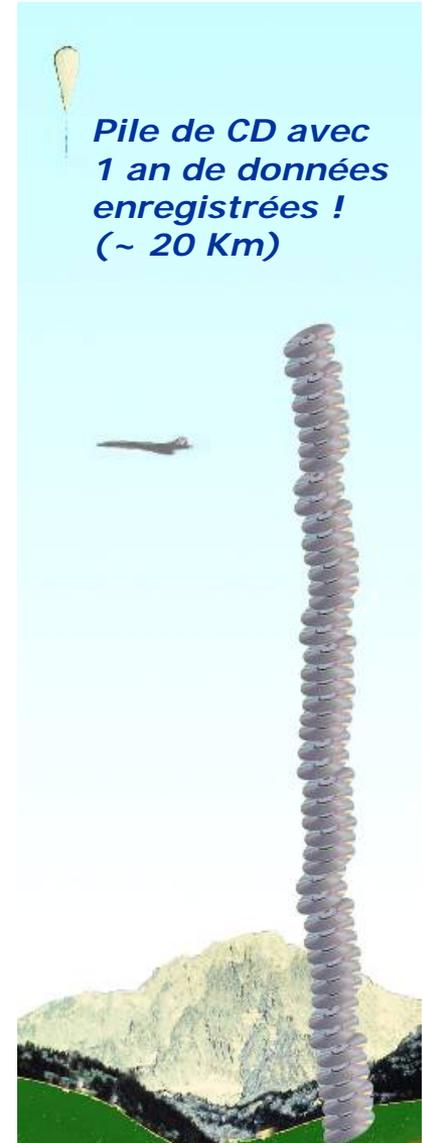
# Les contraintes sur les détecteurs du LHC

## L'environnement du LHC impose des contraintes fortes sur les détecteurs

- ✓ Survivre à plus de 10 ans de fonctionnement
- ✓ Détecteurs rapides  $\Rightarrow$  contraintes sur électronique !
- ✓ Très granulaires  $\Rightarrow$  nombreuses voies d'électronique
- ✓ Quantité de données :  $\sim 10^9$  événements (1 Mbyte) / an  
 $\Rightarrow$  1CD toutes les 2 secondes

**A la pointe de l'innovation** dans le domaine de la transmission des informations et le traitement des données :

- > **web (www) inventé au CERN** (protocole http et html)
- > **grille de calcul** (mise en lien des centres de calculs)



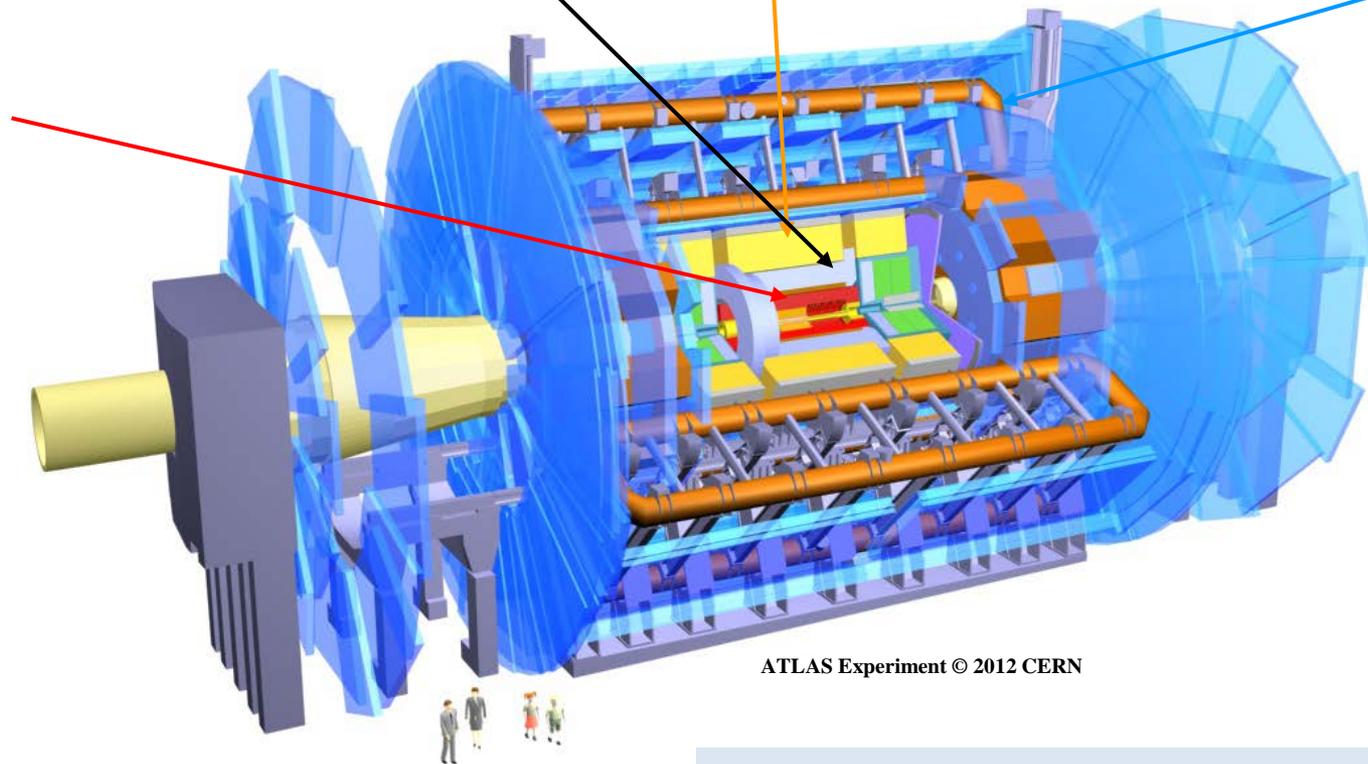
# Le détecteur ATLAS

Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

Chambres à  
muons et toroïde  
supraconducteur

Détecteur  
interne de  
traces



ATLAS Experiment © 2012 CERN

Câbles : 3000 km

Voies électronique :  $10^8$

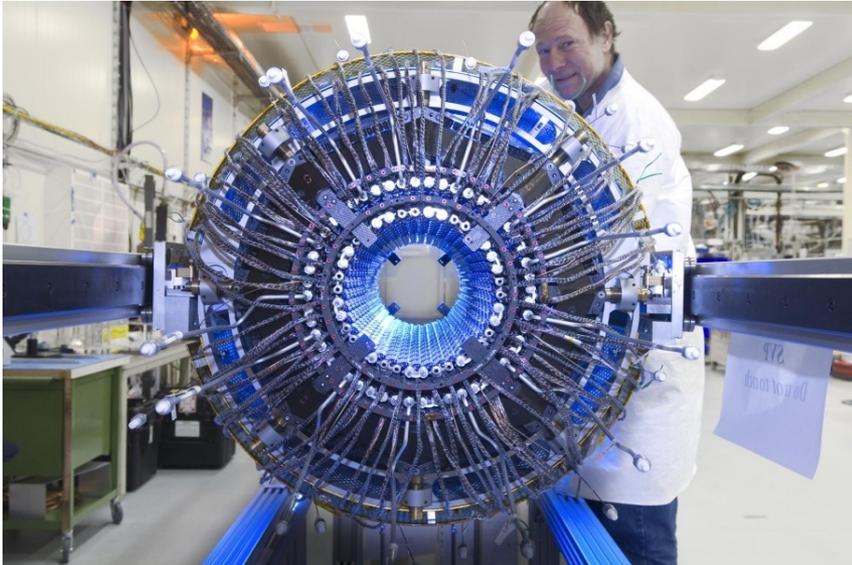
Haut comme un immeuble de 6 étages

Longueur : ~ 46 m

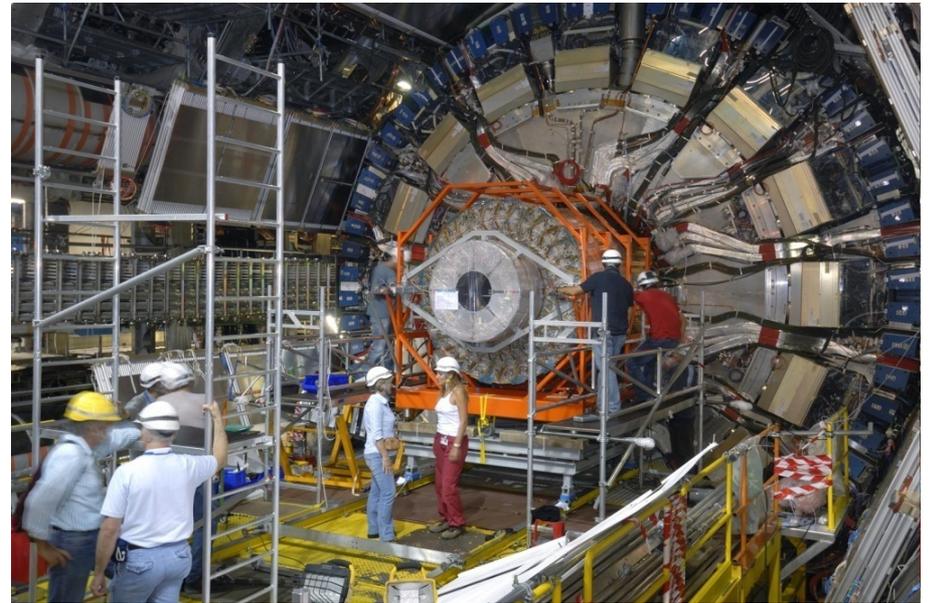
Diamètre : ~ 25 m

Poids : ~ 7000 tonnes

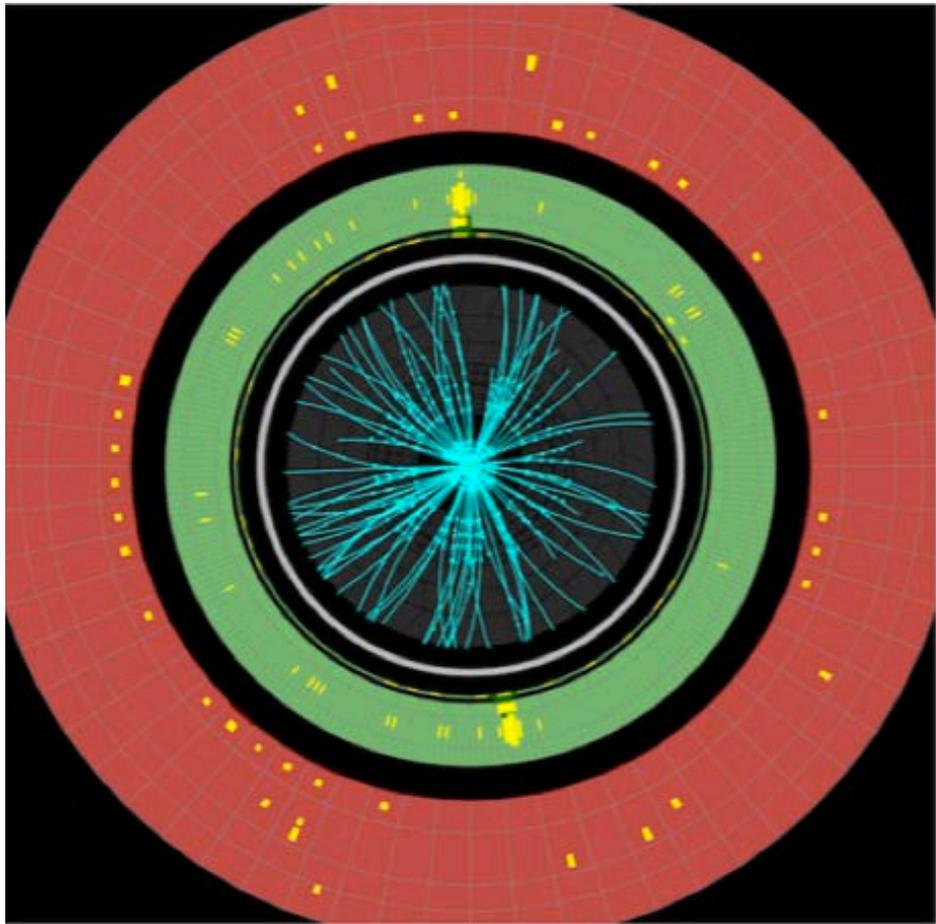
# Le détecteur interne



ATLAS Experiment © 2012 CERN



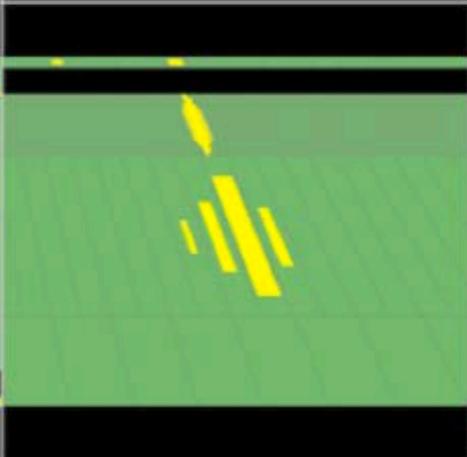
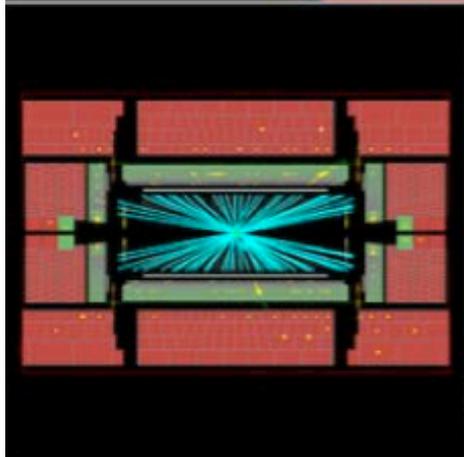
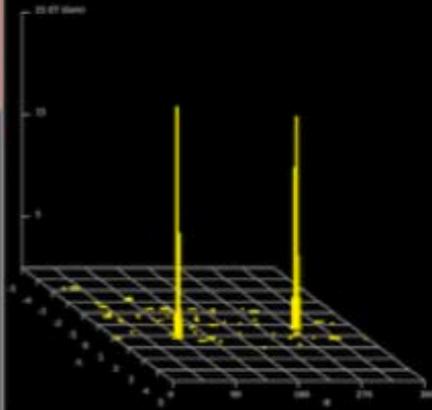
ATLAS Experiment © 2012 CERN



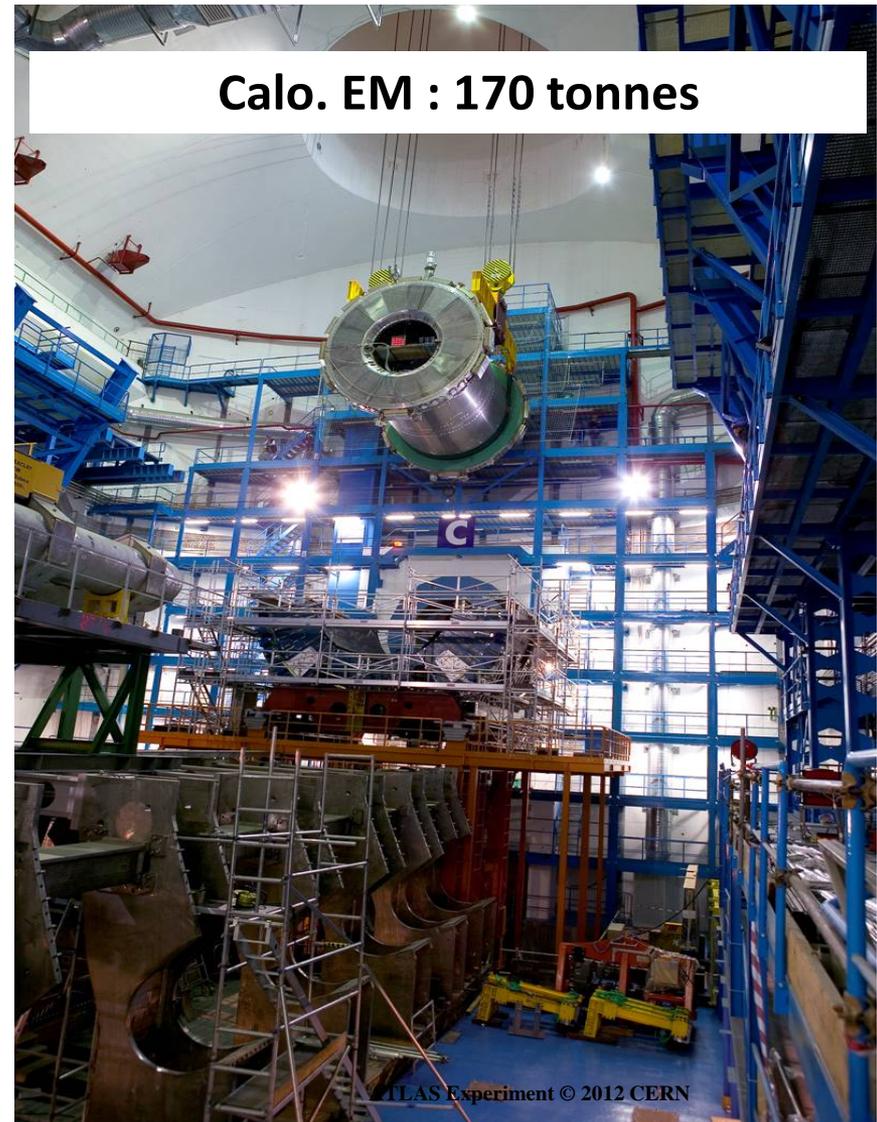
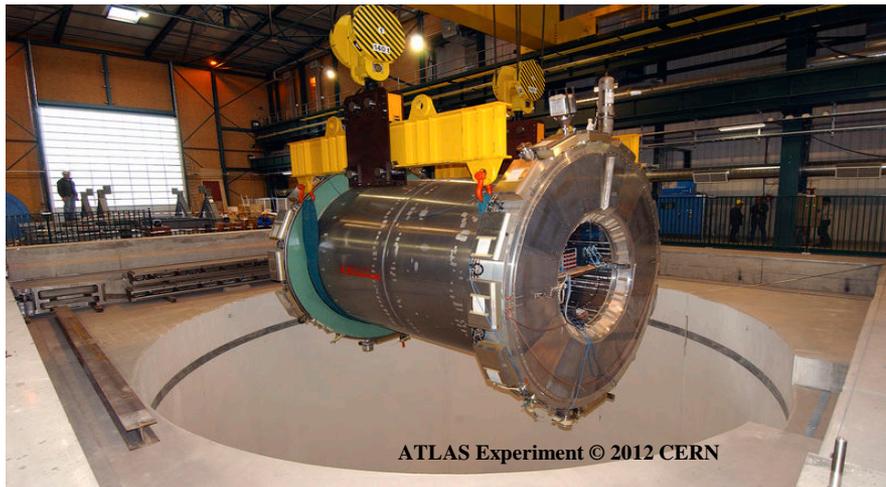
# ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 203779, Event Number: 56662314

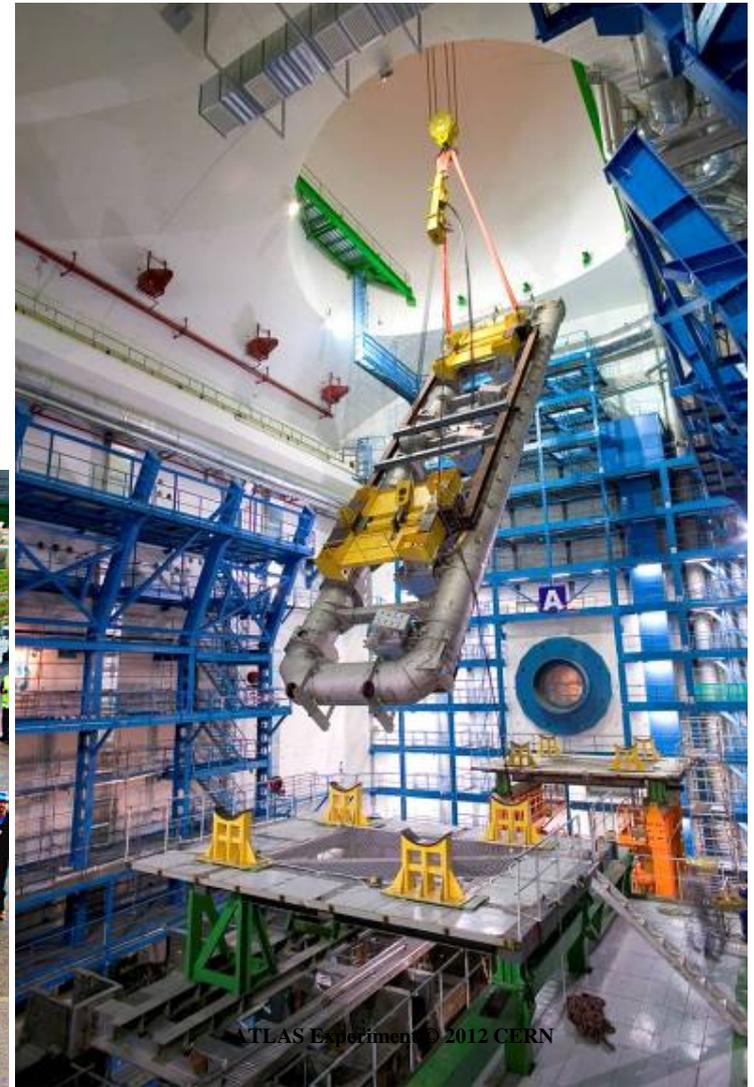
Date: 2012-05-23 22:19:29 CEST



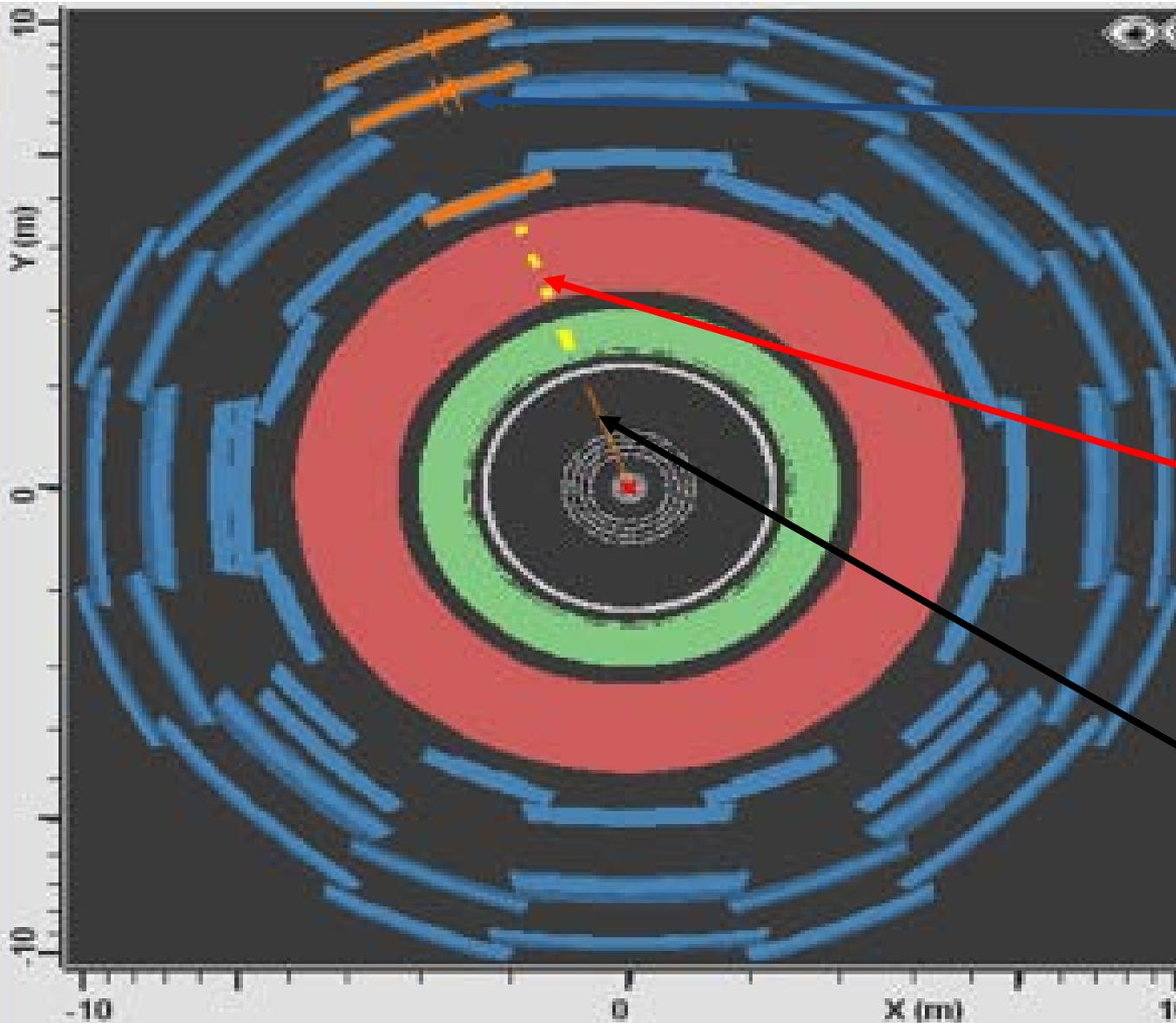
# Installation des calorimètres



# Descente d'une bobine des chambres à muons



# Un muon dans ATLAS

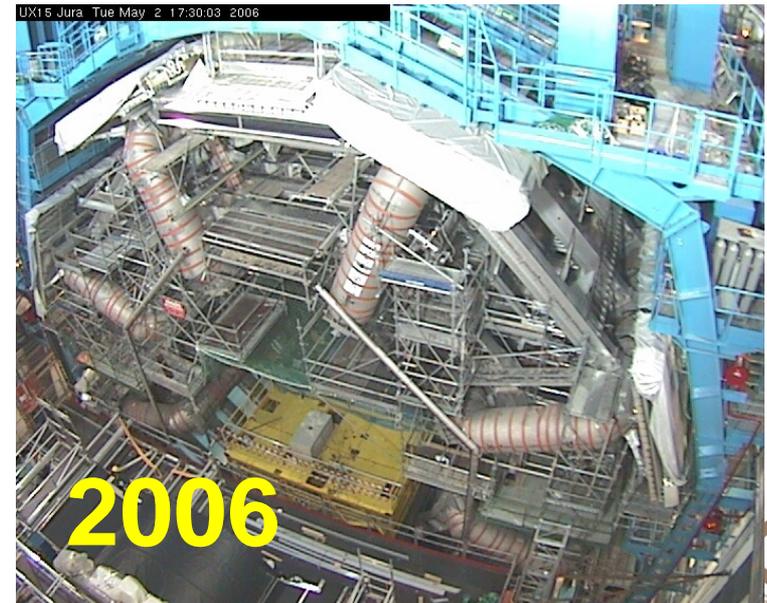
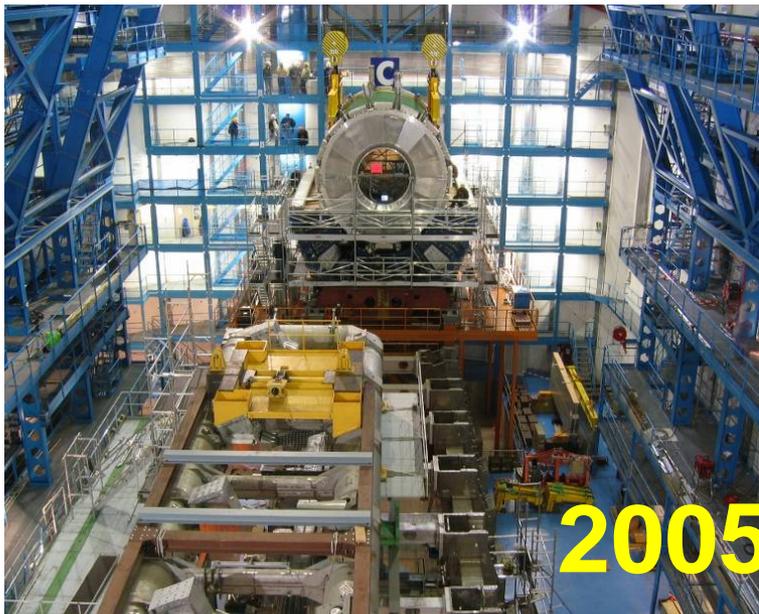


Chambres à muons touchées

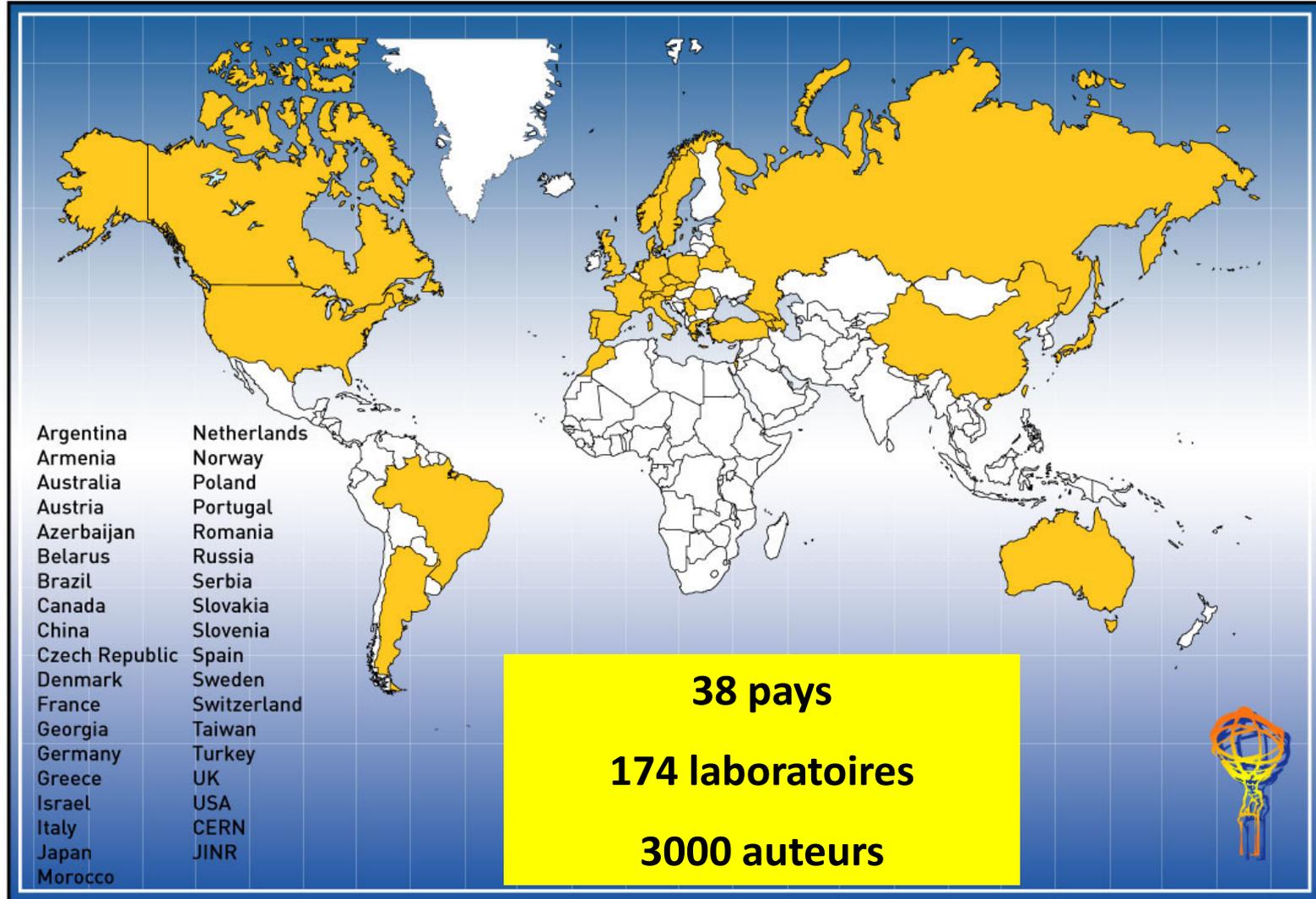
Faibles dépôts d'énergie dans les calorimètres électromagnétique et hadronique

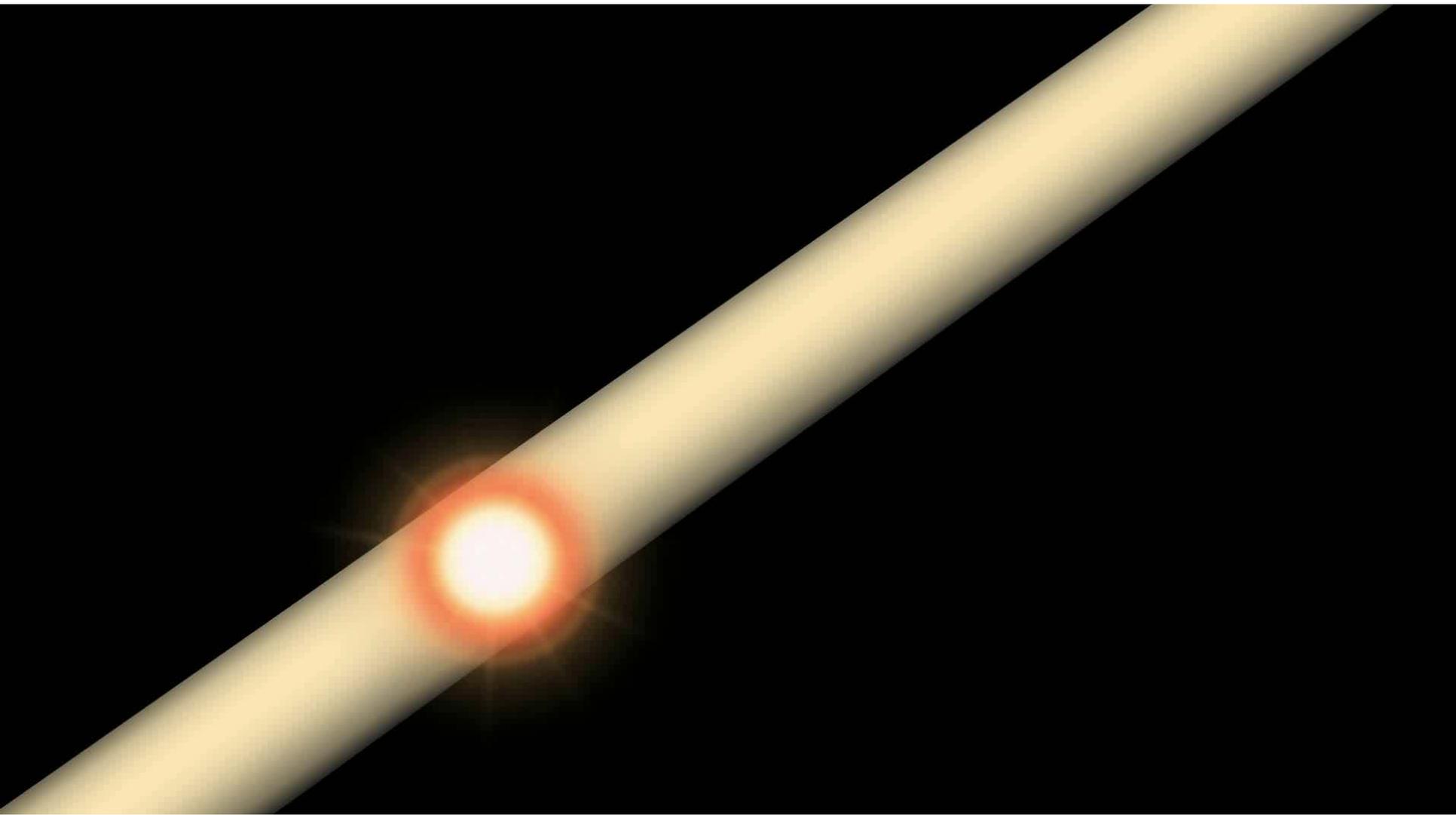
Trace visible dans le détecteur de traces

# Un exploit de génie civil



# La collaboration ATLAS





<http://www.atlas.ch/multimedia/2-electron-2-muon-event.html>

S. Trincaz-Duvoid

LPNHE  
PARIS

UPMC  
SORBONNE UNIVERSITÉS

# Et ici à l'UPMC ?

Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies  
représentant environ **150 personnes**

- ✓ enseignants chercheurs, chercheurs CNRS
- ✓ personnels d'appui à la recherche
- ✓ doctorants, post doctorants, émérites, bénévoles
- ✓ et chaque année des visiteurs et stagiaires



Physique des **Particules**,  
**Astroparticules**  
et **Cosmologie**  
(environ ~15 projets)



# ATLAS au LPNHE

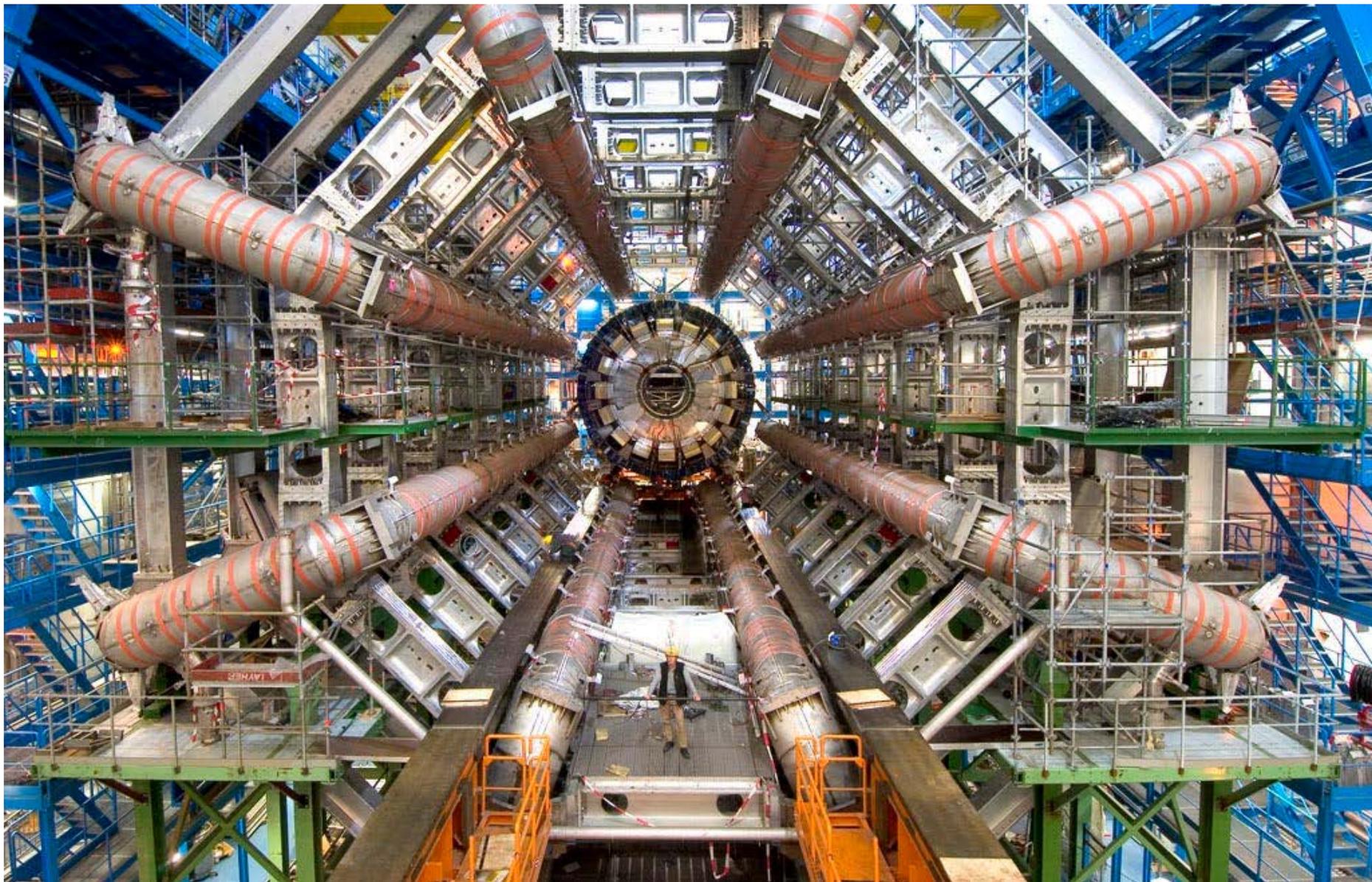
Le groupe **ATLAS** du **LPNHE** compte ~25 personnes  
{ chercheurs CNRS, enseignants chercheurs,  
doctorants, post-doc

**Thèmes de recherche** : Higgs, Top, compréhension du détecteur,  
mesures de précisions sur le modèle standard

Alternance entre **Travail au laboratoire** et **Missions au CERN**



**Merci de votre attention**

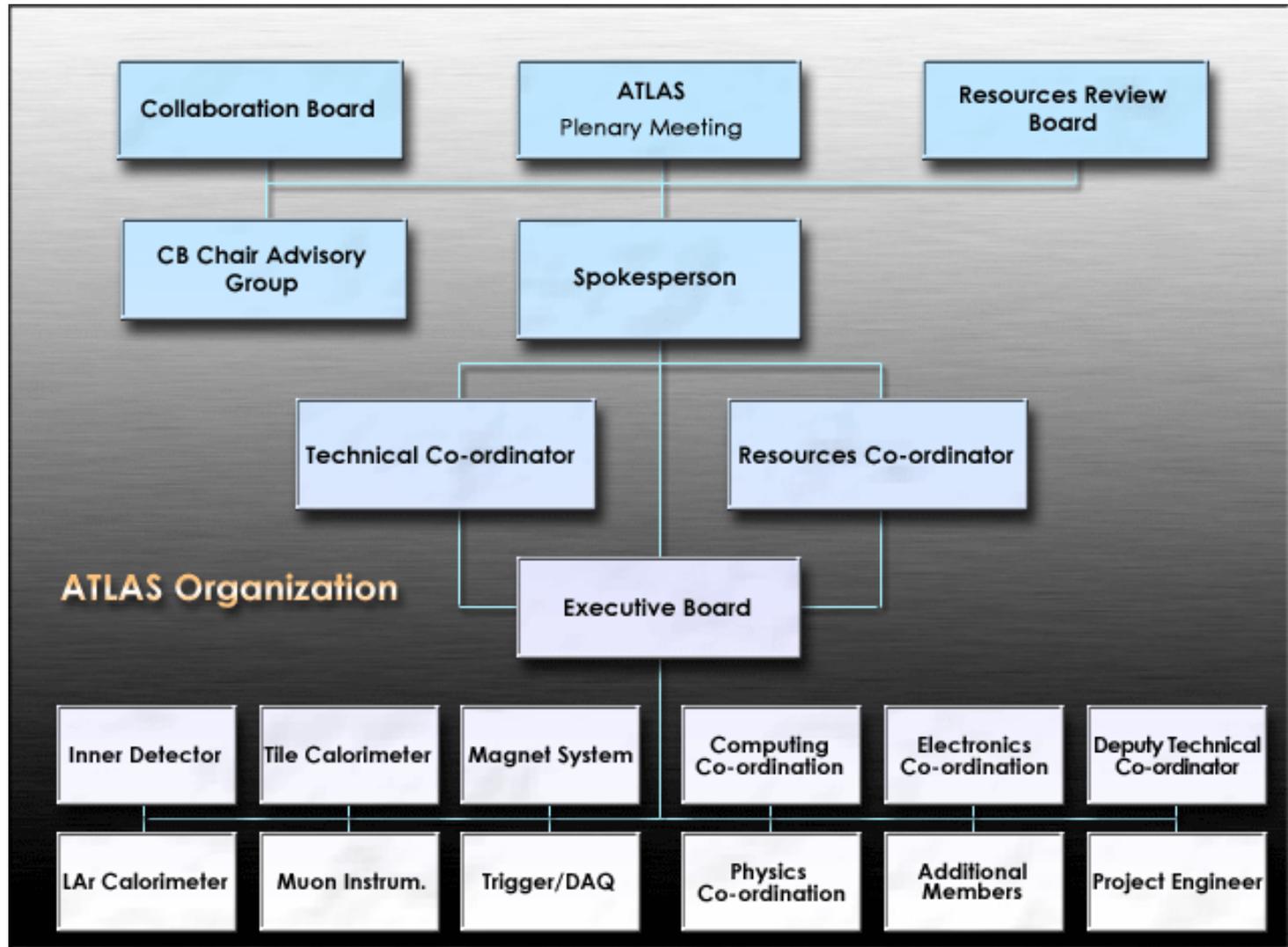


S. Trincaz-Duvoid

LPNHE  
PARIS

UPMC  
SORBONNE UNIVERSITÉS

# L'organisation de la collaboration ATLAS



# La salle de contrôle d'ATLAS



# La salle de contrôle d'ATLAS





# Combien coûte le LHC ?

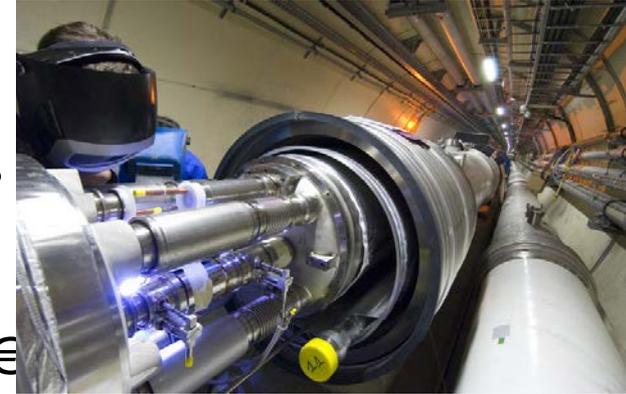
La monnaie utilisée est le franc suisse ! 1 Milliard CHF = 0,65 Milliard €

La France contribue pour ~15% au budget du Cern

La France contribue pour ~12% au budget d'Atlas

Le LHC (matériel, halls, etc...) a coûté ~ 2,5 Milliards  
(Le prix du gros oeuvre a été réduit car le tunnel réutilise celui du LEP)

Le personnel ayant travaillé au Cern ~0,65 Milliards €



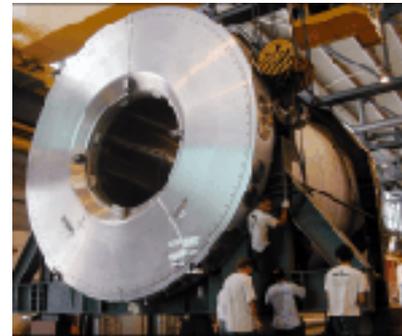
**CMS**



**LHCb**



**ATLAS**



**ALICE**



Le calcul  
~100 M€

Les détecteurs :  
Atlas ~350 M€  
CMS ~350 M€  
Alice ~75 M€  
LHCb ~50 M€

Merci à Frédéric Derue pour le transparent

S. Trincav-Duyoid

# La composition de la matière : une vision en évolution

Grecs : 4 éléments

Chine : 5 éléments

Inde : éther, air, feu, eau, terre

Alchimistes médiévaux ajoutent :  
mercure, soufre, sel

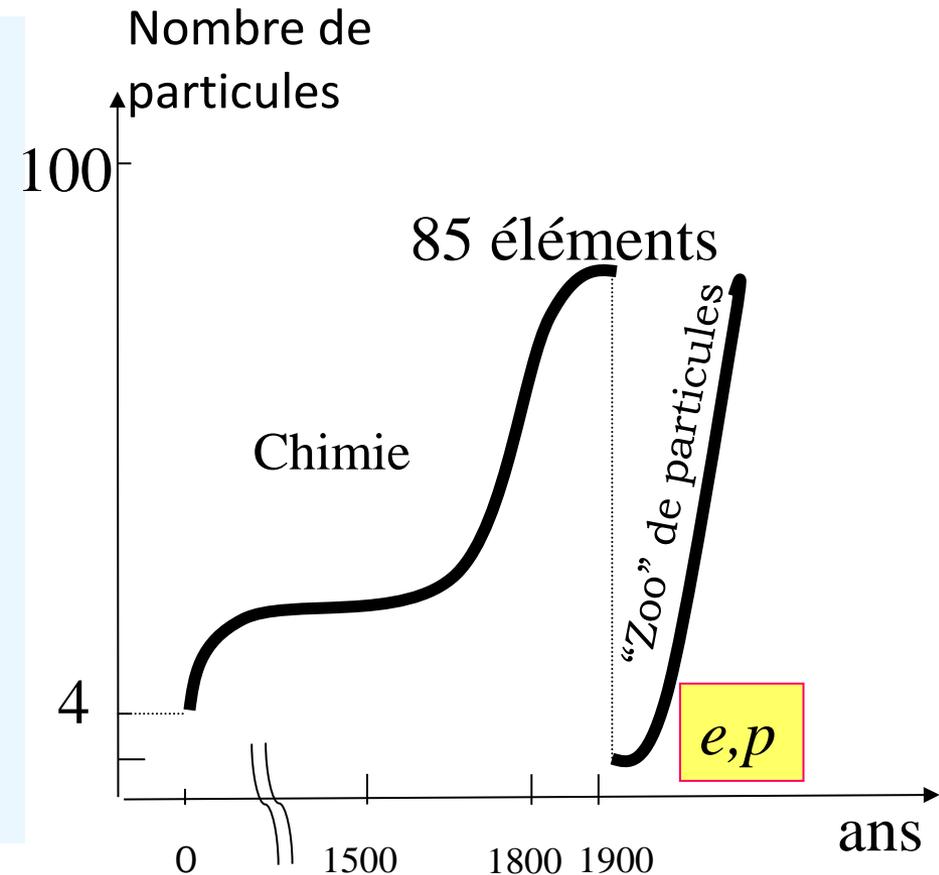
1661 Boyle définit la chimie

1789 33 éléments

1868 Mendeleïev classifie les éléments

1914 85 éléments sont connus

Le modèle de l'atome est à l'étude

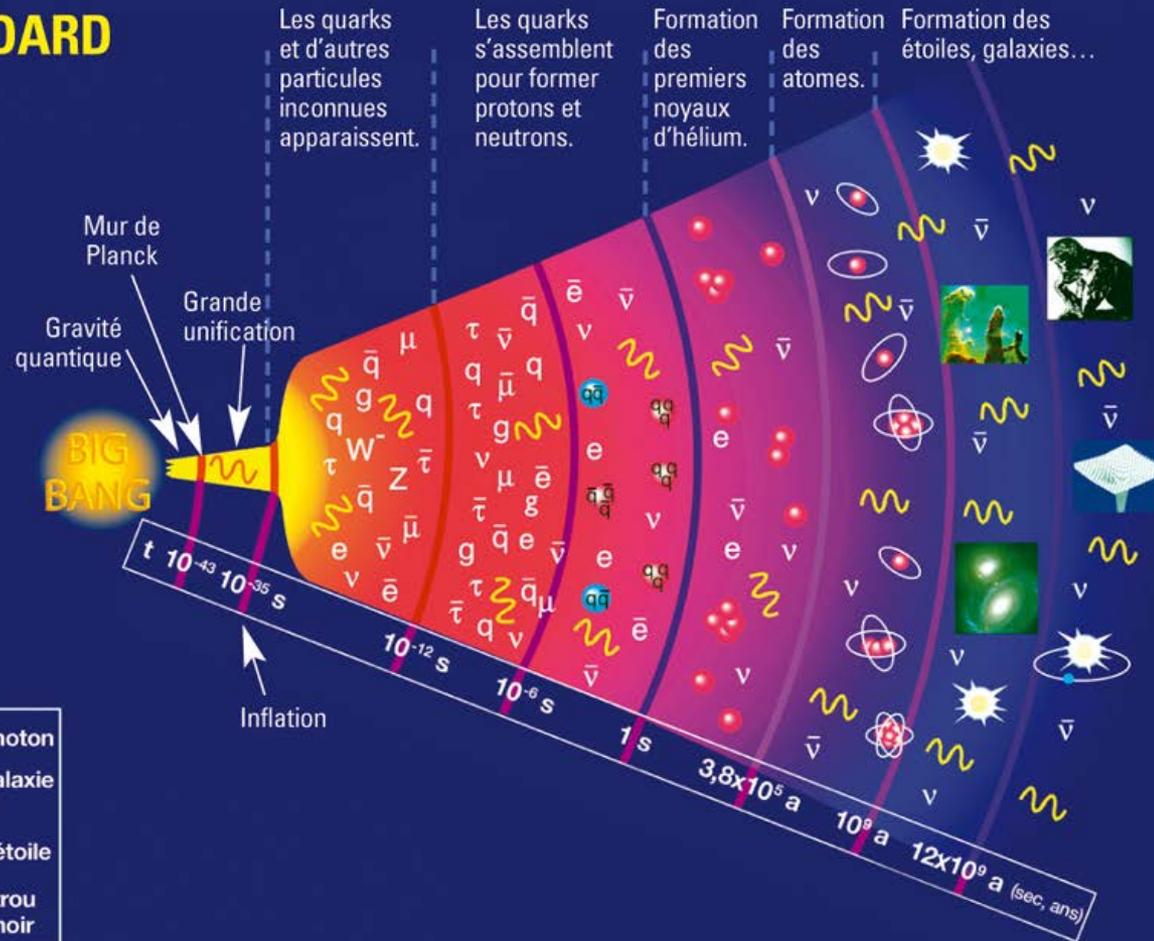


# Des particules à l'Univers : Big Bang et particules

## L'UNIVERS SELON LE MODÈLE STANDARD

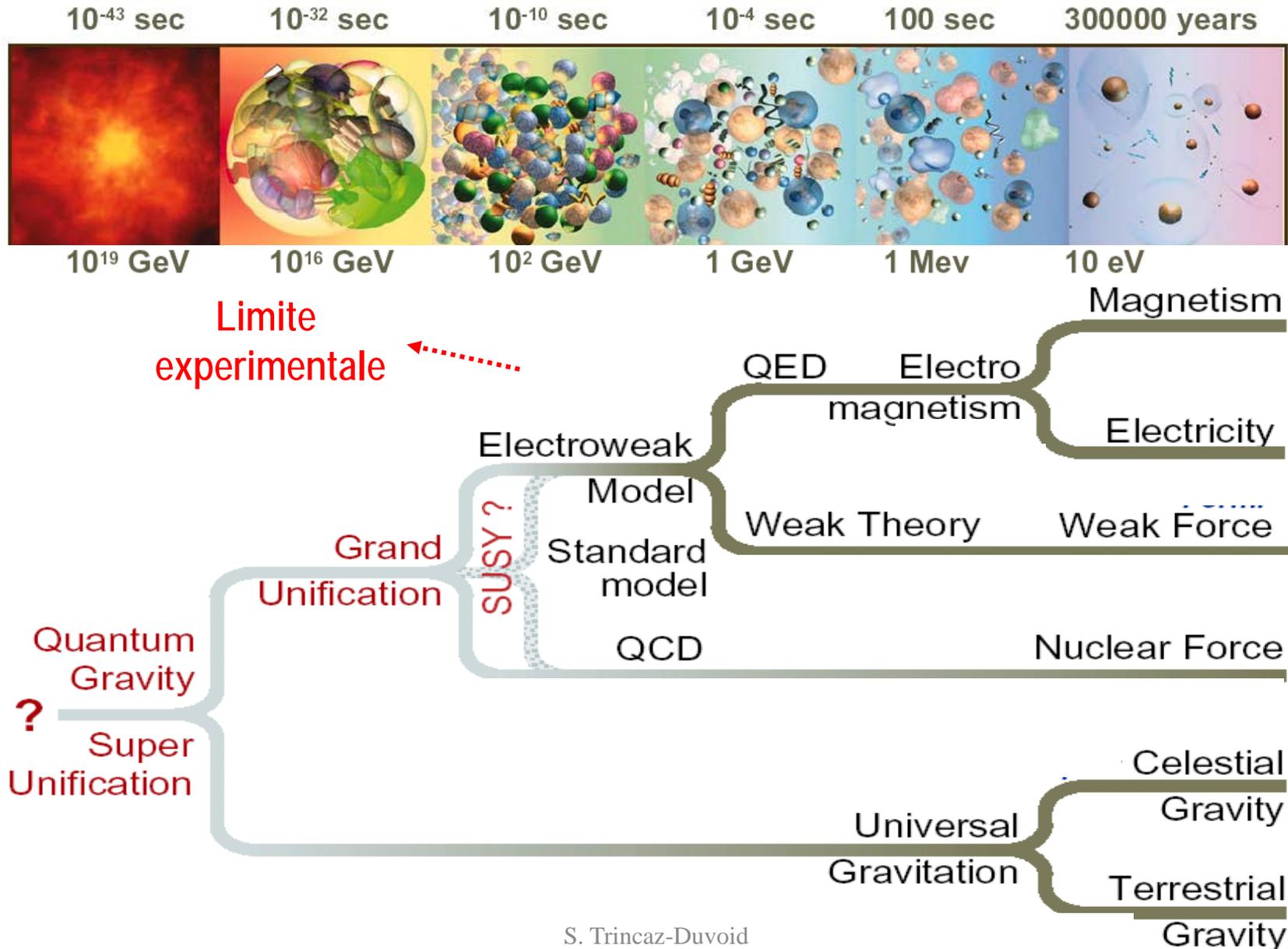
Depuis le Big Bang, l'Univers primordial a franchi de nombreuses étapes durant lesquelles les particules puis les atomes et la lumière ont peu à peu émergé avant qu'étoiles et galaxies ne prennent corps. C'est cette histoire que raconte la théorie du « modèle standard » en vigueur aujourd'hui.

L'Univers devient transparent.



Légendes		
W, Z bosons		photon
q quark		galaxie
g gluon		étoile
e électron		trou noir
$\mu$ muon		
$\tau$ tau		
$\nu$ neutrino		

# Unification des forces

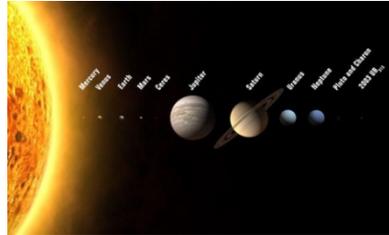


# A quelles distances ?

La tour Eiffel : 300 mètres



Rayon de la terre : 6400 kilomètres



Distance Terre-Soleil : 150 millions de km

**En 1 an, la lumière parcourt 9 460 730 472 580,8 km**

**(8 minutes pour aller du soleil à la terre)**

L'étoile la plus proche : 4,4 années-lumière

(10000 milliards de kilometres)

Le centre de notre Galaxie : 30 000 années-lumière

Le diamètre de notre Galaxie : 100 000 années-lumière

La galaxie la plus proche : 2,5 million années-lumière

# Qu'est ce que les chercheurs observent?

Les galaxies et objets célestes → pour comprendre comment ont pu se former ces structures

Des rayons ou des particules qui arrivent du ciel (astroparticules) → pour comprendre de quoi l'univers est fait et comment il pouvait être à l'origine

La lumière des supernova → pour comprendre comment l'univers évolue et le dater

Toutes les observations conduisent à un modèle appelé le **big bang** pour expliquer l'origine et l'évolution de l'Univers