

50 ans de Chasse au de Higgs

**Un voyage vertigineux : de l'infiniment
grand à l'infiniment petit**

Achille Stocchi

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

Université Paris-Sud / CNRS-In2P3

Orsay-France

Pour l' aide, le matériel
et les idées fournies pour cet exposé

merci a

Nicolas Arnaud

Michel Davier

Nikola Makovec

Patrick Roudeau

Marie-Hélène Schune

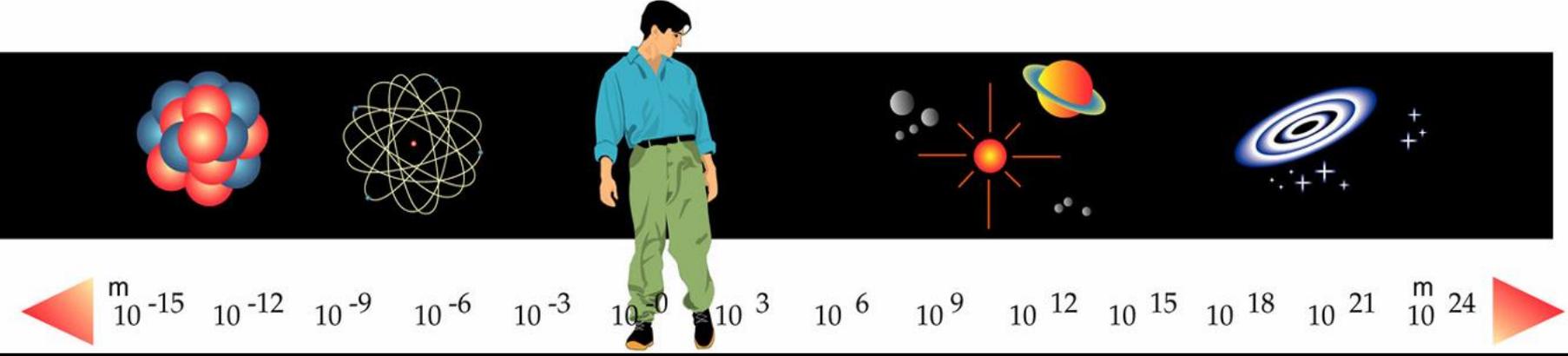
Johann Collot

Sabine Crépé

Yoan Coadou

La Physique des particules étudie la matière dans ses dimensions les plus petites

L'astrophysique étudie la matière dans ses dimensions les plus grandes



Accélérateurs
et Détecteurs

Œil nu

Télescopes
Optique et radio

Jumelles
binoculaires

Microscopes

Le monde des particules : quantique et relativiste

Relativité

$E = mc^2$
(Physique des hautes énergies)

Masse/Energie



Production de nouvelles particules

Mécanique Quantique

$p = h / \lambda$
(Physique de l'infiniment petit)

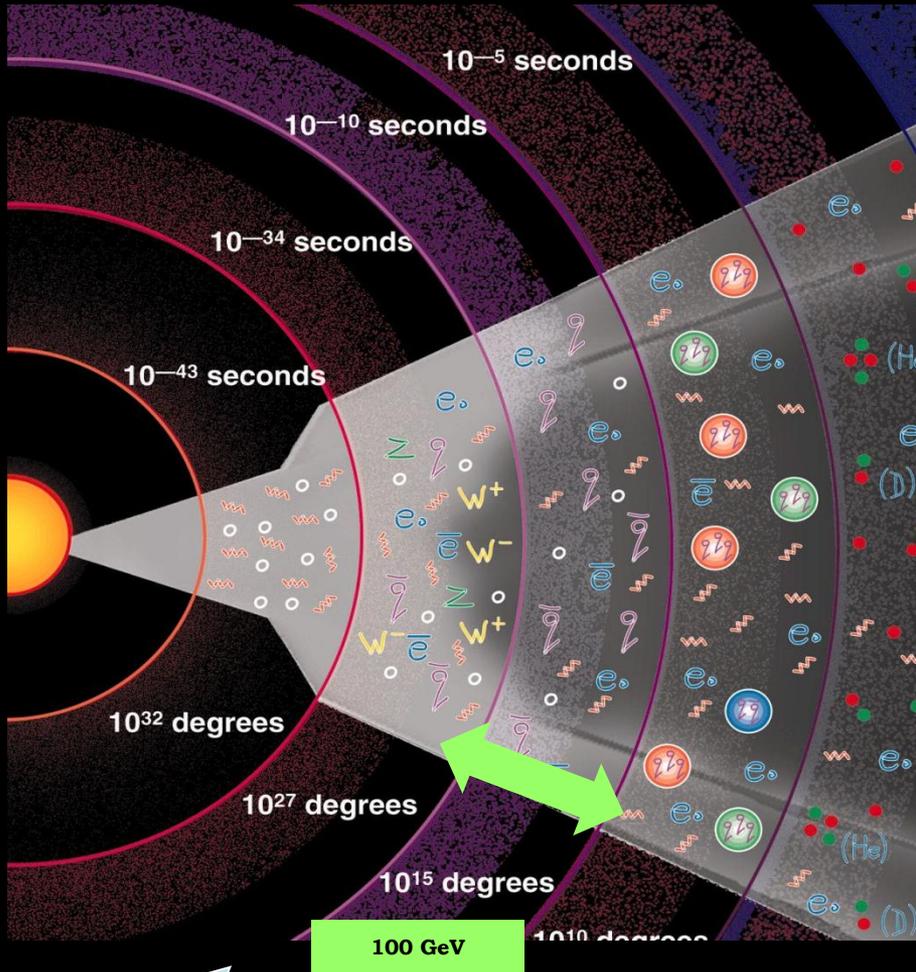
Particule/Onde



Sonder la structure de la matière

Peu intuitif.... d'emblée nous sommes dans un monde relativiste et quantique !

Le monde des particules : la physique des deux infinis



Produire des particules
à 100 GeV $\sim 10^{-8}$ Joule



Température $\sim 10^{15}$ degrés



Condition de l'Univers
 10^{-10} sec après le Big Bang

Les particules de haute énergie permettent de remonter le temps \rightarrow Infiniment grand

... relativiste

Masse/Energie

$$E = mc^2$$

Production de
Nouvelles Particules:

Il ne s'agit pas de
"divisibilité" ou de
"filiation" presque
géométrique

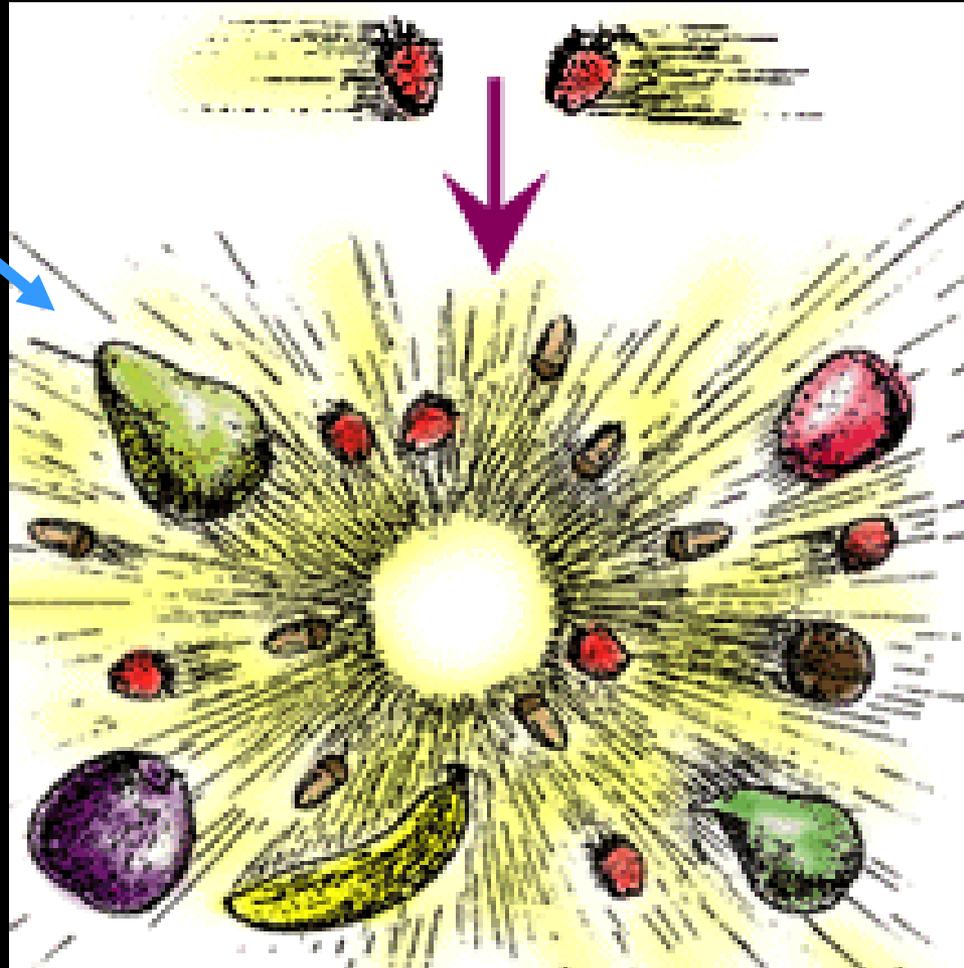
Puisque c est grand

Faible masse

=

grande

quantité d'énergie



Masse
énergie

énergie
Masse

Une particule c est un grumeau d'énergie

... quantique

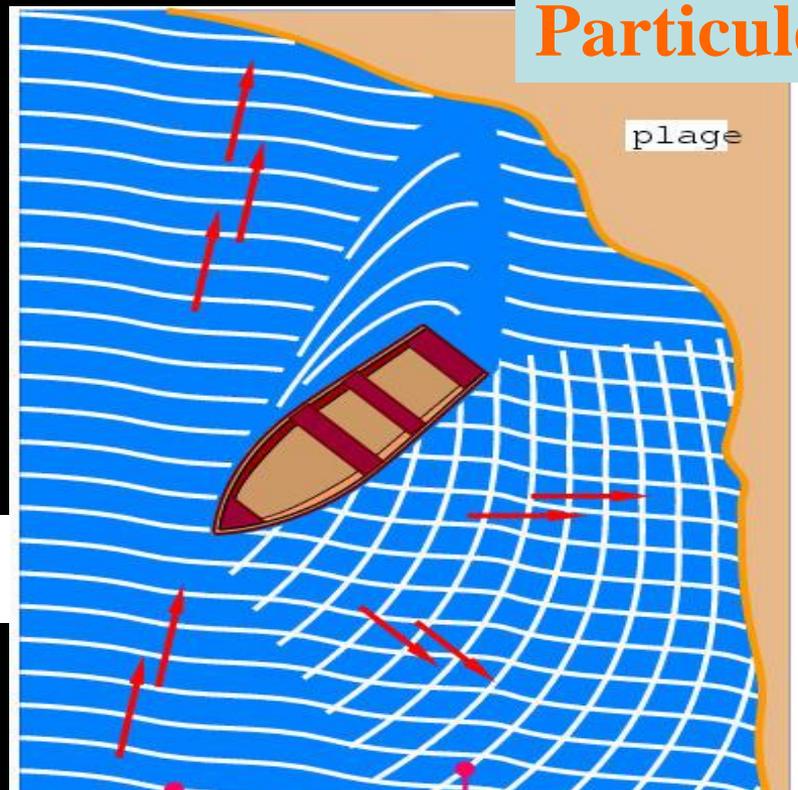
$$p = h / \lambda$$

$$h = 1.06 \cdot 10^{-34} \text{ J sec}$$

Constante extrêmement petite : influence dans le monde microscopique

$$\lambda(\text{m}) = 1.24 \cdot 10^{-15} / P(\text{GeV}/c)$$

Particule/Onde



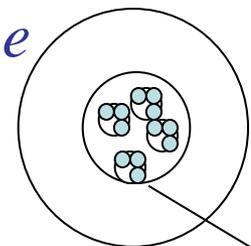
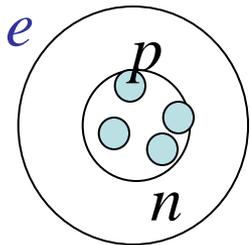
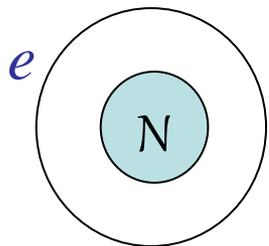
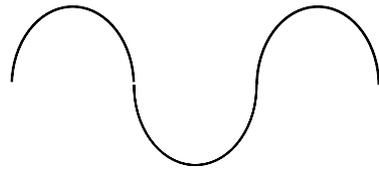
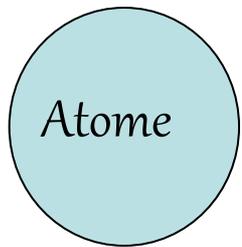
Exemple Classique

La structure d'un objet peut être sondée par des ondes si leur longueur d'onde est plus petite que la taille de l'objet

On peut voir que des détails de l'ordre de λ

Plus l'énergie augmente et plus l'on sonde les petites échelles de distance.

Les particules : les constituants élémentaires de la matière



quarks *up* et *down*

La matière ordinaire

1	IA																										0					
1	H																											He				
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne								
3	Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar								
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr														
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe														
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn														
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112	Naming conventions of new elements																			
																			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
																			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
																			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
																			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

est composée par trois particules :

Quark up *u*
 Quark down *d*
 Lepton electron *e*

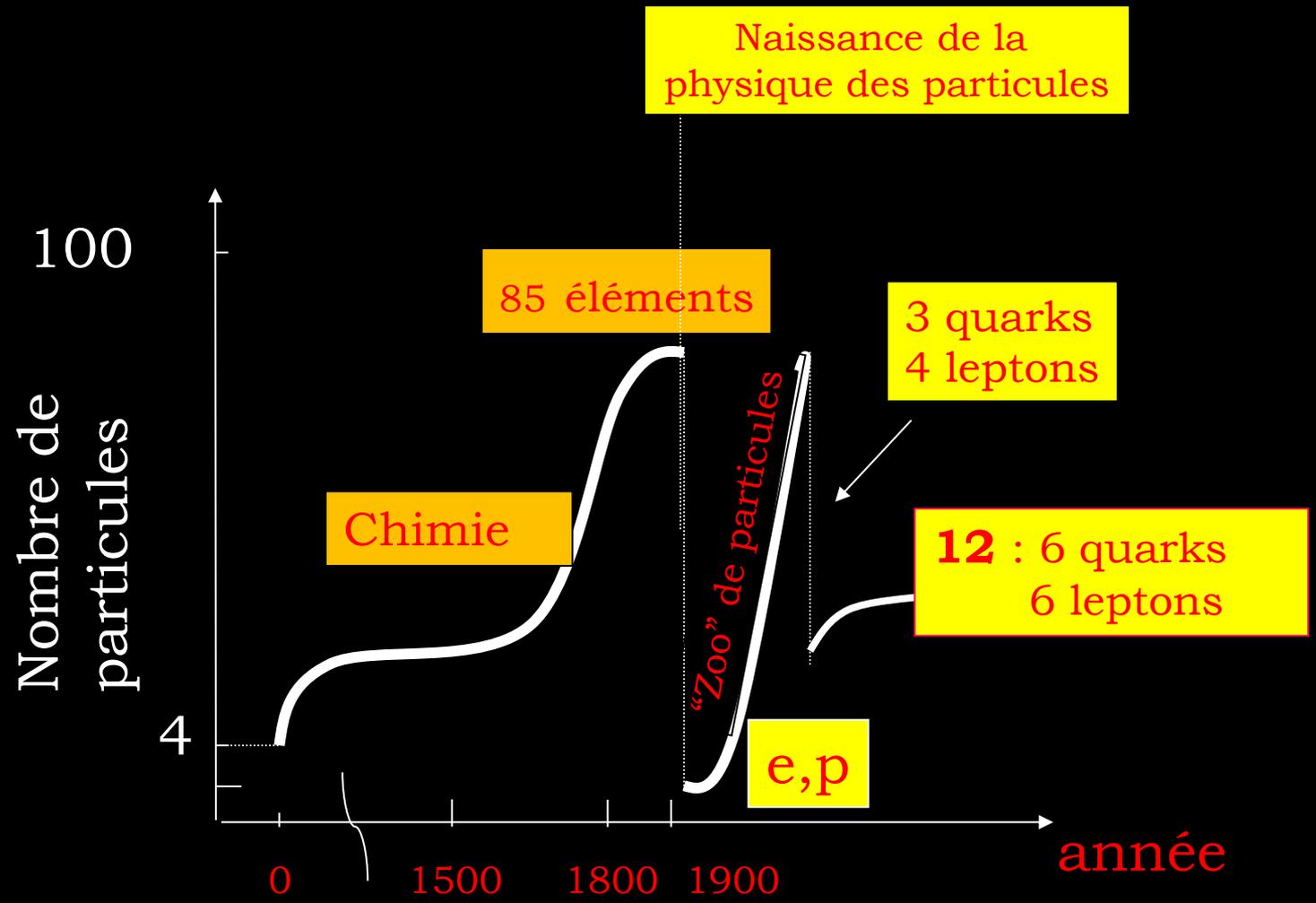
....d'interactions..et de vide !

Si les protons et les neutrons avaient un diamètre de 10 cm, les quarks et les électrons mesureraient moins de 0,1 mm et un atome entier ferait environ 10 km de diamètre.

Un atome est constitué à plus de 99,99 % de vide.

Un approche "reductionniste" : expliquer la complexite par briques d'elementarite

Une approche "réductionniste" : expliquer la diversité et la complexité de la Nature à l'aide d'un petit nombre de "briques élémentaires"



Les particules aujourd'hui: la matière extra..ordinaire

Dans la vie de tous les jours nous expérimentons les particules de la première famille....

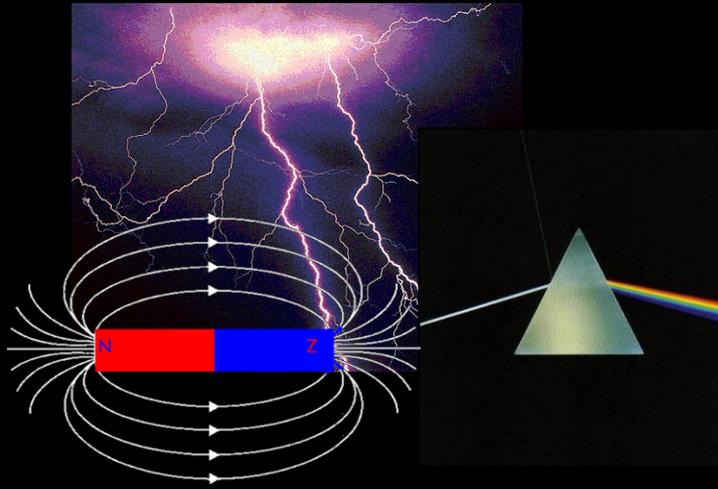
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ- Neutrino	ν_τ τ- Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		

Petite histoire: lorsque la découverte du muon fût annoncée, le physicien I. Rabi dit :



Ça reste une très bonne question.....

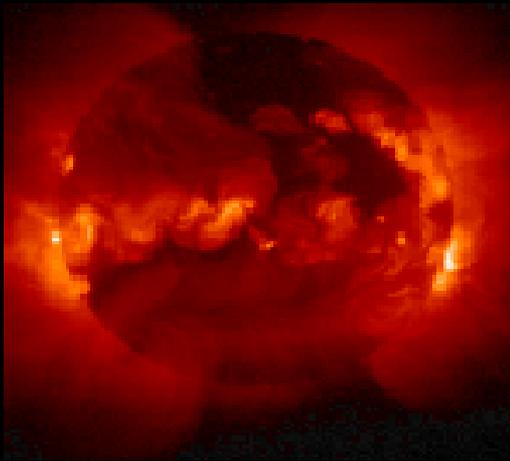
Les quatre forces fondamentales



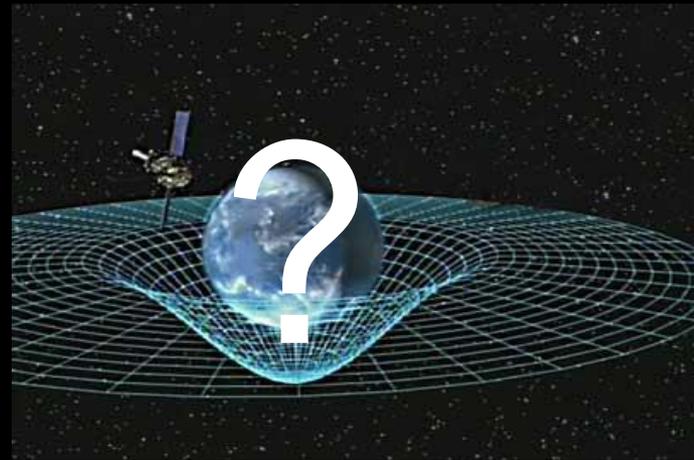
Force electromagnetique



Force forte

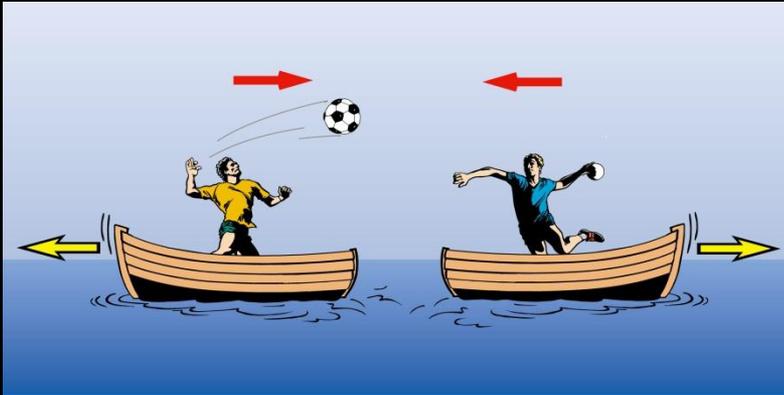


Force faible



Gravite

Les forces vues par les physiciens des particules..



Particule A

⋮

Messenger de l'interaction

⋮

Particule B

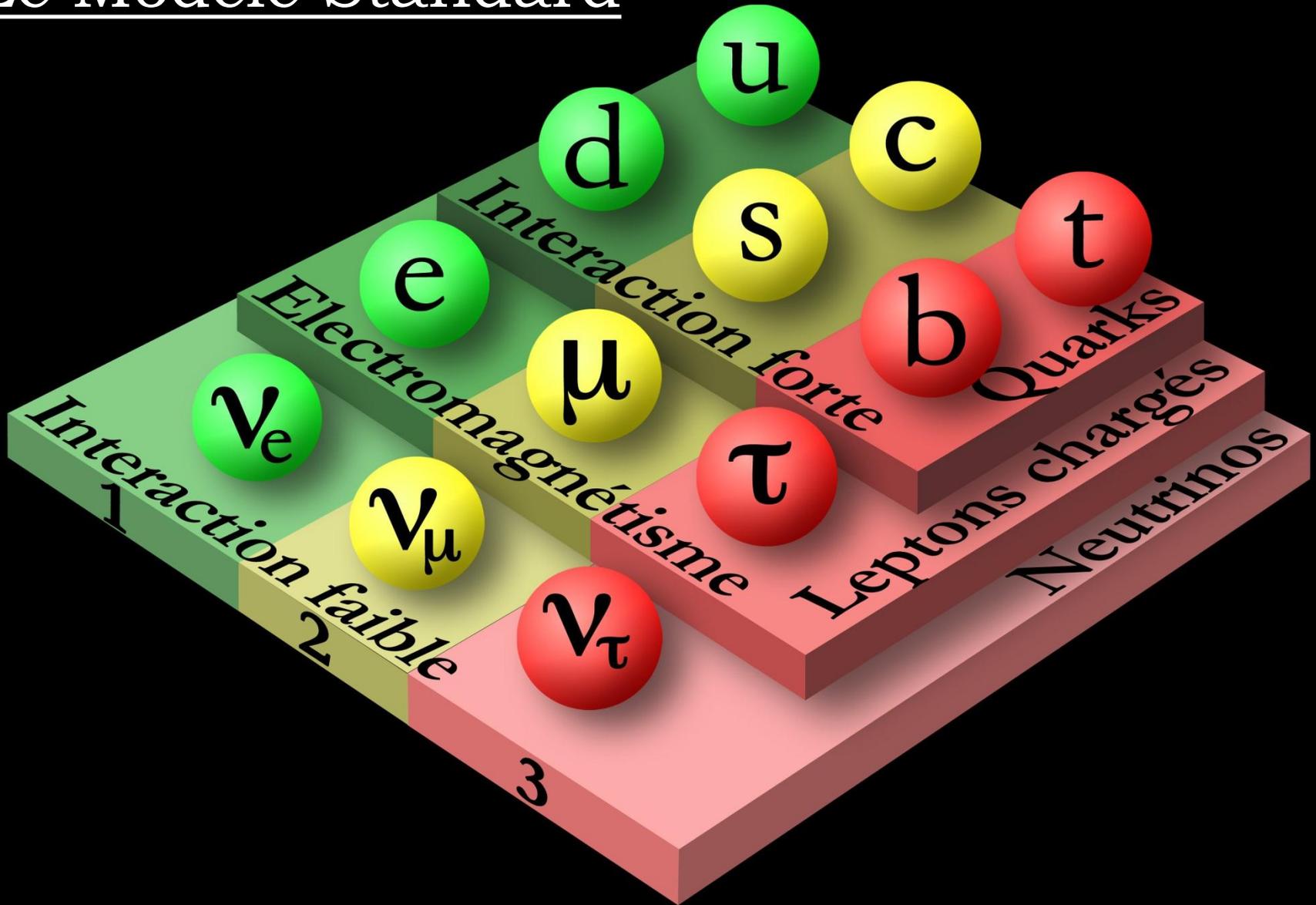
Le messenger de l'interaction est une particule.

Il y a **4 interactions** : elles se différencient par :

- type de messenger (c'est à dire la particule)
- portée de l'interaction (qui dépend de la masse du messenger)*
- La charge du messenger

* Plus le ballon est lourd, plus les joueurs doivent être proches

Le Modèle Standard



Le Modèle Standard codifie tout ce que l'on sait :
Matière, Interaction, Unification

Mais le Modèle Standard ne peut pas expliquer pourquoi
les particules ont une masse

On postule donc une nouvelle interaction.....et donc
une nouvelle particule !

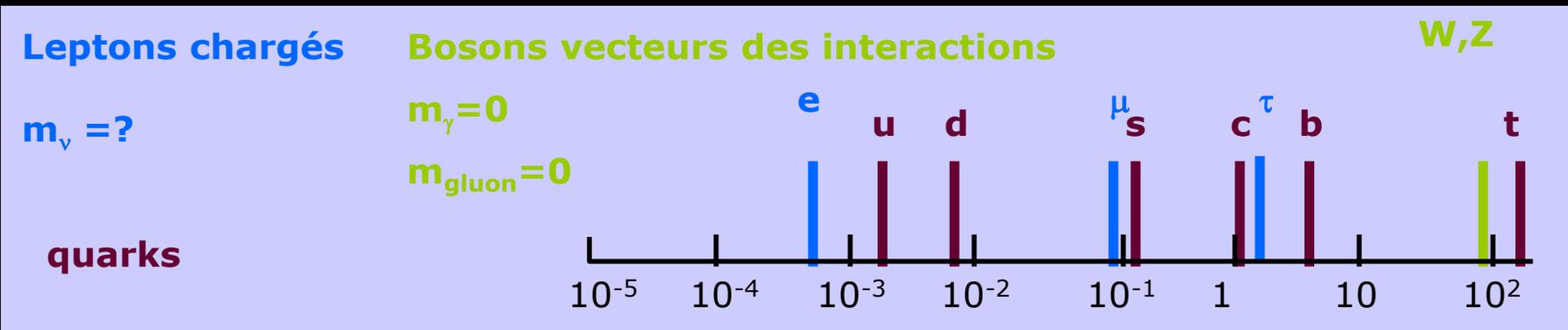
La particule de Higgs

Détermine les masses des particules élémentaires :
Particules de matière
Particules d'interaction

L'Enigme de la masse

D'ou vient la masse ?

Pourquoi les constituants de la matière ainsi que les particules qui véhiculent les interactions ont-elles des masses si disparates ?



Le particule de Higgs

La physique (des particules) est basée sur des principes de symétrie

Si toutes les particules sont de masse nulle le modèle est totalement symétrique

Expérimentalement on sait que les particules ont des masses

Mécanisme de Higgs



Un champ de Higgs remplit tout l'espace-temps

Les particules interagissent avec ce champ \Rightarrow leur mouvement est ralenti \Rightarrow effet d'une masse

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

Higgs n'était pas le seul théoricien à travailler sur ce problème.



Higgs

Kibble

Guralnik

Hagen

Englert

Brout†

Mécanisme de Higgs en images



Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

Mécanisme de Higgs en images



... Albert Einstein entre, créant une perturbation sur son passage et attirant un essaim d'admirateurs à chaque pas ...

Mécanisme de Higgs en images



ce qui accroît la résistance à son déplacement : il acquiert une masse, comme une particule se déplaçant dans un champ de Higgs

Mécanisme de Higgs en images



... si une rumeur traverse la salle ...

Mécanisme de Higgs en images



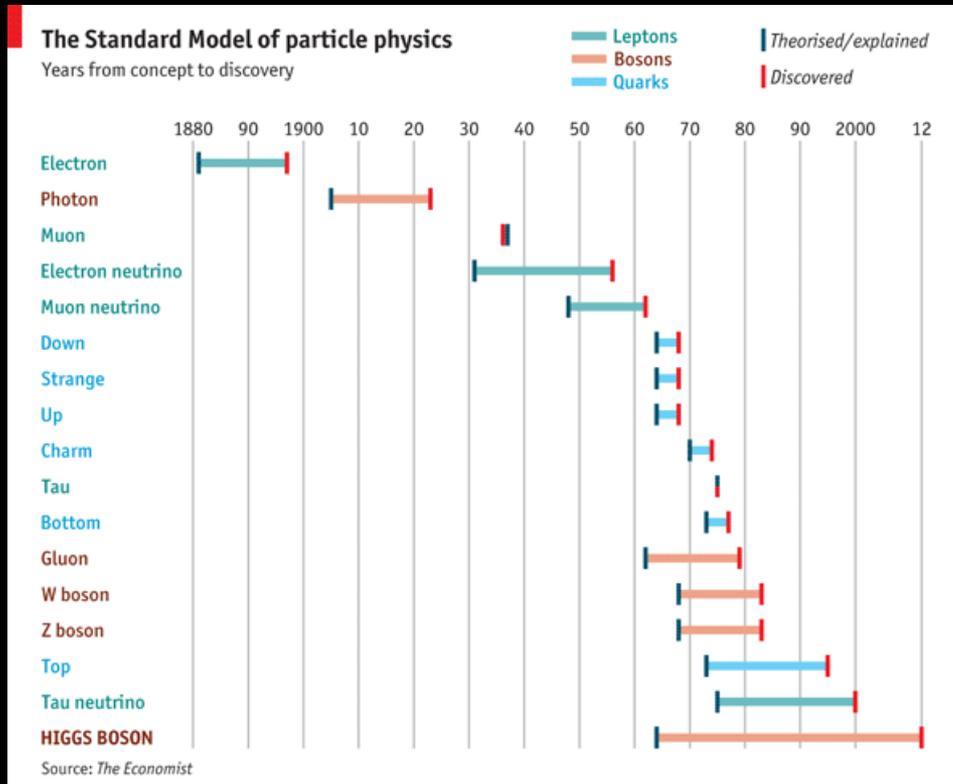
... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.

5

Le particule de Higgs tel qui est prédit par la théorie

Il faut :

- pouvoir le produire
- ... et après le reconnaître !



MAIS : la théorie ne prédit pas la masse du HIGGS !

Il faut le chercher...et cette recherche a duré presque 48 ans !!

de 1964 ... à aujourd'hui

F. Englert



P. Higgs

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout
 Faculté des Sciences, Université libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
 (Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field¹ associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.² In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.^{3,4} A

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_5 invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reason-

VOLUME 15, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs
 The Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
 (Received 21 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenom-

about the "vacuum" solution $\psi_1(x) = 0$, $\psi_2(x) = \psi_0$

$$\partial^\mu \left[\partial_\mu \psi_1 - e \psi_0 A_\mu \right] = 0, \quad (2a)$$

$$[\partial^\mu - 4e\psi_0^2 \gamma^\mu \gamma_5] \psi_2 = 0, \quad (2b)$$

$$i \not{\partial} \psi_2 - e \psi_0 \gamma_5 [\not{\partial} \psi_1 - e \psi_0 A_\mu \gamma^\mu] = 0, \quad (2c)$$

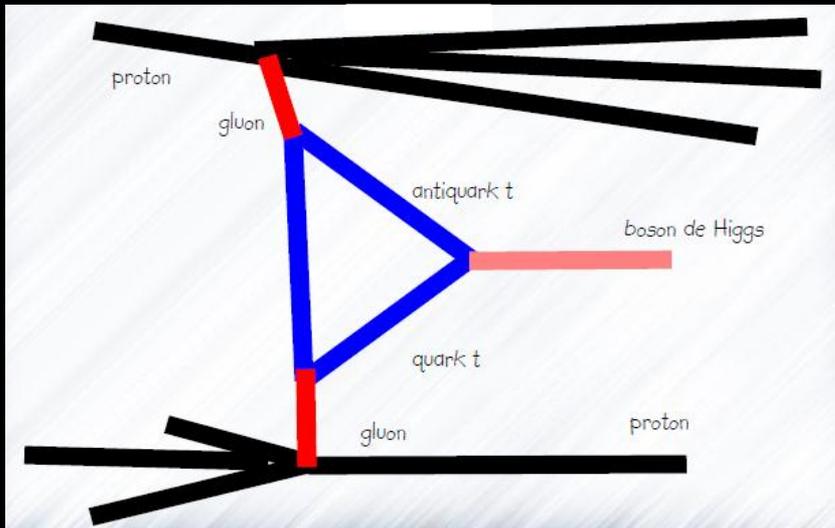
Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2e\psi_0^2 \gamma^\mu \gamma_5 \gamma_\mu \gamma_5$. Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - e \psi_0 \gamma_5 \gamma^\mu \gamma_5 \int \Delta \psi_1,$$

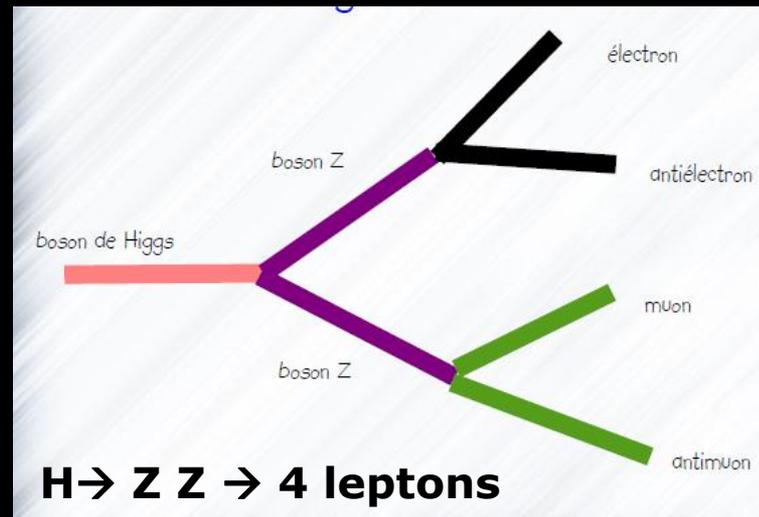
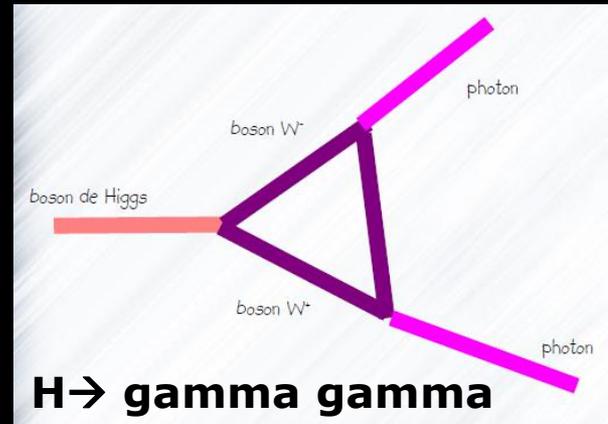
Plus précisément...comment chercher le boson de Higgs ?

La théorie nous dit comment le boson de Higgs est produit et comment il se désintègre.

PRODUCTION



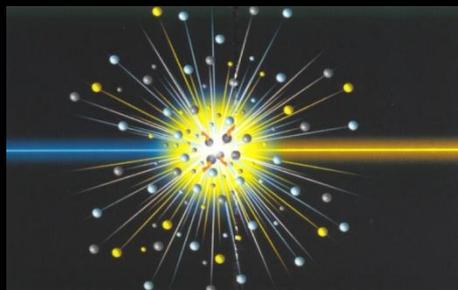
Exemples de DESINTEGRATION



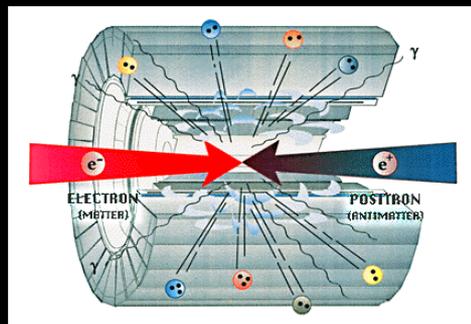
Les accélérateurs

Collision de particules accélérées → « Grain » d'énergie → Nouvelles particules

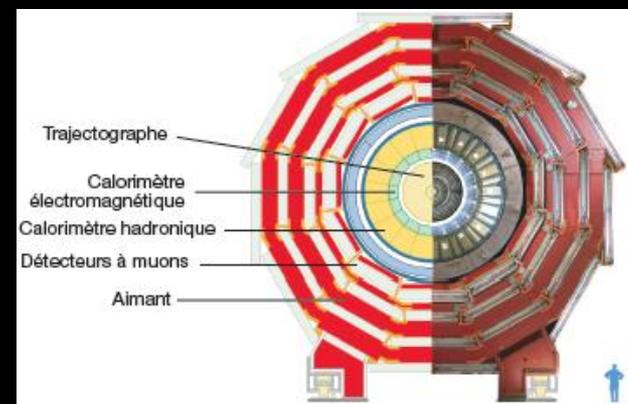
Accélérateur



$$E = mc^2$$



Détecteur



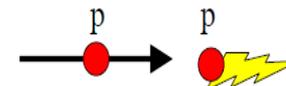
Pouvoir de resolution

$$\lambda(m) = 1.24 \cdot 10^{-15} / P(\text{GeV}/c)$$

$$14\text{TeV} \rightarrow 9 \times 10^{-17} \text{ m}$$

• astuce des collisionneurs

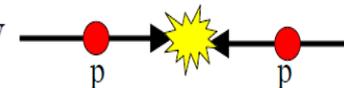
proton $E = 7 \text{ TeV}$ sur proton au repos



énergie disponible

0.12 TeV

collision frontale de 2 protons $E = 7 \text{ TeV}$



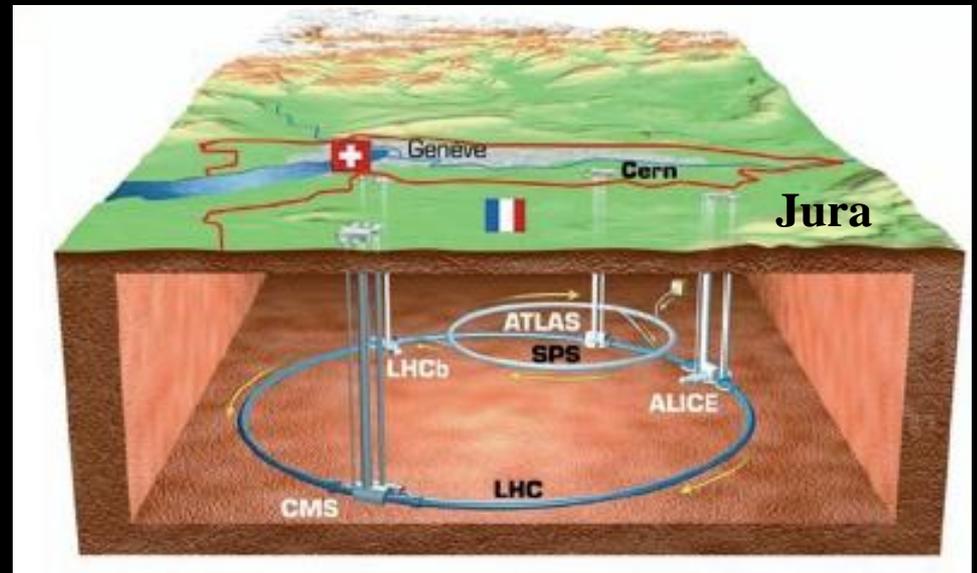
14 TeV

⇒ dans la collision frontale toute l'énergie est disponible

- Précision d'horlogerie au-milieu d'une grosse machine
 - Taille de la zone de collision : $\sim \text{cm}$ (plutôt moins)
 - Taille de l'accélérateur : $\sim \text{km}$ (plutôt plus)

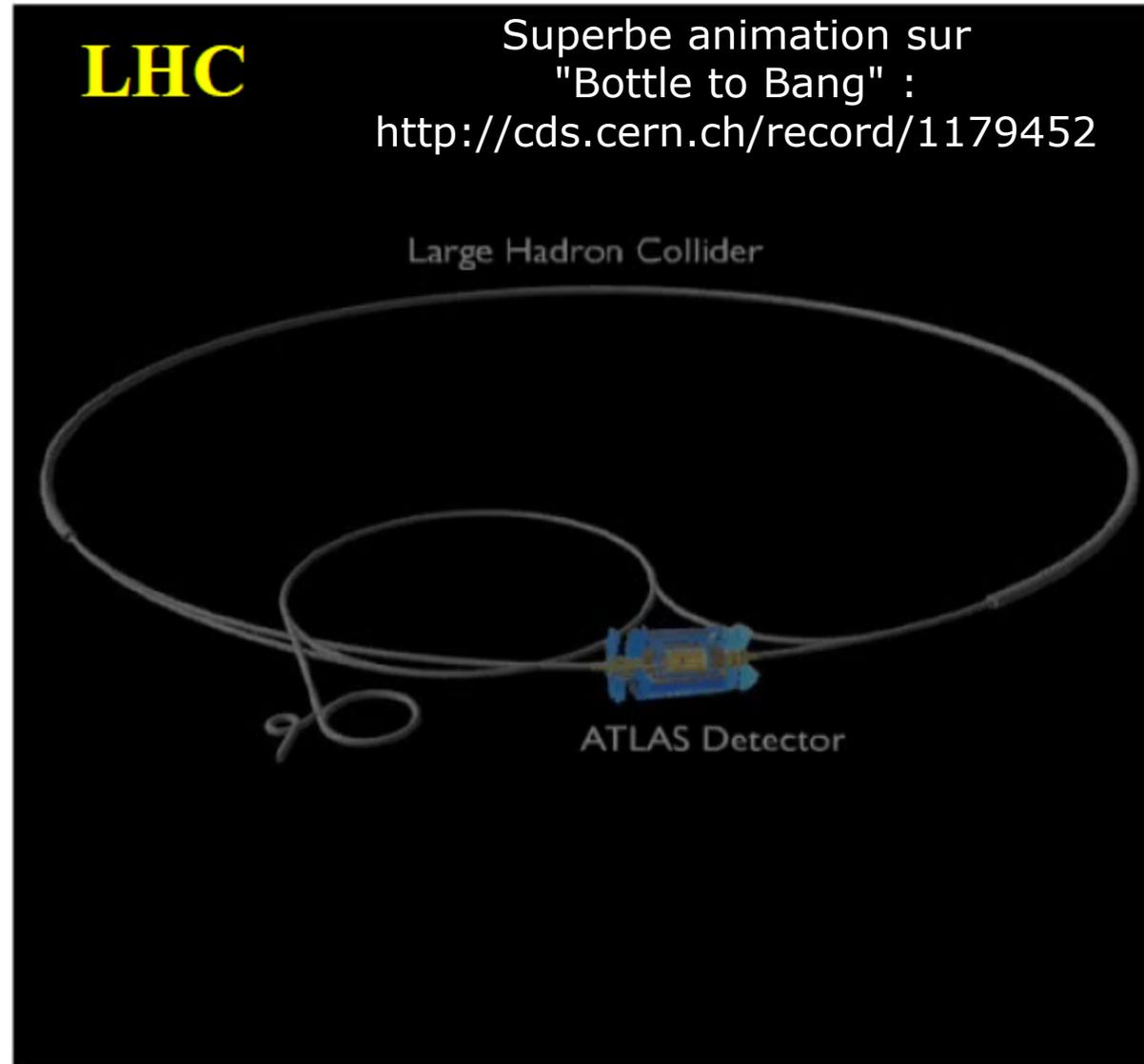
Le LHC

- Anneau quasi-circulaire de ~ 27 km de circonférence creusé à ~ 100 m sous terre
- 2 faisceaux de protons (ou d'ions Pb selon les périodes) y circulent en sens opposé
- Ils se croisent au centre de 4 détecteurs géants (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) où se produisent les collisions dont les produits sont étudiés par les physiciens
- Les particules sont accélérées par tout une série d'accélérateurs en amont ; la dernière phase de ce processus a lieu dans l'anneau LHC lui-même



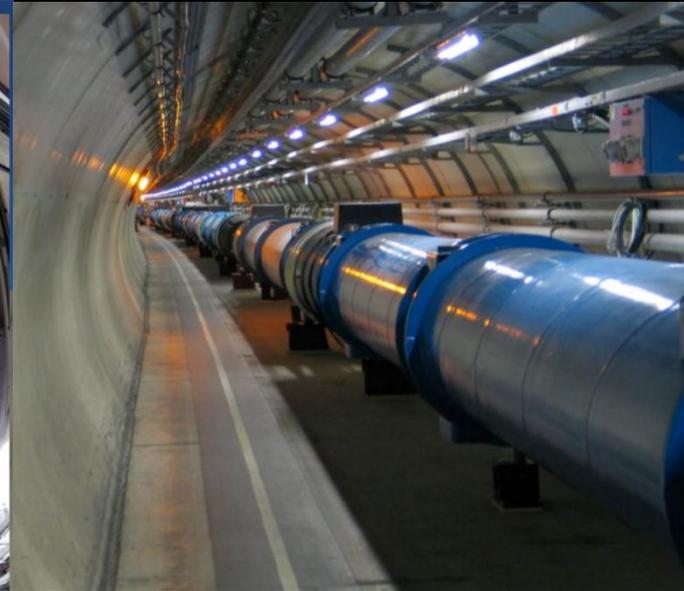
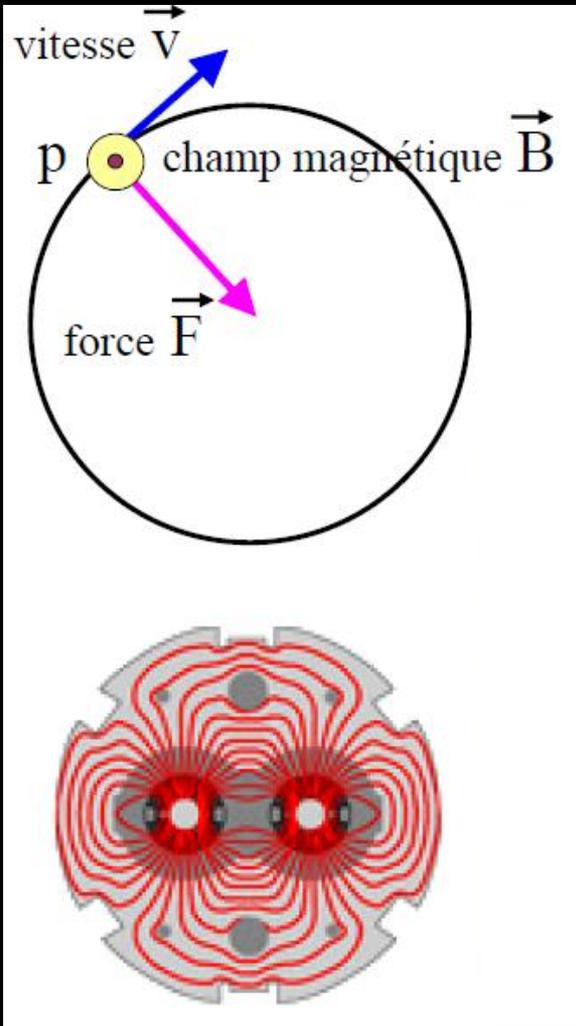
Le complexe d'accélérateurs du CERN

- Linac**
injection 0 → 50 MeV
- Booster**
→ 0.4 GeV
- PS**
→ 28 GeV
- SPS**
→ 450 GeV
- LHC**
→ 7 TeV



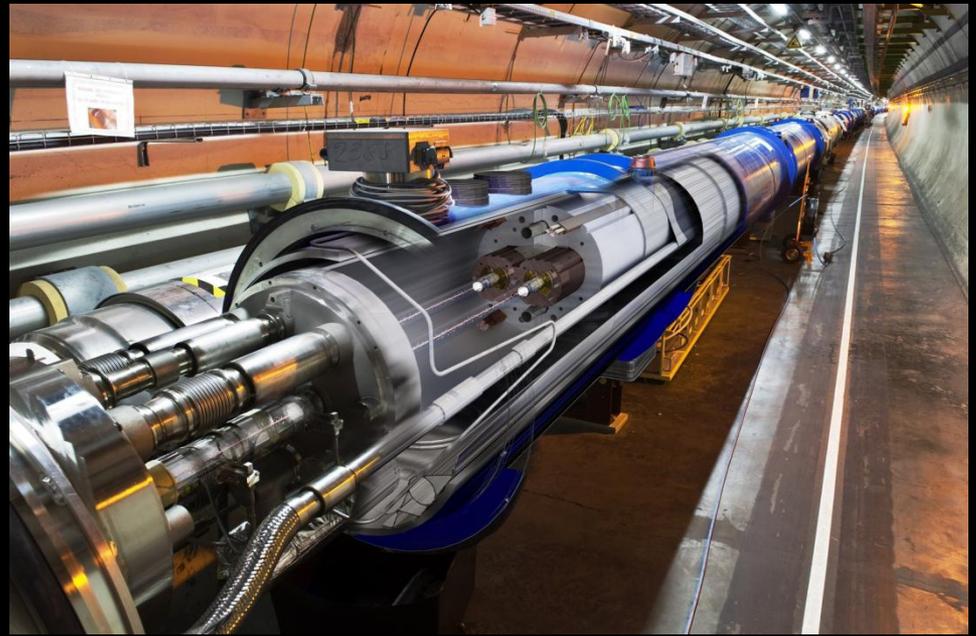
LES AIMANTS DU LHC UN DEFI TECHNOLOGIQUES FORMIDABLE

- Plus de 1000 aimants à 8,3 Tesla
- Deux tubes à vide avec des champs magnétiques opposés
- Supraconductivité (hélium superfluide à -271 C)



- 9600 aimants
- 1200 dipôles
- 16 cavités accélératrices

Et encore des chiffres...

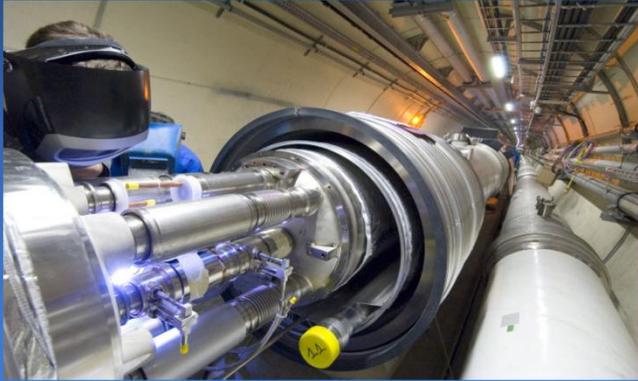


- Les particules accomplissent 11 000 tours / seconde à la vitesse de la lumière
- 2808 paquets. Espace entre paquets : 7.5 m (25 ns). Longueur du paquet : 30 cm
 1.15×10^{11} protons par paquet
- Les particules se croiseront \sim 40 millions de fois par seconde dans les détecteurs et chaque interaction produira \sim 20 collisions proton-proton
→ Production de nouvelles particules : \sim 100 000 par seconde
- Il y aura \sim 300 000 000 000 000 de protons en même temps dans le LHC

Le LHC et l'usage des superlatifs !

Un espace plus vide que le système solaire (10^{-13} atm) :

→ 10 fois moins dense que sur la Lune.



Température $\approx -271^\circ$ Celsius soit $1,9^\circ$ au dessus du zéro absolu
→ plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K)



Plusieurs milliers de milliards de protons lancés à 99,9999991% de c
Ils feront plus de 11000 fois par seconde le tour de l'anneau de 27 km !

Consommation d'électricité : ~ 400 GWh/an (5% de la consommation de la SNCF)

Pour comparer...

Energie d'un proton dans le LHC : 7 TeV c'est à dire $7 \cdot 10^{12}$ eV

1 eV c'est une quantité infime d'énergie $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



$$m_{\text{guêpe}} = 1\text{g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{\text{guêpe}} = 1\text{m/s} \rightarrow E_{\text{guêpe}} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

Ceci dit...dans le LHC...

L'énergie totale dans les faisceaux est de :

$$10^{14} \text{ protons} \times 14 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx 1 \cdot 10^8 \text{ J}$$

qui correspond à



$$M_{\text{poids lourd}} = 100 \text{ T}$$

$$V_{\text{poids lourd}} = 120 \text{ km/h}$$

Ce qui est exceptionnel dans le LHC, c'est qu'il concentre l'énergie dans un espace environ mille milliards de fois plus petit qu'une guêpe !

L'un des premiers collisionneur a été construit il y a 50 ans à Orsay !

ACO = Anneau de Collisions d'Orsay
Monument historique
Se visite sur demande :
<http://www.sciencesaco.fr/>

dispositif
d'accélération

(1962-1988)

chambre
à vide

pompe à
vide

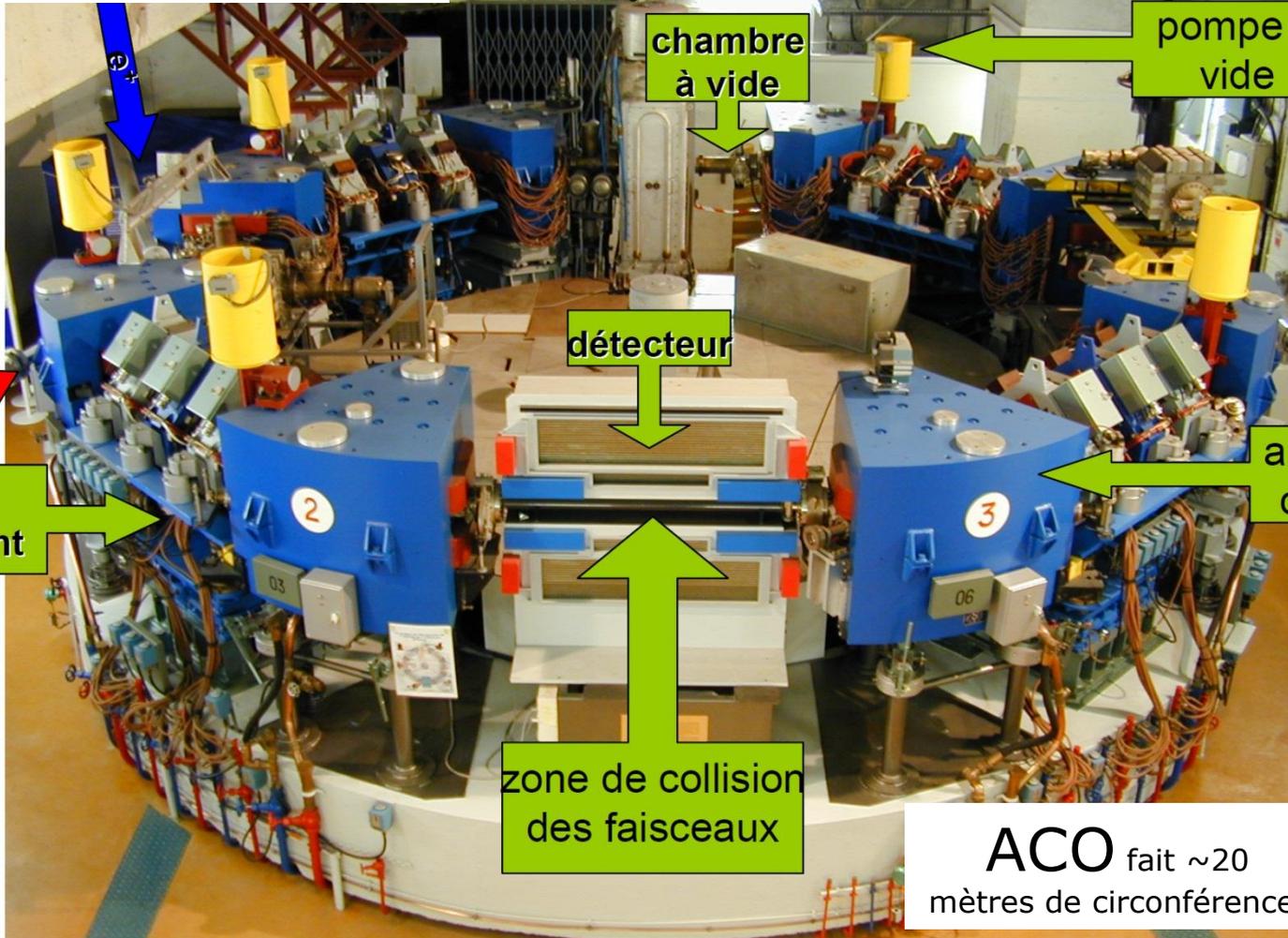
détecteur

aimant de
coubure

aimant
focalisant

zone de collision
des faisceaux

ACO fait ~20
mètres de circonférence.



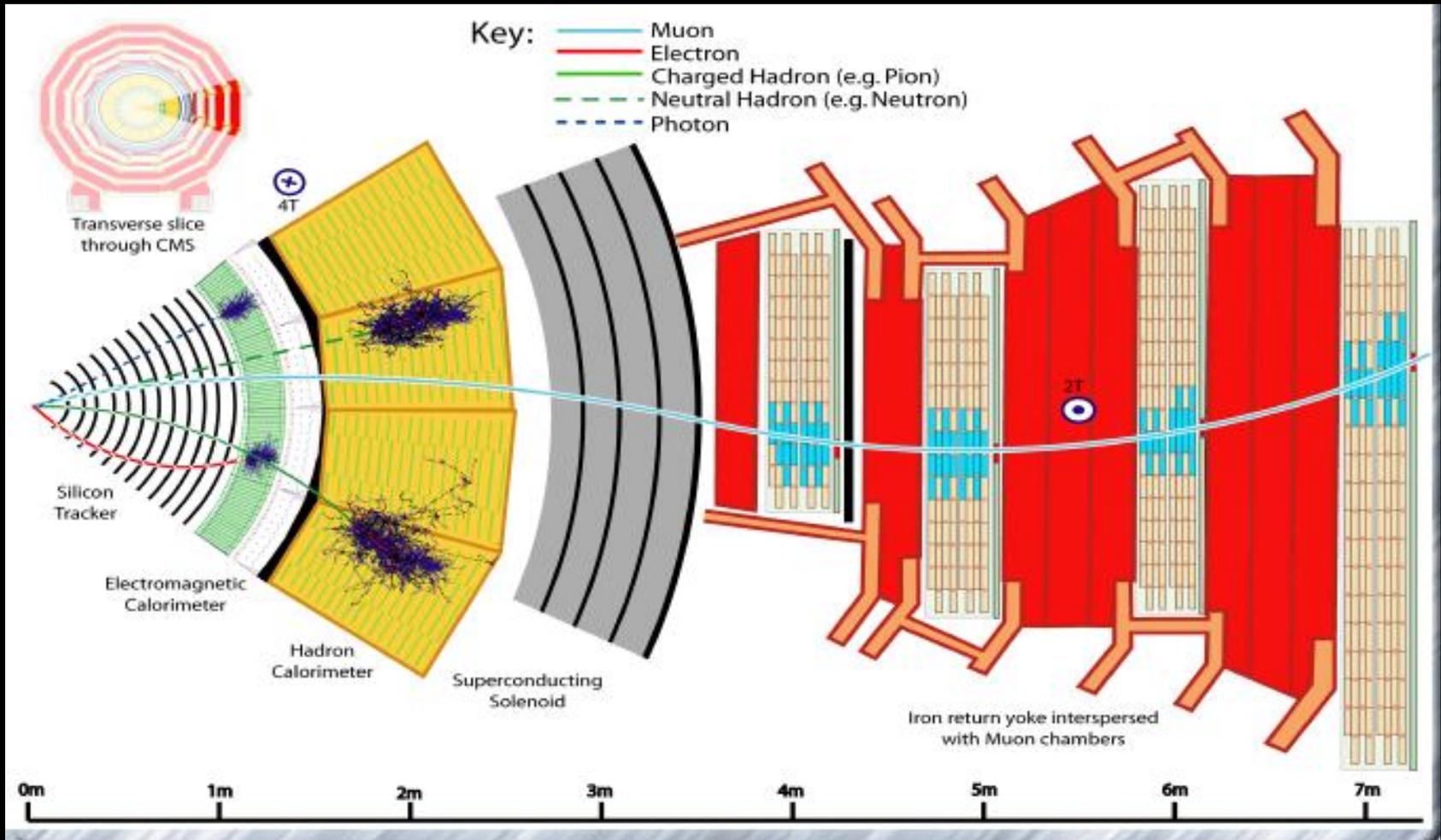
Un détecteur de particules pour quoi faire ?

- Que faut il savoir ?
 - Quelles particules voyons nous ?
 - D'où viennent elles et ou vont elles ?
 - Quelles sont leurs impulsion et énergie ?
- De façon à pouvoir répondre à :
 - Que s'est il passé lors de la collision des 2 protons ?
 - Quelque chose d'intéressant a-t-il été produit ?
- Parfois les « choses intéressantes » se désintègrent en d'autres particules plus légères et stables

Il faut donc se concentrer sur les particules stables et faire un travail de détective. Il faut comprendre ce qui s'est réellement passé à partir des traces et empreintes laissées sur le lieu de l'action !

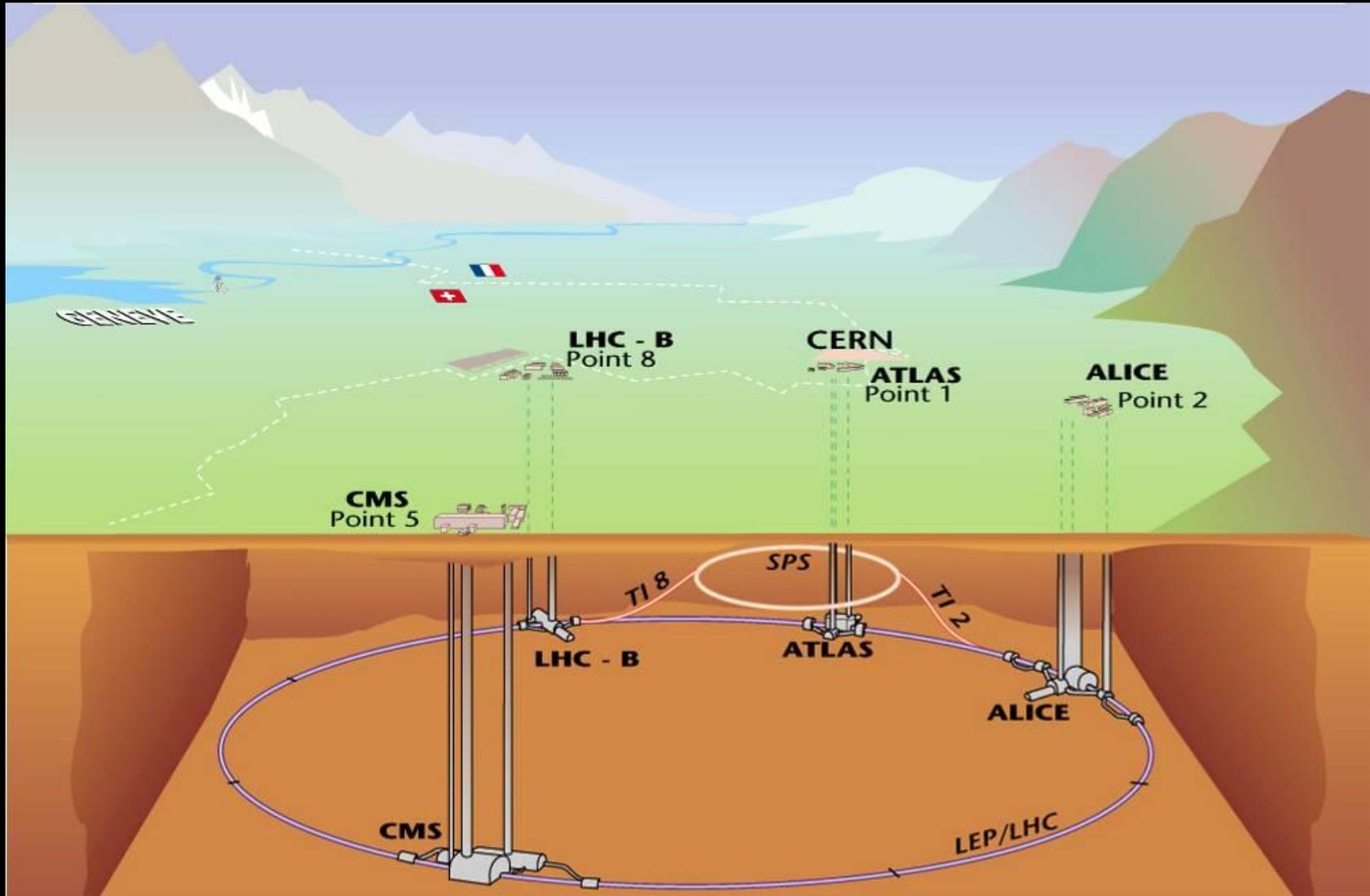


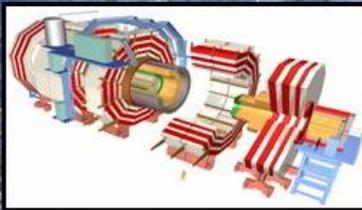
Comment détecter les particules élémentaires



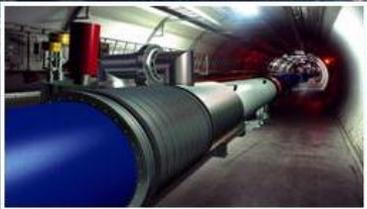
Animation très pédagogique sur :
http://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/wpath_teilchenid1.htm

ATLAS, CMS, LHCb and ALICE quatre expériences pour tenter de répondre à ces questions ...

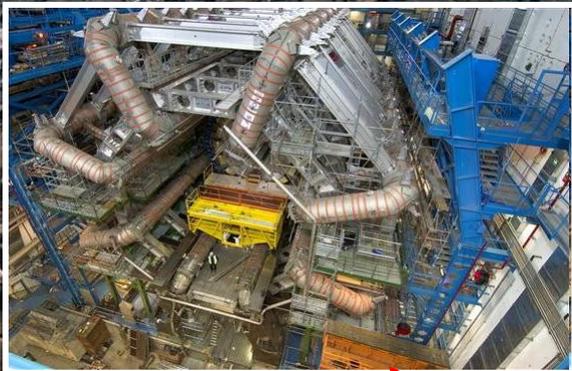




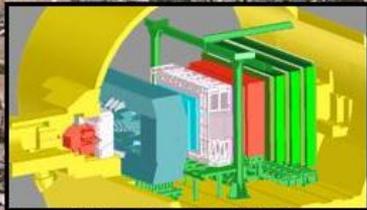
CMS



Aéroport de Genève



ATLAS



LHCb



ALICE

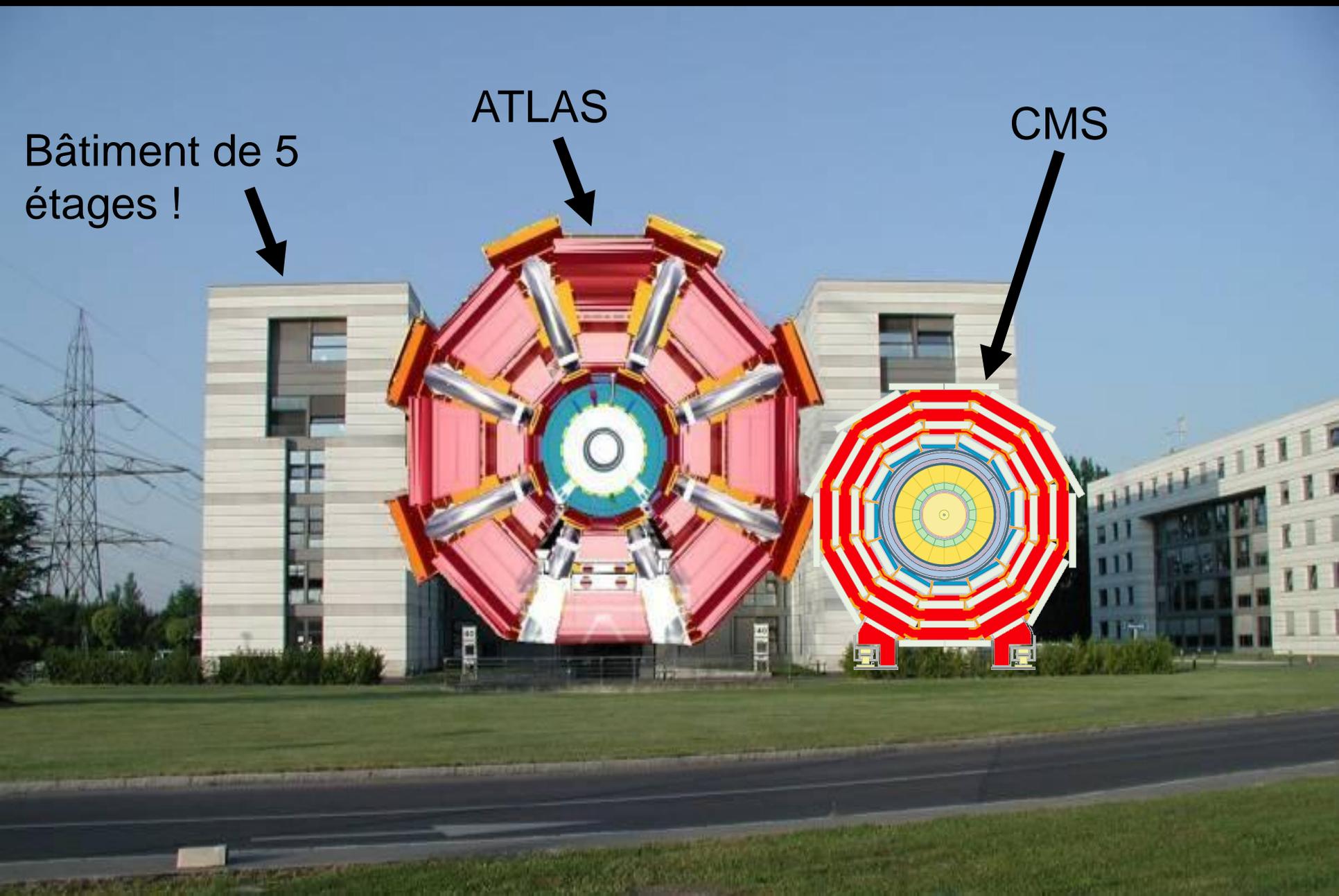


ATLAS et CMS deux géants

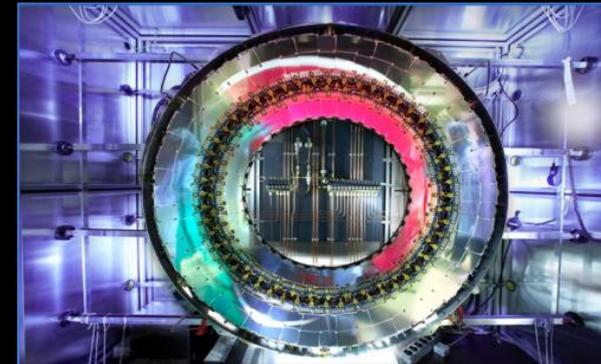
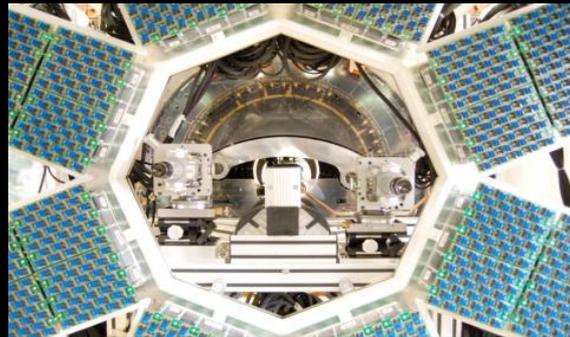
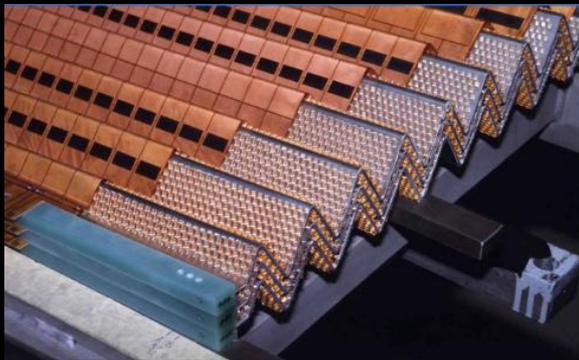
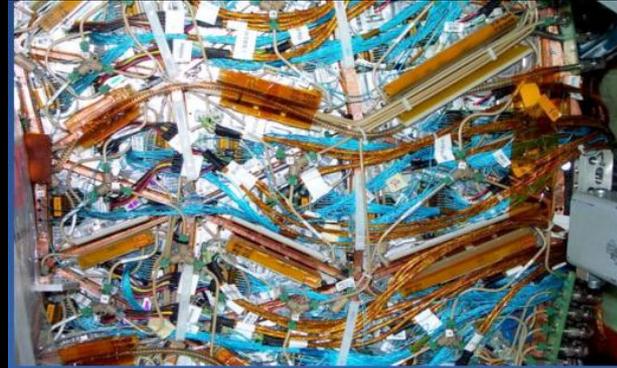
Bâtiment de 5 étages !

ATLAS

CMS

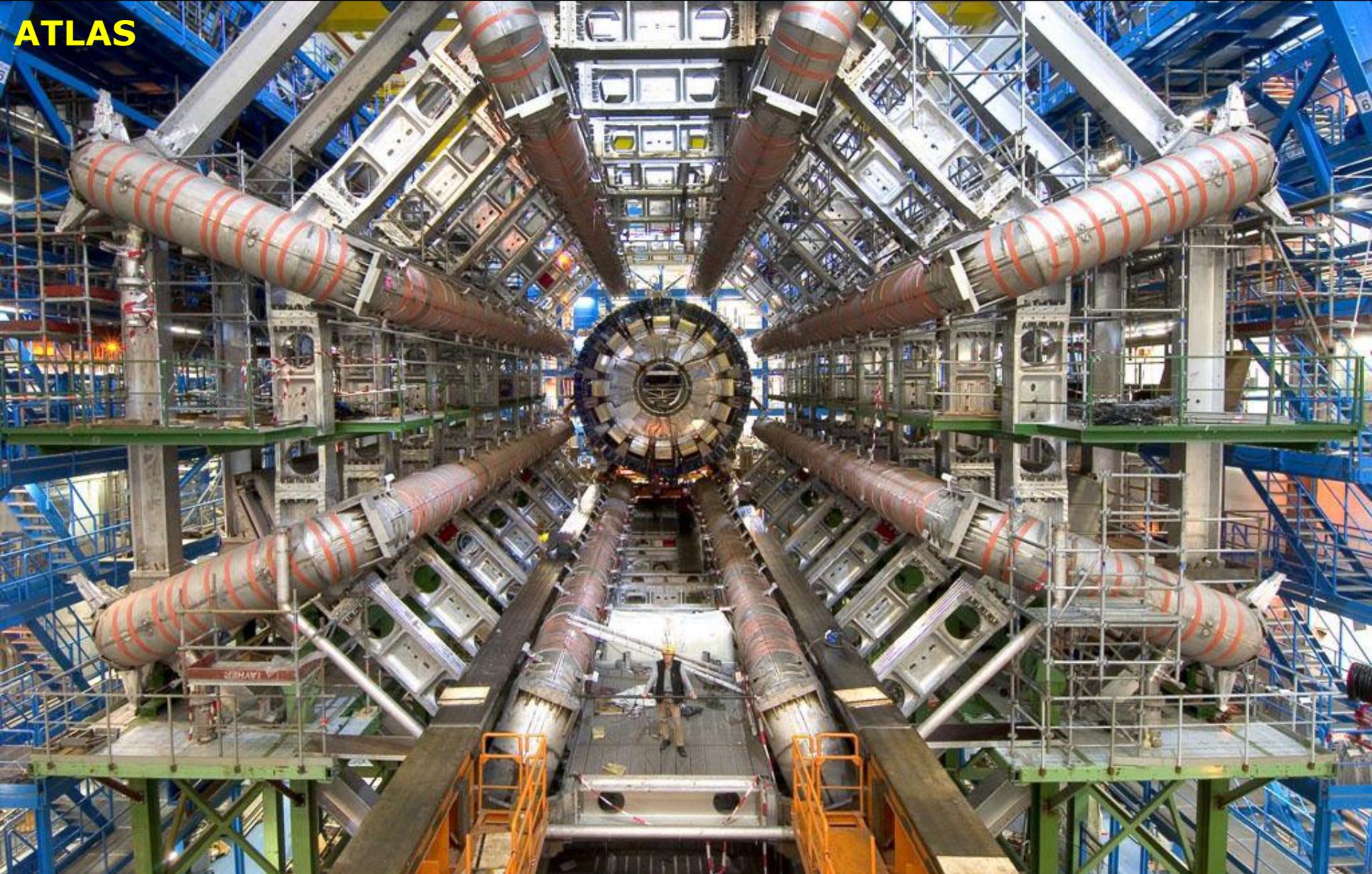


Les détecteurs : les défis technologiques



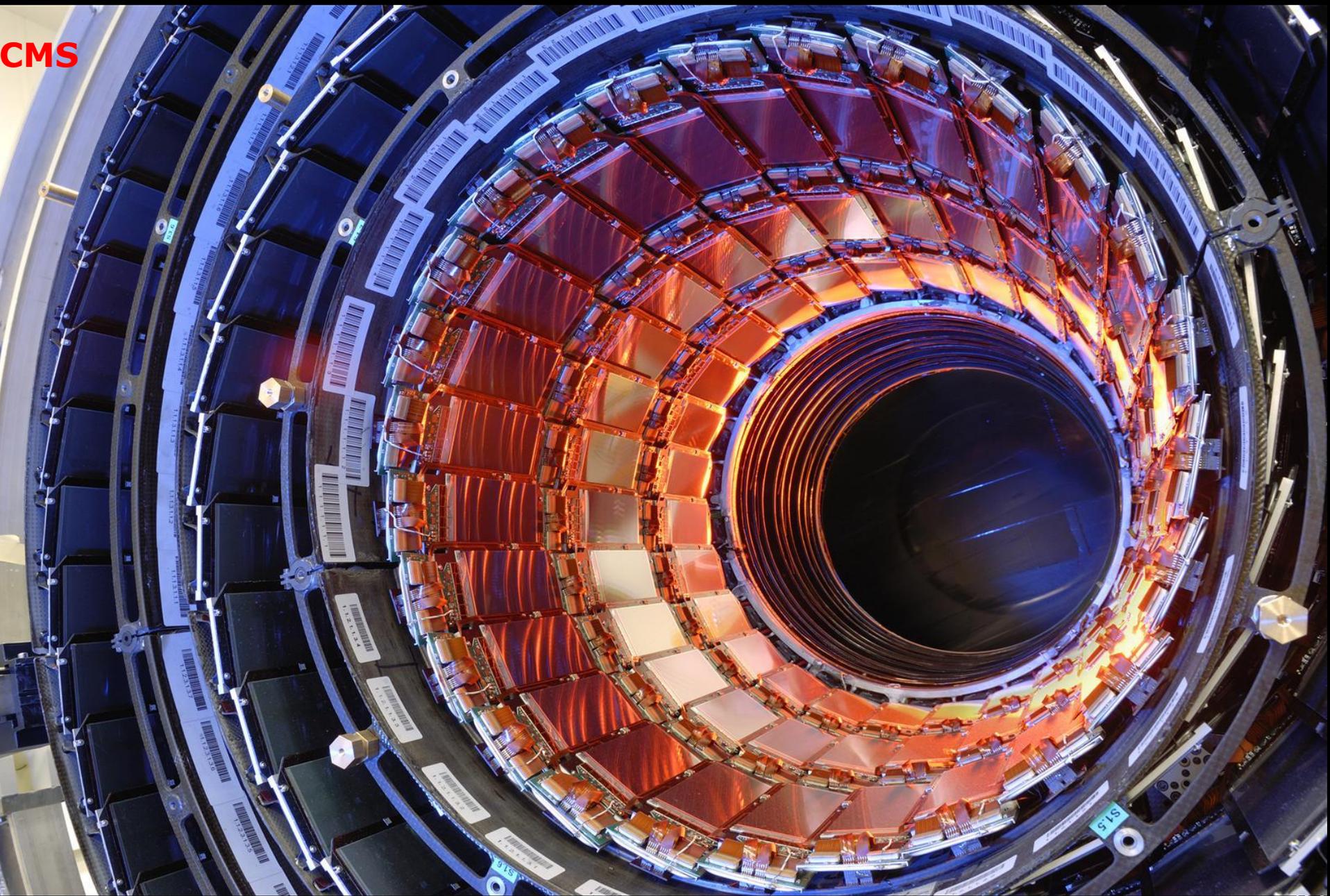
Les empreintes laissées par le boson de Higgs et éventuellement par de nouvelles particules encore inconnues sont recherchées.

ATLAS



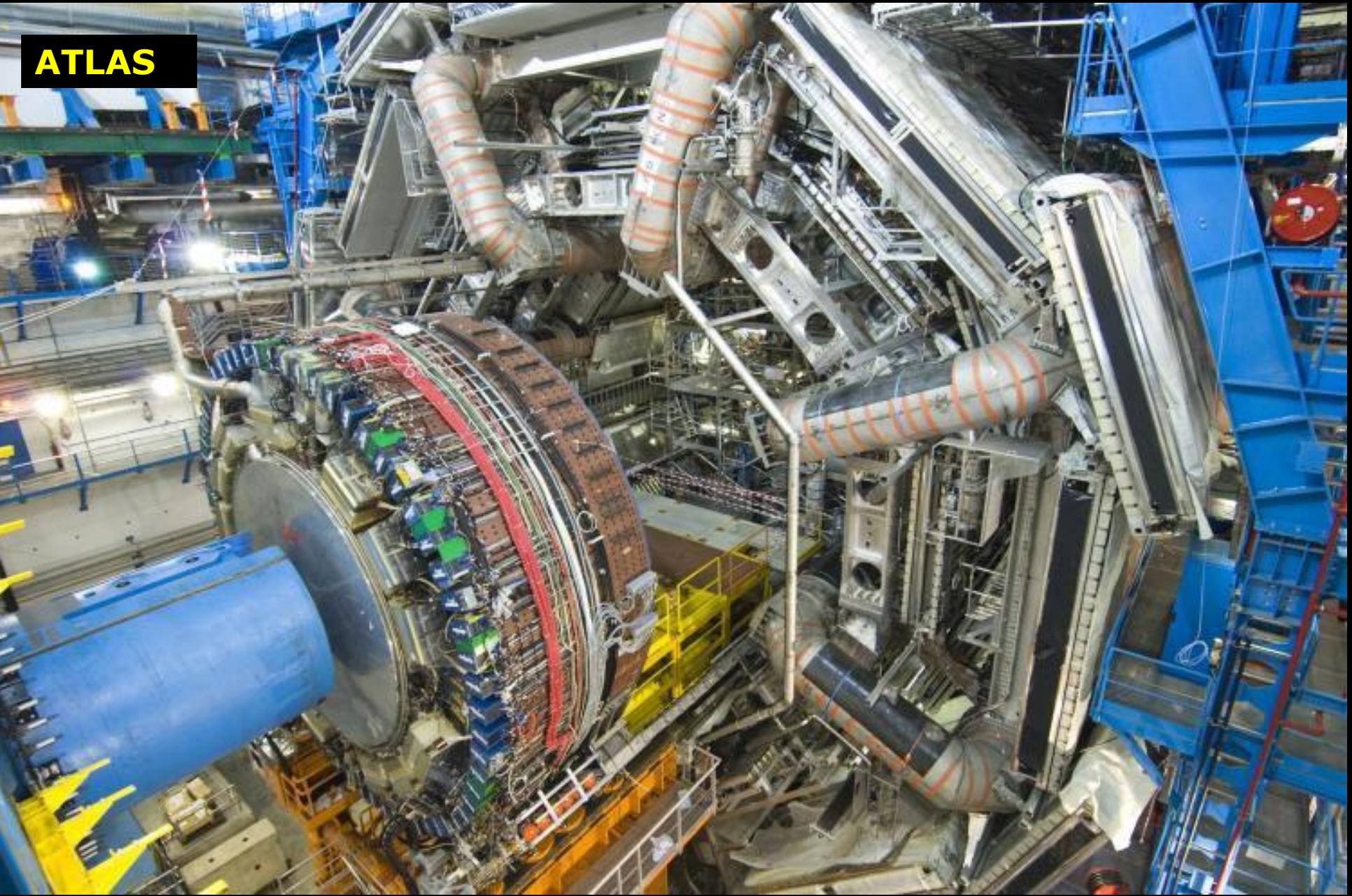
grâce à des détecteurs au silicium équipés de millions de canaux

CMS



et l'énergie des particules stables est mesurée dans des calorimètres

ATLAS



- Un détecteur typique au LHC a environ 100 millions de capteurs individuels (c.f. un appareil photo numérique typique a quelques millions de pixels)

Et il prend une "photo" 40 millions de fois par seconde !

Ces données sont filtrées

⇒ une centaine de collisions par seconde potentiellement intéressantes.

Le flux de données des quatre expériences :
700 Mo par seconde

⇒ 15 000 000 Go (15 Po) par an

Ballon-sonde (~30km)



Pile de CD avec 1 an de données LHC! (~20km)



Long courrier (~10km)



Mont Blanc (4,8km)



D'immenses détecteurs à la pointe de la technologie construits par des milliers de physiciens, ingénieurs et techniciens du monde entier pendant 15 ans

Des moyens de calcul hors du commun

L'accélérateur de particules le plus puissant au monde

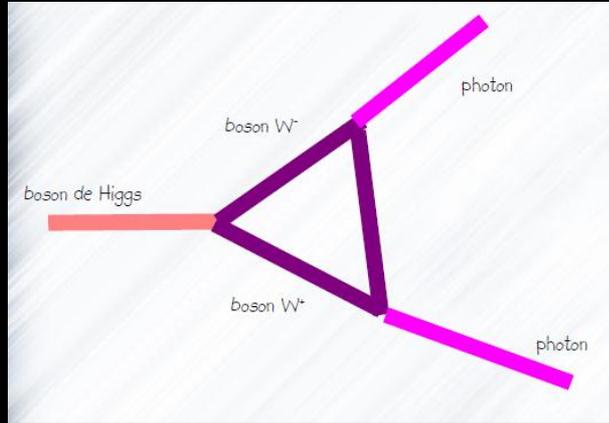
Le cocktail au démarrage du LHC



UN EXEMPLE

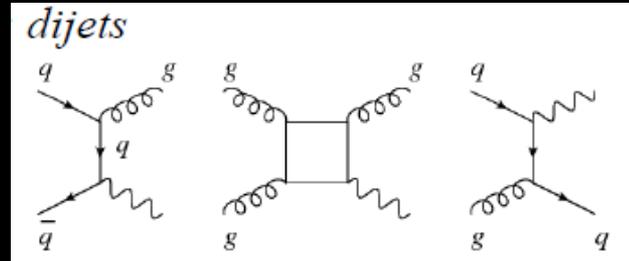
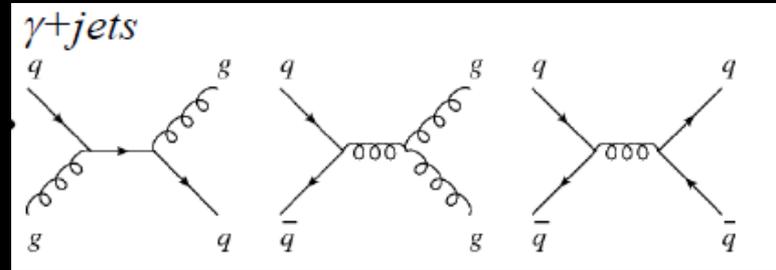
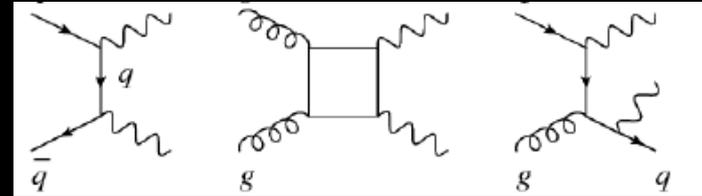
A la recherche du boson de Higgs !!

Rappelez vous de la façon dont le boson de Higgs se désintègre



Les bruits de fonds

Mais il y a d'autres processus avec deux photons dans l'état final....



...et le boson de Higgs est produit une fois sur 10 milliard de collisions tandis que les événements de bruits de fond sont produit plusieurs millions de fois...

Chercher des aiguilles dans une botte de foin



Il faut essayer d'enlever la paille...et garder les aiguilles..

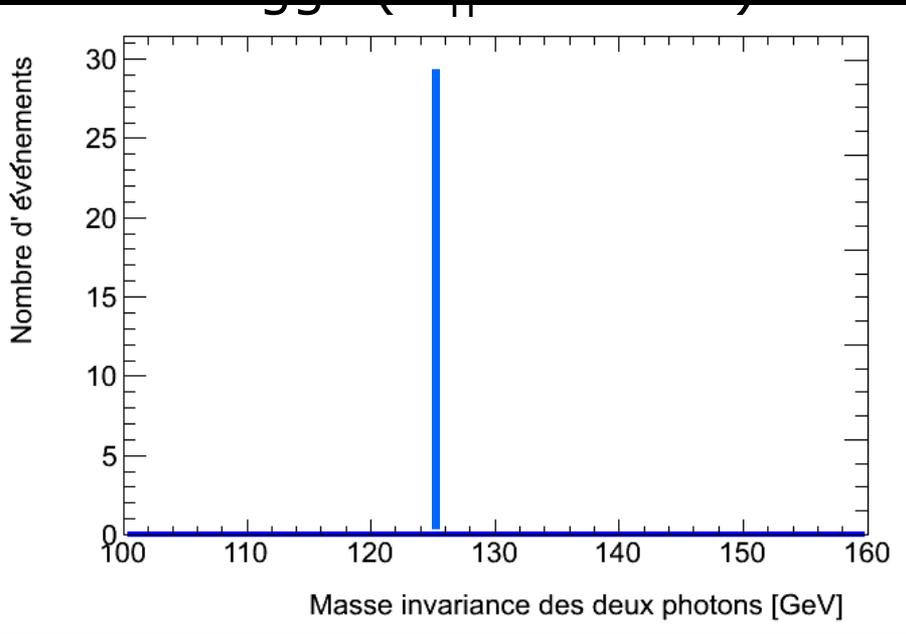


Cela est le métier du physiciens analyste, essayer de réduire les évènements de bruit de fonds (enlever la paille) sans jeter les évènements du signal (surtout pas jeter les aiguilles !!)

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

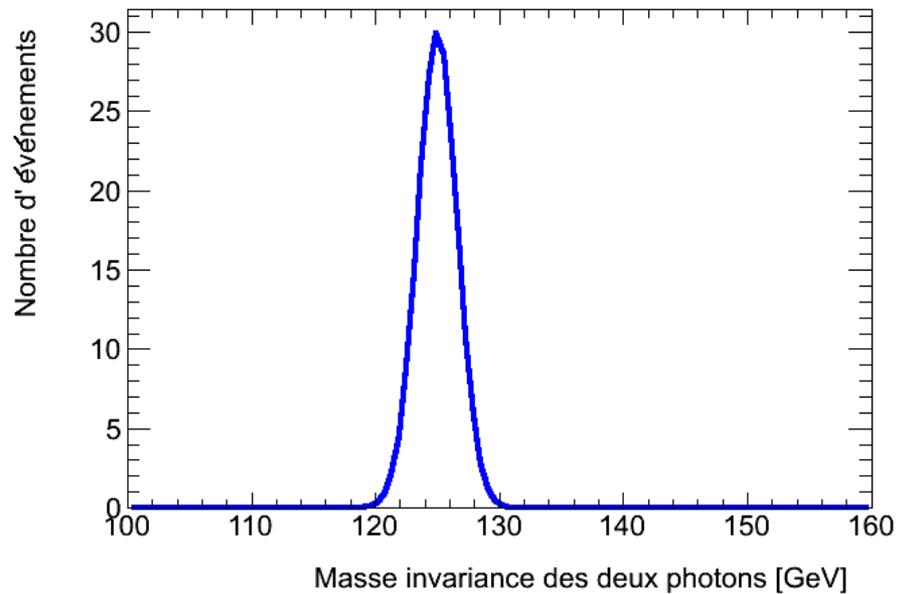
Higgs ($m_H = 125\text{GeV}$)



Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

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

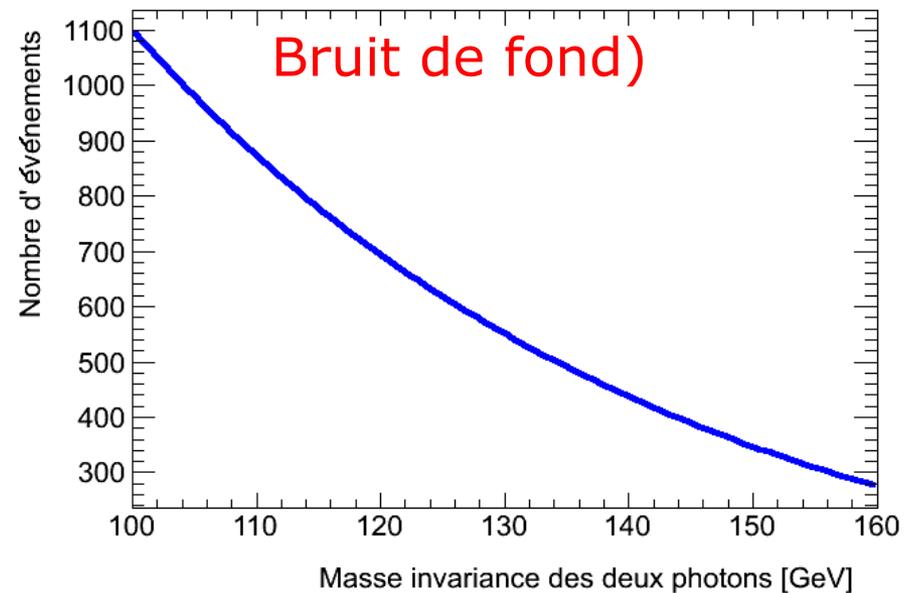
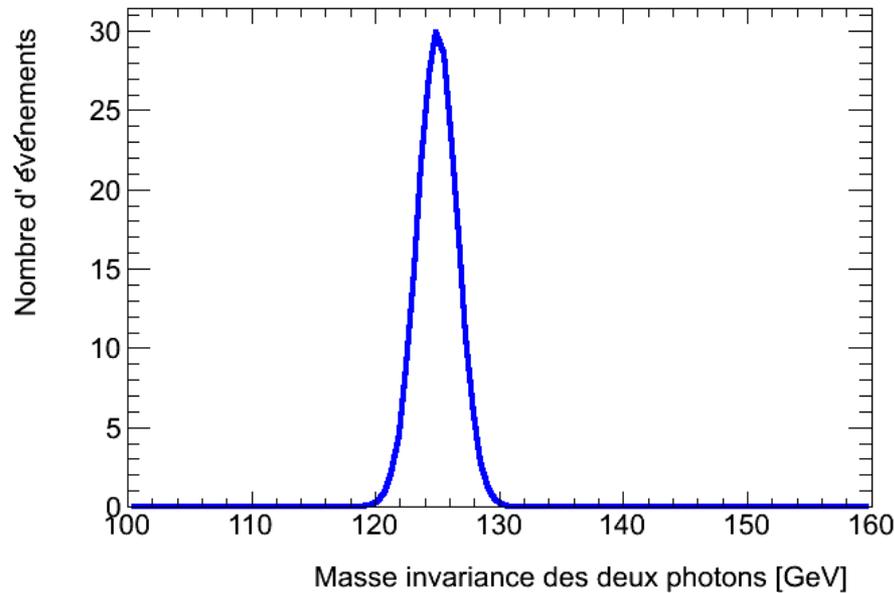


L' effet du detecteur...

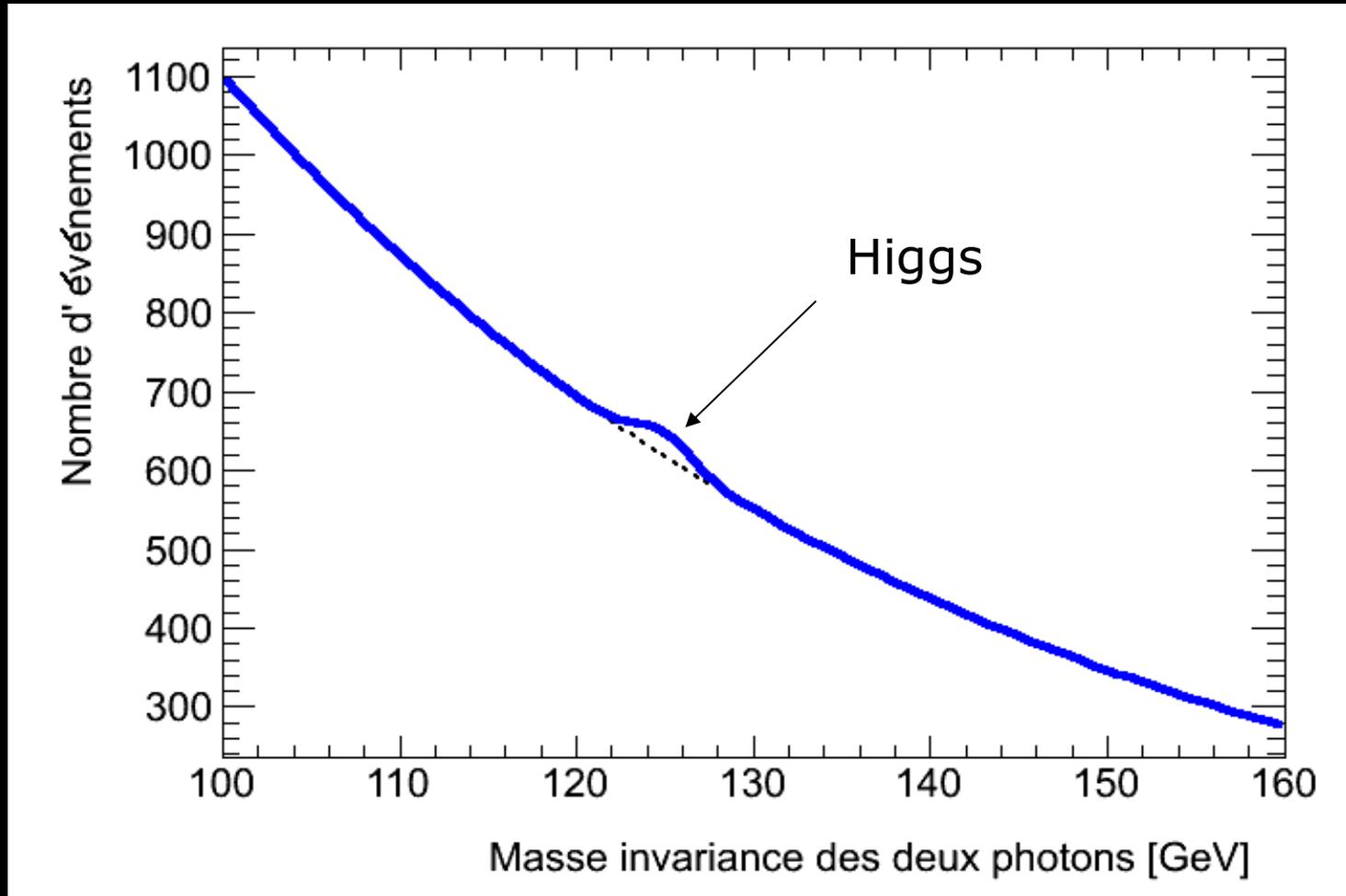
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

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

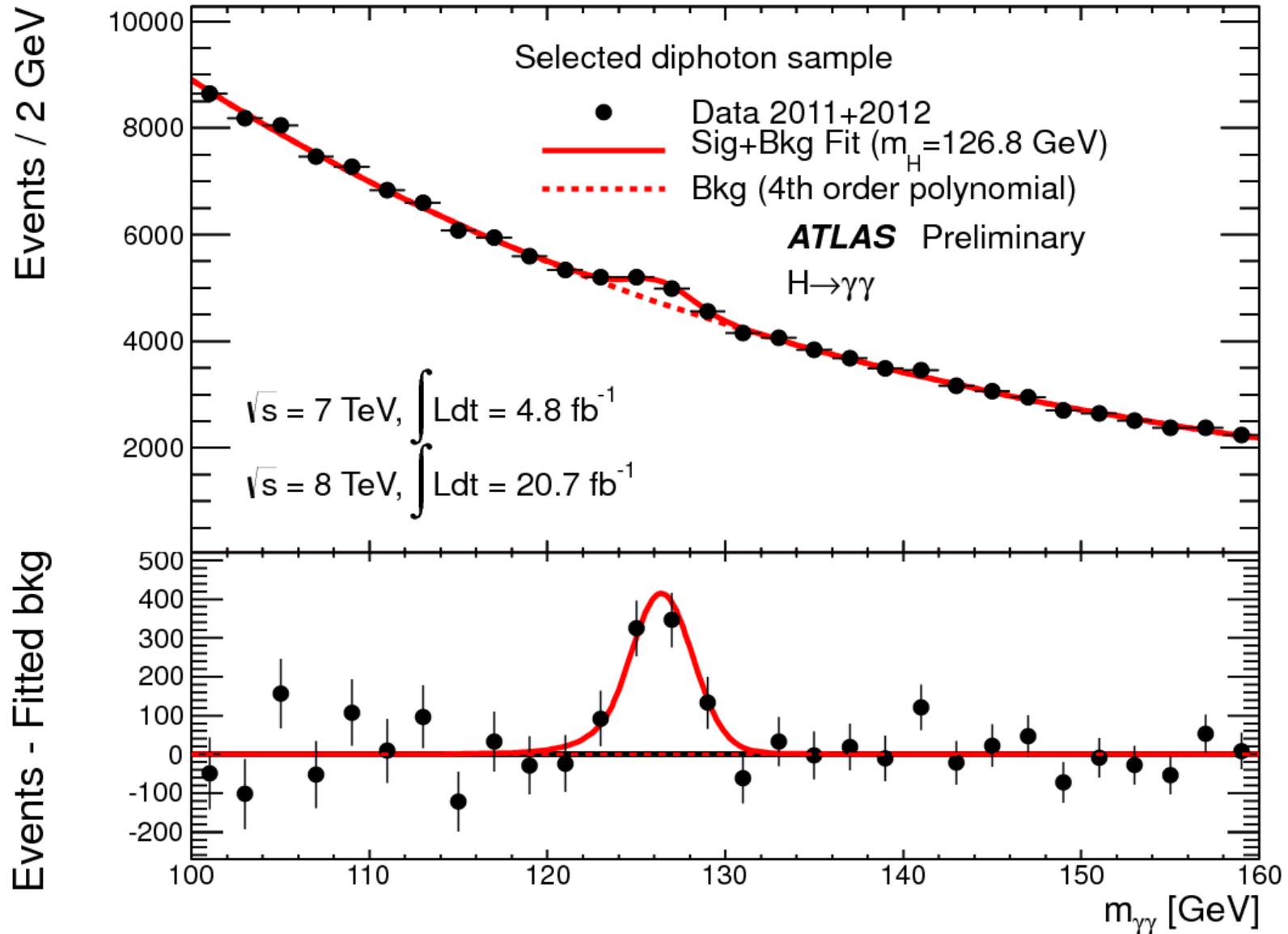


Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$: simulation



Bosse significative = boson de Higgs

Et en vrai !!



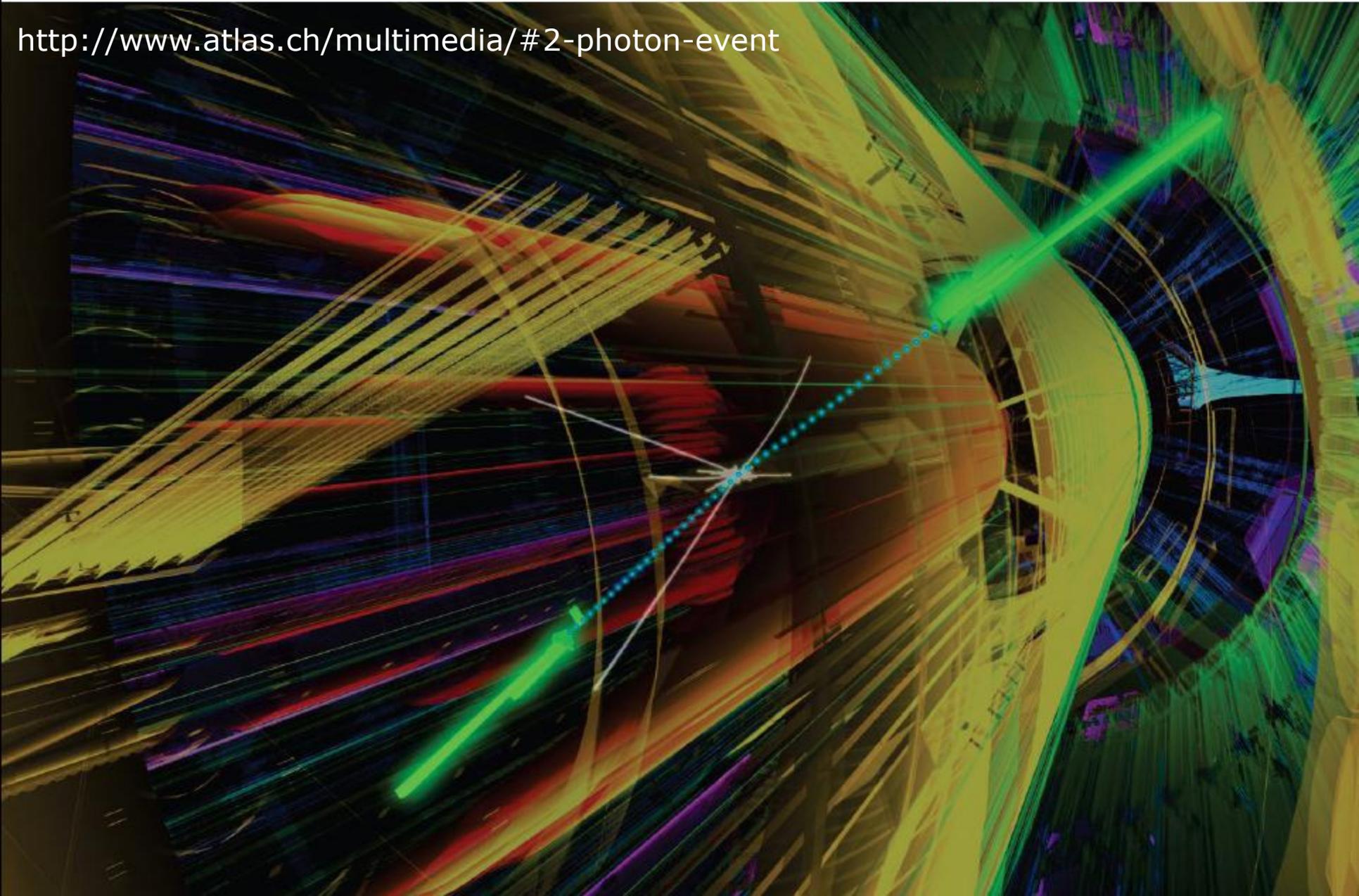
**Et voila une animation
de la découverte !**



Fichier : Hgg-FixedScale-Short2

Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

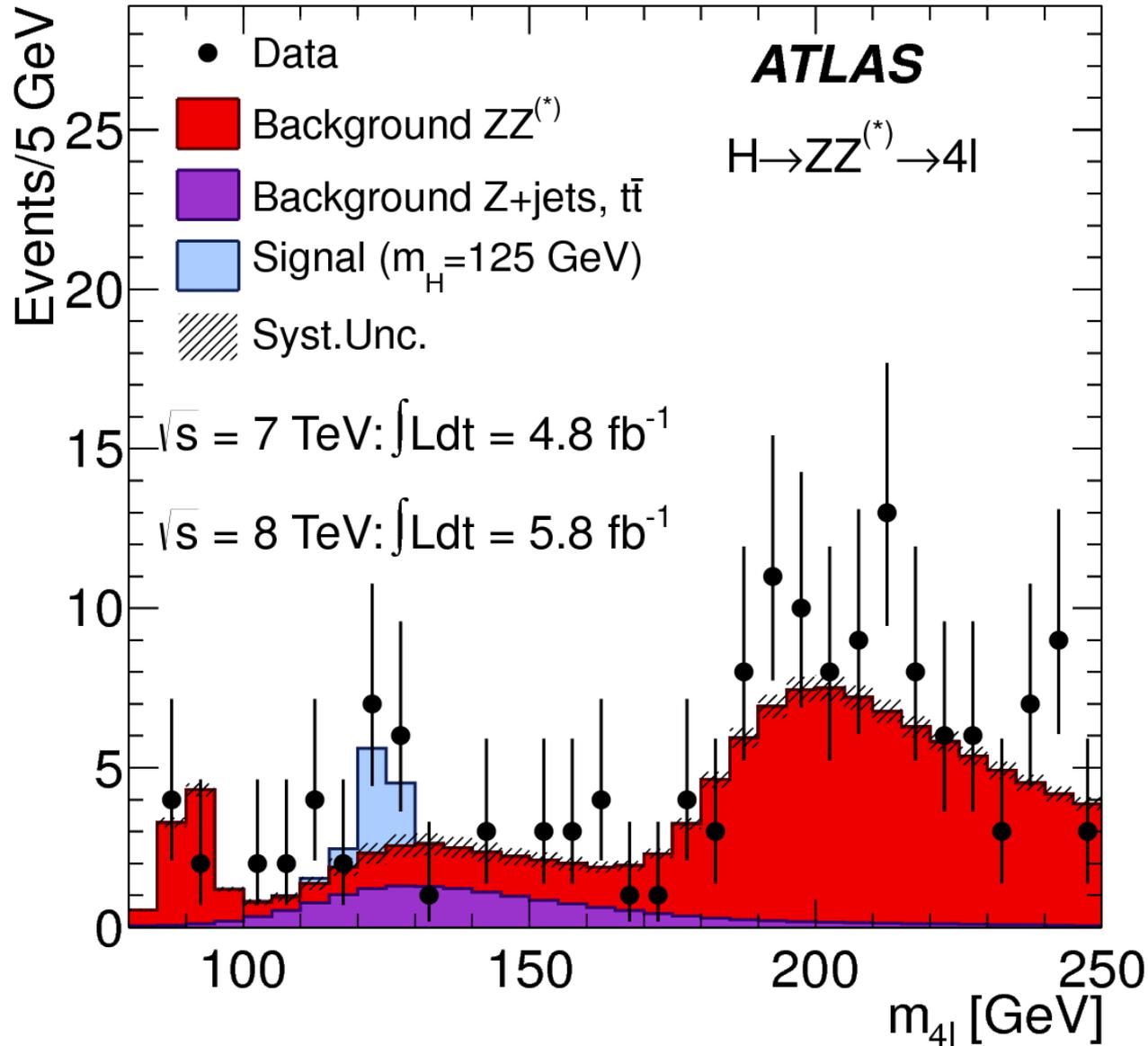
<http://www.atlas.ch/multimedia/#2-photon-event>



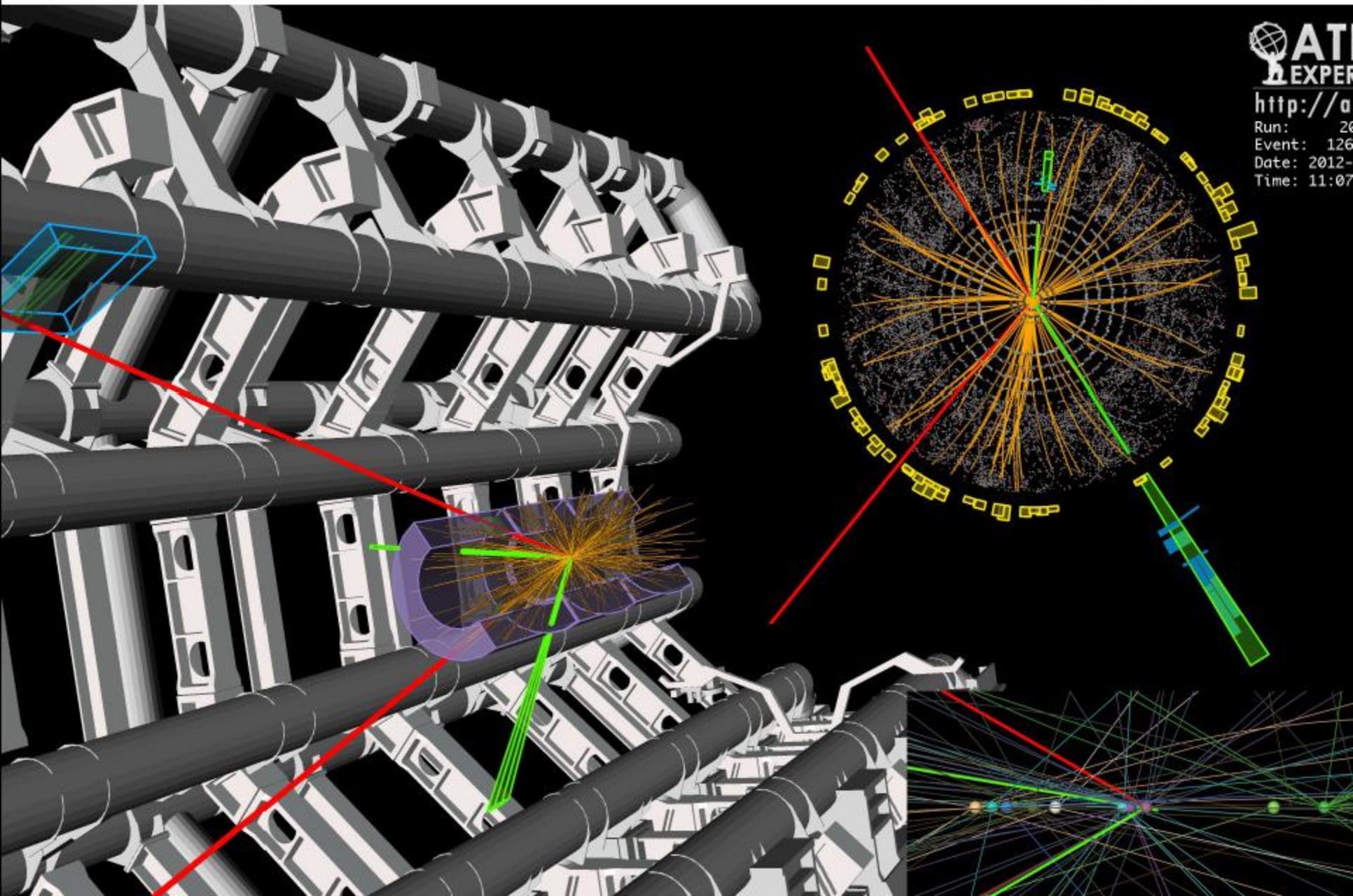
4 Juillet 2012



Autre canal: $H \rightarrow Z(\rightarrow l^+l^-)Z(\rightarrow l^+l^-)$



Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$



ATLAS
EXPERIMENT

<http://atlas.cern.ch>
Run: 2012-01-26
Event: 126000
Date: 2012-01-26
Time: 11:07

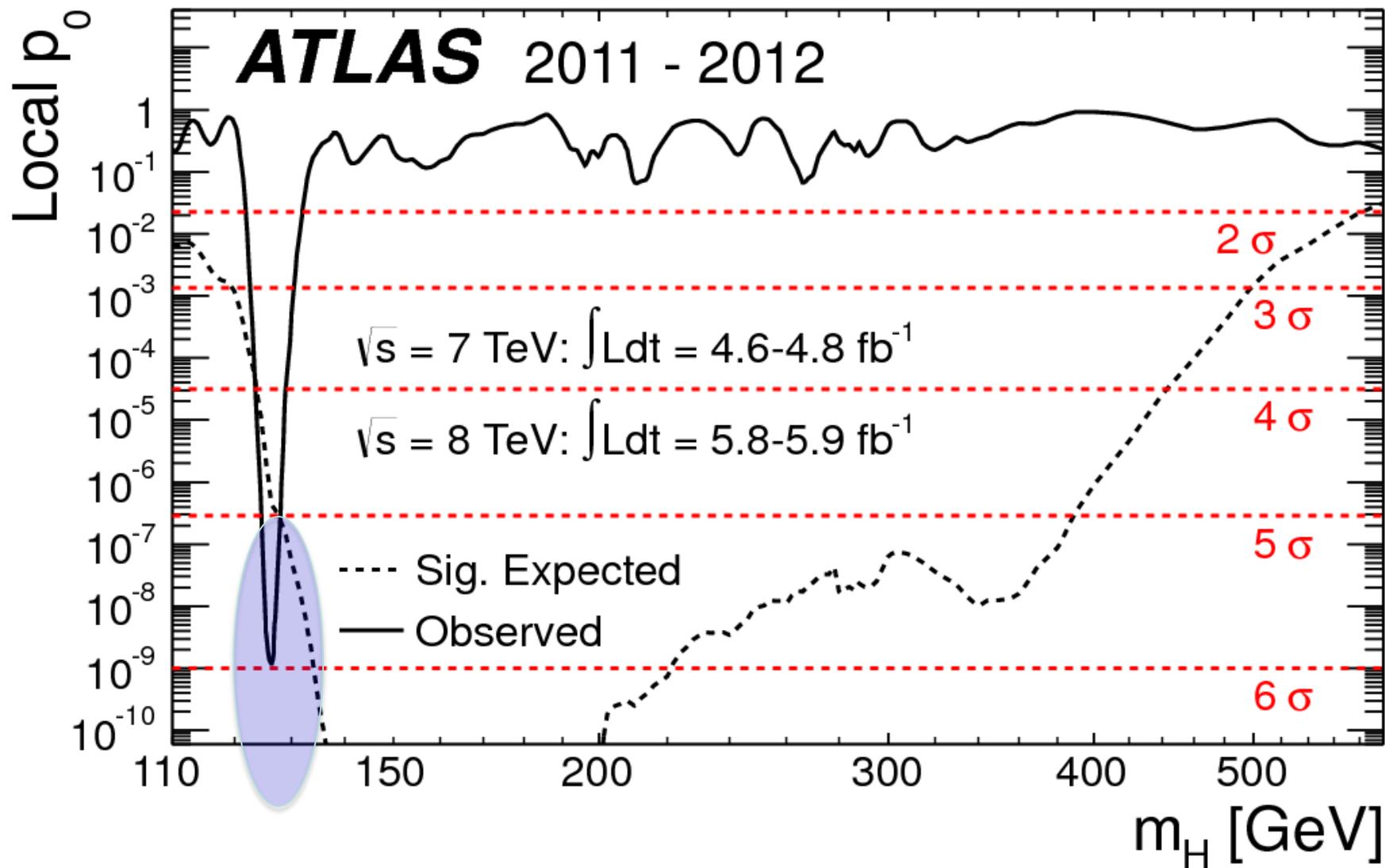
Certitude au sens physique, non mathématique!

On évalue : « la probabilité pour observer ce que l'on voit si il n'y avait que du bruit de fond » (en combinant toutes les informations dont on dispose, et en tenant compte de toutes les incertitudes)

Si cette probabilité est meilleure que 5 écarts standard, on peut, « légalement » parler de découverte .

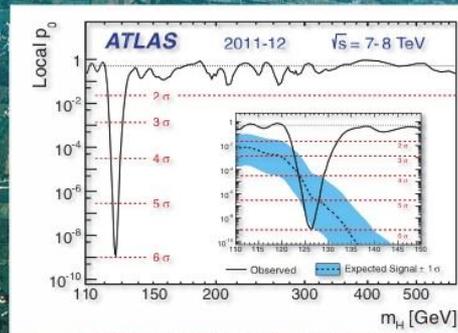
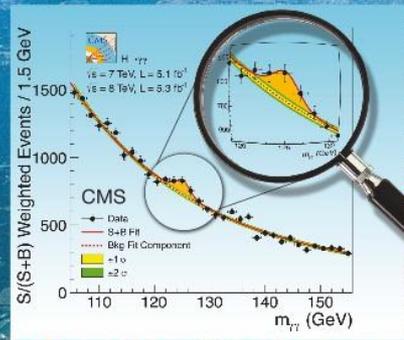
5 écarts standard : probabilité $2.8 \cdot 10^{-7}$, une chance sur 3 millions, ou bien \sim la probabilité de tirer les quatres as d'un jeu de 52 cartes, dans l'ordre







First observations of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson at the LHC



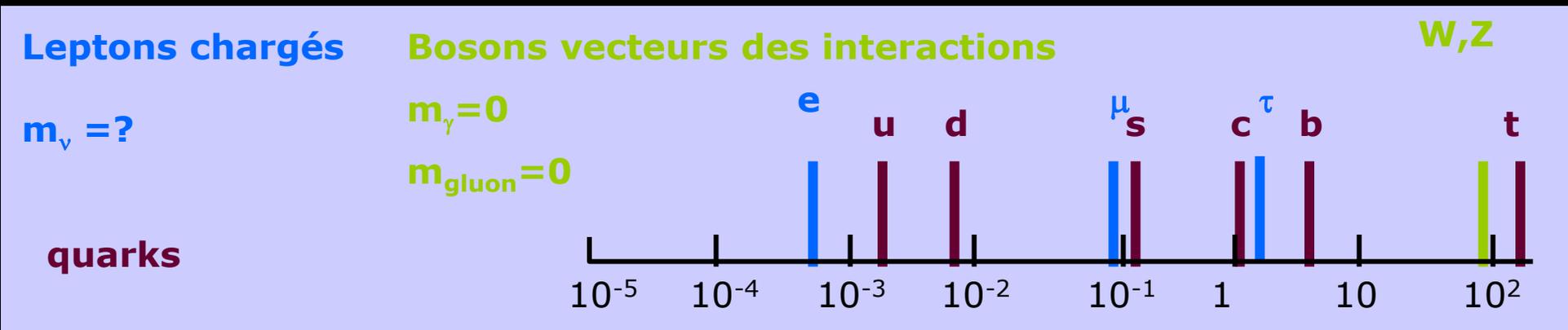
www.elsevier.com/locate/physletb

Et maintenant ??

- Des études et des mesures plus précises sur le boson de Higgs
- Plein de questions ouvertes

Nous avons trouvé le boson de Higgs, mais toujours pas répondu à cette question...

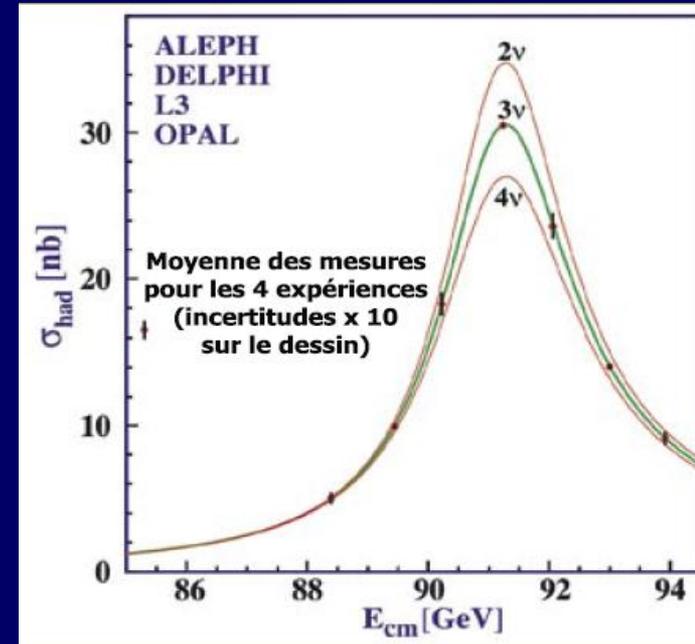
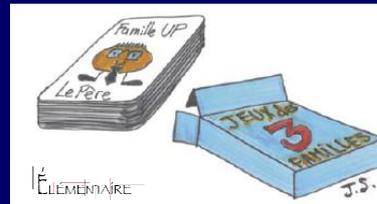
Pourquoi les constituants de la matière ainsi que les particules qui véhiculent les interactions ont-elles des masses si disparates ?



Quelques grandes questions 1/3 ...

Pourquoi trois familles ?

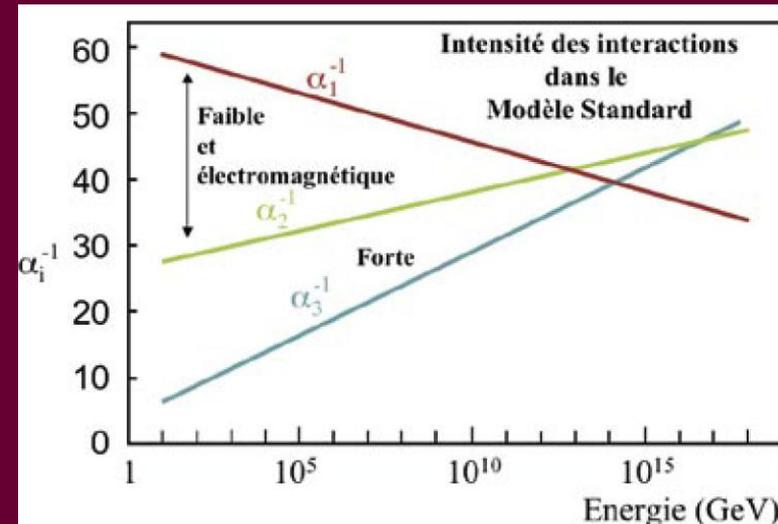
On sait simplement que des « répliques » des constituants de la matière ordinaire existent, et que jusqu'à présent on n'a vu que trois familles...



Pourquoi quatre interactions ?

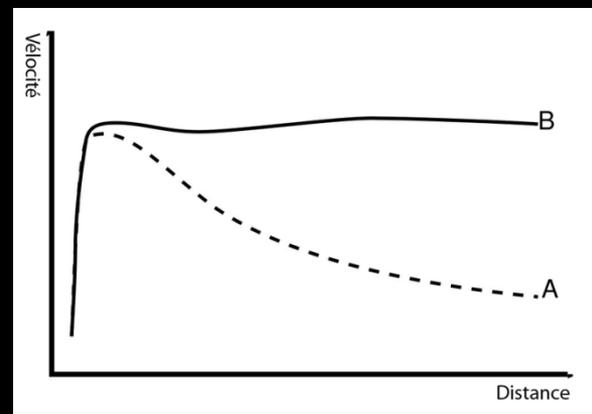
Unification ?

(cf Maxwell pour l'électricité et le magnétisme)





NOUVELLES PARTICULES ?

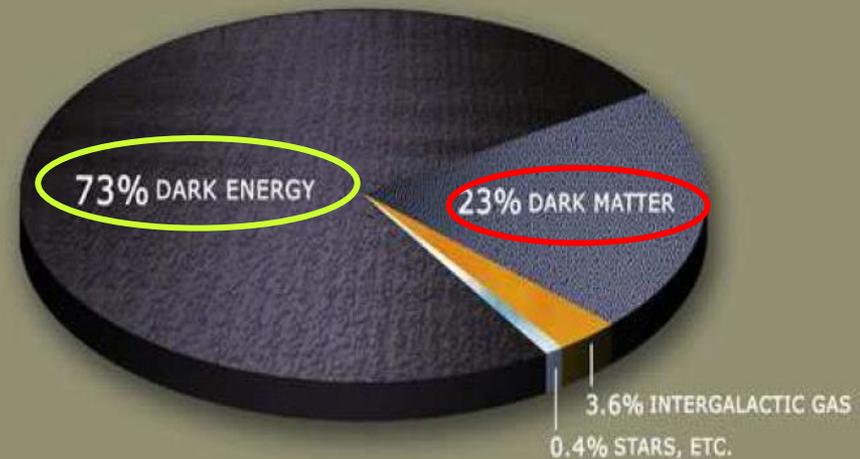


Les étoiles situées à la périphérie des galaxies spirales semblent tourner trop vite:
⇒ Il y a de la masse sous une forme non lumineuse, c'est la **Matière Noire**

Composition de notre univers ?

L'expansion de l'univers est plus rapide qu'attendu (Big Bang + relativité générale) ⇒ quelque chose d'autre doit entrer en jeu : "énergie noire"

Matière autre que celle du Modèle Standard



Quelques grandes questions 3/3 ...

Juste après le Big-Bang :

matière

antimatière

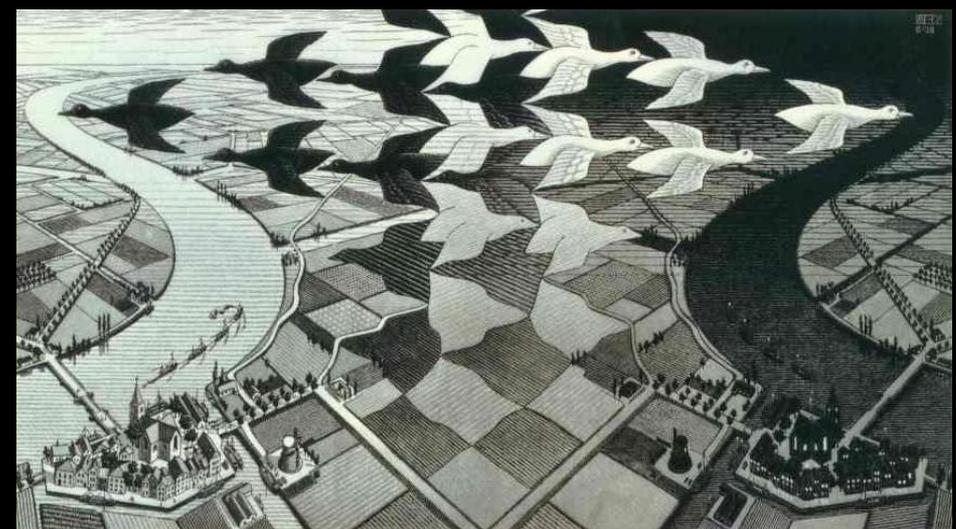
Univers actuel :

matière

~~**antimatière**~~

Univers actuel : le fruit d'un petit déséquilibre qui a mené à une très légère surabondance de matière

Quelle est la source du déséquilibre entre matière et anti-matière ?



Le futur du LHC en deux mots :

2013-2014 : arrêt technique de la machine

2015-2020 : reprise avec une énergie de 14 TeV

2022→ 2030 : phase à très haute luminosité
(100 fois plus de données que' aujourd'hui...)

Et après 2030→ futur moins sur...

→ Un collisionneur linéaire (probablement au Japon)

→ Un autre collisionneur (e^+e^-) et ensuite pp au CERN avec une énergie 5-10 supérieurs au LHC !!

...et en résumé le métier du Physicien des particules ...un métier multi facettes !

Conception et réalisation des accélérateurs

Electronique, mécanique... fort lien avec les ingénieurs



Conception et réalisation des détecteurs

Electronique, mécanique... fort lien avec les ingénieurs



Simulation

Acquisition et prise de données

fort lien avec les ingénieurs en informatique



Analyse des données

Software, analyse statistique, méthodes mathématiques..

Phénoménologie

Lien avec la théorie

Réunion et travail en équipe (très international, voyages..)



Communication des résultats

journaux scientifiques, grand public...



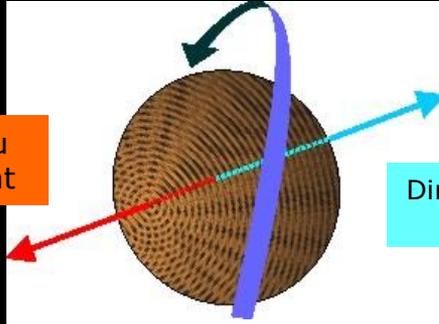
BACKUP MATERIAL

(response aux questions)

Éléments de langage

- Un champ : un fluide immatériel qui emplit l'espace physique. Il y a de nombreux champs dans l'espace (électromagnétique, gravitationnel ...)
- Une particule : une excitation quantique d'un champ
- Le spin d'une particule : la rotation « quantique » propre (sur elle-même) d'une particule
- boson : une particule de l'espèce la plus courante (le photon est un boson). Les bosons portent un spin entier ($N \hbar$). Ils peuvent être produits dans le même état quantique (laser, CBE ...).
- fermion : Toute autre particule. Les fermions incluent les principaux composants élémentaires de notre matière (électron, quarks). Ils portent un spin demi-entier ($(2N+1)/2 \hbar$). Un seul fermion de même nature par état quantique.

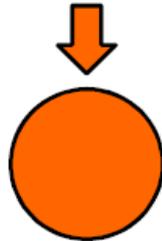
Direction du mouvement



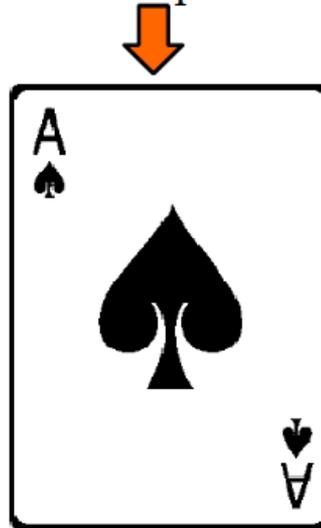
Direction du spin

Une image de vulgarisation du spin

Spin 0 : 
invariant par rotation



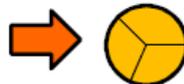
Spin 1 :
invariant par rotation 360°



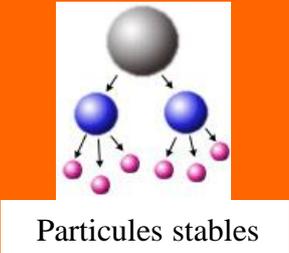
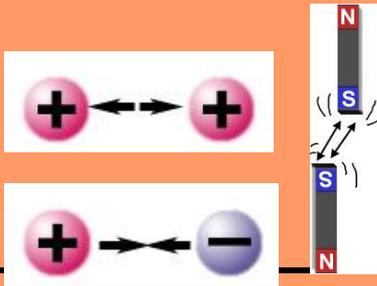
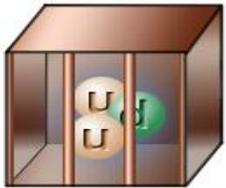
Spin 2 :
invariant par rotation 180°



Spin $3/2$:
invariant par rotation 120°



etc.

FORCE	Gravité	Faible	Electromagnétique	Forte
Portée par	Graviton (non observé)	$W^+W^-Z^0$	Photon (γ)	Gluons (g)
Agit sur	Toutes les particules	Quarks et leptons	Quarks et leptons chargés et W^+W^-	Quarks et gluons
Responsable de	Attraction des objets massifs 	Désintégrations des particules 	Attraction entre particules chargées 	Liasions nucléaires 
Agit à	Distance infinie	Courte distance	Distance infinie	Faible à grande distance Forte à courte distance 

Le Modèle Standard

			Charge élect.	Int	
Quarks	u up	c charm	t top	+2/3	■ ■ ■
	d down	s strange	b bottom	-1/3	■ ■ ■
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ- Neutrino	ν_τ τ- Neutrino	0	■
	e electron	μ muon	τ tau	-1	■ ■

I II III
The Generations of Matter

électromagnétique γ

faible W^\pm, Z^0

forte

gluons

Particules de matière

Particules d'interaction

Le boson de Higgs

La physique (des particules) est basée sur des principes de symétrie

Si toutes les particules sont de masse nulle le modèle est totalement symétrique

Expérimentalement on sait que les particules ont des masses

Mécanisme de Higgs



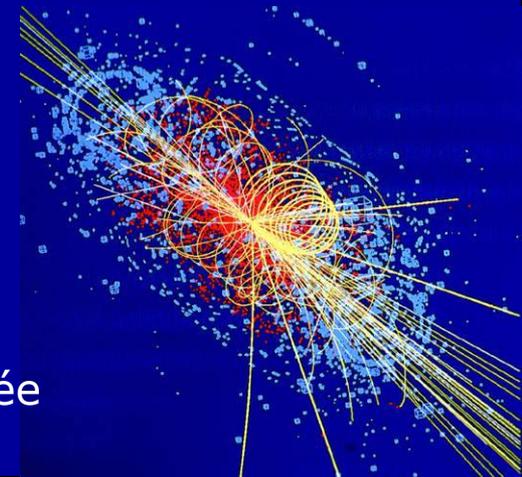
Un champ de Higgs remplit tout l'espace-temps

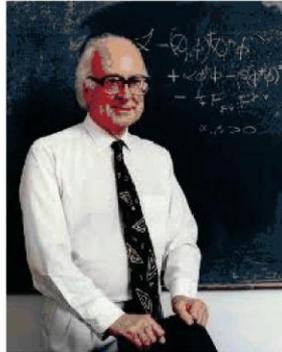
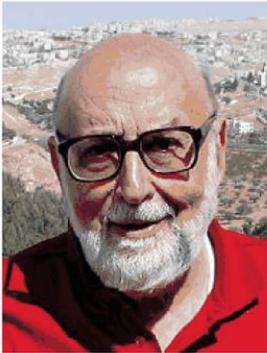
Les particules interagissent avec ce champ \Rightarrow leur mouvement est ralenti \Rightarrow effet d'une masse

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

La signature de ce mécanisme : le boson de Higgs dont toutes les propriétés sont prédites sauf la masse !

C'est la seule particule du Modèle Standard qui n'est pas détectée





BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout
 Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
 (Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.⁴⁻⁶ A

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_5 invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reason-

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs
 Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
 (Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenom-

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

Masse

La masse est omniprésente en physique.

$P = m g$ masse gravitationnelle Galilée

$F = m a$ masse inertielle Newton

$E = m c^2$ équivalence masse-énergie Einstein

Toutes ces masses sont identiques.

Dans notre modélisation du monde, les particules élémentaires nues seraient de masse nulle ce qui est contraire à l'expérience.

Le mécanisme de Brout, Englert et Higgs

Le champ BEH emplit l'univers mais initialement (juste après le Big Bang) sa valeur est en moyenne nulle.

Une particule libre initialement de masse nulle interagit avec ce champ...



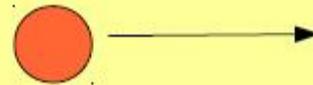
Son énergie d'interaction est proportionnelle à sa masse et au carré de la valeur du champ (ici un nombre ou encore un scalaire).

Initialement le champ est nul, par conséquent l'énergie d'interaction est nulle.

Cette particule garde alors une masse nulle.

Le mécanisme de Brout, Englert et Higgs

Quelques instants après le Big Bang (10^{-12} s), le champ BEH subit une transformation de phase. Sa valeur moyenne devient non nulle et constante en tout point de l'espace.

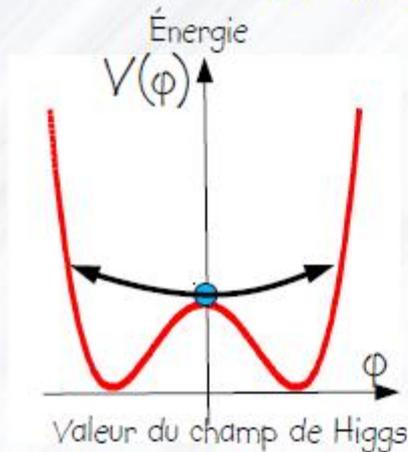


Une particule libre acquiert une énergie d'interaction proportionnelle à sa masse et au carré de la valeur du champ. Cette particule devient massive. Sa masse est constante

Toutes les particules élémentaires interagissent avec le champ BEH sauf les photons et les gluons qui demeurent donc de masse nulle.

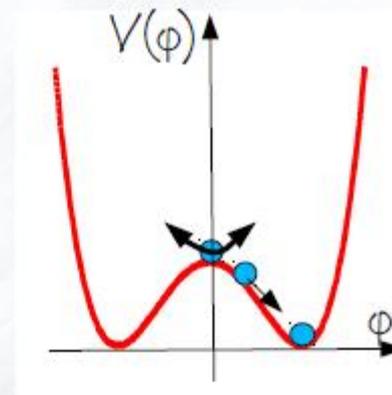
Le boson de Higgs est l'excitation du champ de Higgs. C'est Higgs qui le premier a suggéré cette possibilité. C'est une particule neutre, massive et dépourvue de spin.

Transition de phase



Initialement, juste après le Big Bang, la température est très forte, chaque point de l'univers voit un champ de Higgs en moyenne nul.

Un millième de milliardième de seconde après le Big Bang, la température a suffisamment décreu pour que l'univers transite vers une phase où le champ de Higgs est partout de valeur moyenne constante et non nulle. La symétrie est brisée, les particules deviennent massives.



Le mécanisme de Higgs: une analogie

Le photon: masse nulle car n'interagit pas avec le de champ Higgs

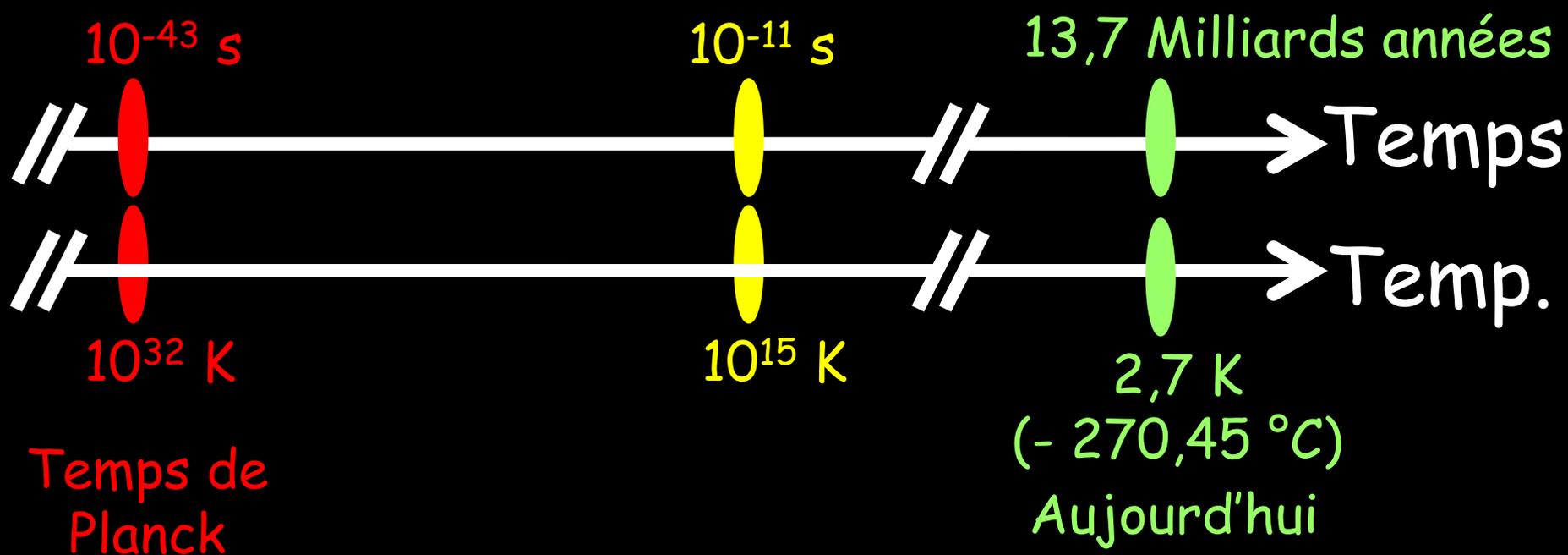


L'électron: petite masse



Le boson W: grande masse car interagit beaucoup





Temps de Planck

Les particules n'ont pas de masse

Les particules sont massives

Les faisceaux de protons et leurs collisions

- maximiser le nombre de collisions proton-proton
 - dans chaque faisceau: environ 3000 paquets
 - dans chaque paquet: 100 milliards de protons
- } ↑↑ "luminosité"
- énergie de chaque faisceau 300 MJ (une rame TGV à 200 km/h!)
 - 1 milliard d'événements / s produits dans les détecteurs
 - défis pour les détecteurs: résistance au rayonnement
énorme flux de données
ne garder que les événements d'intérêt

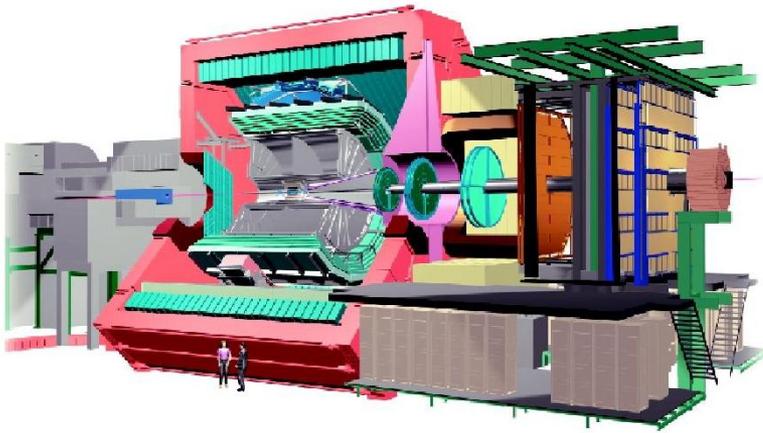
Le LHC en quelques chiffres

- Consommation d'électricité : ~ 400 GWh/an (5% de la consommation de la SNCF)
- Les particules accomplissent 11 000 tours / seconde à la vitesse de la lumière
- La pression dans le tube à vide est 10 fois inférieure à celle sur la Lune
- Les aimants sont au nombre de 9 600 environ ; ils sont refroidis à $-271,3^{\circ}\text{C}$
→ Plus froid que l'espace intersidéral !
- 2808 paquets. Espace entre paquets : 7.5 m (25 ns). Longueur du paquet : 30 cm
 1.15×10^{11} protons par paquet

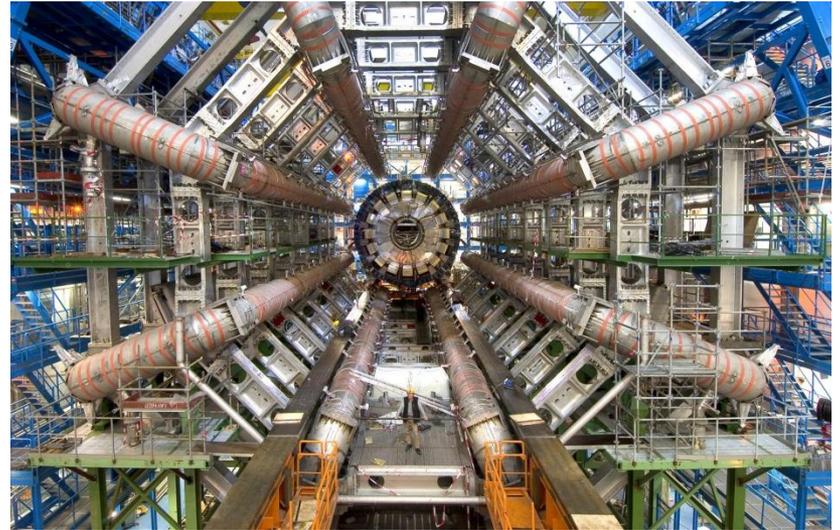
En fonctionnement nominal (pas encore atteint) :

- Les particules se croiseront ~ 40 millions de fois par seconde dans les détecteurs et chaque interaction produira ~ 20 collisions proton-proton
→ Production de nouvelles particules : ~ 100 000 par seconde
- Il y aura ~ 300 000 000 000 000 de protons en même temps dans le LHC
- L'énergie stockée dans le faisceau équivaudra à celle de 80 kg de TNT
- L'énergie nominale des collisions est 14 TeV (8 TeV actuellement)

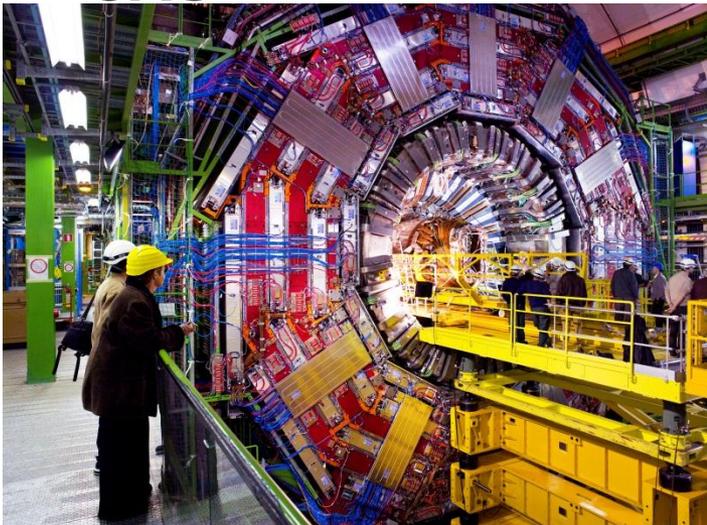
ALICE



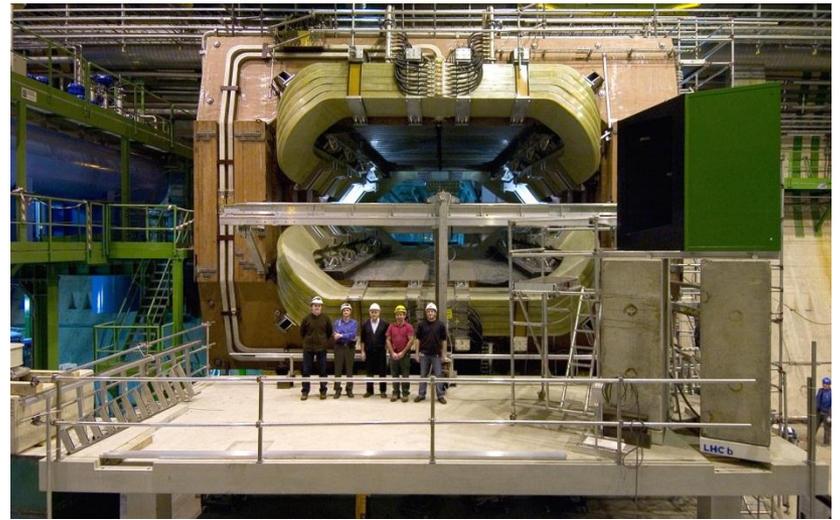
ATLAS



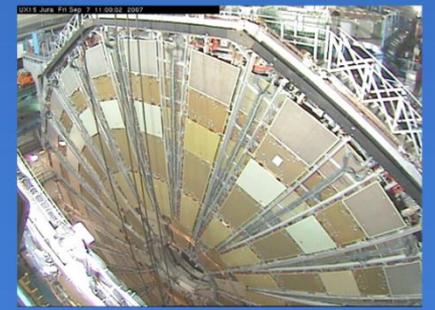
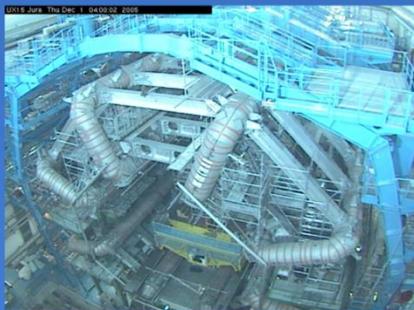
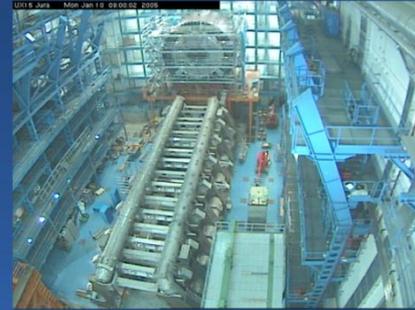
CMS



LHCb



Un puzzle à assembler





février 2004



octobre 2004



juillet 2005

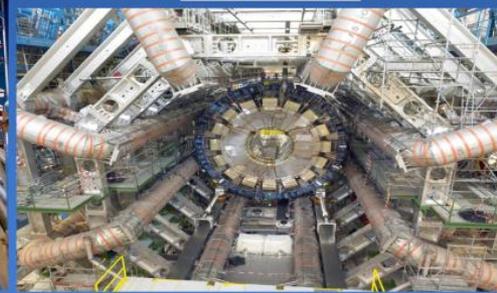
ience 20 novembre 2008 42



octobre 2004



Novembre 2005



février 2006

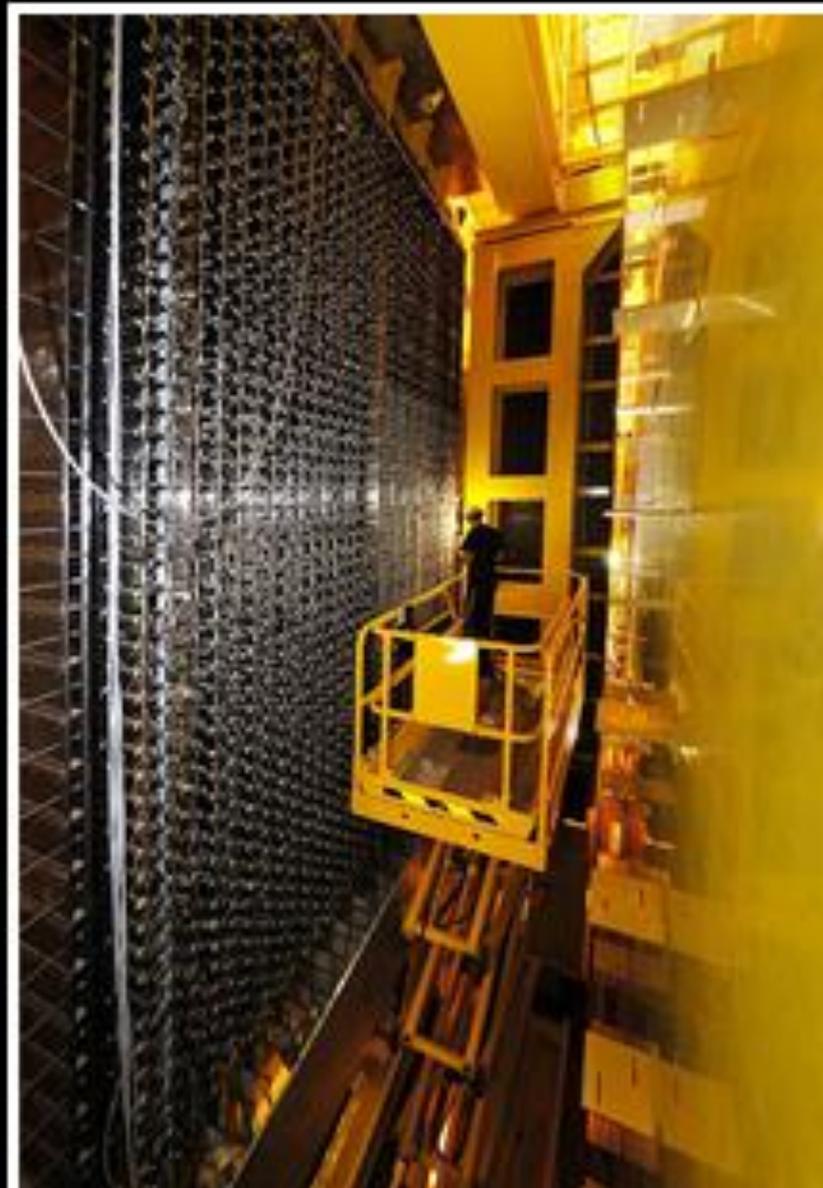
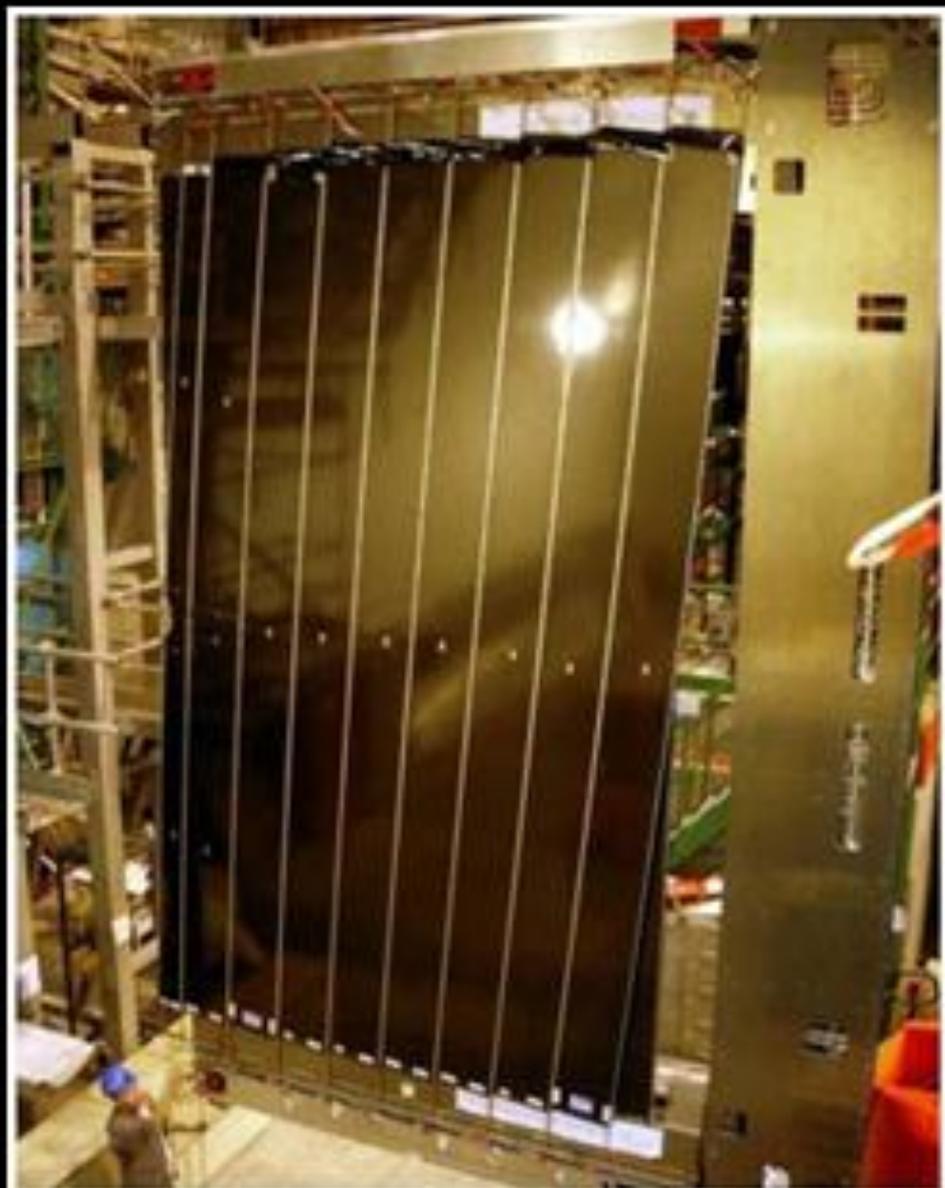


Octobre 2006



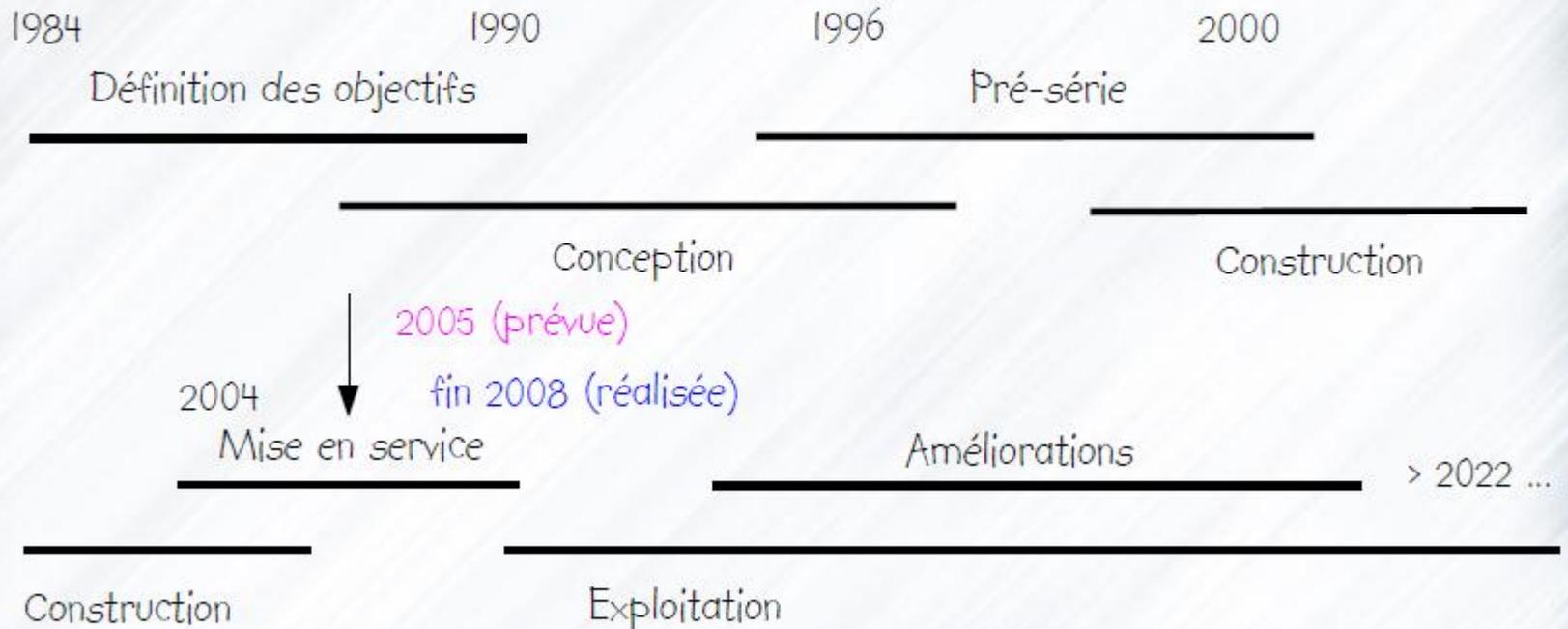
Juillet 2007

particules composées d'un quark b et étudier la subtile différence de comportement entre matière et antimatière

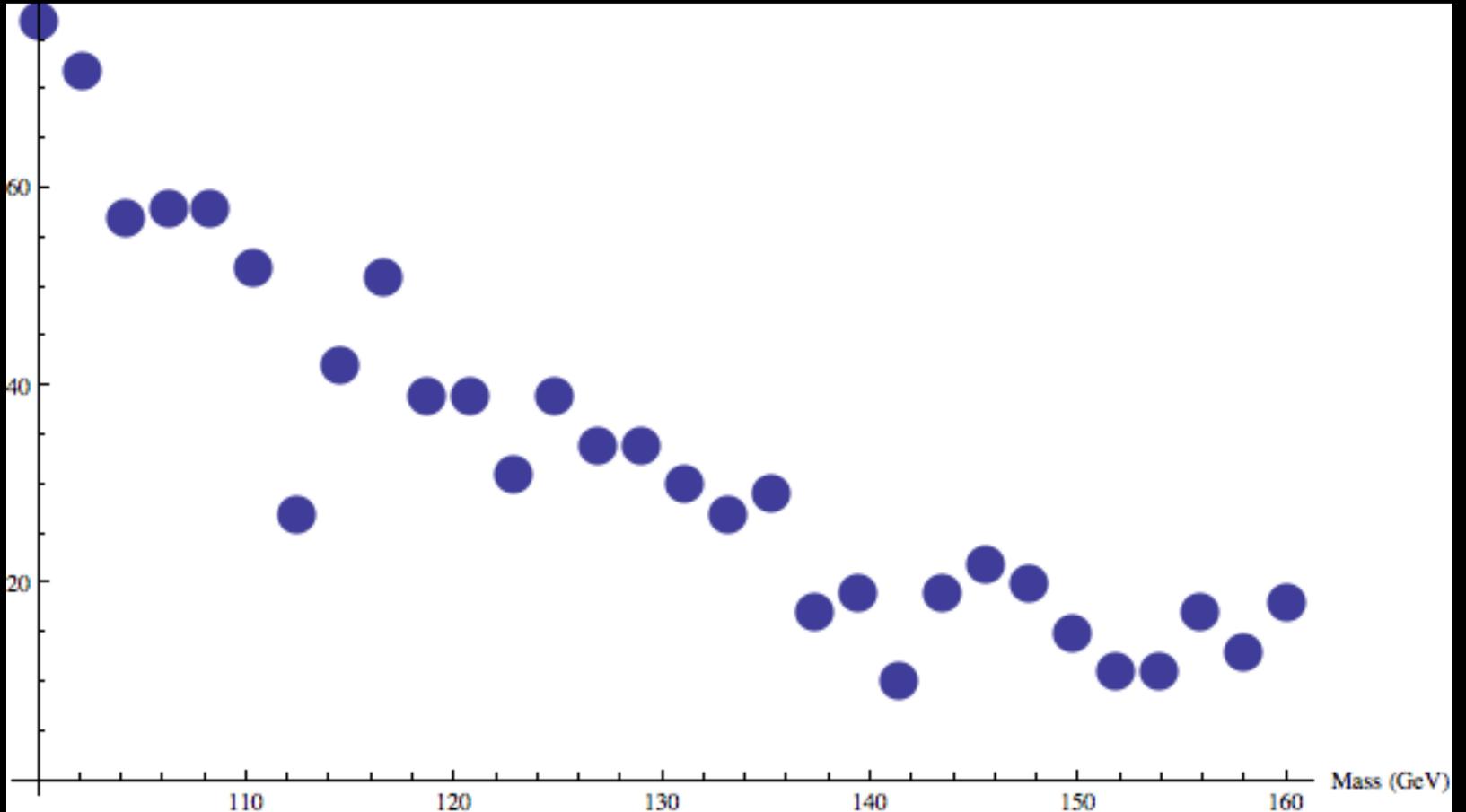


1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

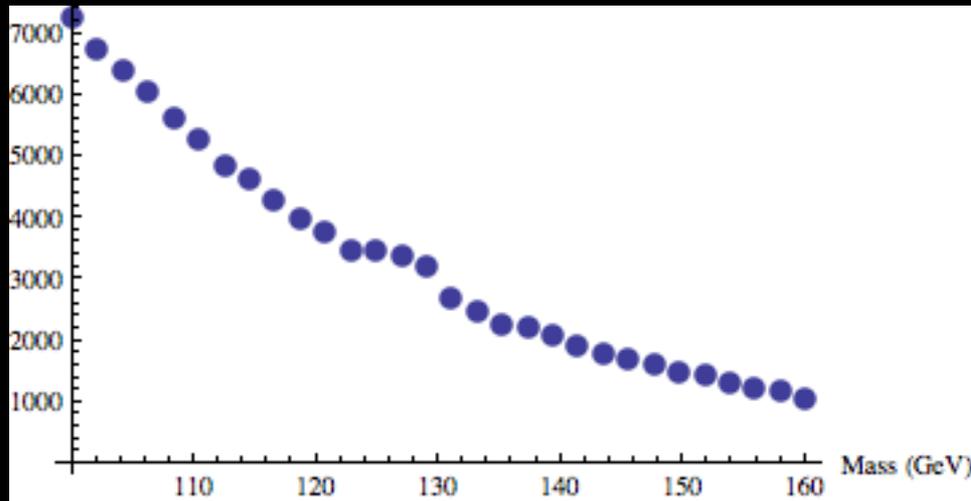
Les phases du projet ATLAS



Effet de la statistique



Jobs du physicien



- Augmenter la taille du pic
- Réduire sa largeur
- Réduire le fond
- Evaluer les incertitudes

Job du LHC : augmenter la statistique, accompli au-delà des espérances

Métier de Physicien des particules

Un métier à multiples facettes:

- **Conception et réalisation des détecteurs**
 - Électronique, mécanique,...
- Simulation
- **Acquisition, prise de données**
- **Analyse des données**
 - Software, analyse statistique,...
- **Phénoménologie**
 - Lien avec la théorie
- **Réunions, conférences**
 - Beaucoup de temps en réunions
 - Communauté très internationale
- **Communication des résultats**
 - Journaux scientifiques, grand public,...





Surveillance/maintenance
Prises de données jours et nuits
24h/24, 7j/7

Déroulement dans le temps

Conception des détecteurs + R&D (1989-1996)

Construction des détecteurs (1996-2008)

Opération & prises de données (2008-2020?)

Ressources informatiques

Publications scientifiques

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN)



CMS-HIG-12-039

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC

The CMS Collaboration

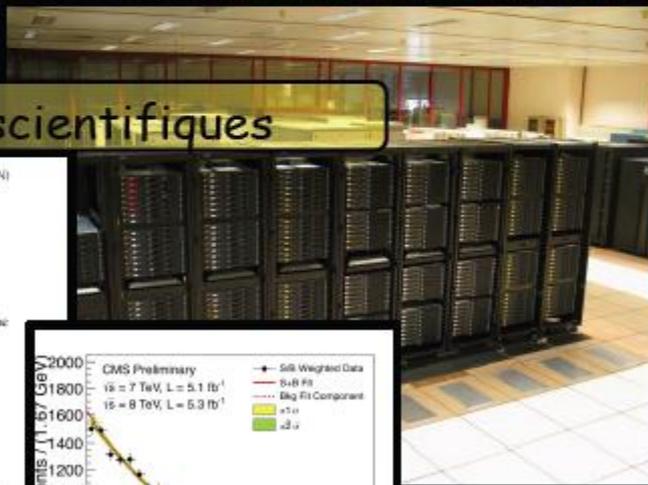
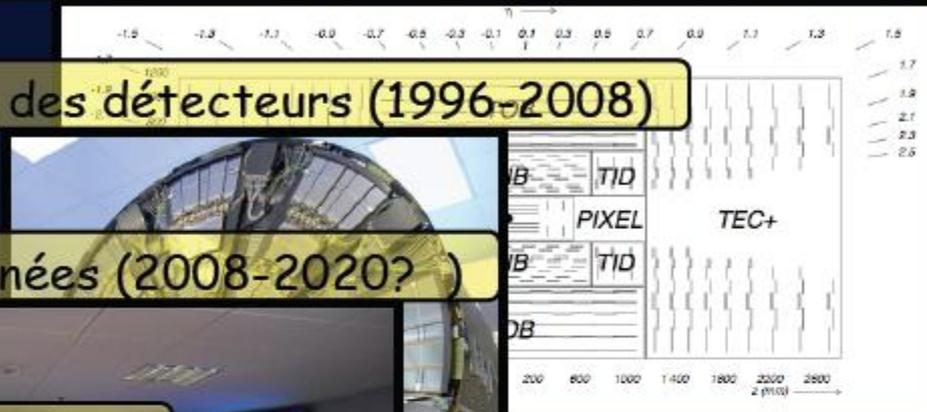
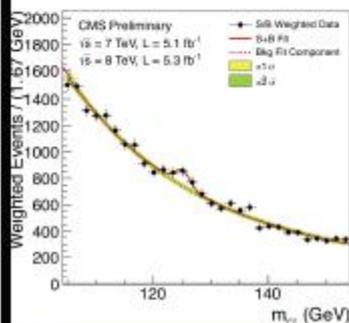
Abstract

Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the CMS experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to 5.1 fb $^{-1}$ at 7 TeV and 5.3 fb $^{-1}$ at 8 TeV. The search is performed in five decay modes: $\gamma\gamma$, ZZ, WW, $\tau\tau$, and bb, as well as in exotic final states. The expected background is estimated using a 100 standard deviation, at a mass near 125 GeV, signals by the production of a new particle. The expected significance for a standard model Higgs boson of that mass is 5.8 standard deviations. The results are most significant in the four decay modes with the best cross-sections, $\gamma\gamma$ and ZZ, fit to three signal regions a mass of 125.3 \pm 0.4 (stat) \pm 0.5 (sys) GeV. The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

This paper includes the full text of the CMS paper published in Phys. Lett. B 710 (2012) 258-331.

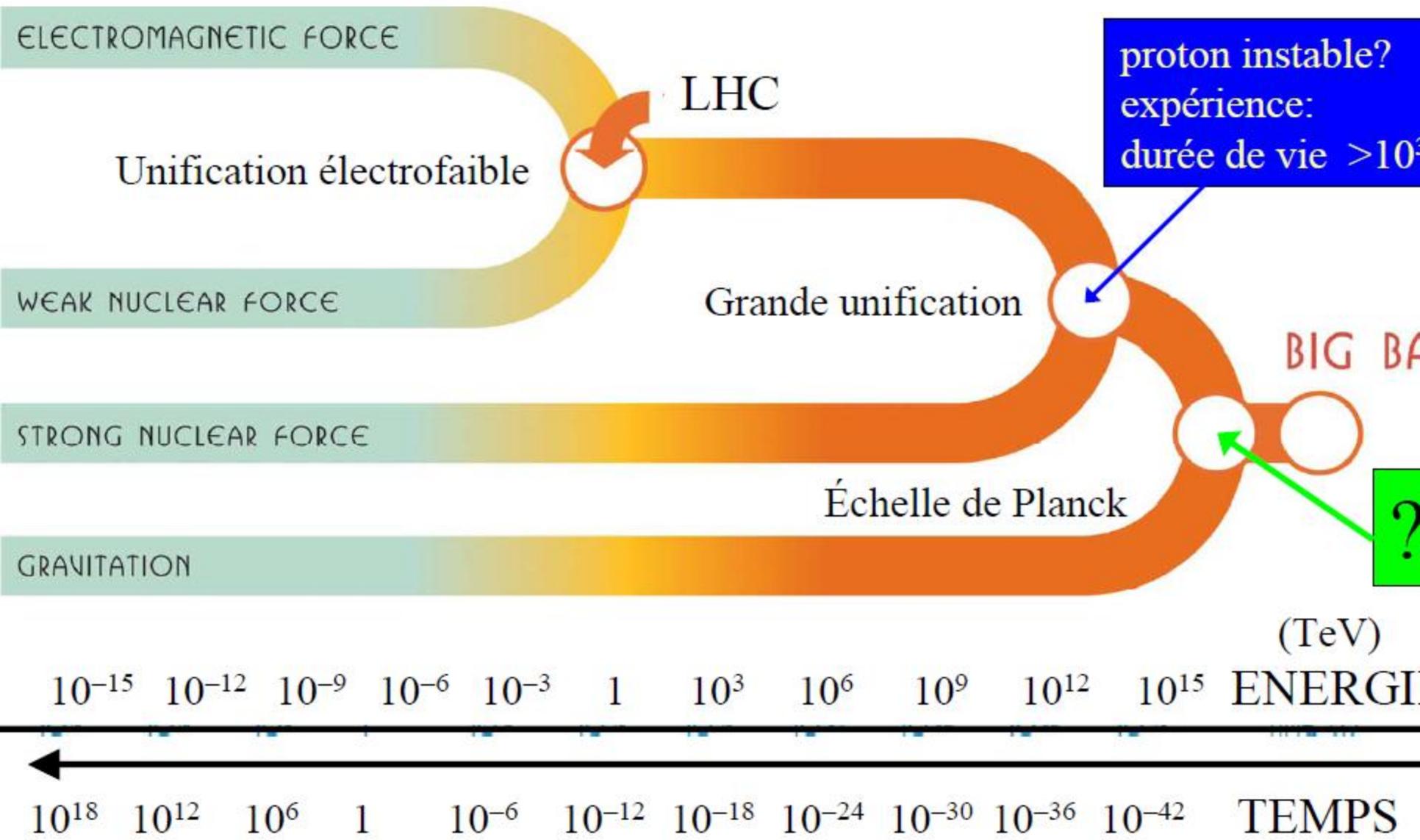
A recognition of their many contributions to the achievement of this observation.

Submitted to Physics Letters B



Unique dans l'histoire de la science

Vers l'unification des forces fondamentales?



La physique des particules avec les accélérateurs nous fait