

La Lumière des Particules Elémentaires



2015
ANNÉE DE LA LUMIÈRE
EN
FRANCE

Cristinel Diaconu
Directeur de Recherches au CNRS

20/01/15

CENTRE DE PHYSIQUE DES
PARTICULES DE MARSEILLE

CPPPM

Aix*Marseille
université



IN2P3
Les deux infinis

Les deux infinis

- Que l'homme contemple donc la nature entière dans sa haute et pleine majesté, qu'il éloigne sa vue des objets bas qui l'entourent.
- Qu'il regarde cette **éclatante lumière**, mise comme une lampe éternelle pour éclairer l'univers, que la terre lui paraisse comme un point au prix du vaste tour que cet astre décrit et qu'il s'étonne de ce que ce vaste tour lui-même n'est qu'une pointe très délicate à l'égard de celui que les astres qui roulent dans le firmament embrassent.

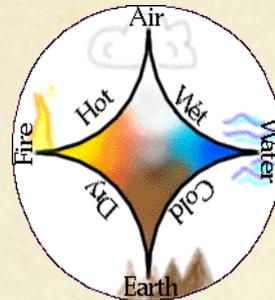
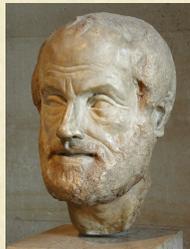
Les lumières des particules

- De quoi est faite la matière?
- Est-ce que la multitude des objets et matériaux nous entourant peut être expliquée par une poignée de particules élémentaires?
- Est-on poussière d'étoiles?

Pré-histoire

- Modèles

- Aristote, Héraclite et al.: 4+1 éléments

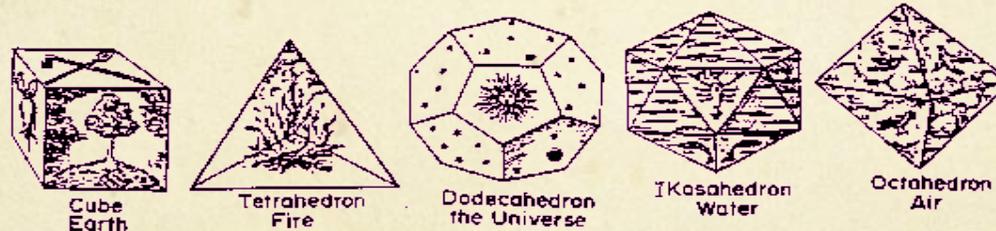


+



The 5th element

- Plato : model geometric



- Leucip, Démocrite: “Particules élémentaires” atome+espace

XVIII-XIX Eléments?...

- Lavoisier, Davy, etc découvrent les « éléments »
 - Par exemple O₂
- Eléments composés d'atomes
- Mendeleev, 1850:
 - table ~ 50 éléments
 - Les propriétés chimiques se répètent
 - Sous-structure? Pouvoir de prédiction.

Property	Ekasilicon	Germanium
atomic mass	72	72.59
density (g/cm ³)	5.5	5.35
melting point (°C)	high	947
color	gray	gray
oxide type	refractory dioxide	refractory dioxide
oxide density (g/cm ³)	4.7	4.7
oxide activity	feebly basic	feebly basic
chloride boils	under 100°C	86°C (GeCl ₄)

Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Von D. Mendelejeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in verticale Reihen so, dass die Horizontalreihen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmendem Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich einige allgemeinere Folgerungen ableiten lassen.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
		Ni = 59	Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

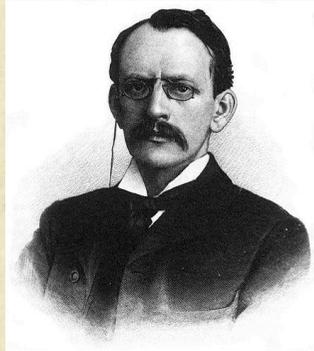
- Die nach der Größe des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine stufenweise Abänderung in den Eigenschaften.
- Chemisch-analoge Elemente haben entweder übereinstimmende Atomgewichte (Pt, Ir, Os), oder letztere nehmen gleichviel zu (K, Rb, Cs).
- Das Anordnen nach den Atomgewichten entspricht der *Werthigkeit* der Elemente und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit im chemischen Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.
- Die in der Natur verbreitetsten Elemente haben *kleine* Atomgewichte

Les « éléments »

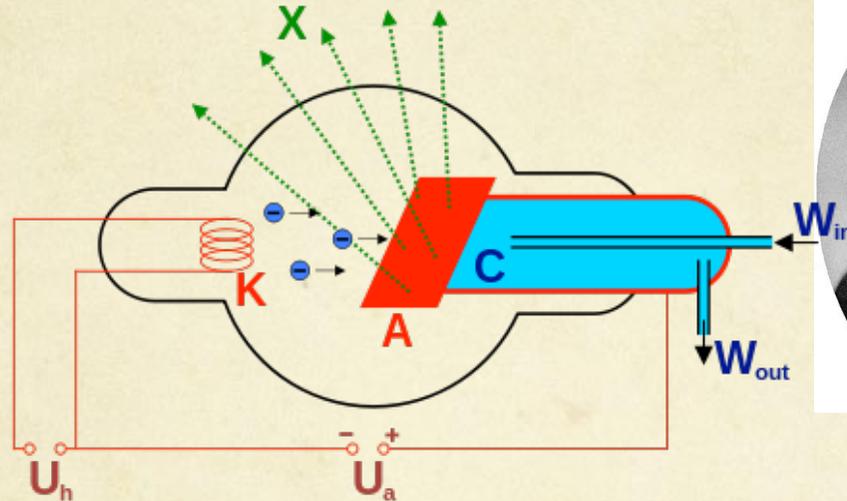
TABLEAU DE MENDELEIEV

	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	H 1																		He 2
2	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	
3	Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36	
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	
6	Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	
7	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Uum 110	Uuu 111	Uub 112		Uuq 114		Uuh 116		Uuo 118	
			Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71			
			Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103			

Fin du XIX^{ème} siècle: les éléments sont composés

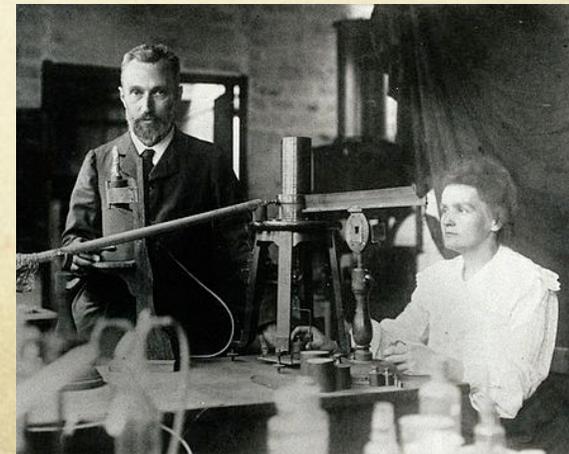
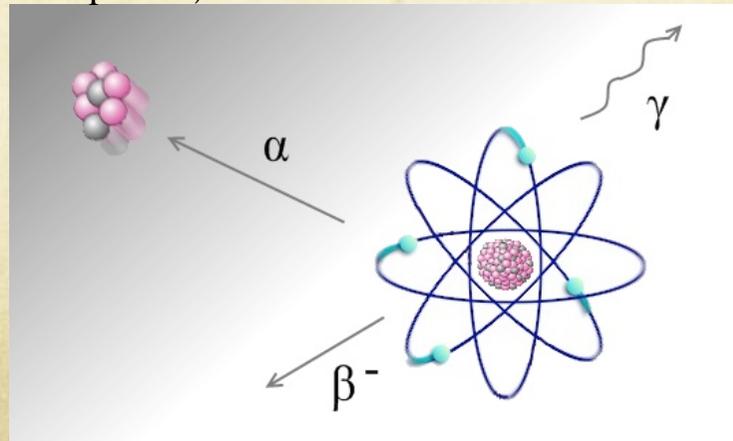
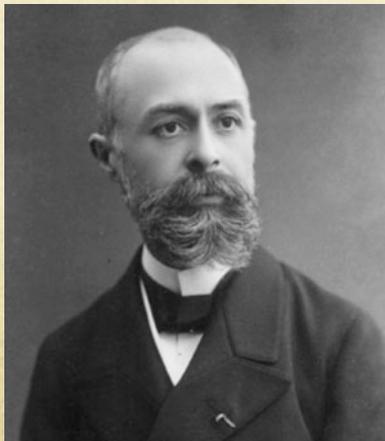


JJ Thomson
Electron, 1896

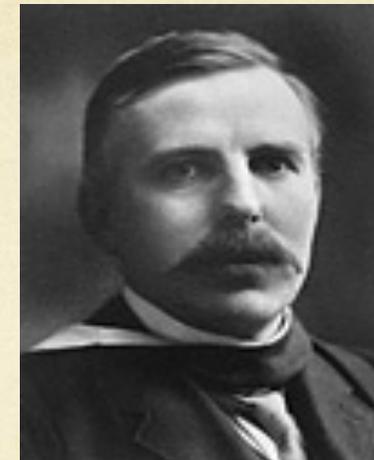
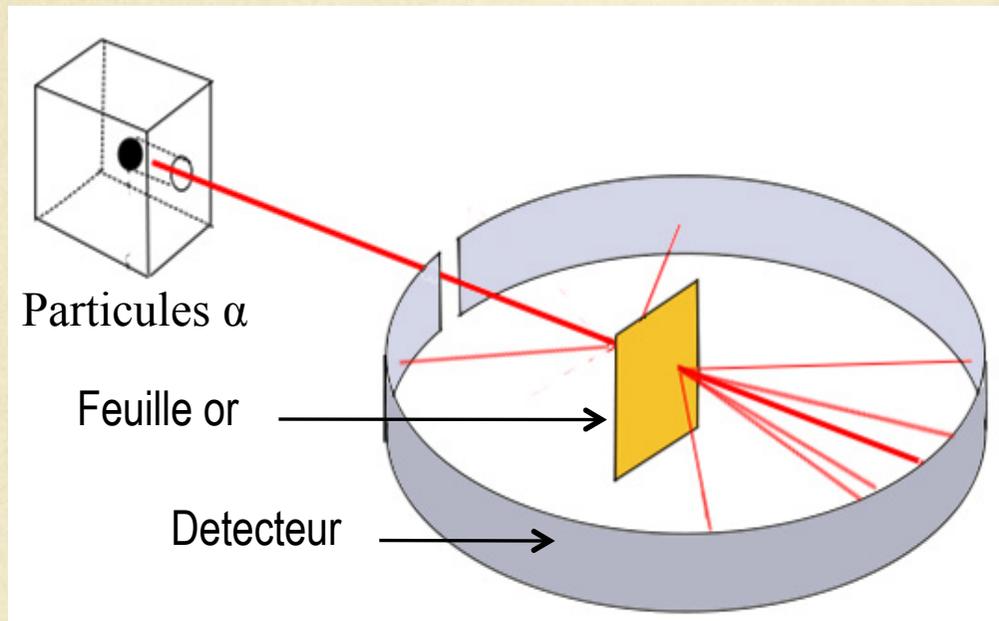


W Roentgen
1895 Rayons X

H. Bequerel, P&M Curie **Radioactivité 1896**



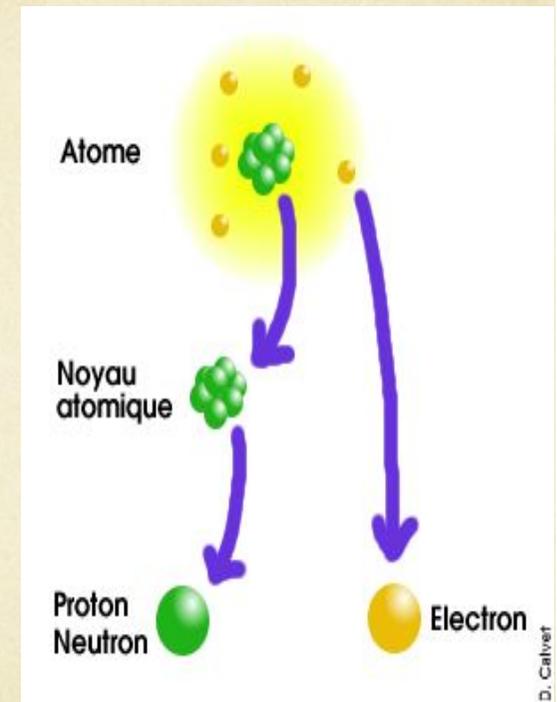
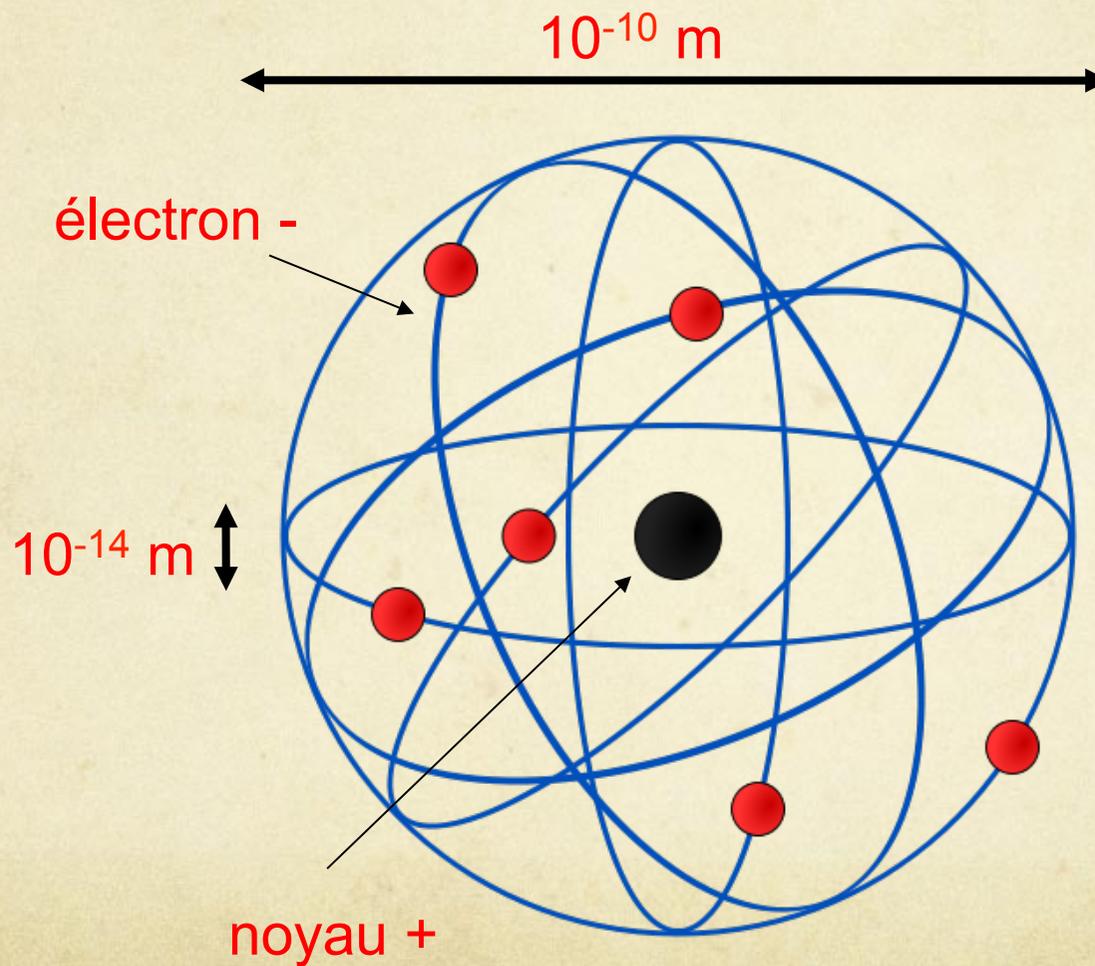
Regarder dans la matière avec des particules



Rutherford, Geiger, Madsen: 1909 découverte du noyau

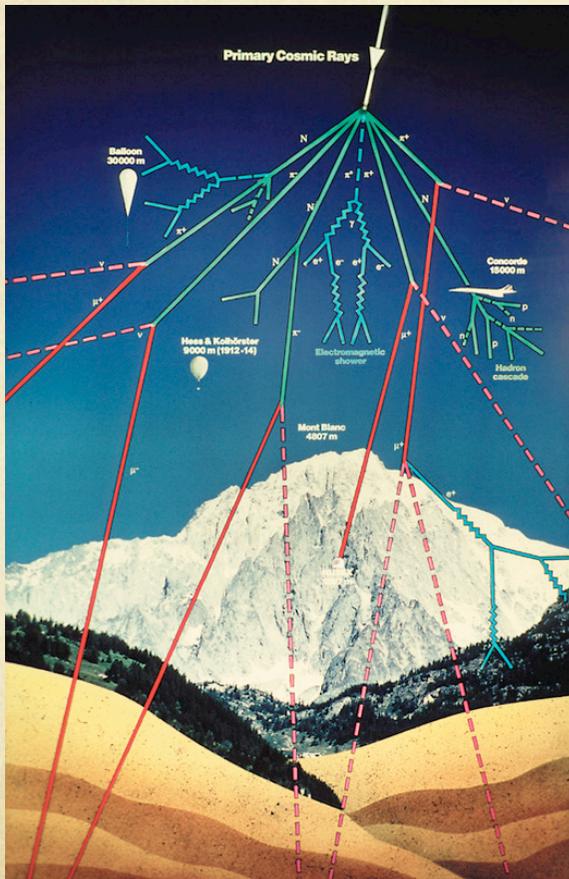
"...as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you."

Modèle atomique: version 1930

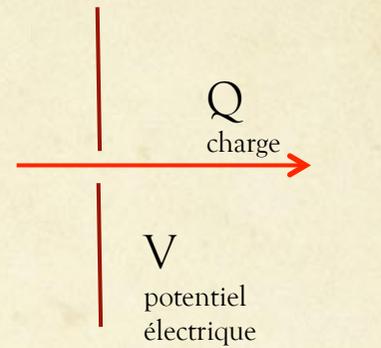


Les laboratoires des particules

○ Rayons cosmiques

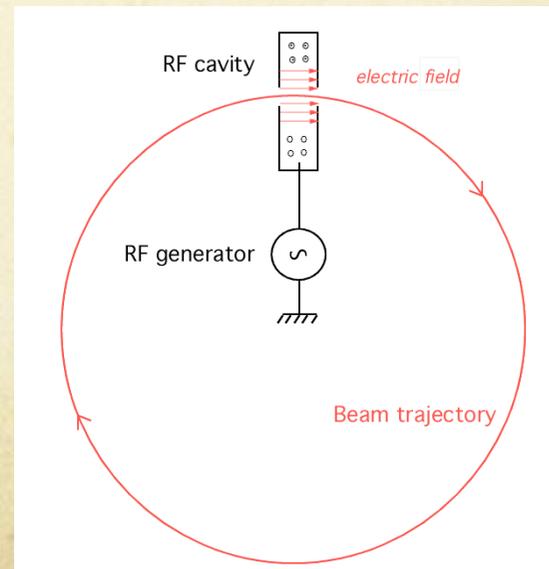


○ Accélérateurs de particules



$$\text{Energie} = q \times V$$

Exemple:
1 eV



La trajectoire
peut être courbée
à l'aide d'aimants

10

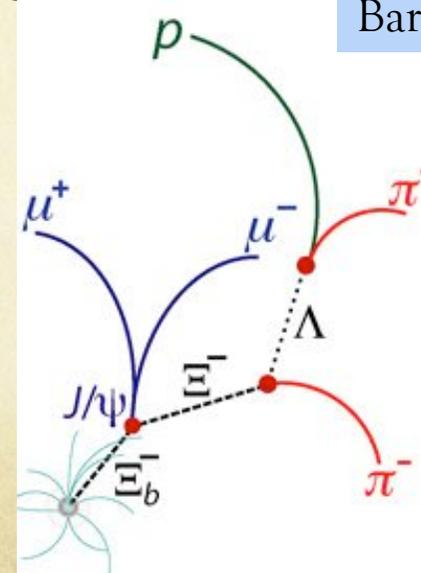
20/01/15

Une multitude de nouvelles particules

- Dans les années 1920-1970: des découvertes en « cascade »
 - Production et désintégration de « particules », autour de ~ 150 répertoriées
 - Identifiées et étudiées à travers leur interactions avec la matière
 - Amélioration continue des techniques de détection
 - Étude de leur propriétés indiquent des « symétries »
 - Similarité, groupes, interactions

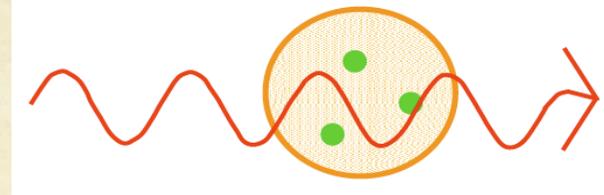


« Muon »
Un électron « lourd »
a été découvert en 1936



Baryon Ξ_b 2007

Dualité onde-particule



- La lumière

- Un ensemble de particules? **Newton**

- Une onde (électromagnétique) **Huygens, Maxwell**

- Portions d'énergie: quantification **Planck**

- Comportement corpusculaire, photons **Einstein**

$$E = h\nu$$

- Les particules

- Matière, localisable? Mécanique quantique **Bohr, Heisenberg**

- Onde aussi **de Broglie**

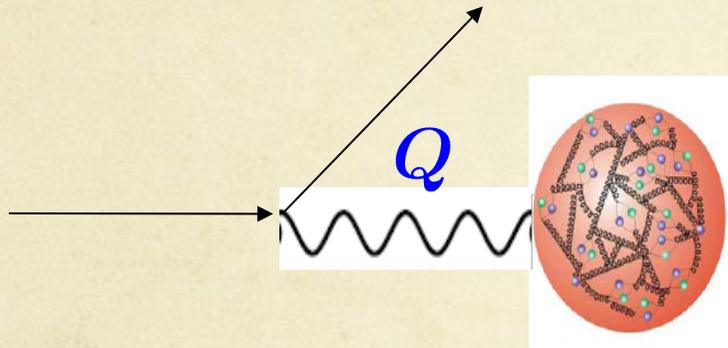
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$h \approx 6,62606957 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

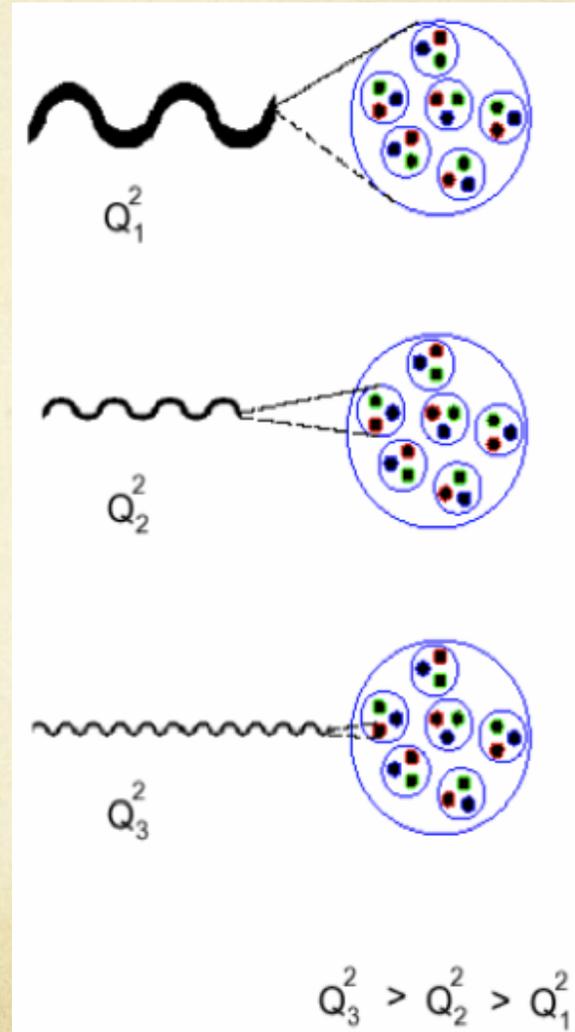
13

20/01/15

Particules en interaction aux profondeurs de la matière



$$\delta \text{ [fm]} \simeq \frac{200 \text{ MeV}}{Q}$$



Nucleus
(~1910)

Nucleon (p,n)
(~1950)

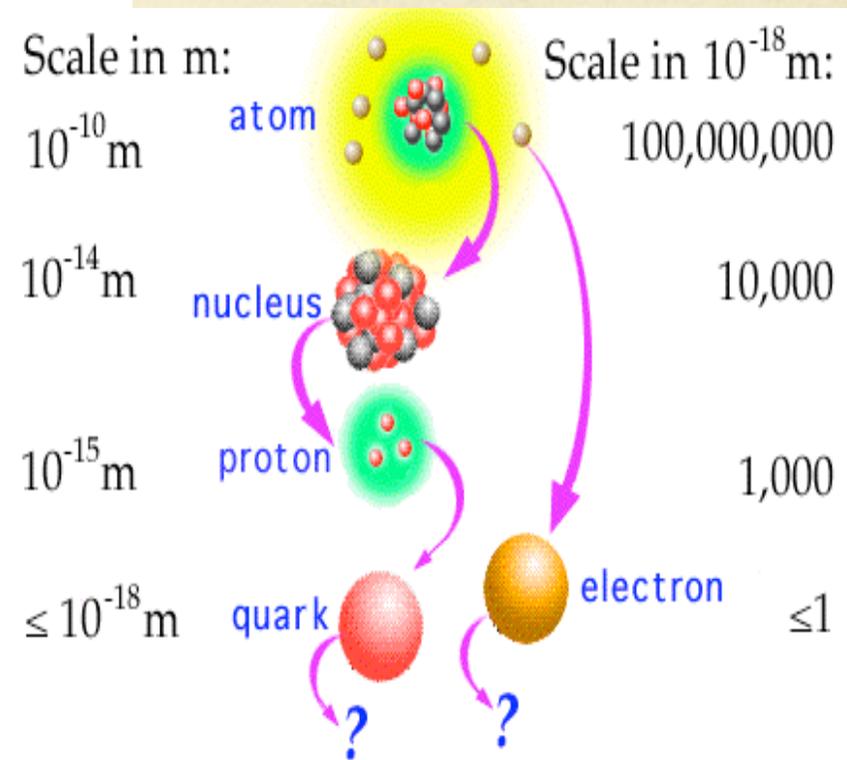
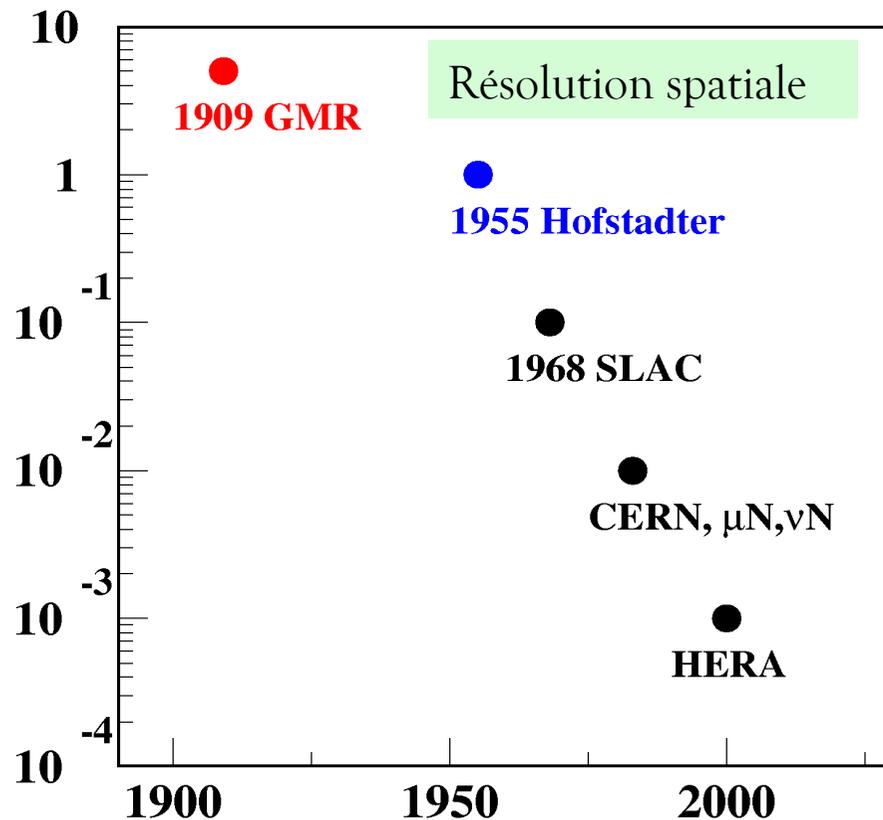
Quarks
(~1970)

14

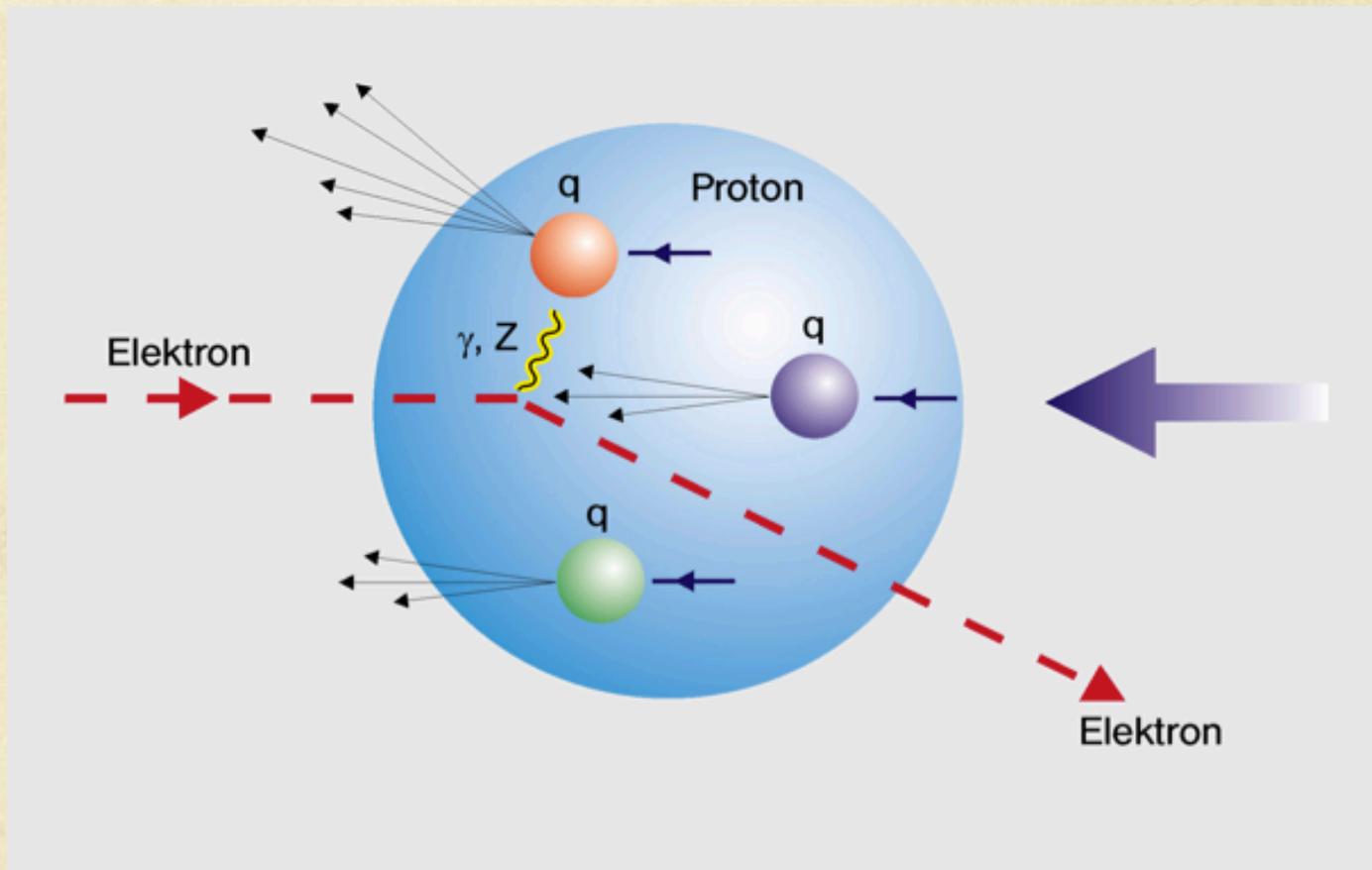
20/01/15

Plus d'énergie, plus de finesse

$$\delta \text{ [fm]} \simeq \frac{200 \text{ MeV}}{Q} \quad [1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}]$$

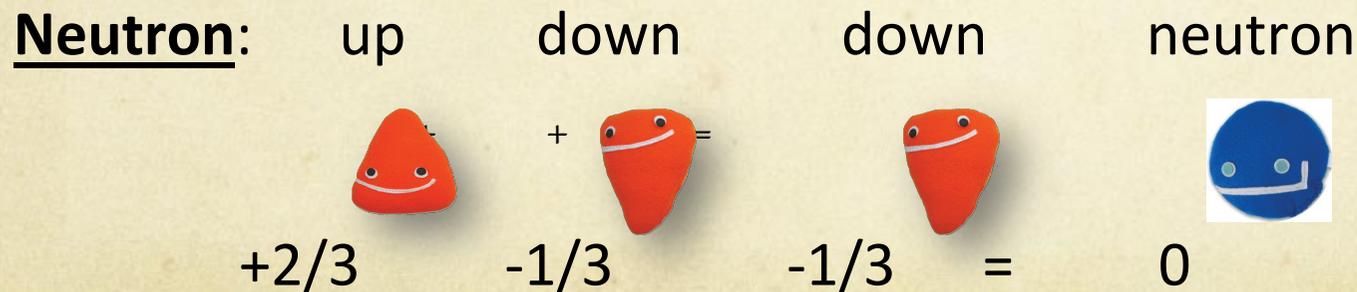
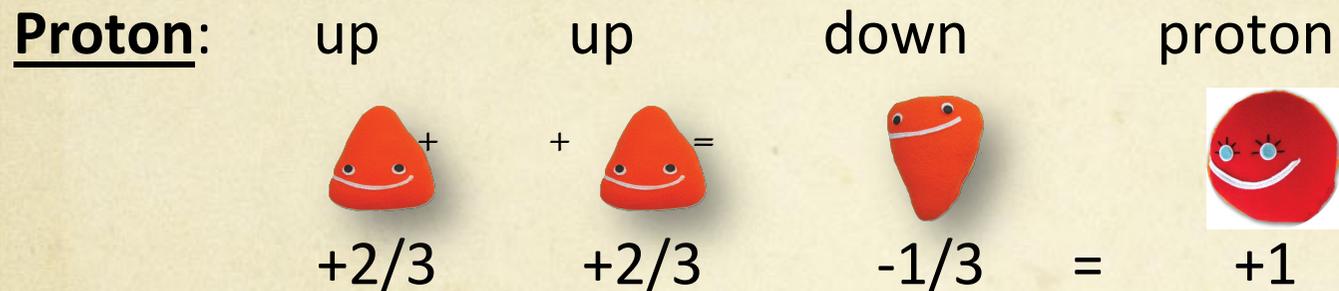


Comment voit-on les « quarks »

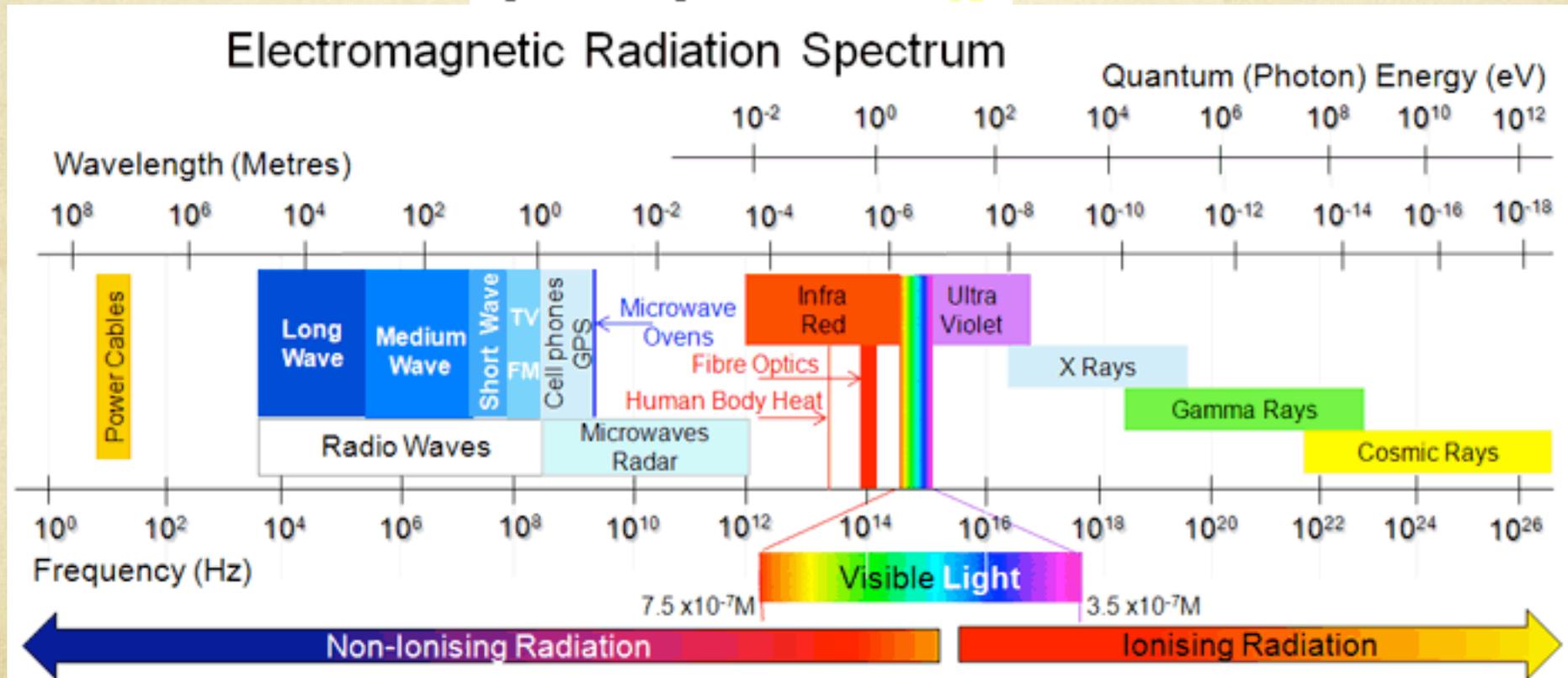
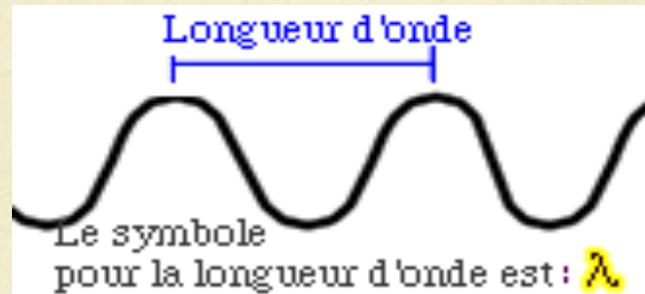


Comment les quarks font les protons et les neutrons

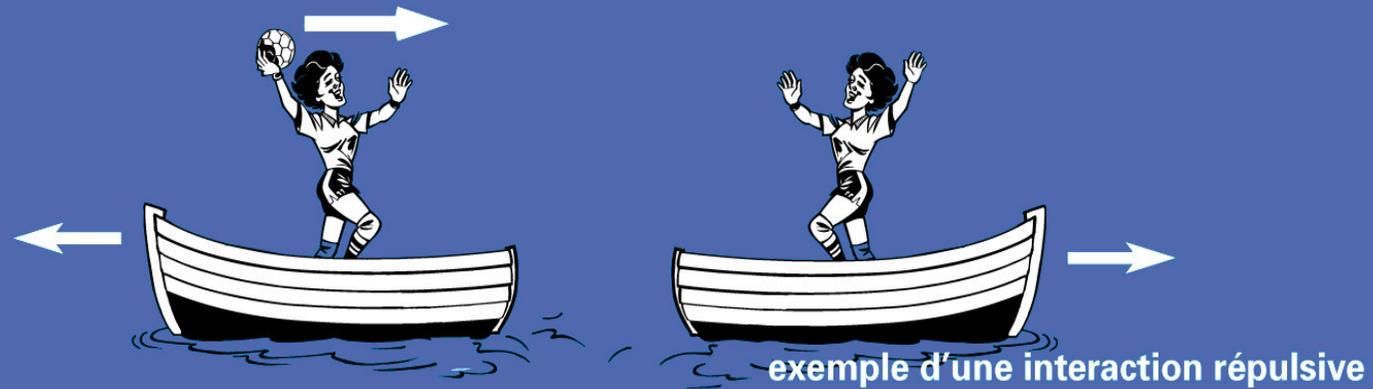
quark **up**:  (charge $+2/3$) et **down**:  (charge $-1/3$)



Les échelles des ondes

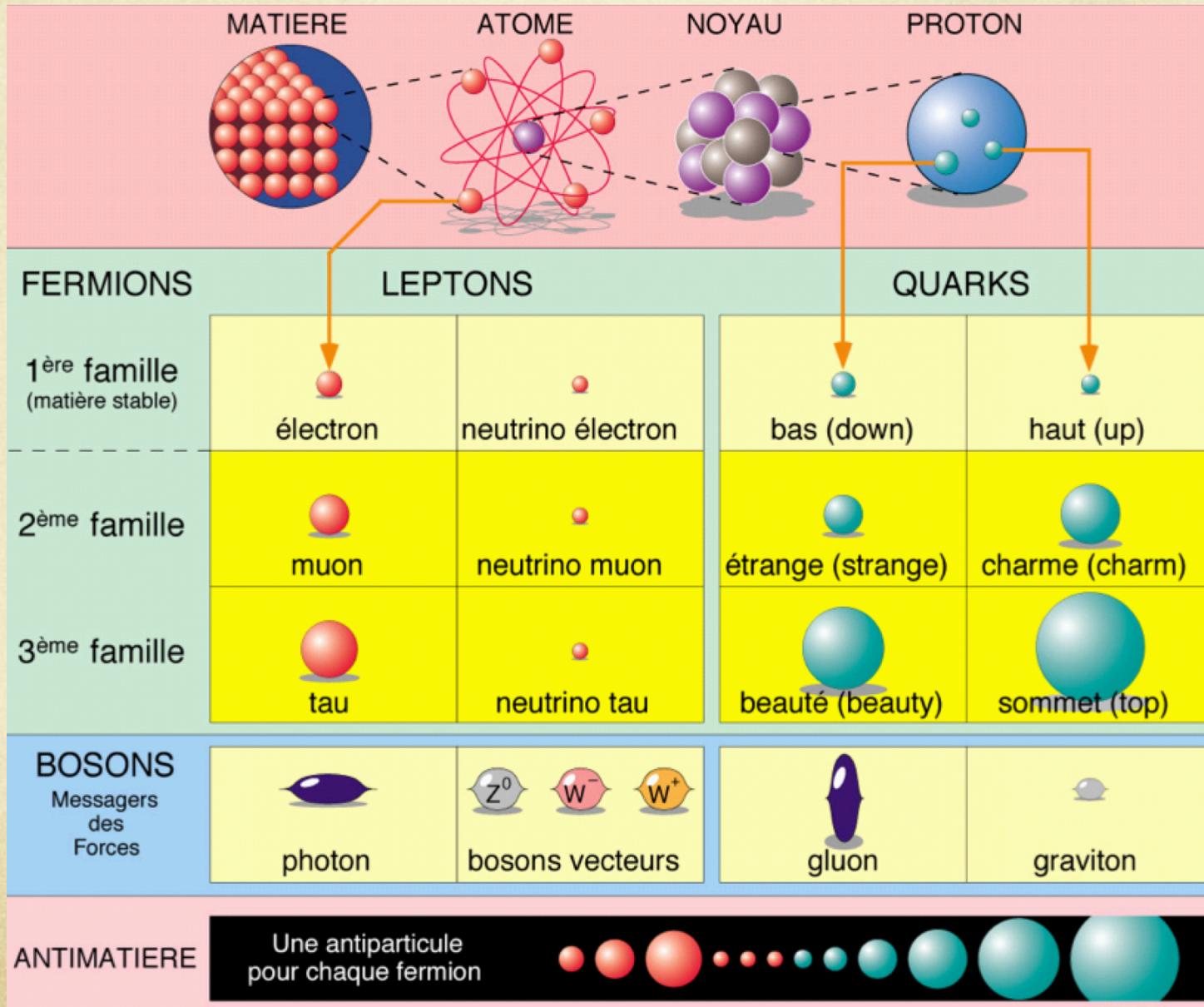


Interactions et forces



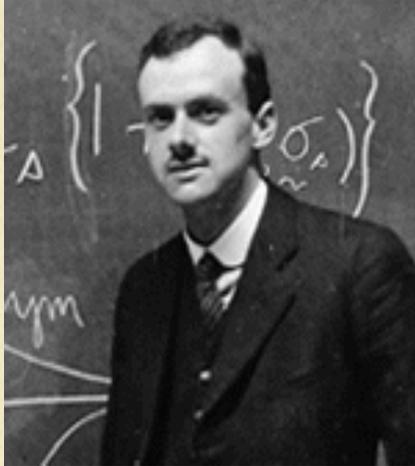
TYPE	FORCE RELATIVE	PARTICULES ÉCHANGÉES	EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION
FORTE	~ 1	gluons	noyau, nucléons
ÉLECTROMAGNÉTIQUE	$\sim 10^{-2}$	photons	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\sim 10^{-6}$	bosons Z^0, W^+, W^-	radioactivité β énergie solaire
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	graviton ?	pesanteur systèmes planétaires

Le Modèle Standard

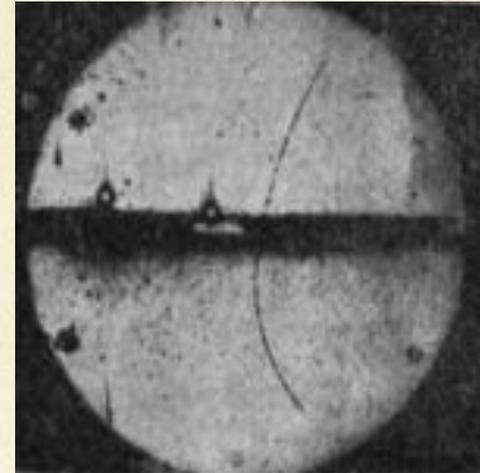
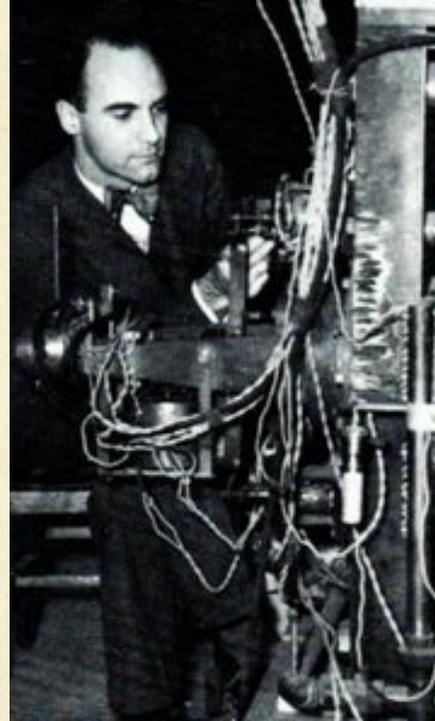


Anti-matière!

Dirac: équation 1928

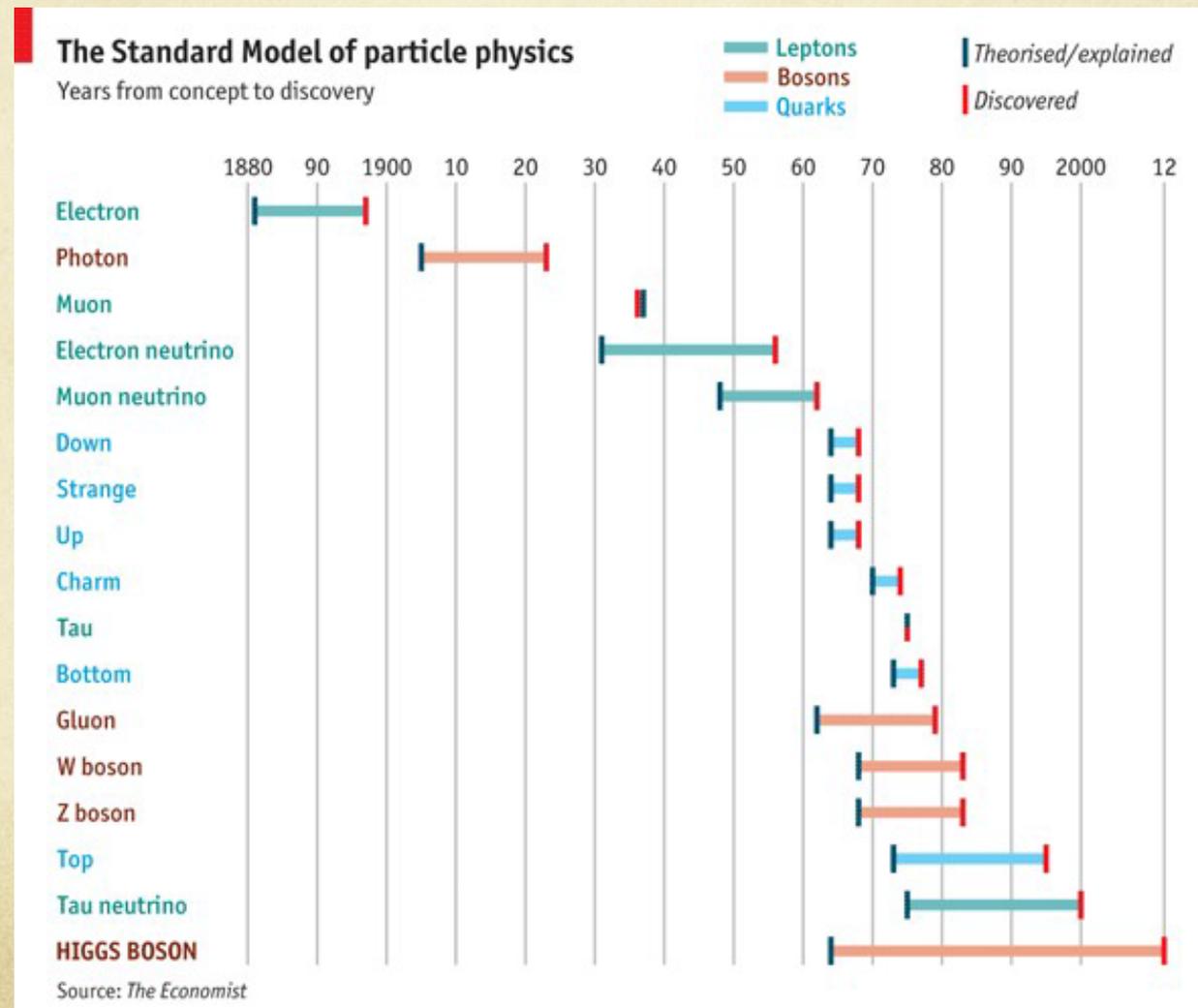


Découverte: Anderson 1932



La quête aux particules

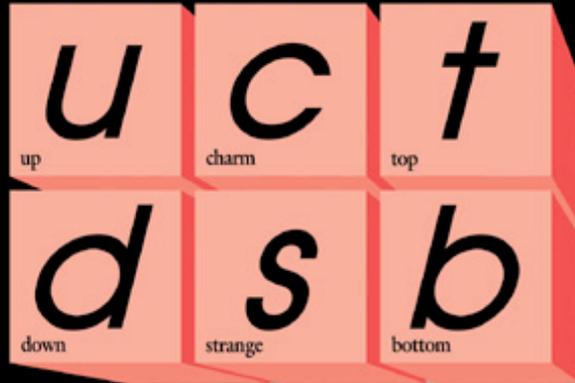
- Plus d'un siècle de particules



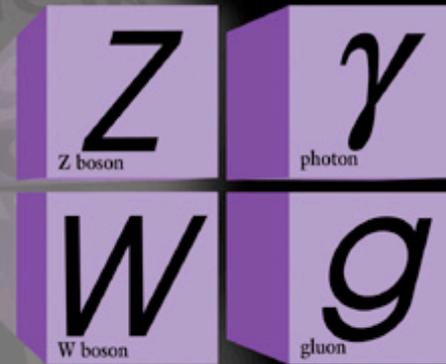
22

20/01/15

Quarks



Forces



Leptons

Le mécanisme de masse

- Les particules sont « casées », mais une grande question demeurait:
 - L'origine des masses?????
- Proposition
 - Le vide n'est pas « vide »: il existe une nouvelle particule: « boson de Higgs »
 - Cette particule (champ) remplit le vide et le rend « visqueux »
 - Le boson « colle » à toutes les particules visibles et les rend « lourdes »
 - Ni « matière », ni « lumière », ce boson s'accroche à toutes les particules, matière ou interactions, pour leur donner de la masse.
- Proposition théorique 1964-> Découverte 2012

CERN was founded 1954: 12 European States

“Science for Peace”

Today: 20 Member States



~ 2300 staff
~ 930 other paid personnel
> 10500 users
Budget (2011) ~1000 MCHF



5 applicants for MS:

Cyprus, Israel, Serbia, Slovenia, Turkey
and **Associate Membership**
discussions: Brazil, Ukraine, India, ...

20 Member States: Austria, Belgium, Bulgaria, the Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Italy, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom

1 Candidate for Accession: Romania

8 Observers to Council: India, Israel, Japan, the Russian Federation, the United States of America, Turkey, the European Commission and UNESCO

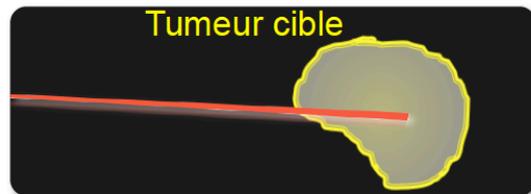


CERN Technologies - Innovation



Exemple: applications médicales

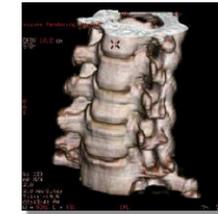
Accélération
de particules



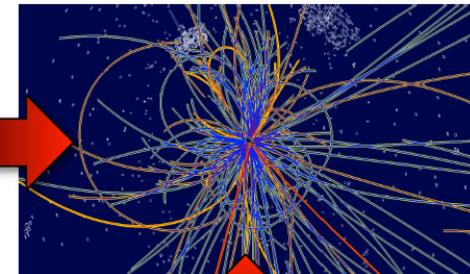
Faisceau de hadrons
chargés qui perd de
l'énergie dans la matière



Imagerie médicale

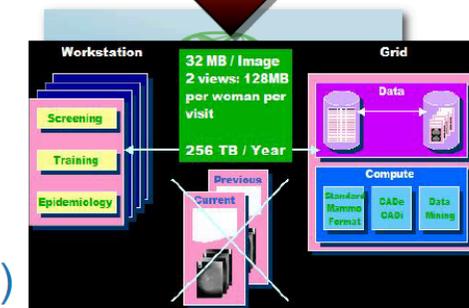


Détection

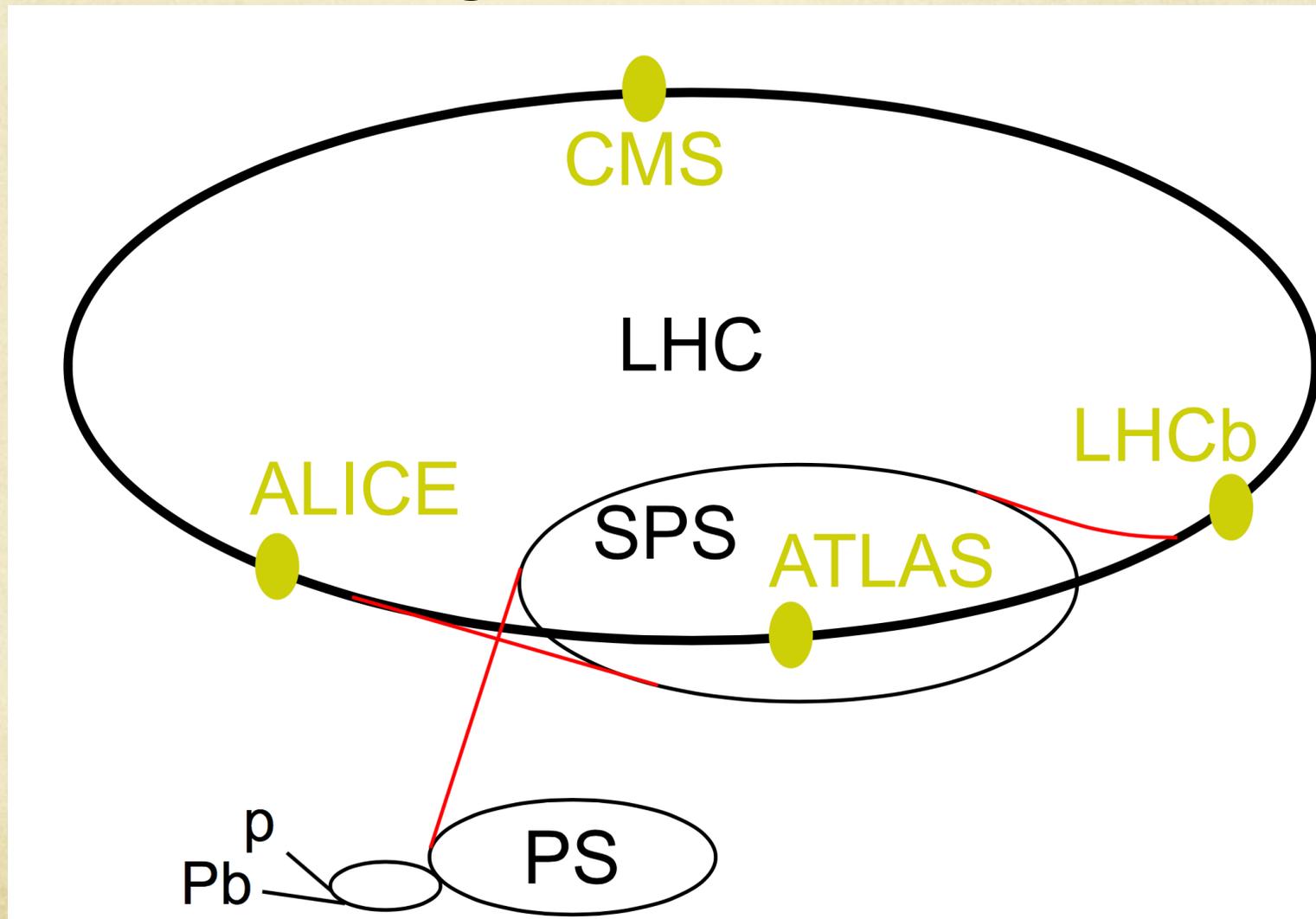


Traitement de données
à grande échelle (Grille de calcul)

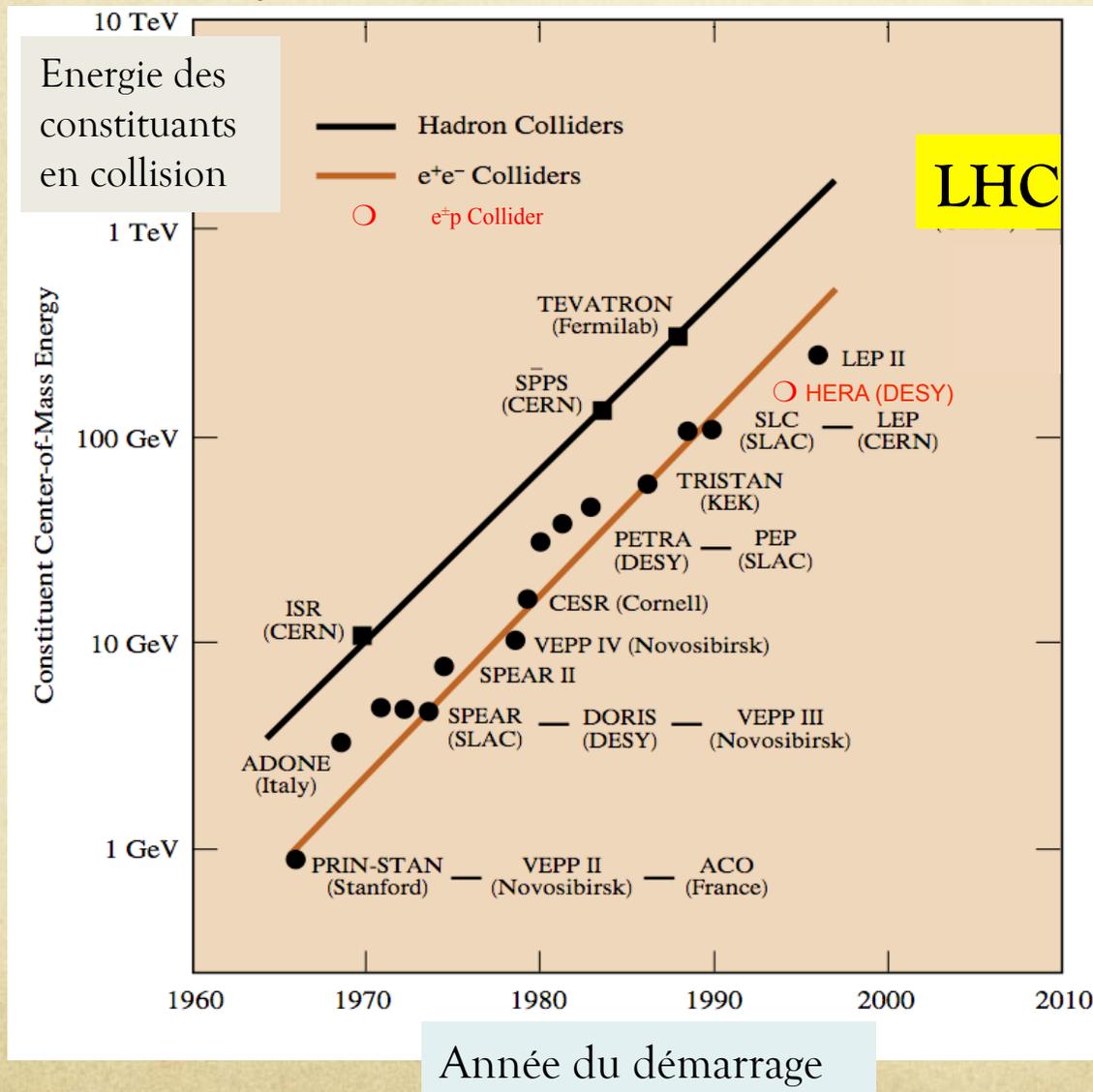
Grille pour la gestion et l'analyse des données médicales



LHC Large Hadron Collider



LHC: la plus grande énergie jamais atteinte: 7 TeV/ faisceau



Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol

Mais:

-2800 paquets x 10¹¹ protons

-concentré dans région

Energie du faisceau équivalente à un TGV à 200 km/h



LHC: Large Hadron Collider

Câbles supraconducteurs:
7600 Km

1232 dipôles 15m/35 tonnes

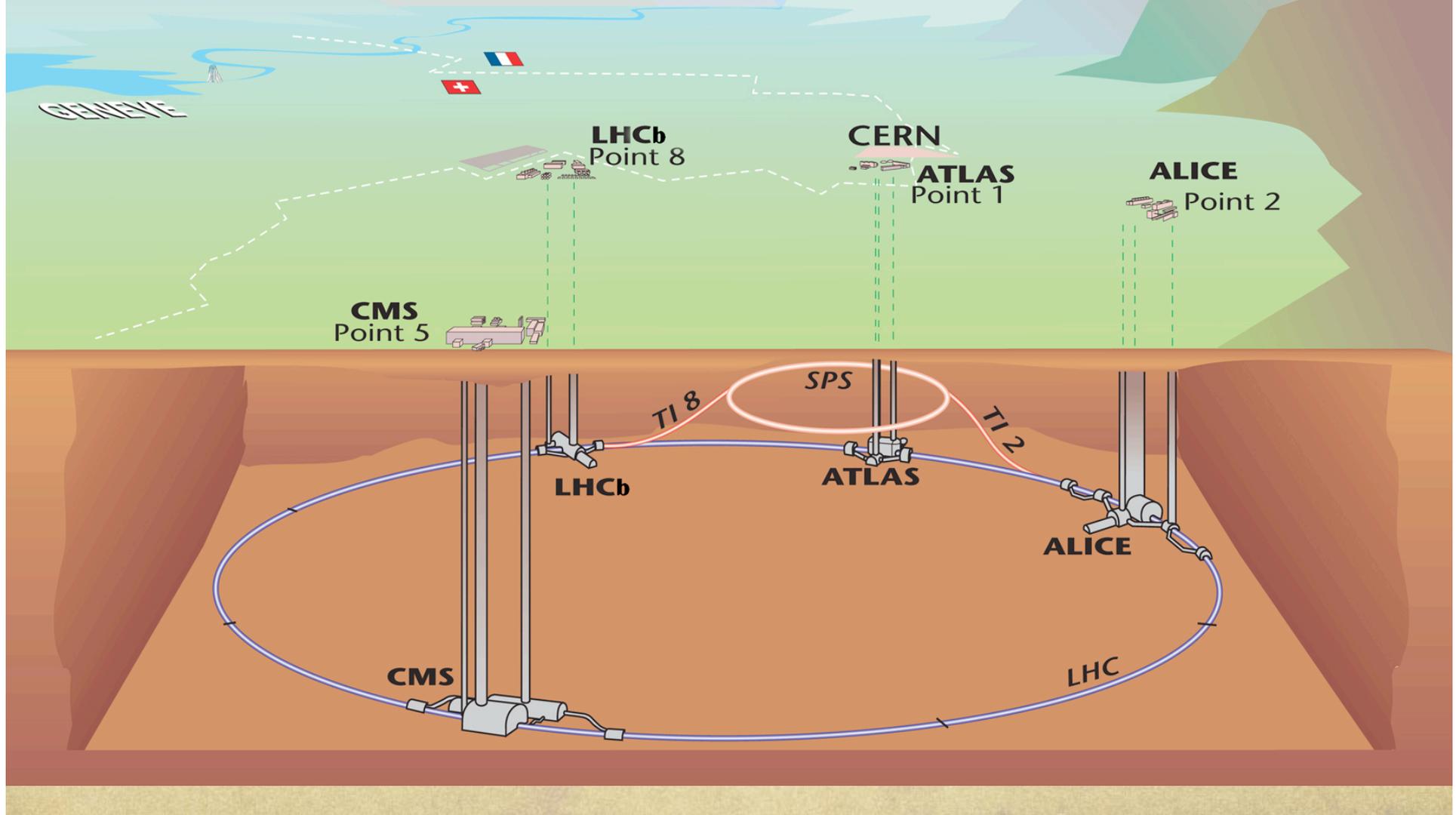
Champ magnétique 8.3T
200 000 fois plus intense que le
champ magnétique terrestre

Température 1.9K (-271°C)
Plus froid que l'espace
intergalactique

Vide presque parfait (10-13 atm) :
pression 10 fois plus faible
que sur la Lune

20/01/15

Tout au long de ses 27 km de tunnel, à 100 m sous terre, les particules sont lancées à 99,9999991% de la vitesse de la lumière et vont effectuer 11 245 fois le tour de l'accélérateur par seconde. Deux faisceaux de protons voyageront chacun à une énergie maximum de 7 TeV, permettant ainsi des collisions frontales de 14 TeV, ce qui donnera lieu à quelque 600 millions de collisions par seconde.



LHC un projet multi-décades

2x25 ans

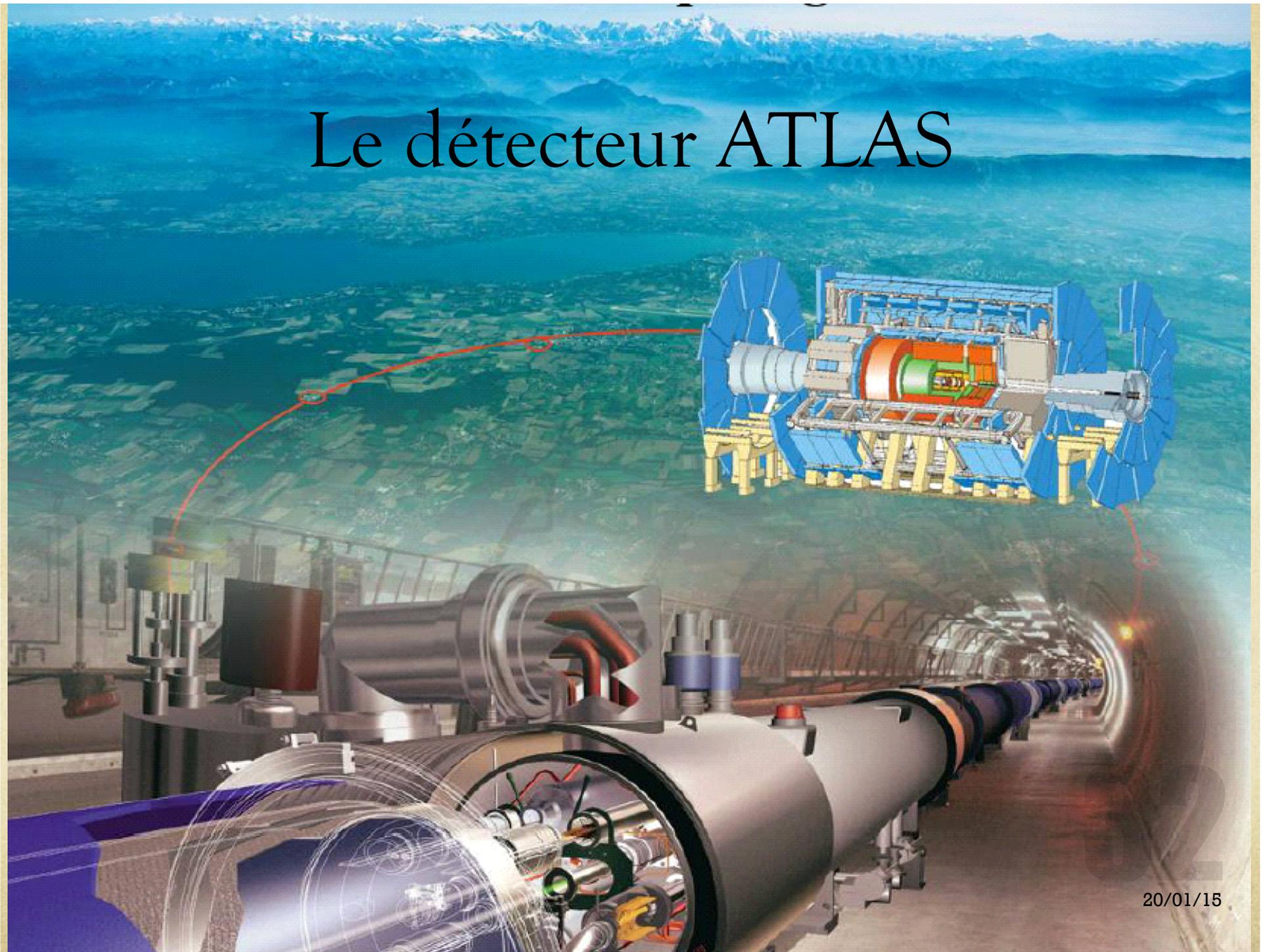
25 ans de préparation

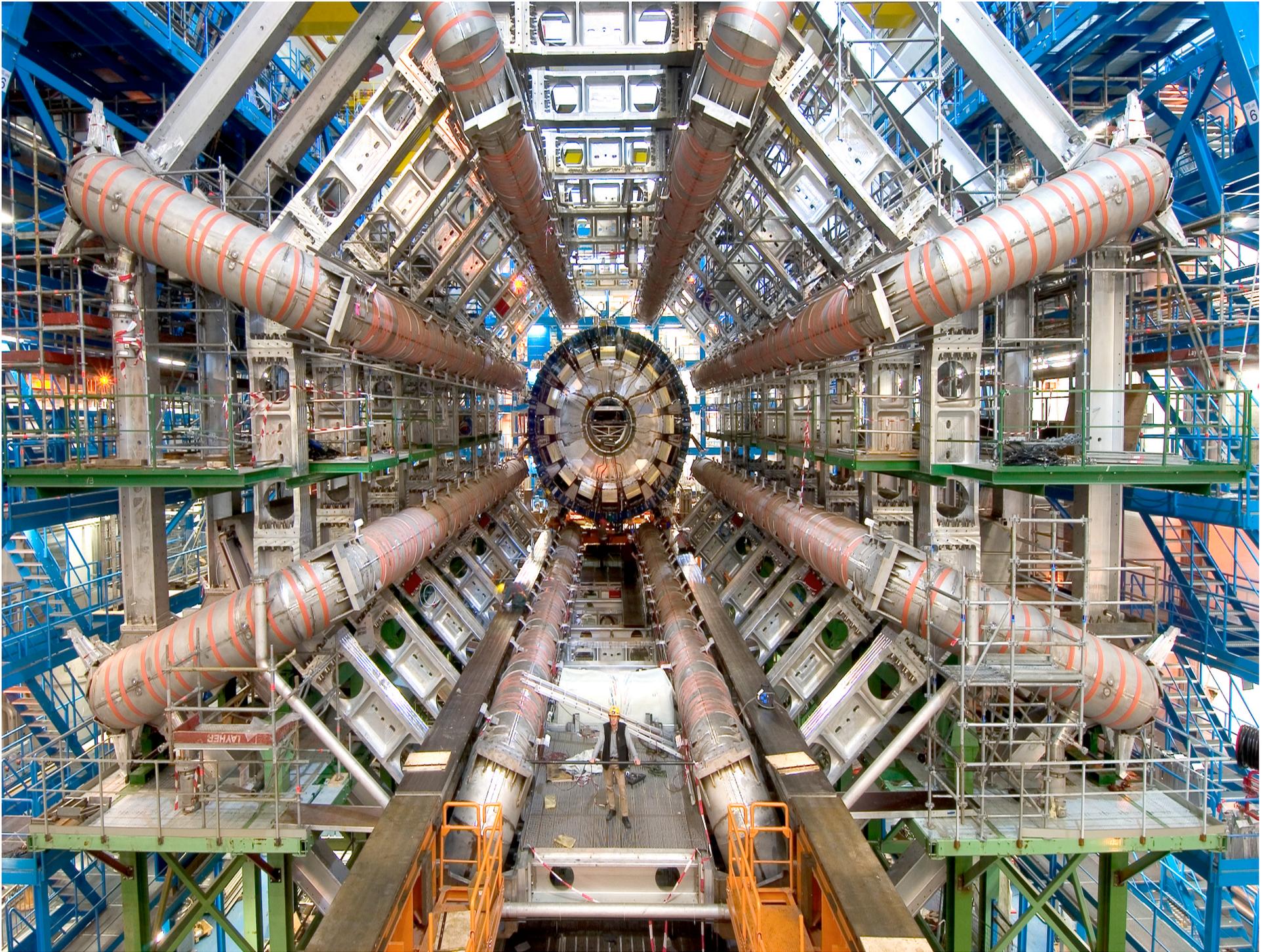
1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

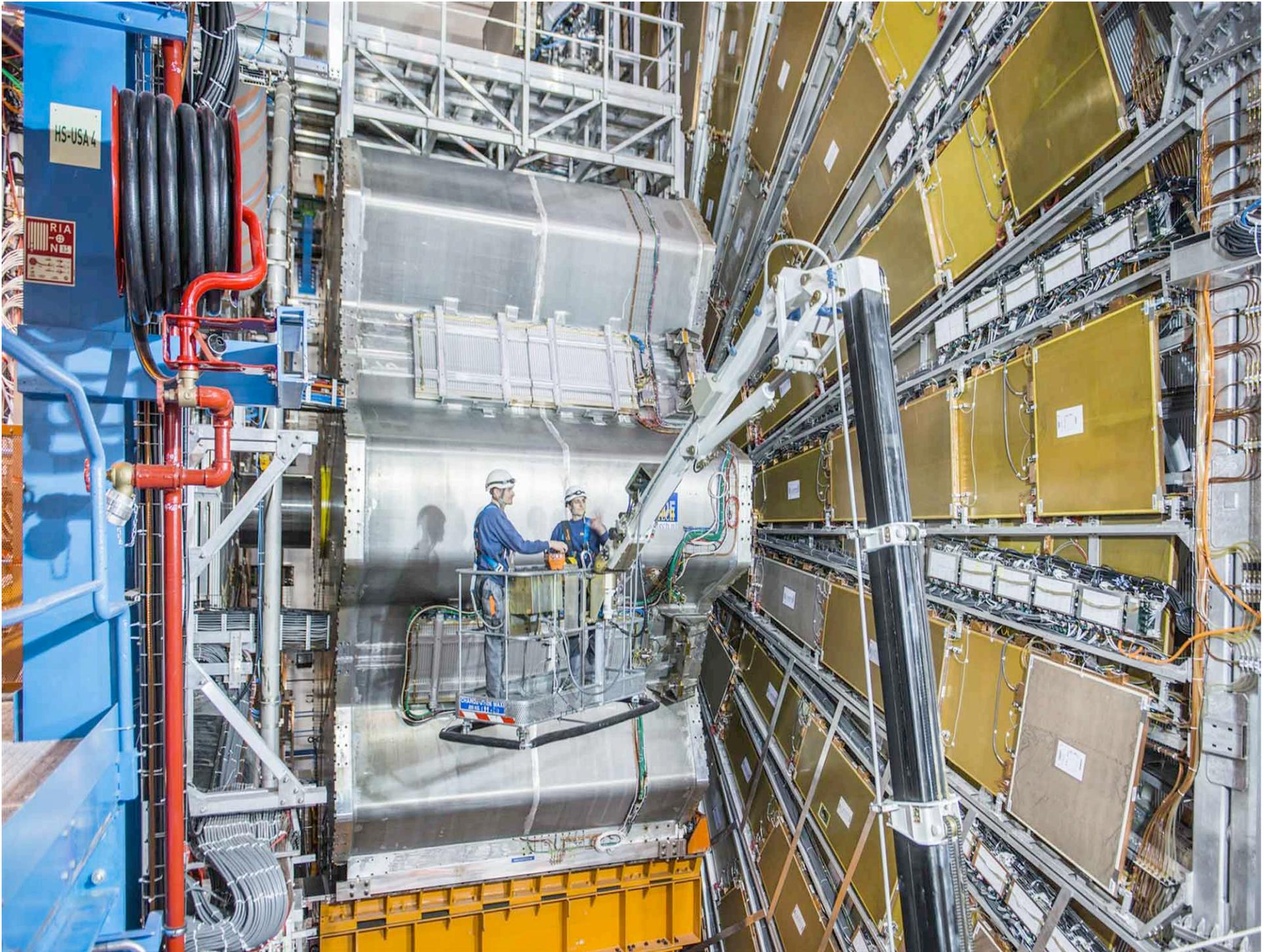
25 ans d'expérimentation

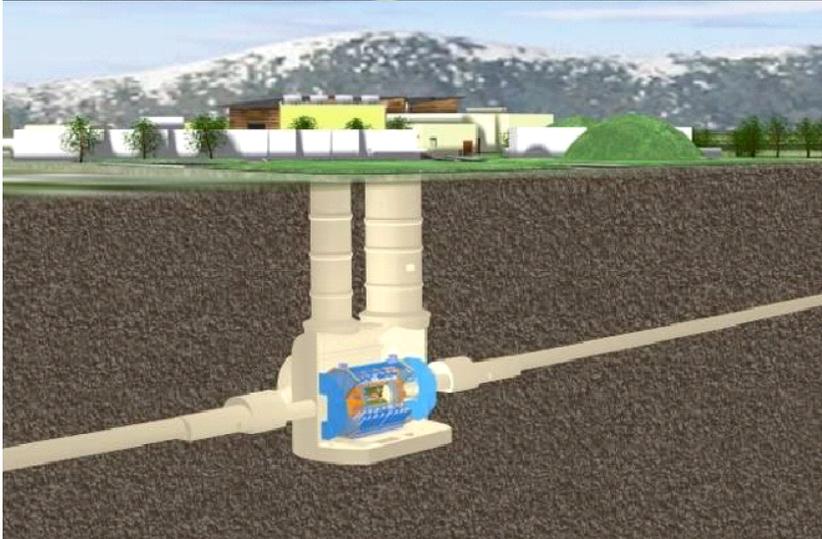
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Début 2015	Redémarrage à 13-14 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?

Le détecteur ATLAS





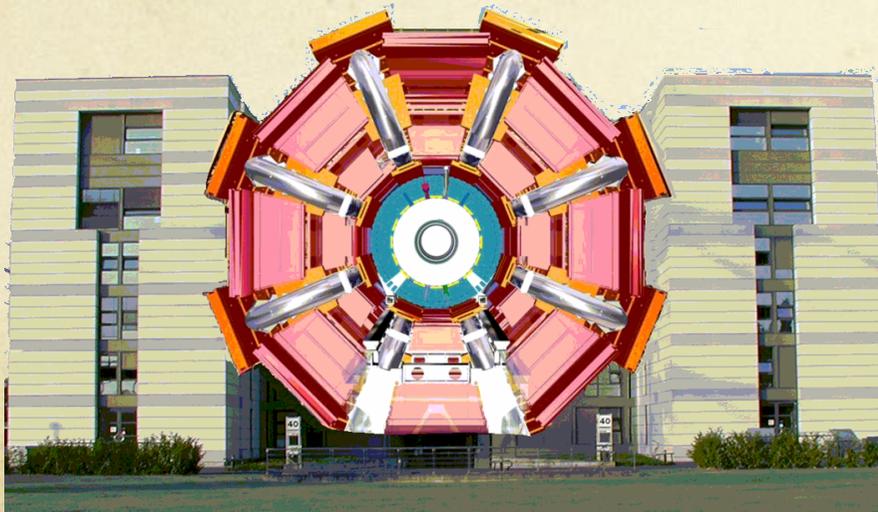




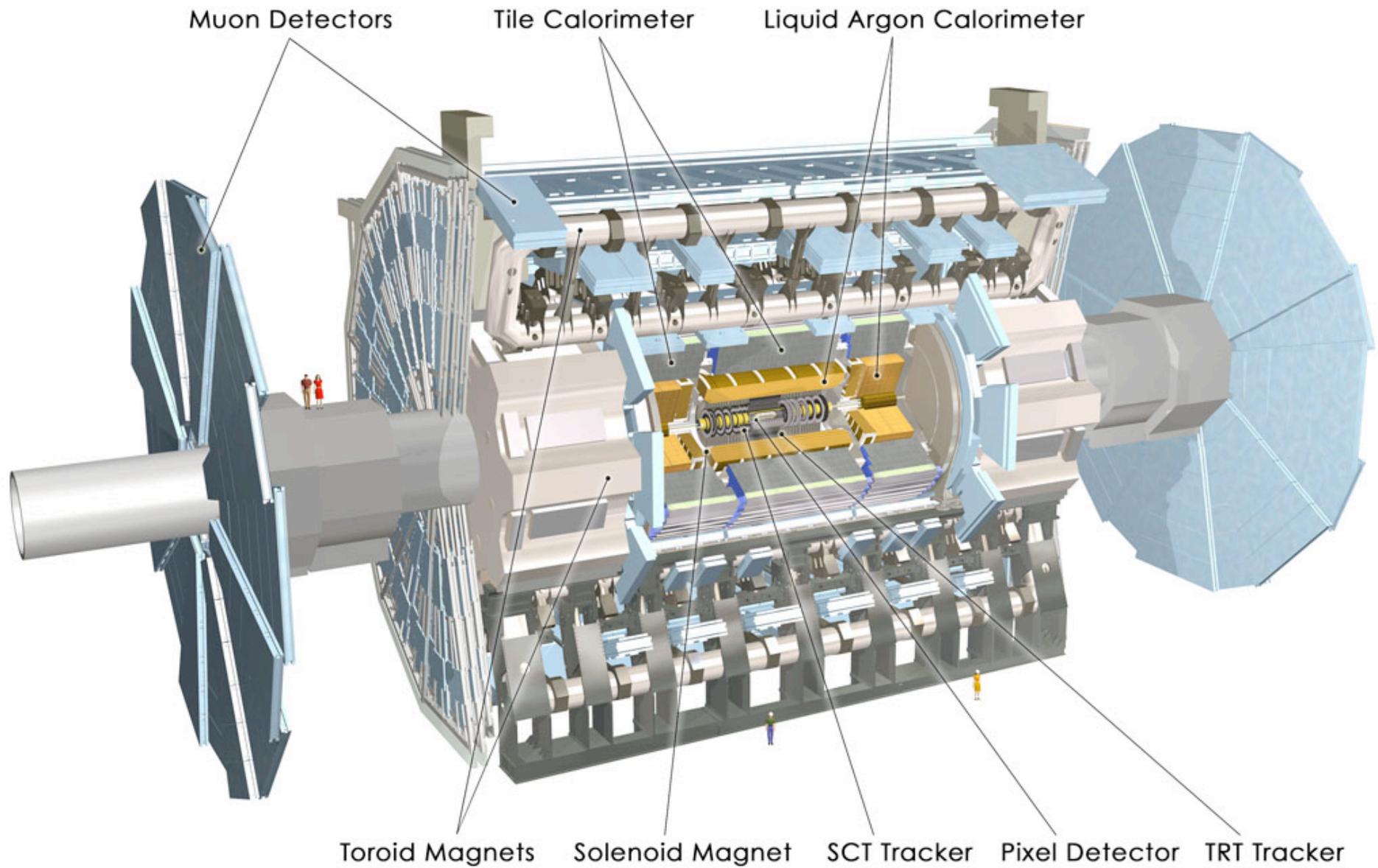
ATLAS: un géant pour la physique

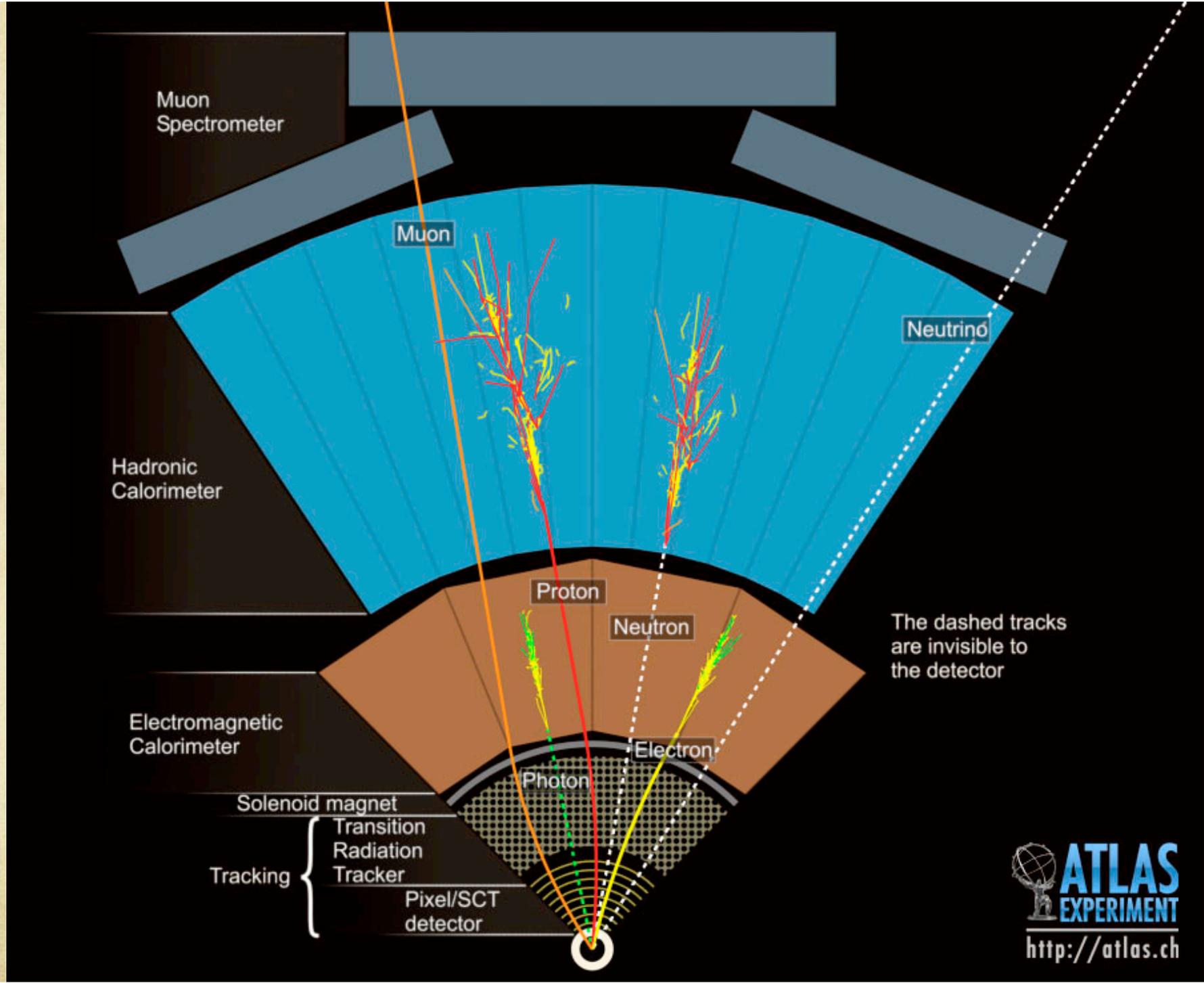
45 mètres de long, plus de 25 mètres de haut
La moitié aussi grand que la cathédrale Notre-Dame de Paris

Pèse environ 7000 tonnes.
Le même poids que la Tour Eiffel ou une centaine de B747 jets (vides).



ATLAS



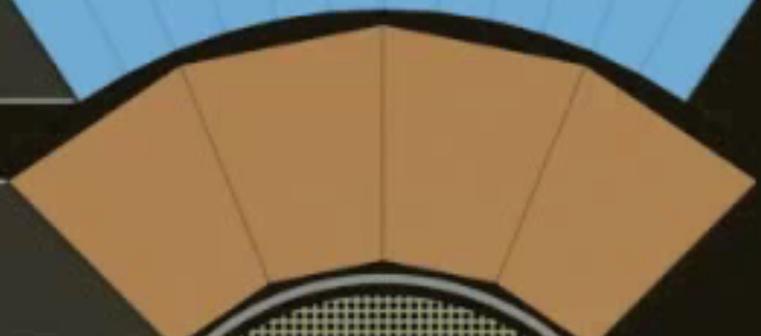


Muon Spectrometer

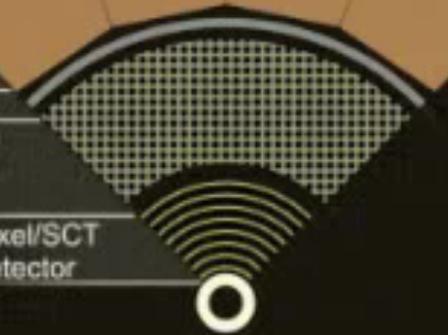


Hadronic Calorimeter

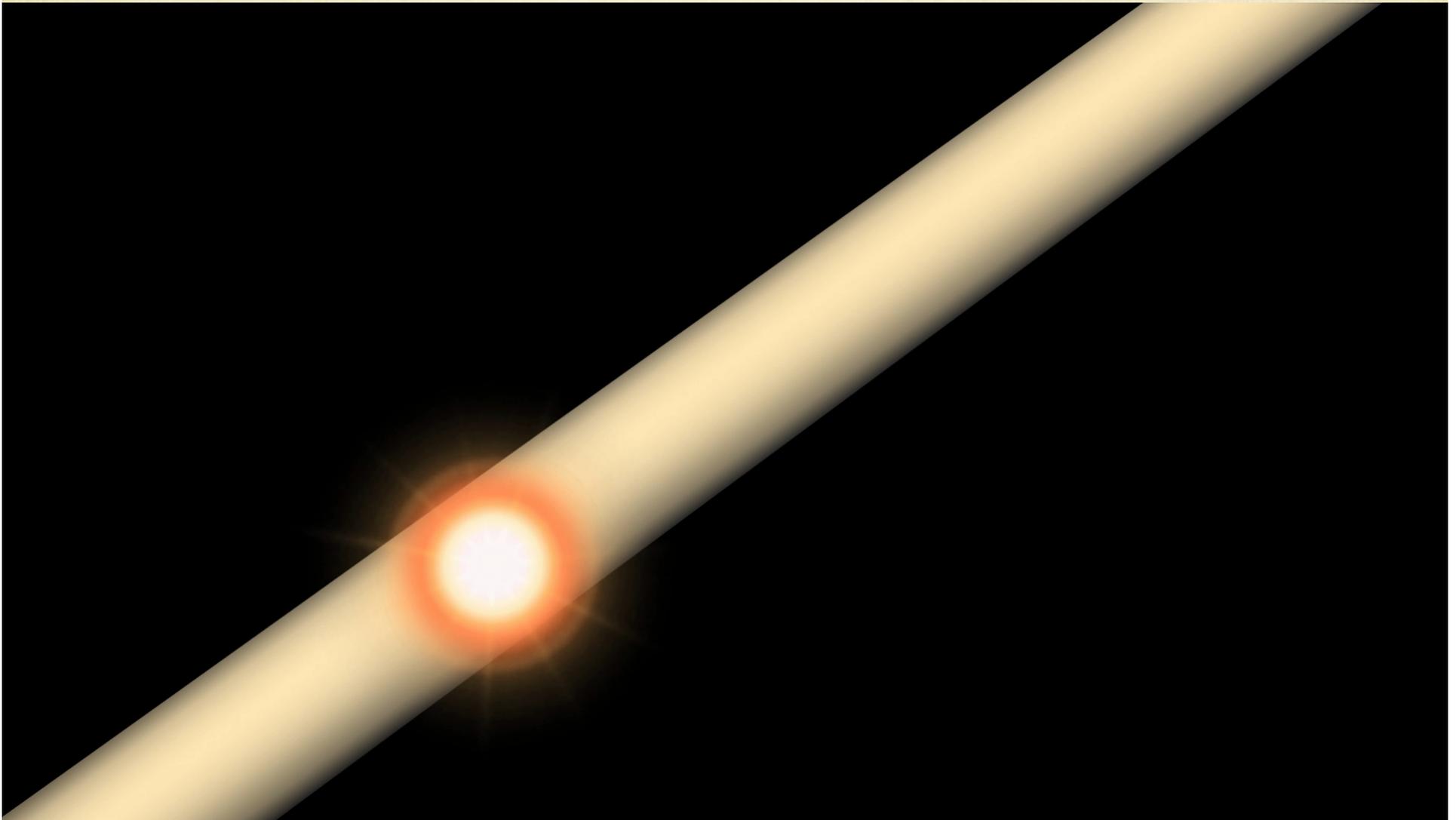
Electromagnetic Calorimeter



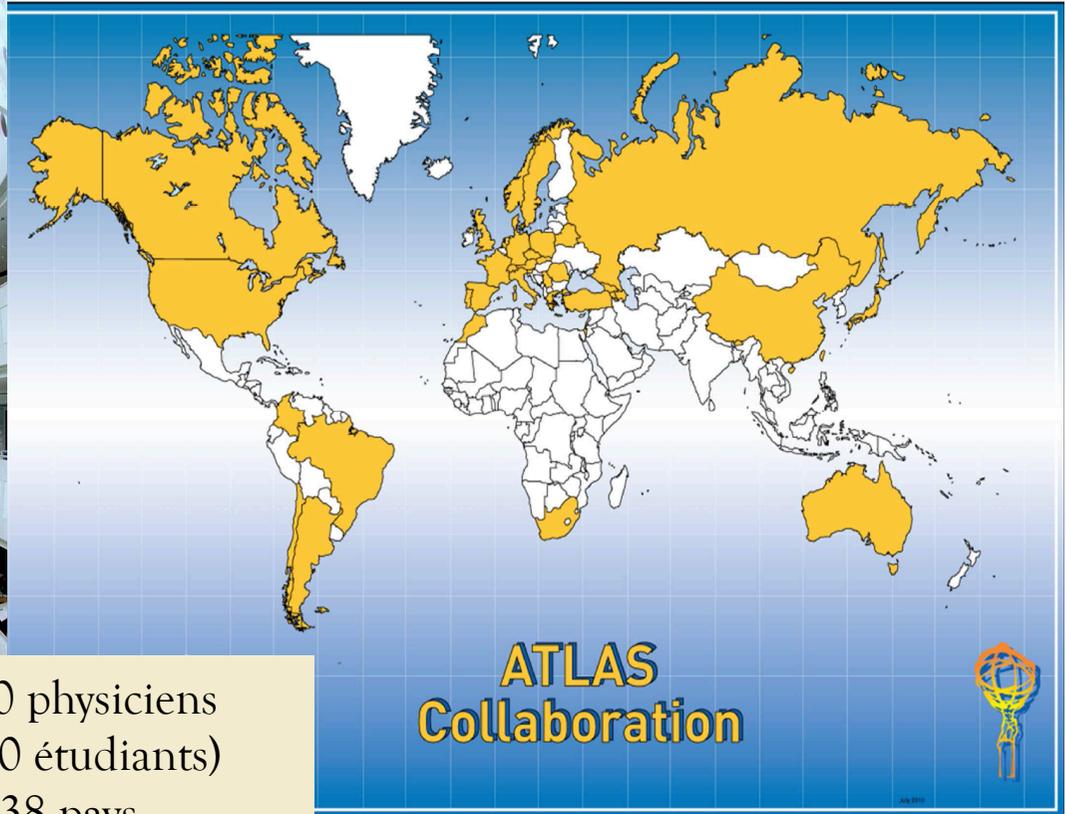
Solenoid magnet
Tracking {
Transition Radiation Tracker
Pixel/SCT detector



Collisions de protons dans ATLAS



ATLAS: une aventure humaine aussi



3000 physiciens
(1000 étudiants)
38 pays
174 instituts

Flux de données

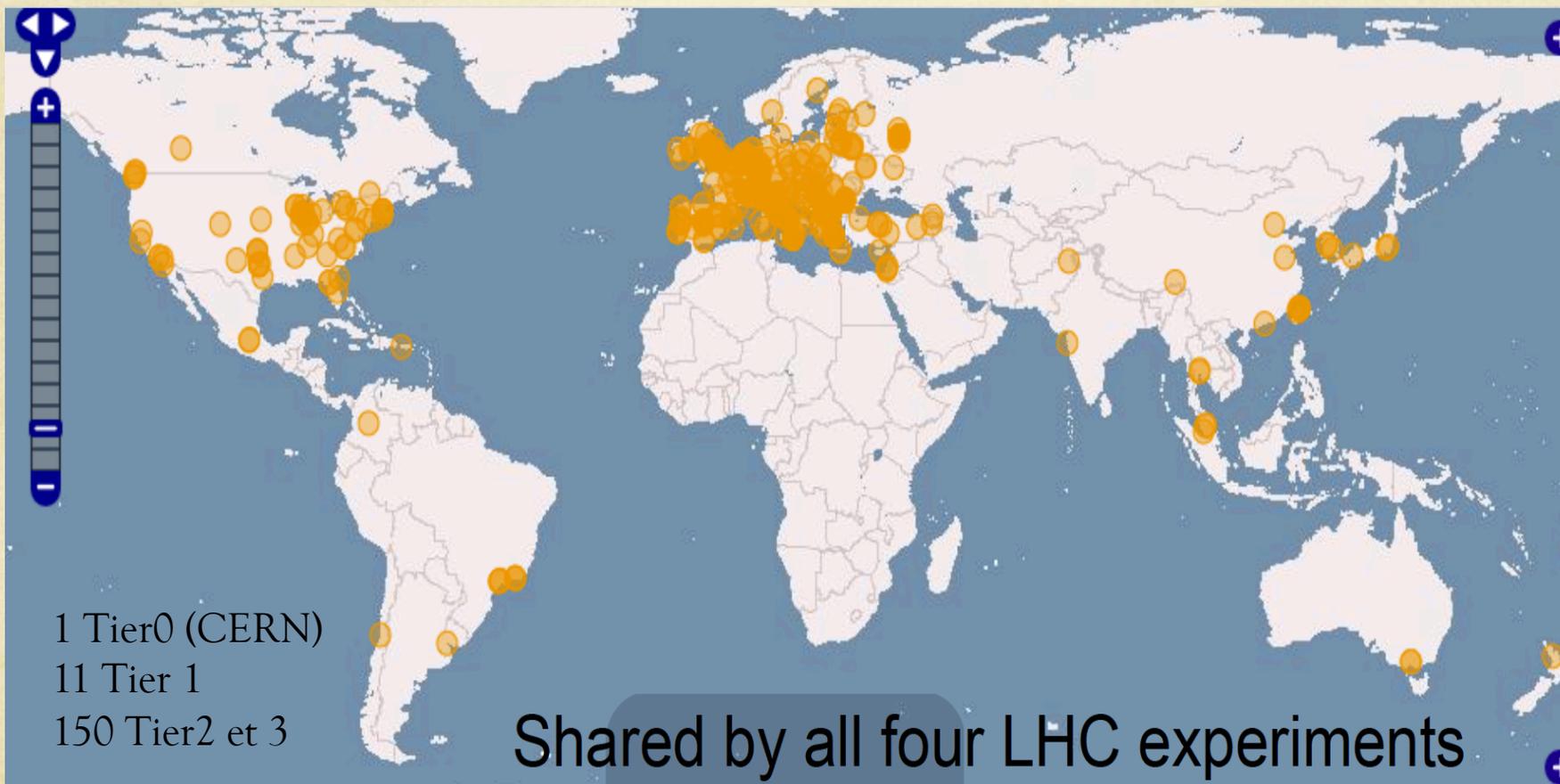
- 600 Millions de collisions → 100 000 CD par seconde.
 - Cela créerait une pile de CD 200m de haut à chaque seconde, ce qui serait à atteindre la lune et retour deux fois par an.
 - Le débit de données est équivalent à 50 milliards d'appels téléphoniques en même temps.
- ATLAS enregistre uniquement une fraction des données le taux est équivalent à 27 CD par minute.
- La nouvelle physique recherchée est encore plus rare:
 - Un boson de Higgs produit tous les 10 000 000 000 collisions



Sven Sachsälber a trouvé "l'aiguille dans la botte de foin"

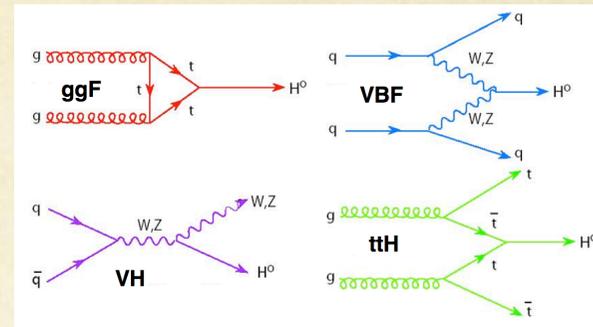
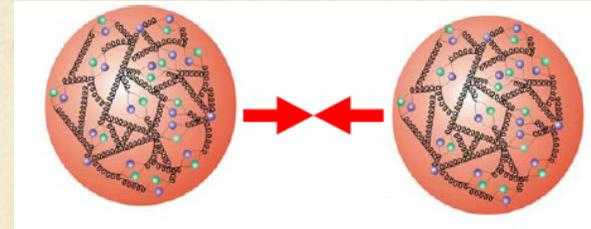


Calcul pour le LHC: la grille de calcul



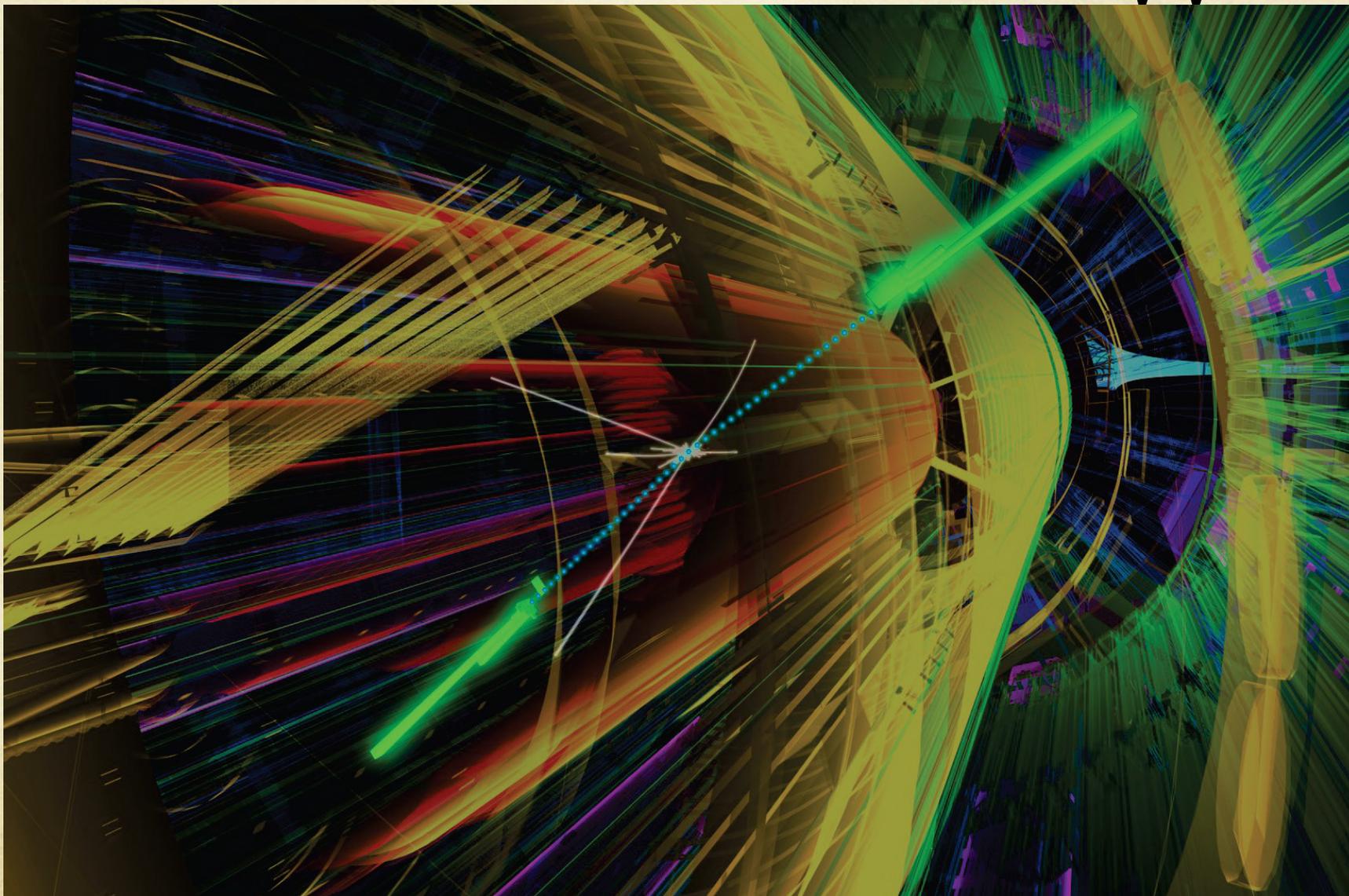
Trouver le boson scalaire

- Production via la fusion des « partons »
- Désintégration dans des multiples « canaux »
 - « signatures »
- Lutte acerbe contre le « bruit »: combinaisons aléatoires de particules
- Les calculs prennent plusieurs mois ou années

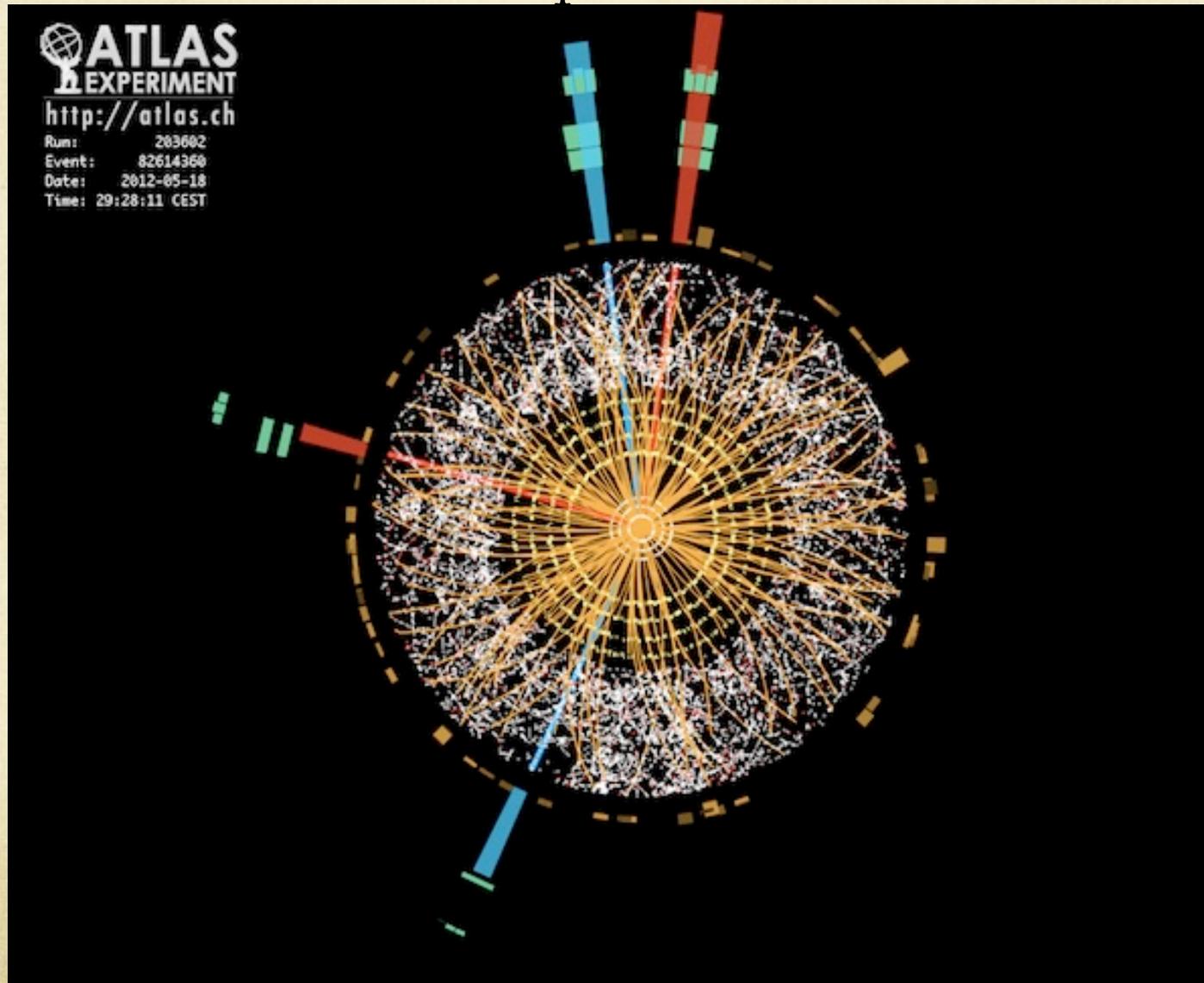


Process	Events/s
Inelastic proton-proton reactions	10^8
$W \rightarrow e\nu$	20
$Z \rightarrow ee$	2
$t\bar{t}$	1
$b\bar{b}$	10^6
Higgs $m = 120$ GeV	0.04

Evénement candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

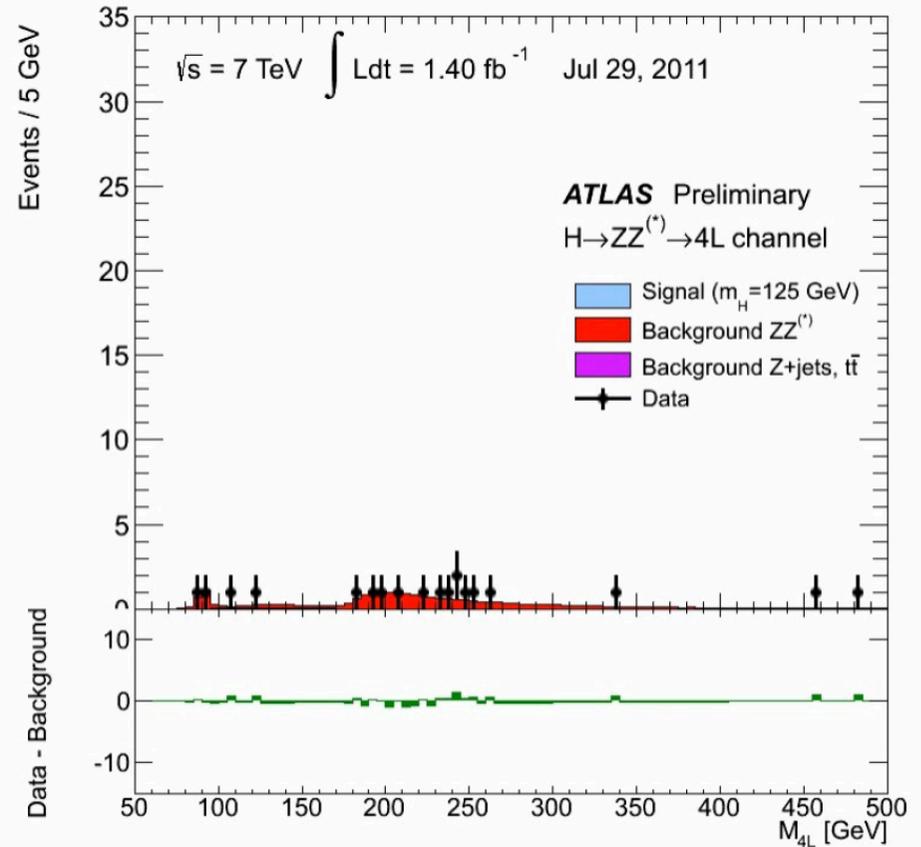
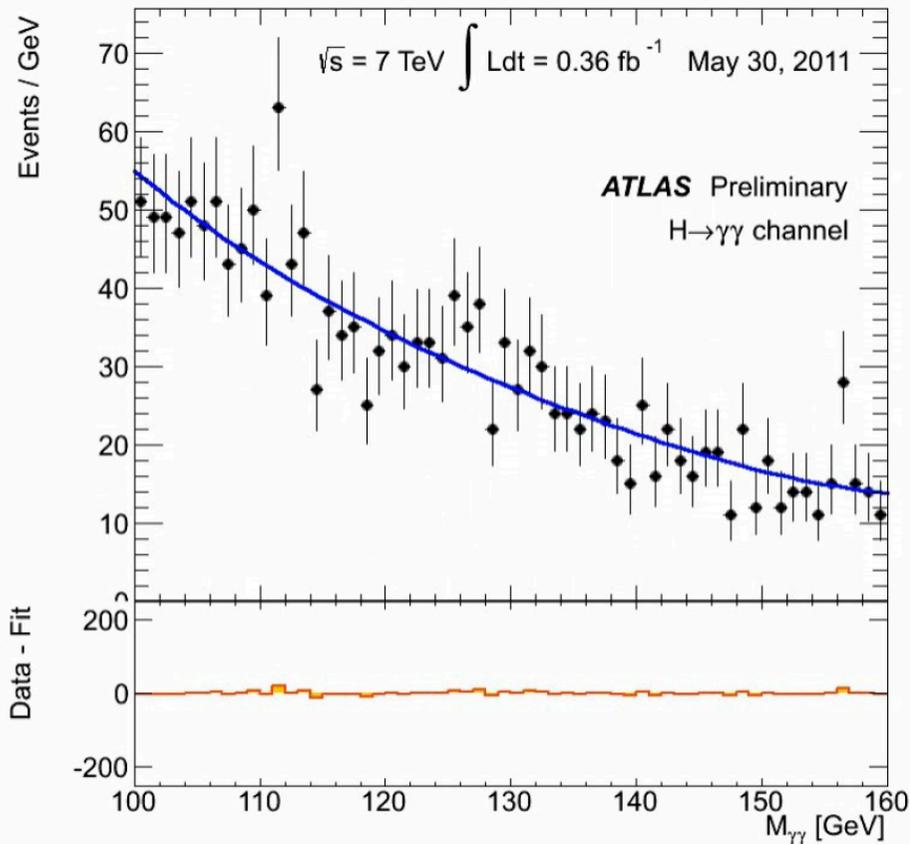


Evénement candidat $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptons



En attendant... le boson Higgs

May 2011: pas encore là, qualification du bruit, réglage des détecteurs



film

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

film

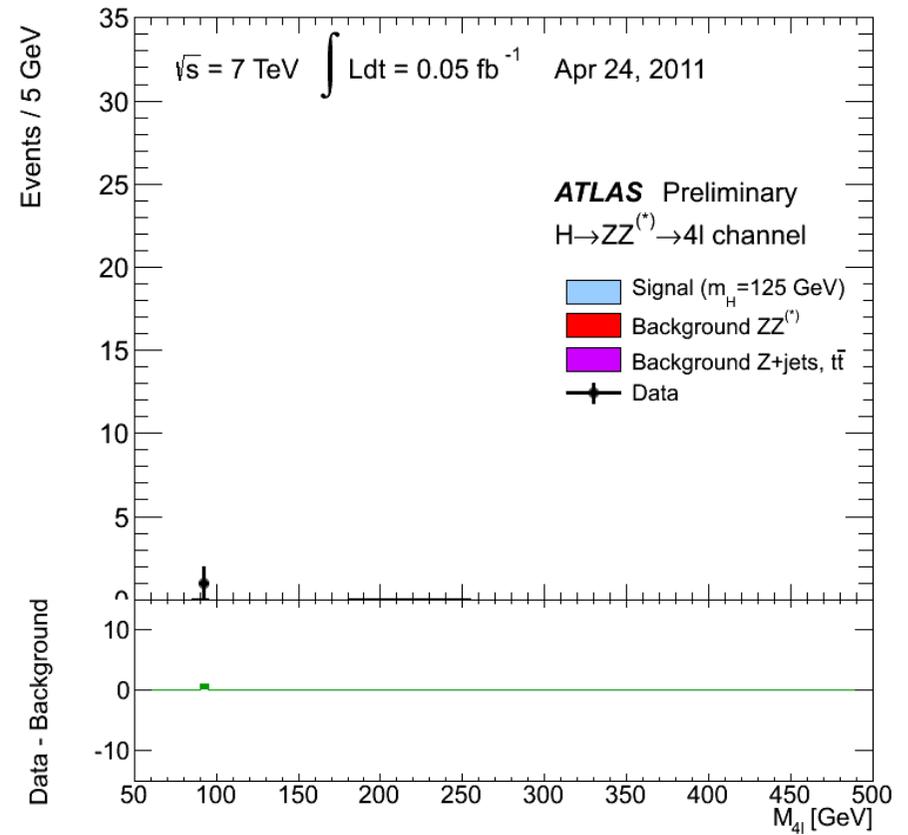
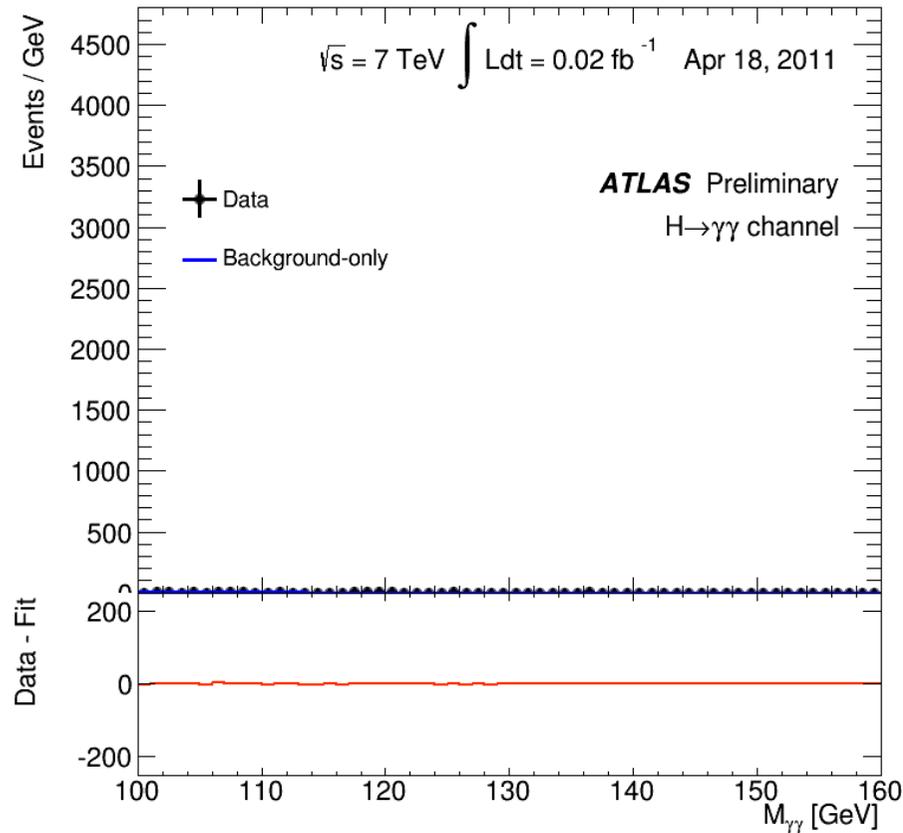
Les physiciens ont découvert le boson de Higgs avec 99,999 % de certitude

Le Monde | 04.07.2012 à 15h20 - Mis à jour le 08.10.2013 à 15h13 |

Par David Larousserie (Genève, envoyé spécial)



Juillet 2012



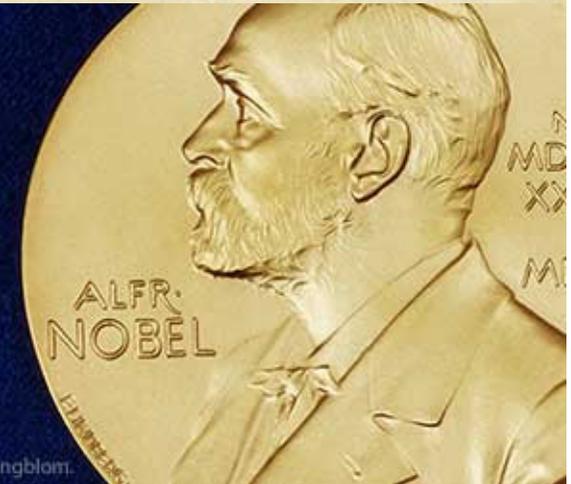


4 Juillet 2012: l'annonce de la découverte du boson scalaire



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.

«pour la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule prédite, par les expériences **ATLAS** et **CMS** au Grand collisionneur de hadrons du CERN"

"Sans lui [le boson], nous n'existerions pas", a constaté le comité Nobel dans son communiqué.

50

20/01/15

Et maintenant?

Prédictions pour le futur....

- "Il n'y a rien de nouveau à découvrir en physique maintenant, tout ce qui reste à faire est de mesurer plus en plus précisément. »

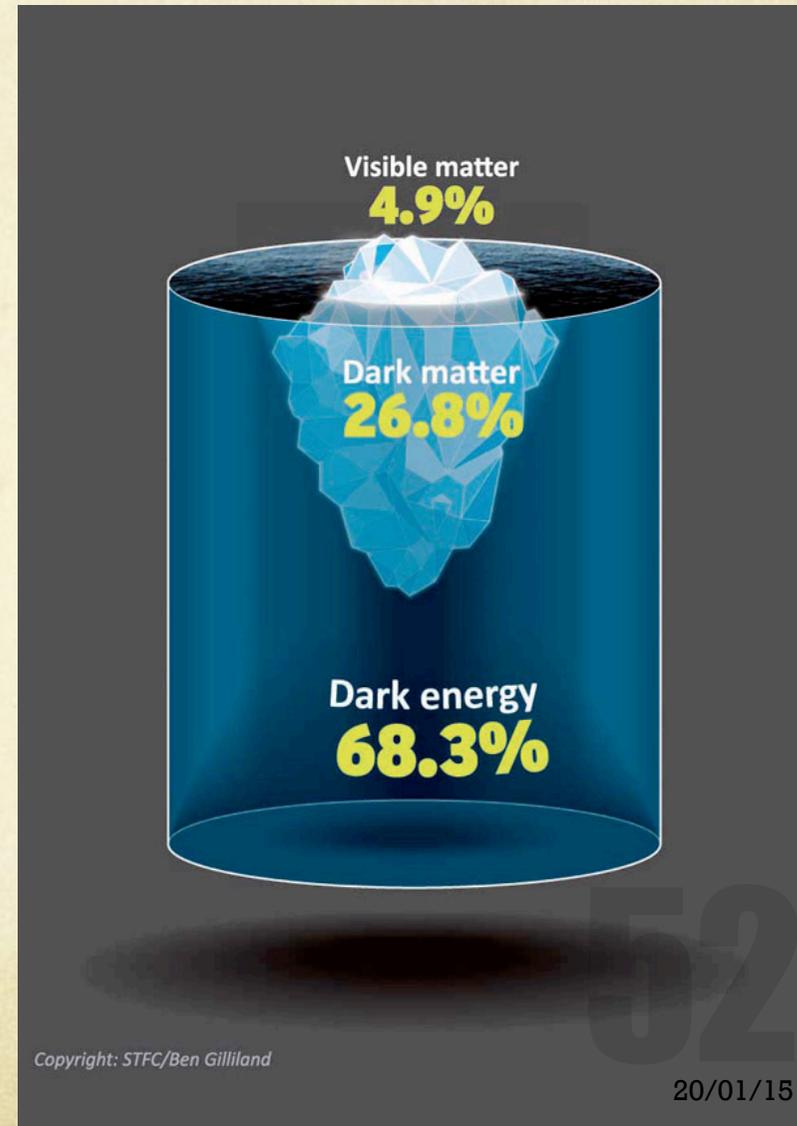
L. Kelvin ~ 1900

- « C'est vraiment avec confiance que j'envisage pour les douze prochains mois l'avenir de notre pays »

Charles de Gaulle, vœux à la nation, 31 décembre 1967)

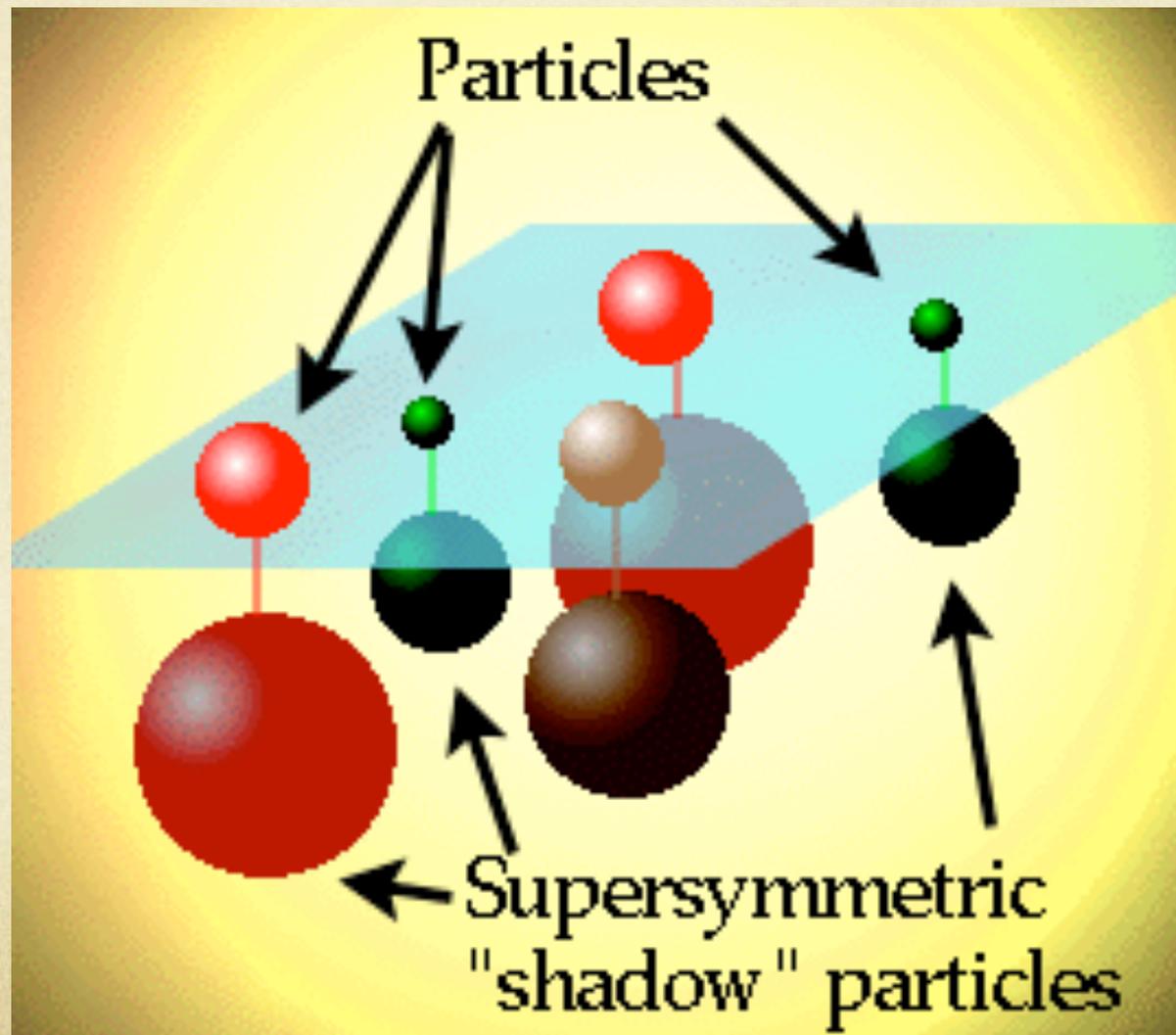
Et maintenant?

- Le boson de Higgs explique les masses des particules élémentaires connues
 - Mais pas la masse de la matière visible, qui est surtout de l'énergie
 - ...en plus 95% de l'Univers demeure inconnu
- Le boson de Higgs est une nouvelle forme de matière
 - Fenêtre vers la nouvelle physique?
- Le programme de physique au LHC est prévu jusqu'en 2035
 - 100 fois plus de données
 - ...et des nouvelles découvertes?

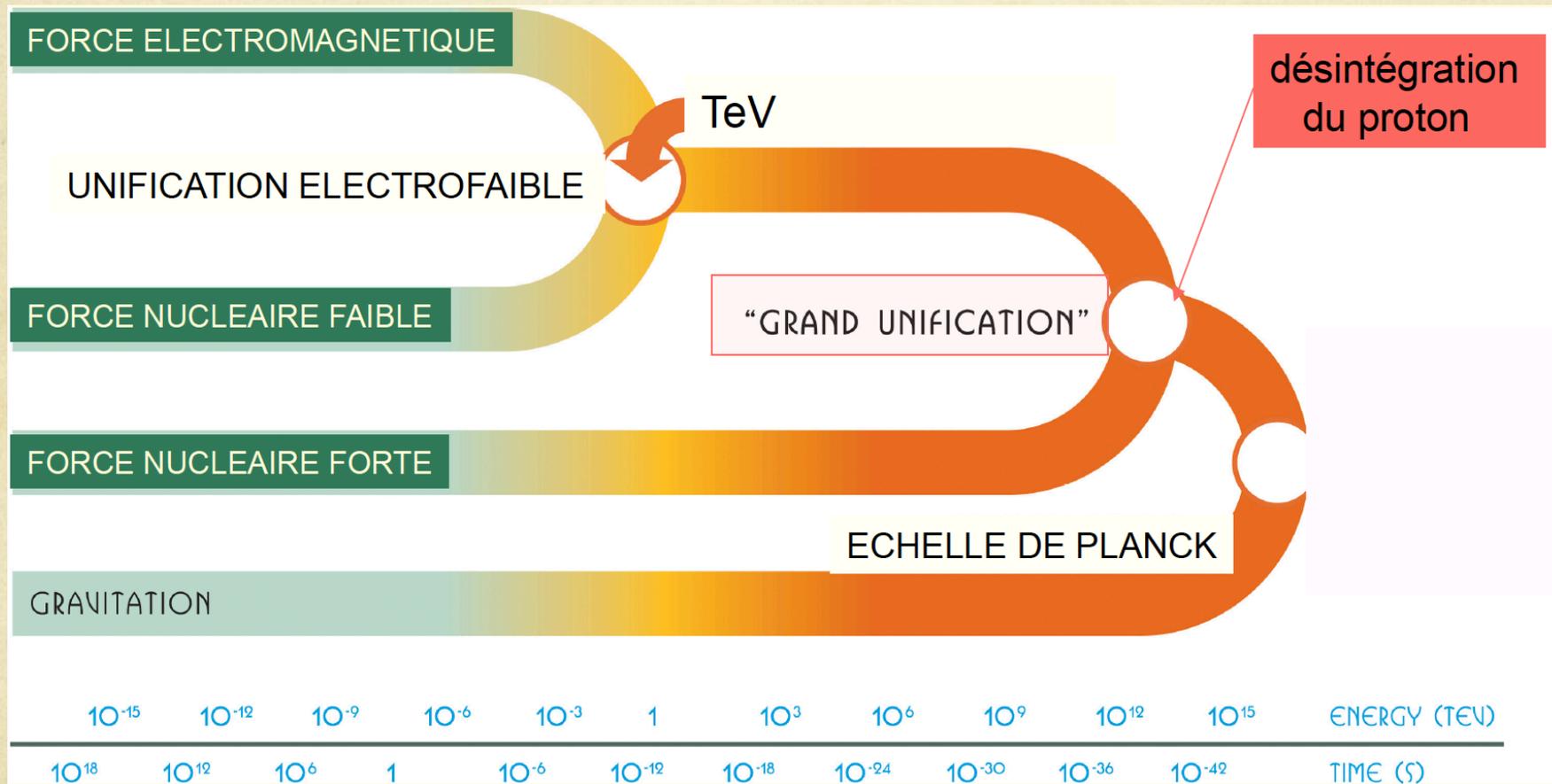


Supersymétrie

- Un monde en « miroir », extension du Modèle Standard



Unification des forces?



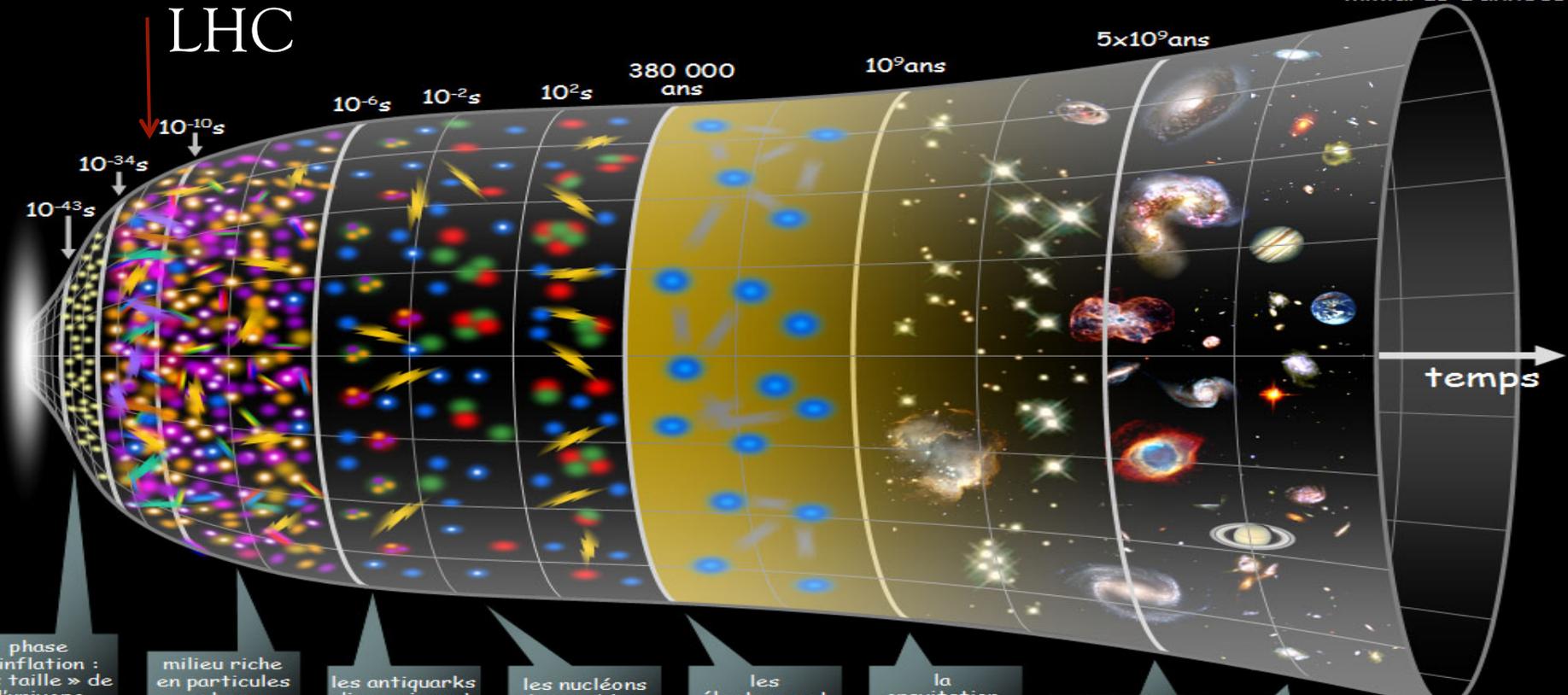
Les deux infinis se rencontrent?

taille en mètres



environ 14 milliards d'années

LHC



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

milieu riche en particules et en antiparticules proche du plasma de quarks et de gluons

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

les nucléons s'assemblent et forment les noyaux légers

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

Conclusions

- La boson de Higgs est une découverte extraordinaire pour conclure le « long siècle des particules »
- Cette découverte ouvre des nouvelles fenêtres vers la nouvelle physique au niveau de l'infiniment petit et de l'infiniment grand.

*Car enfin qu'est-ce que l'homme dans la nature ?
Un néant à l'égard de l'infini, un tout à l'égard
du néant, un milieu entre rien et tout.*

Pascal « Pensées »

56

57

20/01/15