

La question des origines : du big bang à nos jours

● Mardi 10h – 12h ou 10h -13h

15 octobre 2013 10h-12h

Conférence : Les briques et ciments de l'Univers

Stéphane Perriès, Maître de conférences, Université Lyon 1

12 novembre 2013 10h-13h (limité à 30 personnes)

et 19 novembre 2013 10h-13h (limité à 30 personnes, ouverture si participants)

Visite du « CMS center », salle de contrôle à l'IPNL d'une expérience LHC et Visite du dôme de l'IPNL où se font l'étude et les tests pour un détecteur du projet ILC (International Linear Collider)

Viola Sordini, Chargée de recherche CNRS et Gérald Grenier

7 janvier 2014 10h-12h

Conférence : La théorie du Big Bang

Yannick Copin, Maître de conférences, Université Lyon 1

4 février 2014 10h-13h (limité à 30 personnes)

et 11 février 2014 10h-13h (limité à 30 personnes, ouverture si participants)

Exercice pratique : Apprendre à « découvrir » une particule dans les données LHC

Stéphane Perriès, Viola Sordini et Sébastien Viret, Chargé de recherche CNRS

18 mars 2014 10h - 12h

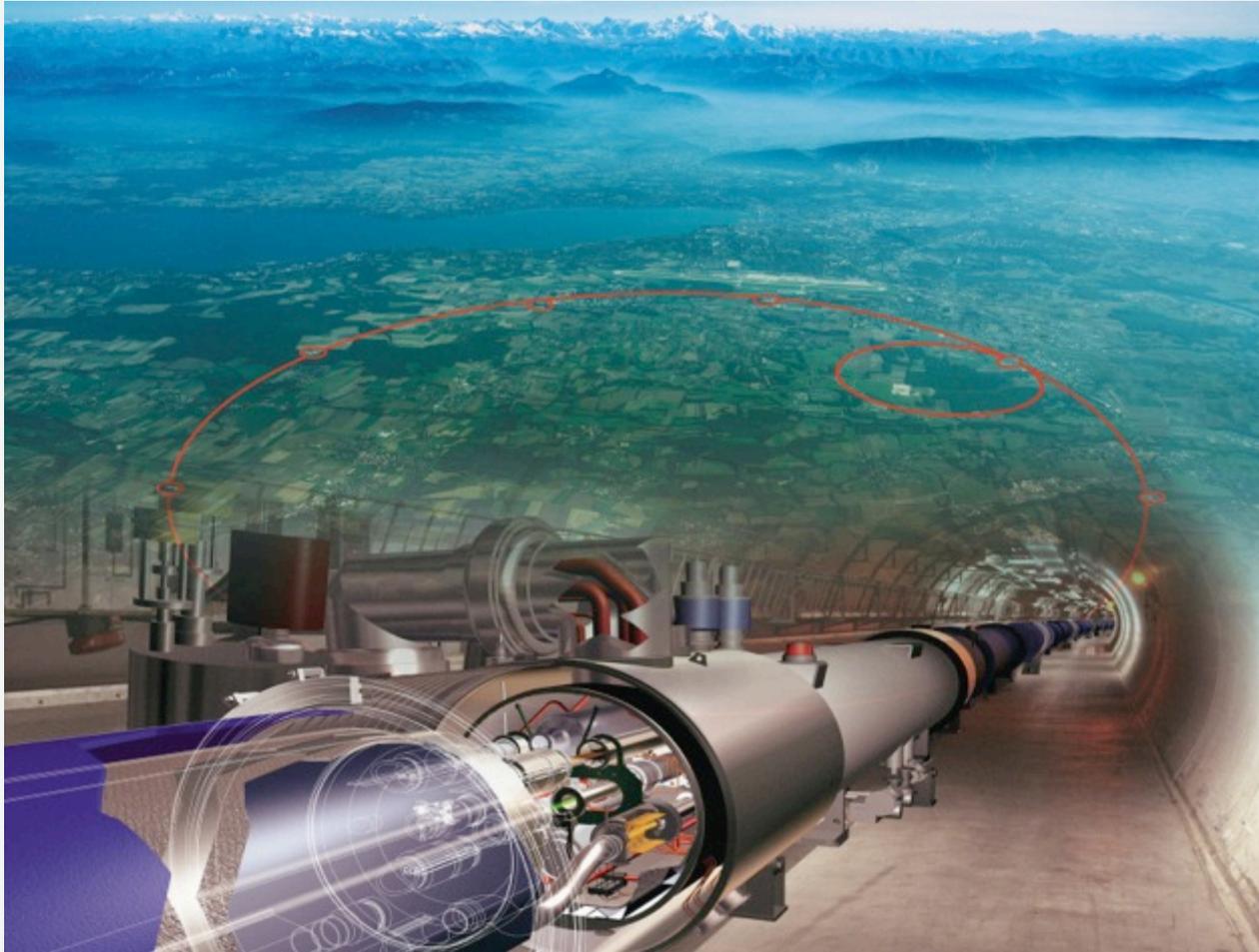
Conférence : L'Unité du Monde

Gérald Grenier

Visite novembre : [lien](#)

TP février : [lien](#)

Les Briques et Ciments de l'Univers



Stéphane Perries - IPN Lyon

Plan

1. Historique
2. Physique des hautes énergies
3. La matière
4. Les interactions fondamentales
5. Les accélérateurs de particules
6. Les détecteurs de particules

Physique des particules

- Etude des constituants (élémentaires) de la matière
- Etude interactions (forces) qui s'exercent entre ces constituants
- Discipline qui a vu le jour il y environ 1 siècle avec l'avènement de la théorie de la relativité restreinte (Einstein 1905) et de la mécanique quantique (Planck) → Théorie quantique des champs
- Expérimentalement deux grandes périodes :
 - Utilisation des rayons cosmiques → 1930-1960
 - Production de particules avec des accélérateurs 1960 → aujourd'hui
- Succession de découvertes expérimentales et prédictions/avancement théorique

1- Historique: La quête des constituants élémentaires de la matière

L'antiquité



eau
état liquide



air
état gazeux



terre
état solide



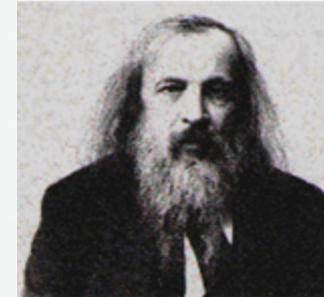
feu
chaleur

L'intuition de Démocrite (400 av JC) : « Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide : ATOMOS »
capables de se combiner entre eux pour expliquer la diversité des substances que l'on rencontre dans la nature

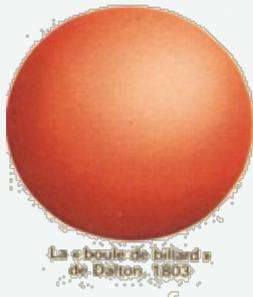
Moyen-âge : Les alchimistes
 éléments de contrôle
 (sel, soufre, mercure) et métaux



XIX siècle : Mendeleïev classe les
 éléments, chaque élément à son type
 d'atome

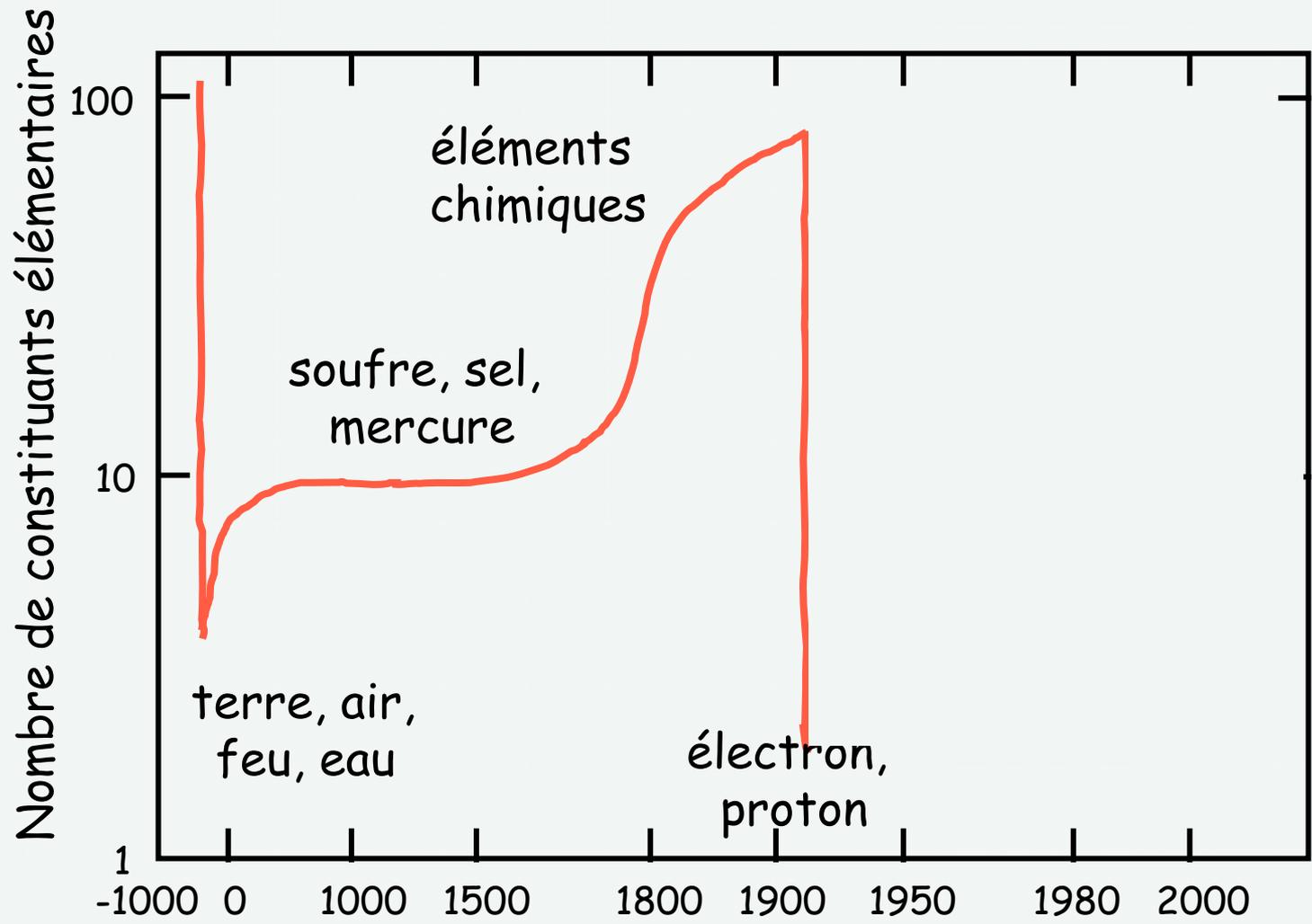


XVIII siècle : Les chimistes (Boyle, Cavendish,
 Lavoisier) et la renaissance de l'hypothèse
 atomique (Dalton): l'eau, l'air, le sel sont
 composites.

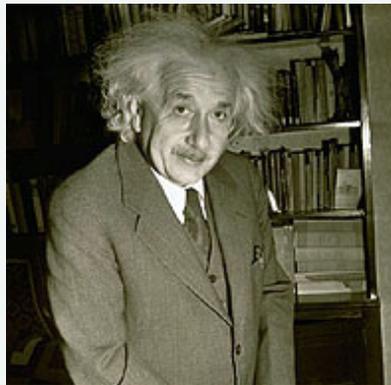
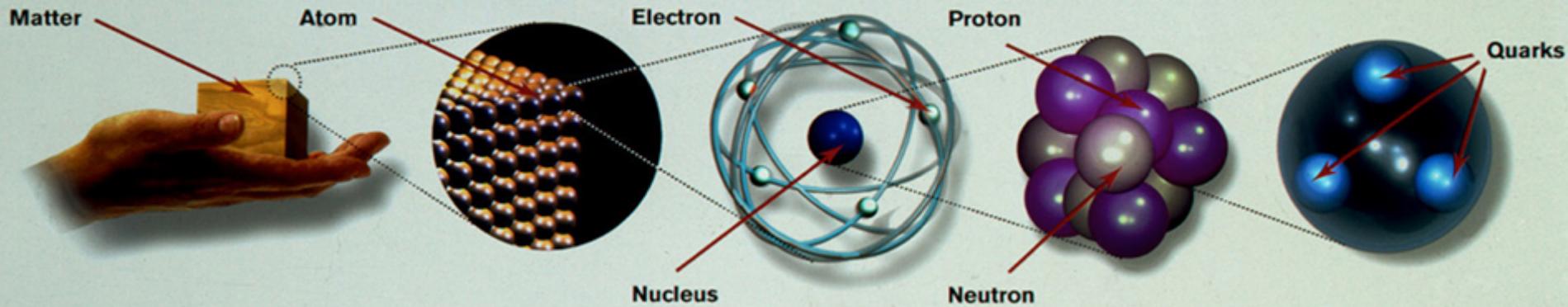


Etat physique du corps simple(25°C,1 atm)		SOLIDE				LIQUIDE				GAZEUX				SYNTHESE												
* Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											
# Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr											
		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71											
		90	91	92	93	94	95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

La quête des constituants élémentaires



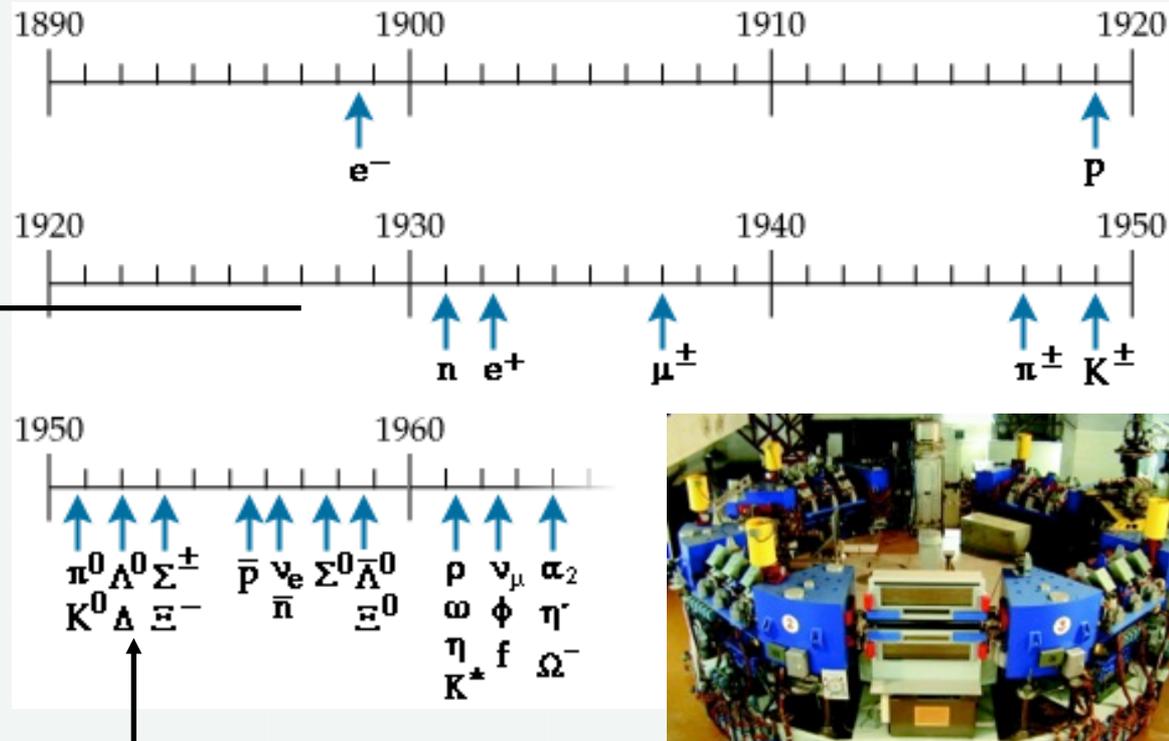
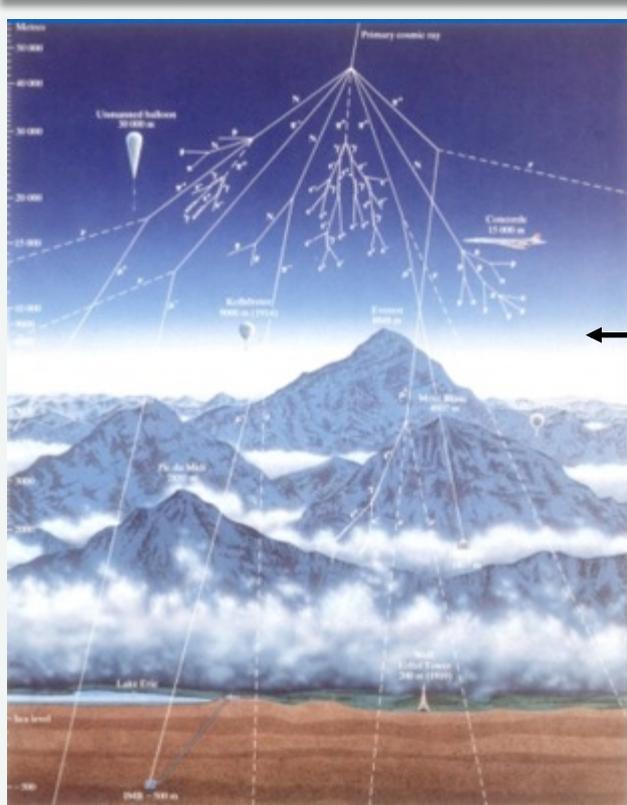
Le XX^{ème} siècle



Depuis le début du XX^{ème} siècle :
11 prix Nobel pour la physique nucléaire
21 prix Nobel pour la physique des particules

XX siècle: La physique moderne devient mathématique : mécanique quantique et mécanique relativiste...
constituants ultimes ?

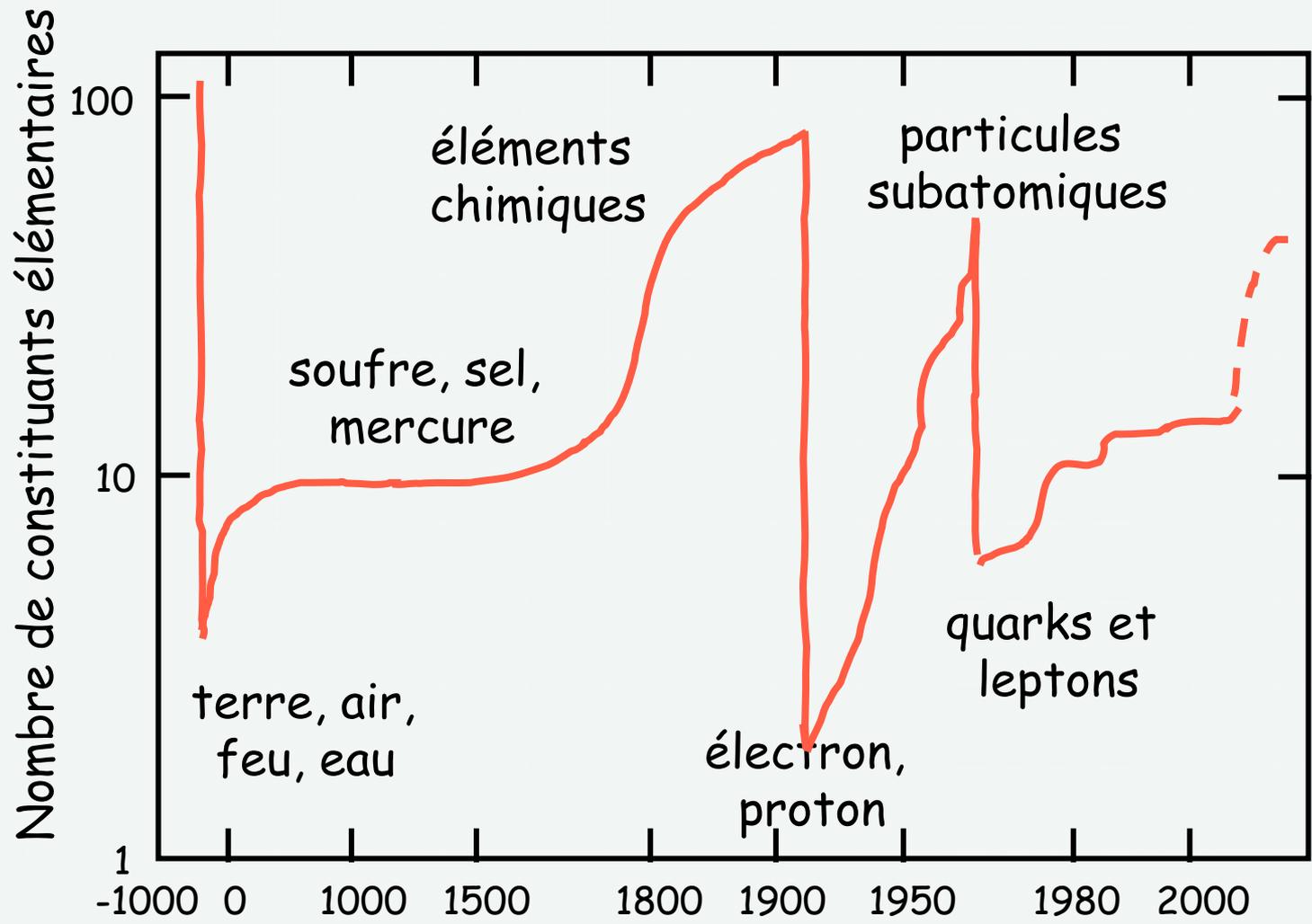
Trop de nouvelles particules...



Avec l'arrivée des accélérateurs (années ~1950) on trouve beaucoup (trop) de nouvelles particules. On est revenu à Mendeleïev.

Il doit y avoir des symétries/propriétés permettant de décrire ensemble ces particules ou une sous structure? (modèle des quarks fin des ~1960)

La quête des constituants élémentaires



Lois fondamentales de la physique < 1900

Lois de la gravité : Newton (1687)

Electromagnétisme de Maxwell (1872)

Lois de thermodynamique : Carnot, Kelvin (~1850)

*« La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien **deux petits problèmes** : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance... »*

Lord Kelvin, 1900, british association for the advancement of science

Michelson → théorie de la relativité restreinte Einstein (1905)

Corps noir → Mécanique quantique Planck (1900)

2- Comment étudier ces constituants ?

Les "hautes énergies" nous permettent de:

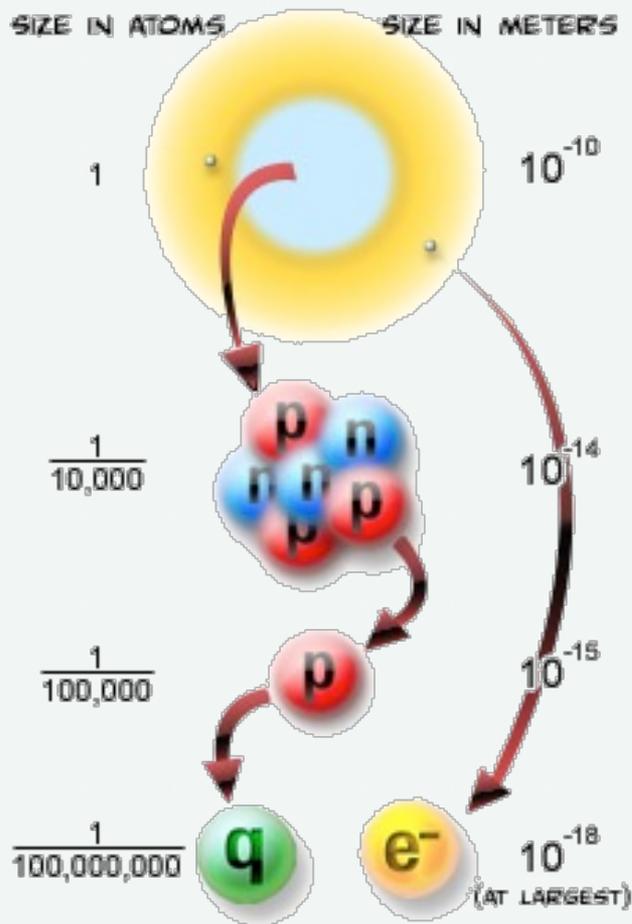
- sonder la matière à plus petite distance

$$E \propto 1 / \lambda$$



Louis
de Broglie

Echelles de taille



La matière est essentiellement vide !

Unité de distance naturelle
en physique des particules:

1 fermi
= 1 fm
= 1 femtomètre
= 10^{-15} m

Comment étudier ces constituants ? (suite)

Les "hautes énergies" nous permettent de:

- sonder la matière à plus petite distance

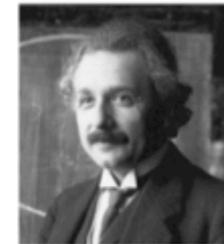
$$E \propto 1 / \lambda$$



Louis
de Broglie

- créer de nouvelles particules à grande masse

$$E = M C^2$$



Albert
Einstein

$E=mc^2$

- Equivalence masse-énergie (Einstein 1905)

- Cette relation n'est valable que pour des objets au repos.

Equations plus générales :

$$E = E_{\text{cin}} + mc^2$$

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

avec E_{cin} l'énergie cinétique de l'objet et p son impulsion

- On peut exprimer une masse en unité d'énergie via $M=E/c^2$

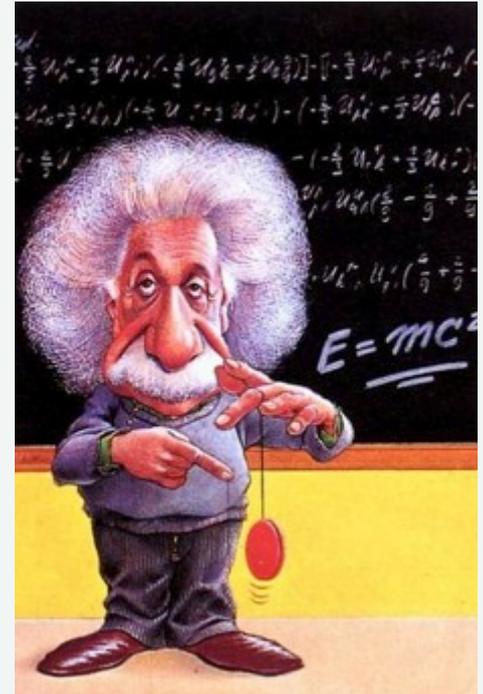
Masse en électron-volt:

Un électron-volt vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule.

$$m_e = 510\,999 \text{ eV}/c^2 = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

- On utilise les multiples de l'eV : keV, MeV, GeV, TeV, PeV, ...

- Unité naturelle de la physique des particules pour les énergies et les masses : GeV



Comment étudier ces constituants ? (suite)

Les "hautes énergies" nous permettent de:

- sonder la matière à plus petite distance

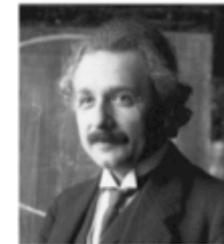
$$E \propto 1 / \lambda$$



Louis
de Broglie

- créer de nouvelles particules à grande masse

$$E = M C^2$$



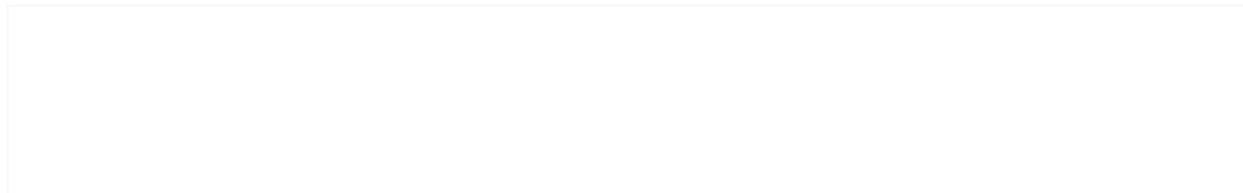
Albert
Einstein

- étudier les très hautes températures

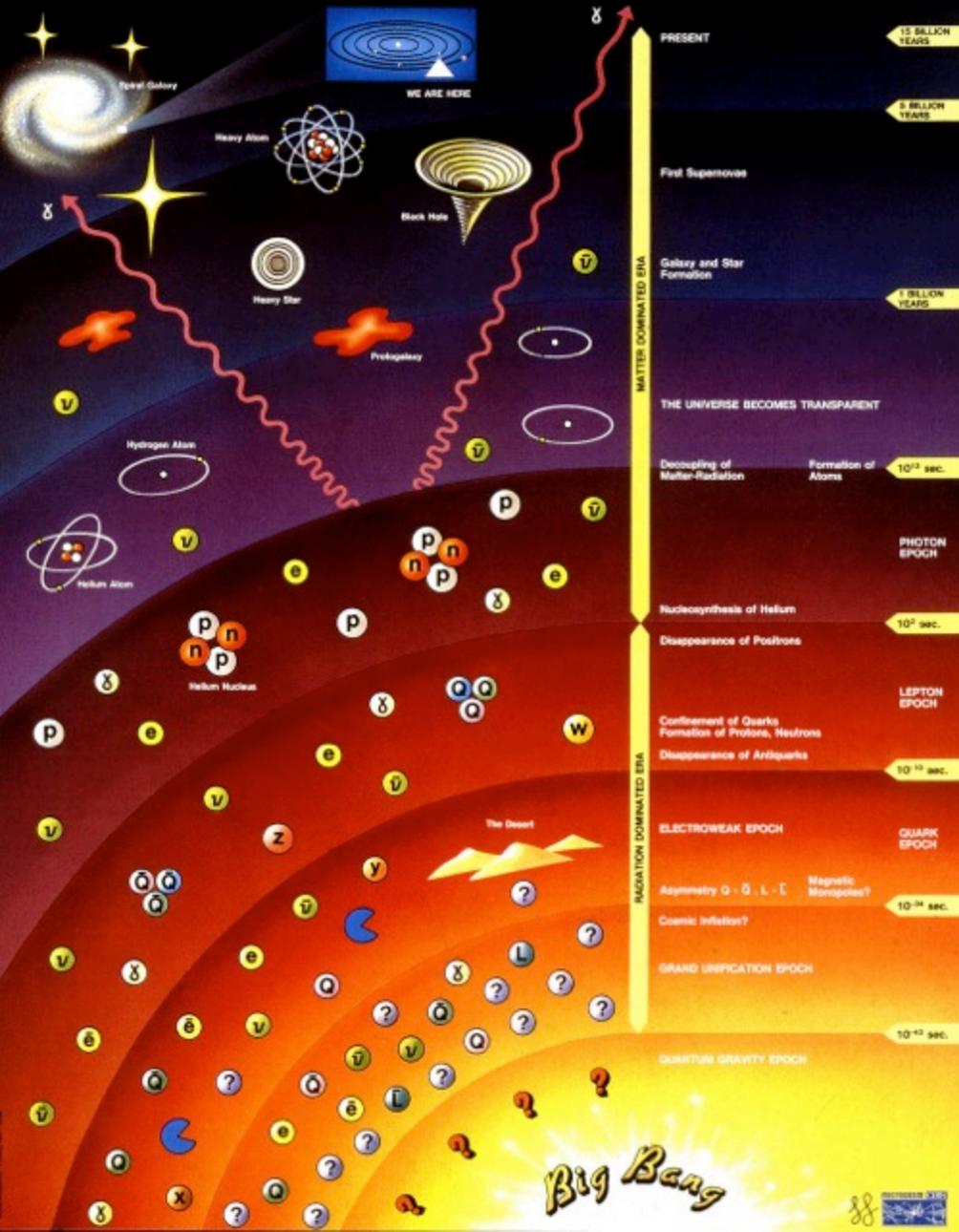
$$E = K T^{\circ}$$



Ludwig
Boltzmann



History of the Universe



Aujourd'hui (13,7 milliards d'années)

Formation étoiles(1 milliard d'années)

Formation des atomes (300 000 ans)

Formation des noyaux (180 secondes)

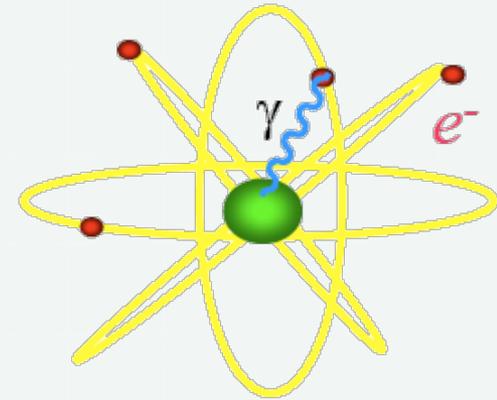
Formation des protons et neutrons (10^{-10} s)

??? (Avant)

3- La matière

L'atome

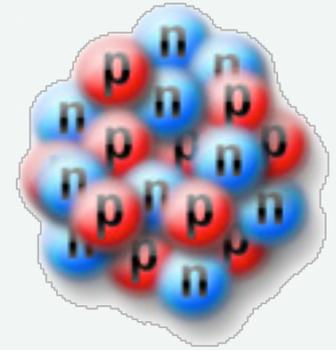
- 1 noyau et Z électrons liés au noyau par la force électromagnétique
- Taille :** Atome $\sim 10^{-10}$ m, $e^- < 10^{-19}$ m
- Charge :** L'atome est globalement neutre, électron $-e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C
- Masse :**
 - Masse atomique \sim Masse nucléaire
- Les propriétés chimiques dépendent du nombre atomique Z



Energie de
liaison des
électrons
 ~ 10 eV

Le noyau

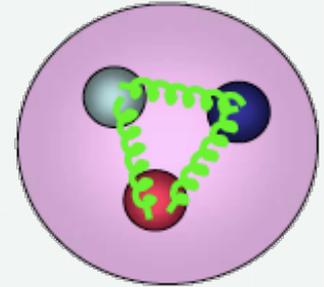
- Cohésion assurée par la **force nucléaire forte**
- **Taille :**
Pour un noyau de masse intermédiaire (80 nucléons)
 $R \sim 5 \text{ fm}$ (rappel : $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)
- **Charge :** Ze (Z protons)
- **Masse :** de quelques GeV/c^2 à quelques centaines de GeV/c^2
 - $m(^1\text{H}) = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $= 938.8 \text{ MeV}/c^2$
 - $m(^{244}\text{Pu}) \approx 4.08 \times 10^{-25} \text{ kg} \approx 230 \text{ GeV}/c^2$
- Certains noyaux sont stable, d'autre sont instables et se désintègrent



Energie de
liaison
 $\sim 10 \text{ MeV}/\text{nucléon}$

Les nucléons

- Proton (p) and neutrons (n) : cohésion assurée par la **force forte (de couleur)**
- Taille** : p,n ~1 fm
- Charge** : proton +e; neutron non chargé
- Masse** :
 - $m_p = 1.672621637(83) \times 10^{-27} \text{ kg} = 938.27 \text{ MeV}/c^2$
 - $m_n = 1.67492729(28) \times 10^{-27} \text{ kg} = 939.57 \text{ MeV}/c^2$
 - $m_p \sim m_n \sim 1836 m_e$
- Stabilité** :
 - Proton : stable (période $> 3 \times 10^{29}$ ans)
 - neutron : instable, période 614 s ~10 minutes



Energie de
liaison ~ 1 GeV

La matière qui nous entoure

Toute la matière ordinaire peut être décrite par les interactions de quatre fermions élémentaires (spin $\frac{1}{2}$) :

Particule	Symbole	Type	Charge (unité e)
Electron	e^-	Lepton	-1
Neutrino Electronique	ν_e	Lepton	0
Quark up	u	Quark	$2/3$
Quark down	d	Quark	$-1/3$

LA PREMIÈRE GÉNÉRATION

Les quarks sont les briques élémentaires des protons et des neutrons, qui sont les états liés de plus basse énergie d'un système trois quarks.



Proton (uud)



Neutron (udd)

Matière : 3 générations

La matière n'est pas si simple : Il y a 3 générations de fermions fondamentaux :

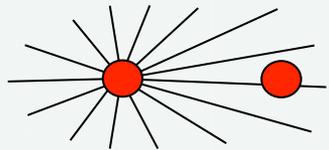
FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	C charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	S strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

- Chaque génération p. ex. (μ, ν_μ, c, s) est une réplique de (e, ν_e, u, d)
- La principale différence est la masse des particules : La première génération est la plus légère et la troisième la plus lourde.
- Une Conséquence du mariage de la relativité et de la mécanique quantique est que pour chaque particule, il existe une antiparticule qui a une masse identique, un spin identique mais des charges opposées.

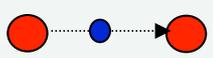
4- Les interactions fondamentales

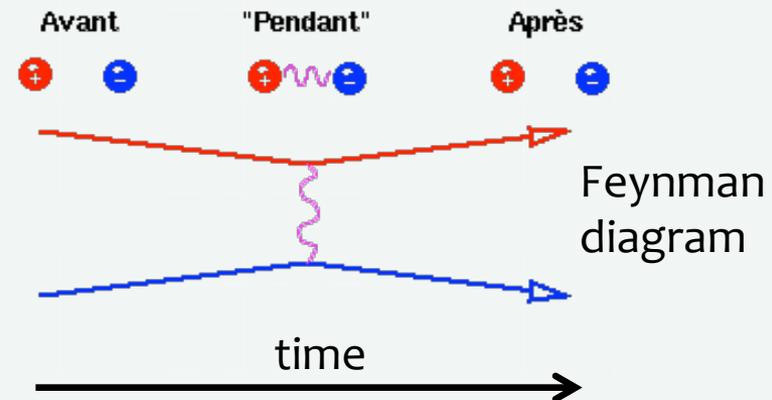
Interactions entre particules fondamentales

- Vue classique : action instantannée à distance 
La force dépend de la position relative des particules. Mais comment « savent-elles » ?

- Interaction via un champ: 

Chaque particule crée un champ dans l'espace. Elle interagissent avec le champs créé par une autre particule.

- Theorie quantique: 
Les particules échangent d'autres particules qui sont des médiateurs de la force.



Interaction Gravitationnelle

- Importante à très grande échelle, négligeable à très petite échelle
- S'exerce sur toutes les particules
- Messenger : Graviton ?
- Interaction à **longue portée** dépendant des masses



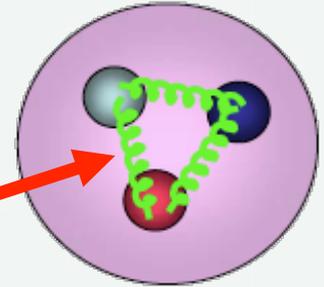
Interaction Électromagnétique

- S'exerce sur toutes les particules possédant une charge électrique.
- Messenger : Photon
- Interaction à longue portée dépendant de la charge électrique



Interaction Forte

- S' exerce uniquement sur les quarks
- Messagers : gluons
- Assure la cohésion des **quarks** dans les nucléons et des protons et neutrons dans le noyau



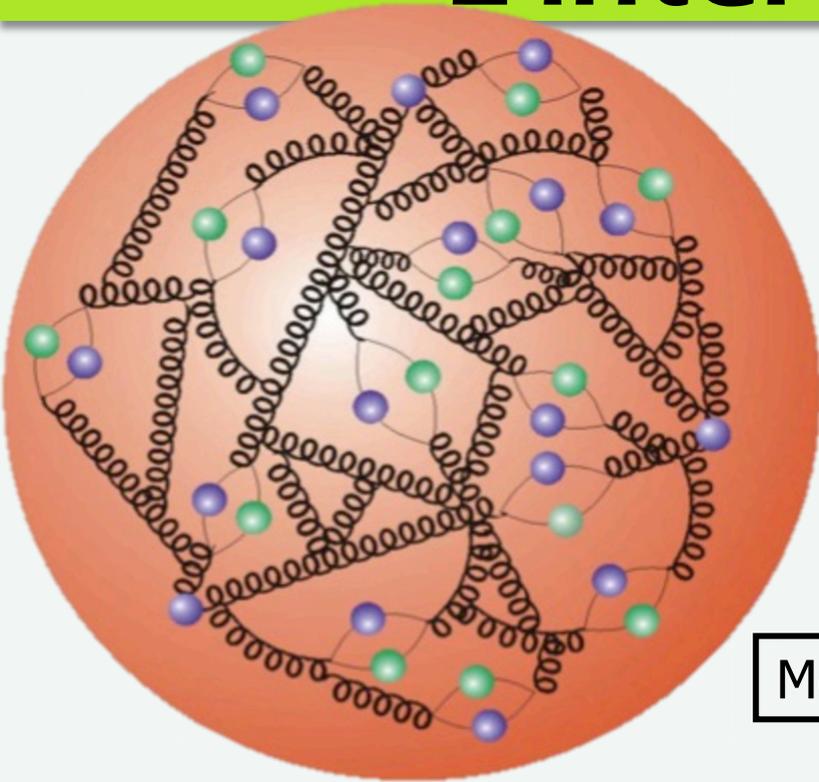
Hadrons

- Les **quarks** libres ne sont jamais **observés**, ils sont toujours confinés dans des **états liés** appelés **hadrons**.
- Macroscopiquement les **hadrons** se comportent comme des particules ponctuelles
- Les Hadrons sont de deux types :
 - MESONS** ($q\bar{q}$)
états liés d'un quark et d'un anti-quark $\pi^+ = (u\bar{d})$ and $K^- = (d\bar{s})$
 - BARYONS** (qqq)
états liés de 3 quarks $p = (uud)$ and $n = (udd)$
 - ANTIBARYONS** ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) e.g. $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$

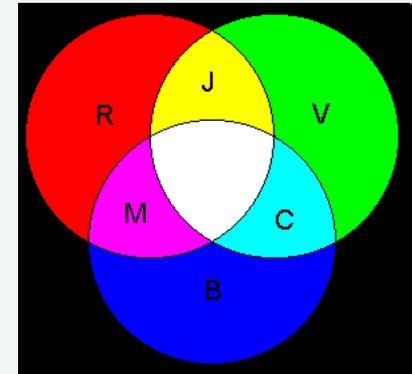
L'interaction forte

En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de couleur: Bleu vert rouge

Ainsi le proton est "incolore"

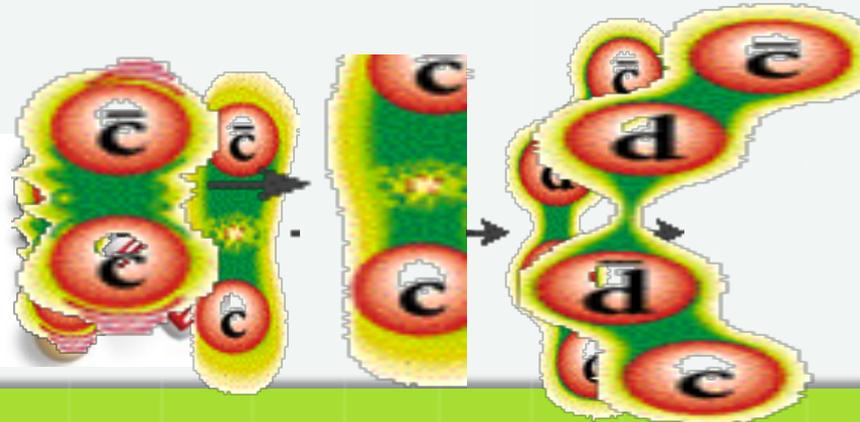


Médiateurs: **gluons**



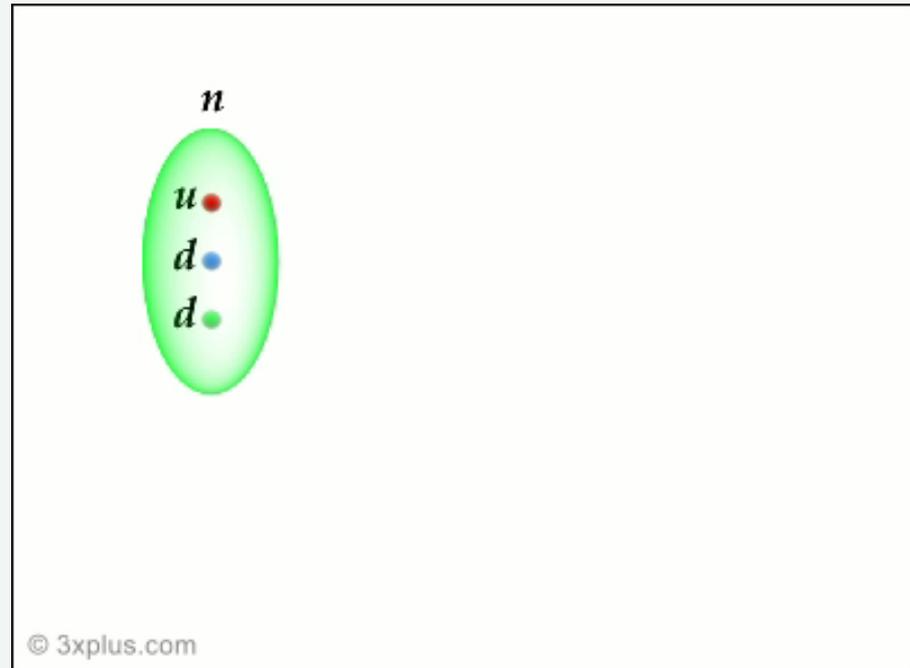
Les gluons « collent » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...). On ne peut pas observer un quark seul.

⇒ Stabilité des noyaux

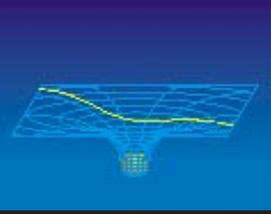


Interaction Faible

- Radioactivité β
- S'exerce sur toutes les particules
- Messagers :
des particules appelées W^+ , W^- et Z^0
- Interaction de courte portée



Les 4 interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Range	Charge	Relative intensity
	Gravitation Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	mass	10^{-39}
	Electromagnetique Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	10^{-2}
	Forte Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-15} m	Charge de couleur	1
	Faible Radioactivité β , Soleil	leptons et quarks	W^+ , W^- , Z^0 bosons	10^{-18} m	Charge faible	10^{-7}

Théorie quantique des champs

• Aux 4 forces fondamentales sont associés des « champs » qui remplissent l'espace. (par ex le champ électromagnétique pour la force électromagnétique).

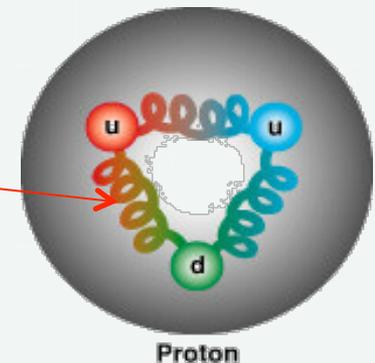
• Ces champs sont **quantifiés**. Les « quanta » du champ sont des particules élémentaires appelées « **bosons intermédiaires** ».

• Quanta de la **force électromagnétique**: **photons**

• Quanta de la **force forte**: **gluons**

• Quanta de la **force faible**: **Bosons W et Z**

• Quanta de la **force gravitationnelle**: **gravitons**
(toujours pas détectés)



• **Tous ces bosons intermédiaires ont une masse nulle, sauf W et Z qui sont très massifs (environ 100 fois la masse du proton)**

Naissance d'un paradigme

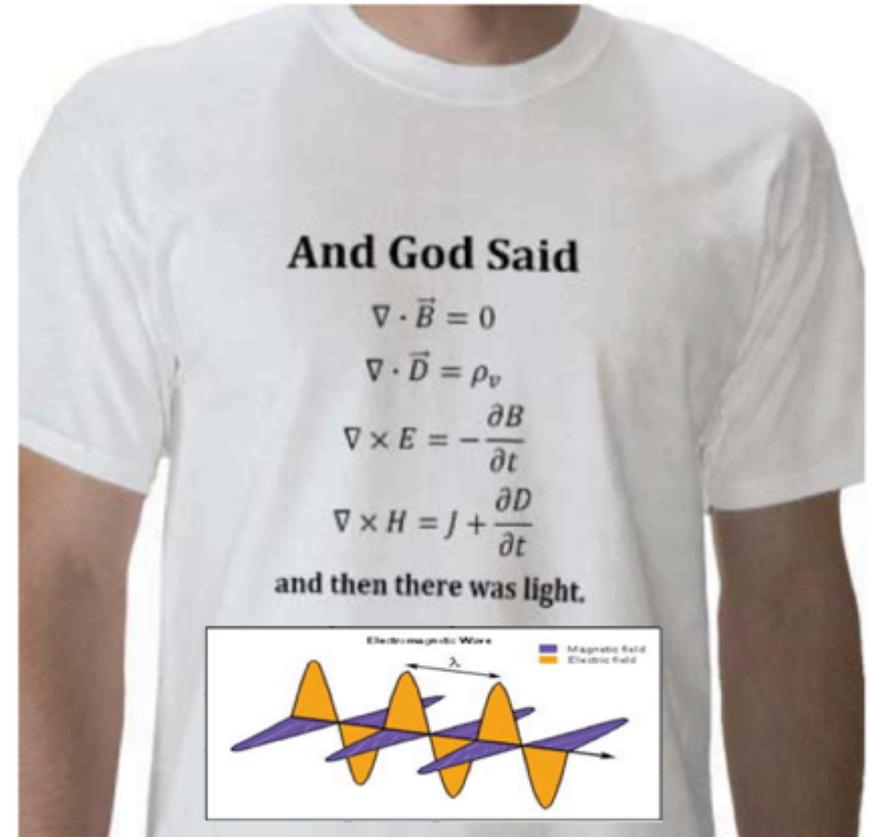


James Clerk
Maxwell

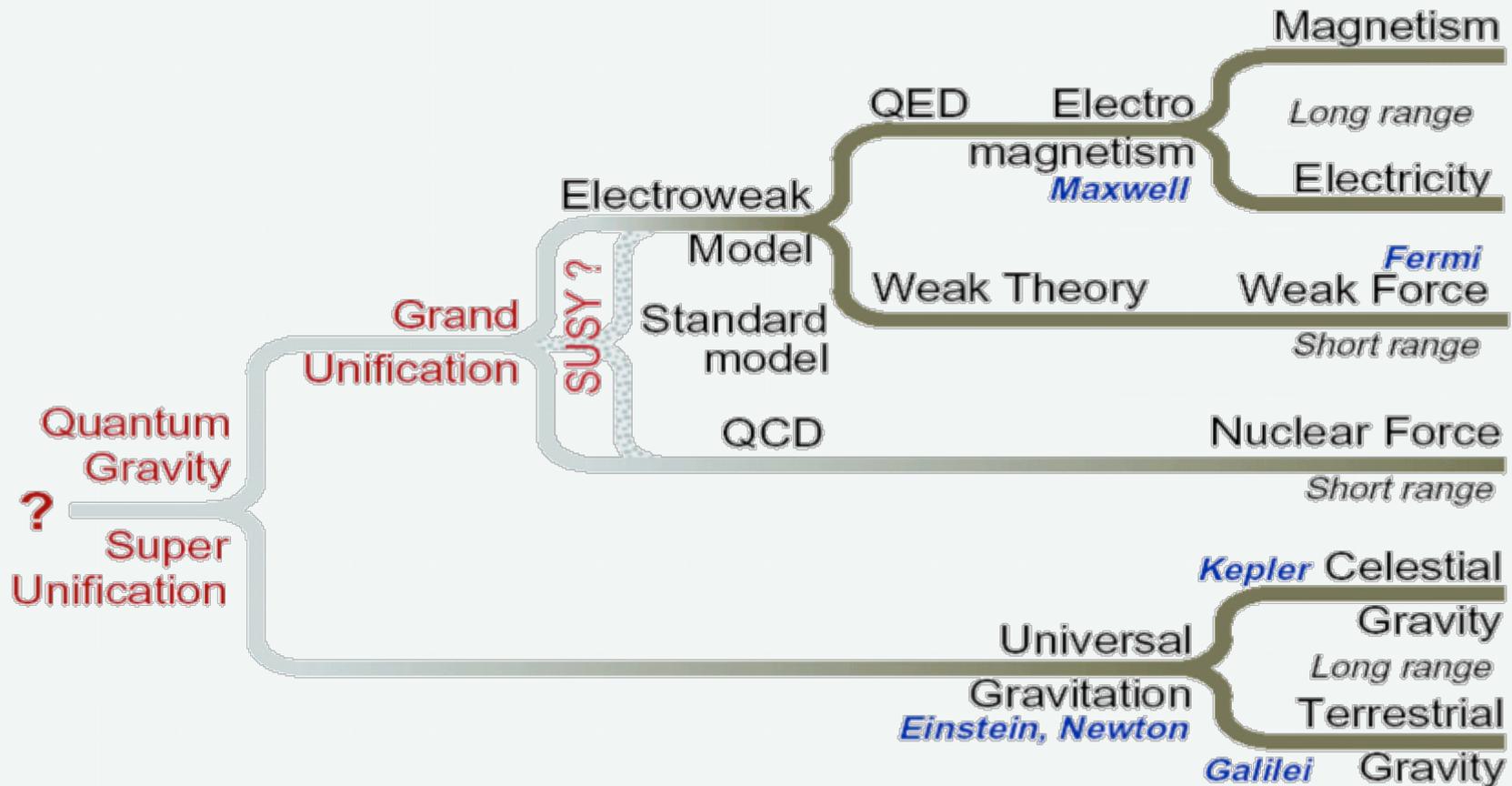
Maxwell introduit le concept de champ et remarque une symétrie entre les équations de l'électricité et du magnétisme

Unification : ELECTROMAGNÉTISME

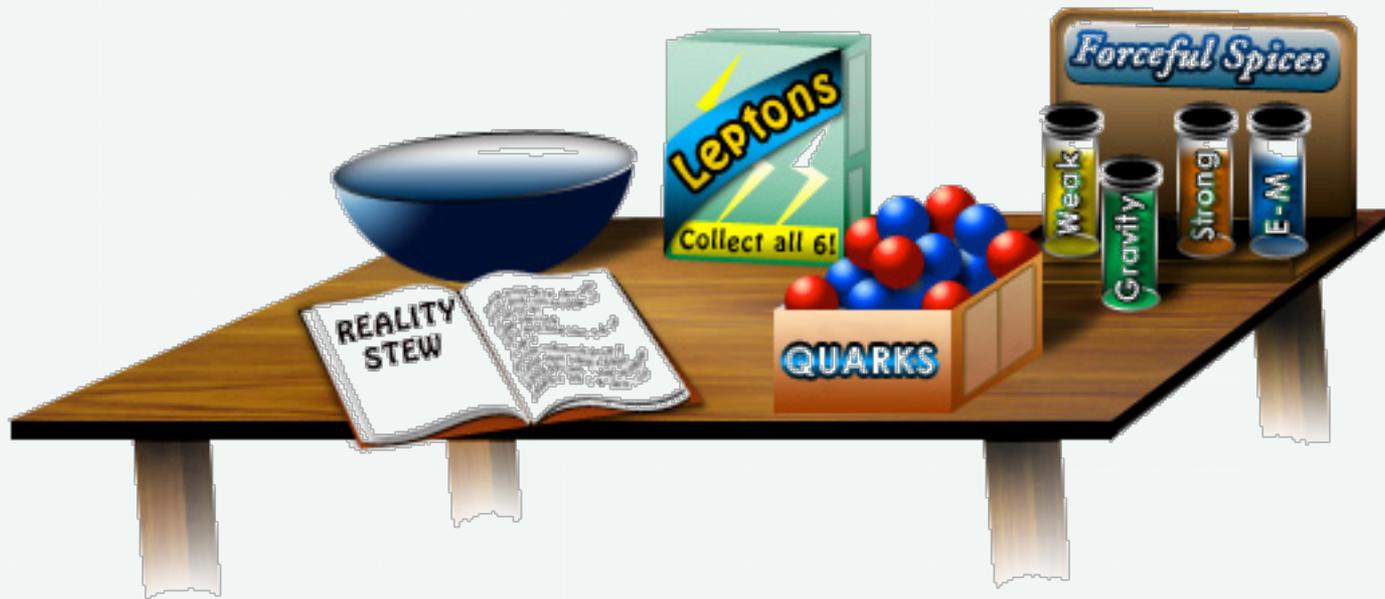
La lumière est une onde électromagnétique ... conséquence inévitable des lois unifiées de l'électricité et du magnétisme !!!



Paradigme de l'unification



Modèle standard de la physique des particules



Aboutissement et fleuron de la physique du
20^{ème} siècle

Le modèle standard

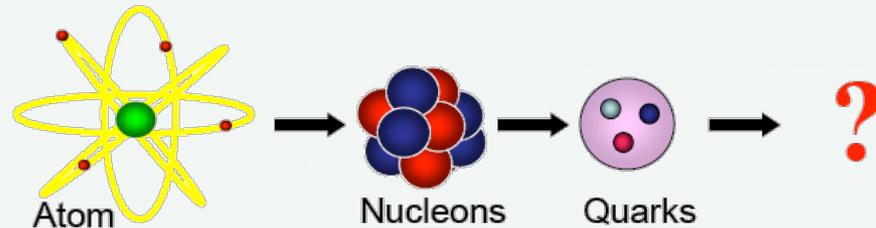
- Une théorie quantique des champs décrivant des constituants ponctuels de spin-1/2 interagissant via l'échange de particules de spin-1.
- Théorie élégante basée sur des invariances de jauge locale.
- Contient 19 paramètres libres, dont la valeur n'est pas fixée par des principes premiers mais doit être déterminée expérimentalement.
- Description remarquablement complète et précise des phénomènes connus en physique des particules (on comprend vraiment la physique jusqu'à une échelle de 100GeV (LEP, CDF&Do))
- (Sur)testé avec précision
précision $<10^{-4}$ dans des centaines de mesures, jusqu'à un impressionnant 10^{-12} pour le facteur gyromagnétique de l'électron.

Pourquoi chercher au-delà ?

Quantity	Value	Standard Model	Pull
m_Z [GeV]	91.1876 ± 0.0021	91.1874 ± 0.0021	0.1
m_W [GeV]	80.376 ± 0.033	80.375 ± 0.015	1.4
$\alpha_s(m_Z)$	0.1184 ± 0.0006	0.1181 ± 0.0006	0.0
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.21629 ± 0.00066	0.21584 ± 0.00006	0.7
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.1721 ± 0.0030	0.17228 ± 0.00004	-0.1
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.0145 ± 0.0025	0.01627 ± 0.00023	-0.7
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.0169 ± 0.0013		0.5
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.0188 ± 0.0017		1.5
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.0992 ± 0.0016	0.1033 ± 0.0007	-2.5
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.0707 ± 0.0035	0.0738 ± 0.0006	-0.9
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.0976 ± 0.0114	0.1034 ± 0.0007	-0.5
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.2324 ± 0.0012	0.23149 ± 0.00013	0.8
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.2238 ± 0.0050		-1.5
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.15138 ± 0.00216	0.1473 ± 0.0011	1.9
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.1544 ± 0.0060		1.2
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.1498 ± 0.0049		0.5
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.142 ± 0.015		-0.4
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.136 ± 0.015		-0.8
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.1439 ± 0.0043		-0.8
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.923 ± 0.020	0.9348 ± 0.0001	-0.6
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.670 ± 0.027	0.6679 ± 0.0005	0.1
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.895 ± 0.091	0.9357 ± 0.0001	-0.4
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	0.3010 ± 0.0015	0.30386 ± 0.00018	-1.9
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	0.0308 ± 0.0011	0.03001 ± 0.00003	0.7
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	-0.040 ± 0.015	-0.0397 ± 0.0003	0.0
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	-0.507 ± 0.014	-0.5064 ± 0.0001	0.0
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	$(-1.31 \pm 0.17) \cdot 10^{-7}$	$(-1.54 \pm 0.02) \cdot 10^{-7}$	1.3
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	-72.62 ± 0.46	-73.16 ± 0.03	1.2
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	-116.4 ± 3.6	-116.76 ± 0.04	0.1
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	$(3.55^{+0.53}_{-0.46}) \cdot 10^{-3}$	$(3.19 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$	0.8
$\alpha_s(m_c)$ [GeV]	$4511.07(74) \cdot 10^{-9}$	$4509.08(10) \cdot 10^{-9}$	2.7
$\alpha_s(m_b)$ [GeV]	290.93 ± 0.48	291.80 ± 1.76	-0.4

PDG 2009

Des questions sans réponses



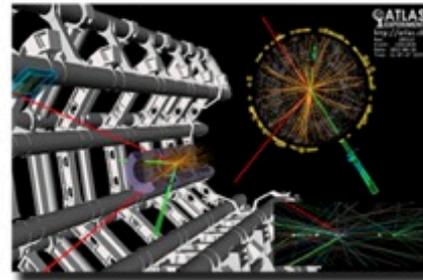
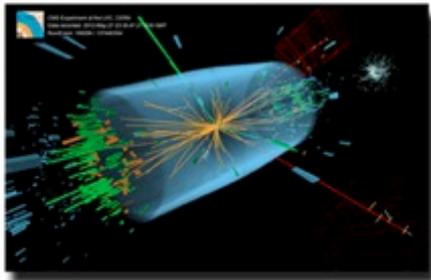
- Quelle est l'origine de la masse ? Pourquoi les masses des particules sont si différentes ?
- Qu'est-ce que la matière noire ?
- Pourquoi l'antimatière a disparu ?
- Pourquoi les 4 interactions fondamentales ont des intensités si différentes ? Comment réconcilier la gravité avec les autres interactions ?
- Combien y-a-t-il vraiment de dimensions dans notre univers

La réponse à certaines de ces questions est probablement cachée dans la région jusqu'alors inexplorée du TeV (10^{12} eV)

Prix nobel de physique 2013



"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"



Masse

- La masse est omniprésente en physique

$P=mg$	Masse gravitationnelle	Galilée
$F=ma$	Masse inertielle	Newton
$E=mc^2$	Equivalence masse-énergie	Einstein

Toutes ces masses sont identiques

- Or au sein du modèle standard les particules sont toutes de masses nulles, sinon les invariances de jauge (symétries de la théorie) sont explicitement brisées.
→ **Contraire aux résultats expérimentaux**

Le mécanisme de Higgs

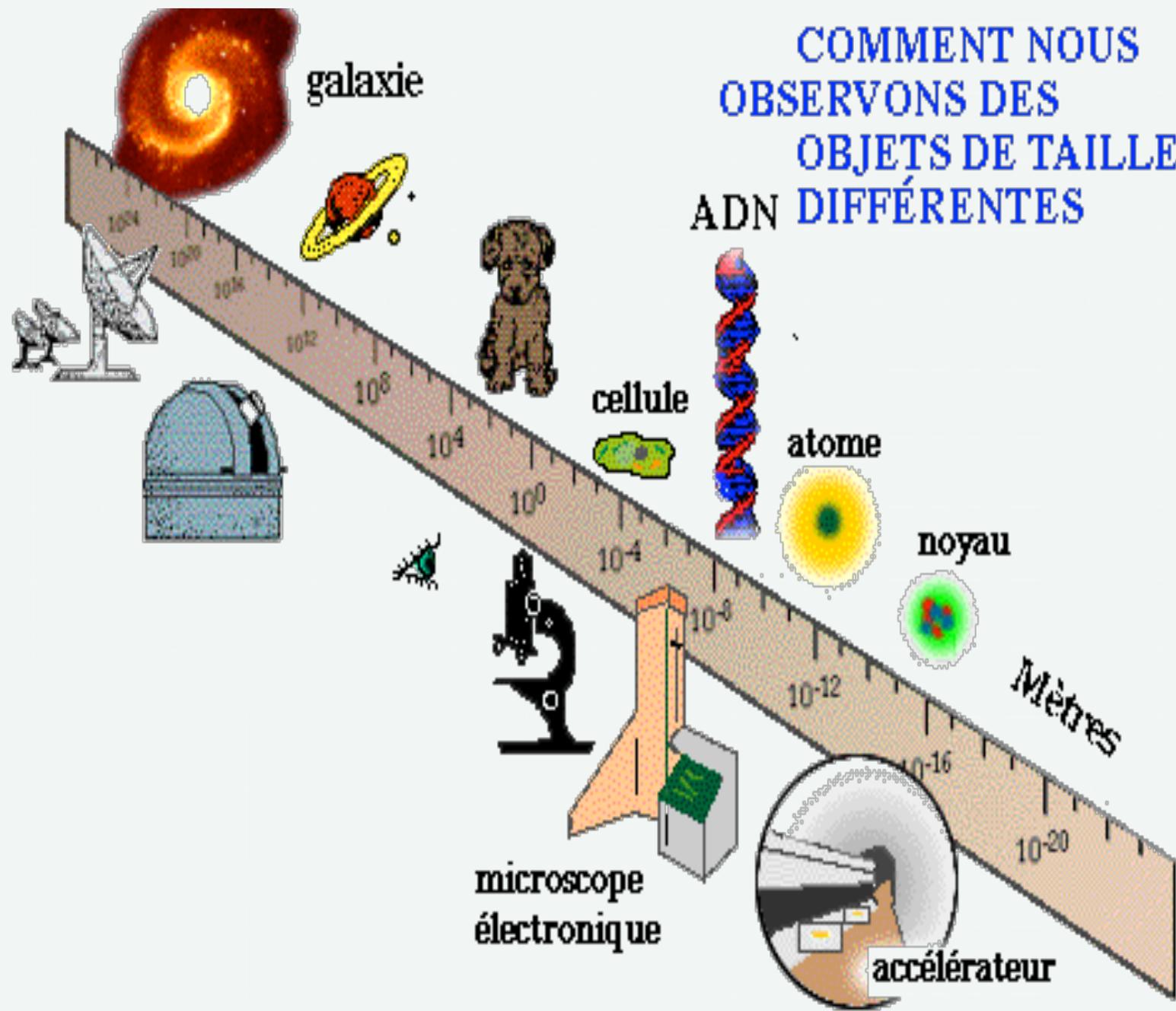
- La solution la plus simple est (Higgs, Kibble, Brout, Englert 1960's) :
 - Toutes les particules sont de masse nulle.
 - Un nouveau champ scalaire imprègne l'univers. Les particules interagissant avec ce champ acquièrent une masse. Plus l'interaction avec ce champ est intense, plus la masse est élevée.
- L'équation la plus connue de la physique $E=mc^2$ est le cas particulier d'une équation plus générale $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
Pour une particule de masse nulle $m=0$, on obtient $E=pc$ et puisque $v/c=pc/E$, alors $v=c$.
→ Les particules de masse nulle se déplacent obligatoirement à la vitesse de la lumière. Avec des arguments similaires, les particules massives ne peuvent jamais atteindre la vitesse de la lumière
- Quand les particules de masse nulle se propagent dans le champ de Higgs, elles interagissent avec ce champ. Elles sont ralenties ($v < c$) et de ce fait acquièrent une masse.

Le boson de Higgs

- Comme tous les champs, le champs de Higgs doit avoir un “quanta”, qui est nommé le “**boson de Higgs**”
- la théorie ne contraint pas significativement la masse du boson de Higgs. M_H peut-être considéré comme un paramètre libre. Le boson de Higgs pouvait être n'importe où entre 10GeV and ~ 1000 GeV.
- Cette théorie est élégante, cohérente et en accord avec toutes les observations ... mais pendant 40 ans, cette particule a échappé à l'observation, elle a été observée EN 2012 dans des expériences ATLAS et CMS du CERN

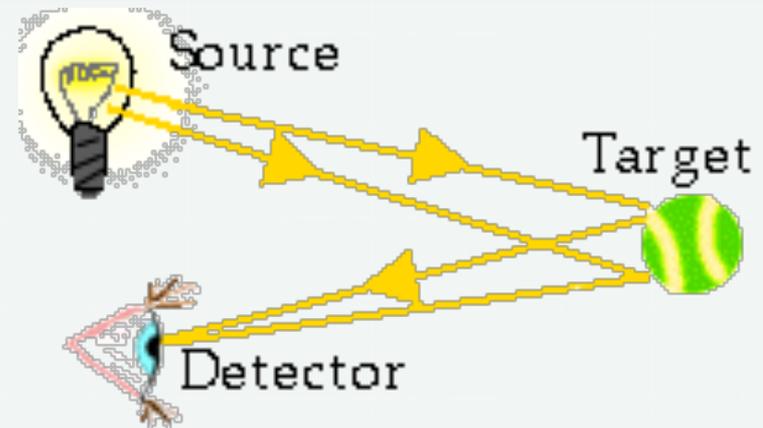
5- Les accélérateurs de particules

COMMENT NOUS OBSERVONS DES OBJETS DE TAILLE DIFFÉRENTES



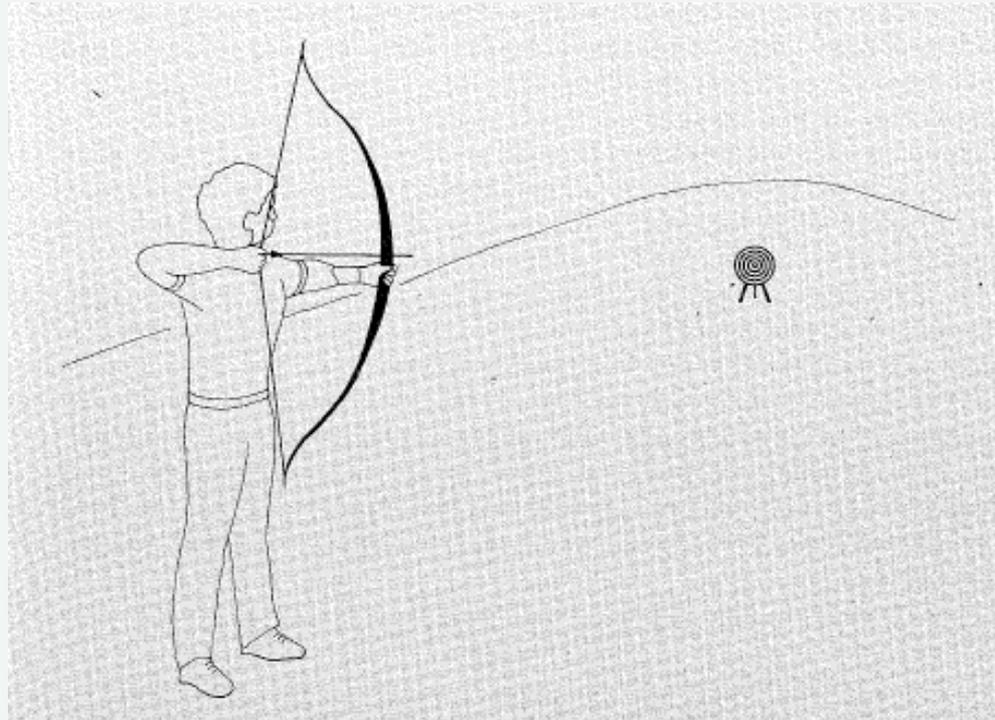
Les outils expérimentaux

- Pour observer un objet :

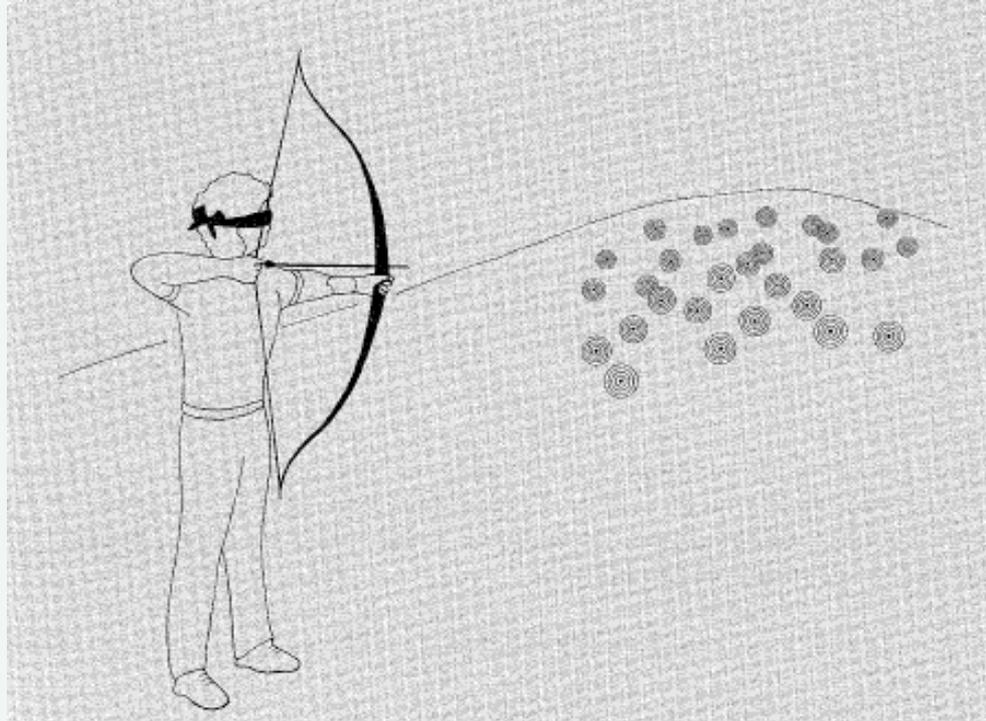


- Comment voir une particule ?
(invisible même avec un microscope)
- Source : particules subatomique de haute énergie.
(accélérateur de particules) → “source lumineuse”
- Détecteurs de particules subatomiques → “yeux”

Collisions dans le monde macroscopique



Collisions dans le monde microscopique



Pour explorer le monde inconnu :

Il faut un accélérateur capable de produire des masses de l'ordre du TeV



... Et un détecteur capable de les identifier

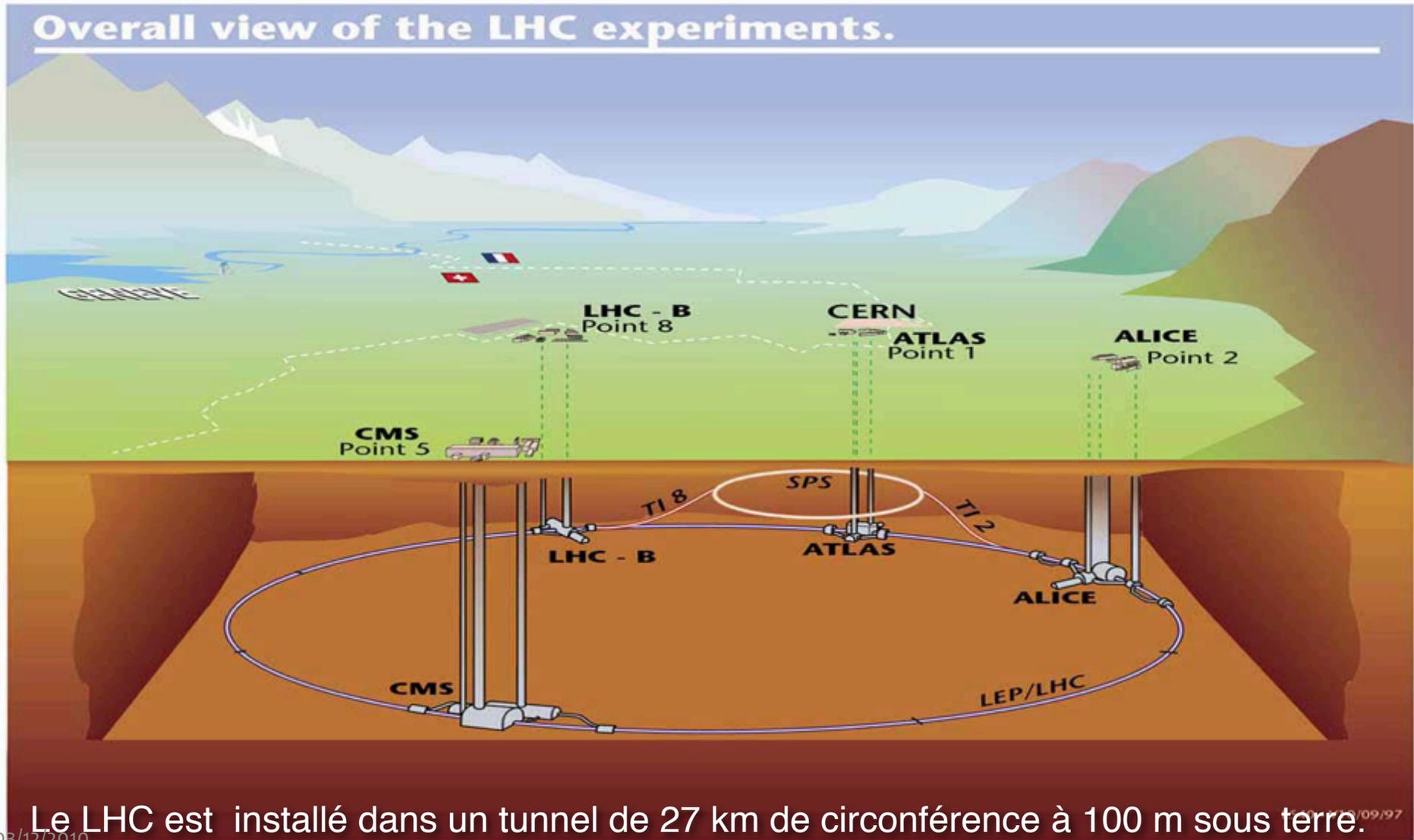
Le LHC du CERN

Le CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) est situé à la frontière franco-suisse près de Genève.

Le plus grand accélérateur du monde, le Large Hadron Collider (**LHC**) est en fonctionnement depuis Mars 2010.



Les protons circulent en sens contraires dans 2 anneaux indépendants. Les faisceaux de protons sont amenés en collision en 4 points d'interaction où sont installés les 2 « gros » détecteurs ATLAS et CMS (+2 détecteurs spécialisés ALICE et LHCb).



LHC = Large Hadron Collider

Large : tunnel de 27 km de circonférence à 100m sous terre

Hadron: les hadrons en question sont des protons

Collider= Collisionneur. Le LHC produit de violentes collisions proton-proton.



Des milliers d'aimants pour guider les protons dans un tunnel circulaire



Des cavités accélératrices pour accélérer les protons à la plus haute énergie jamais atteinte en laboratoire!

Les protons sont accélérés pas de puissants champs électriques à une vitesse proche de la vitesse de la lumière

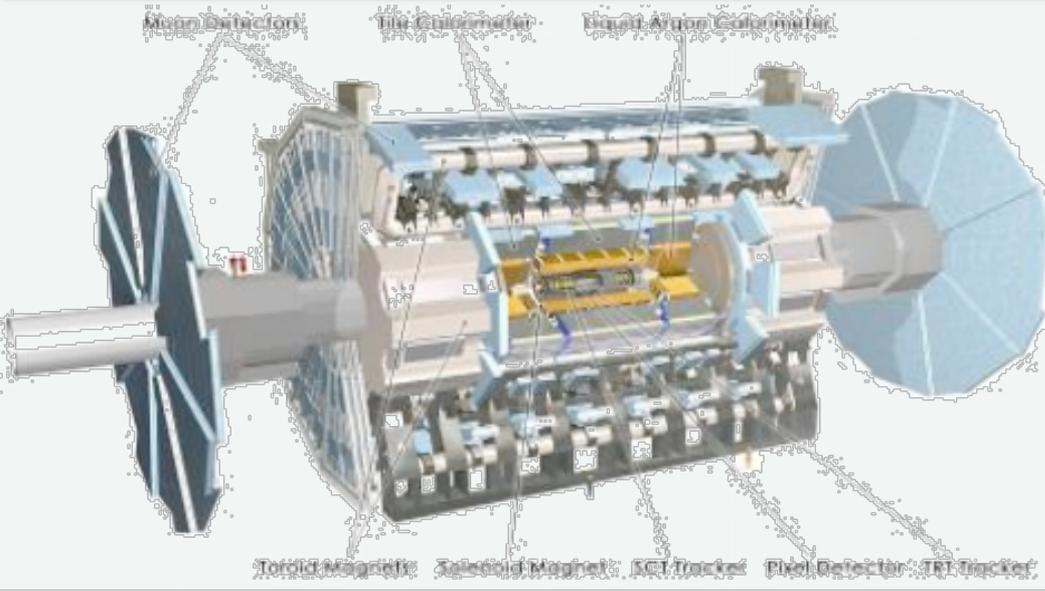
Et sont maintenus sur leur orbite circulaire par de puissant aimants supraconducteurs.

Les aimants opèrent à 8.3 Tesla (200000 x le champ magnétique terrestre) & 1.9 K (-271°C) dans l'hélium superfluide (température plus faible que l'espace interplanétaire)

Les protons voyagent dans un vide qui est plus poussé que l'espace interplanétaire .



Deux détecteurs généralistes

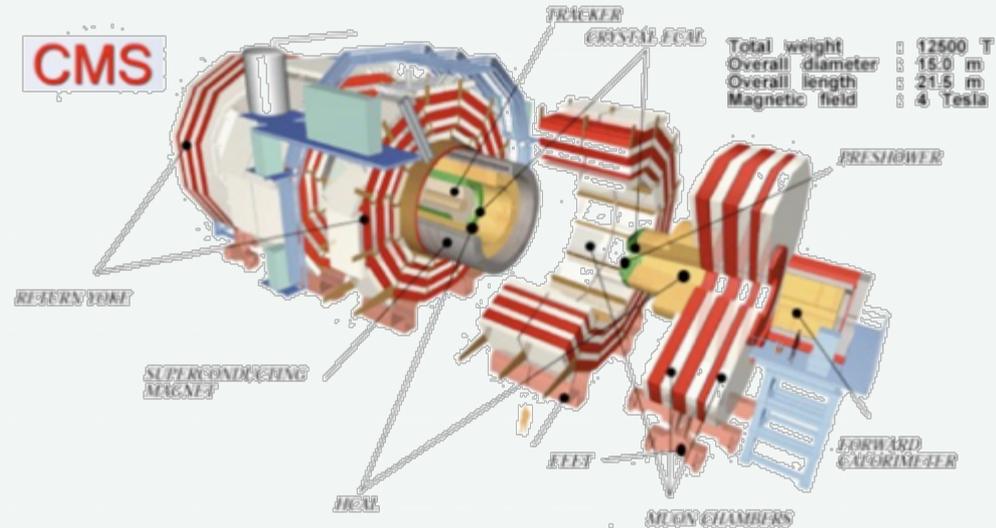


ATLAS

A Toroidal Lhc ApparatuS
Higgs , nouvelle physique, ...

CMS

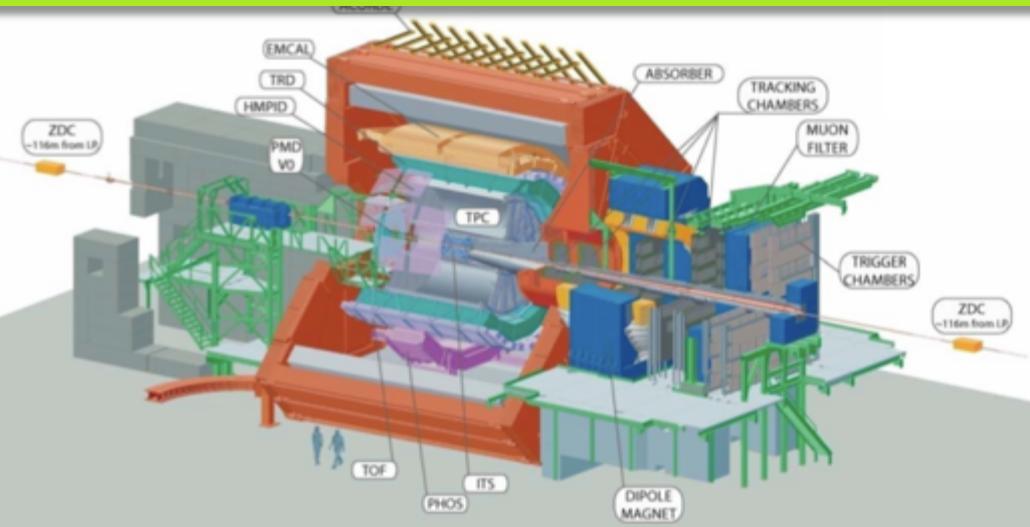
Compact Muon Solenoid
Higgs , nouvelle physique, ...



Deux détecteurs spécialisés

ALICE

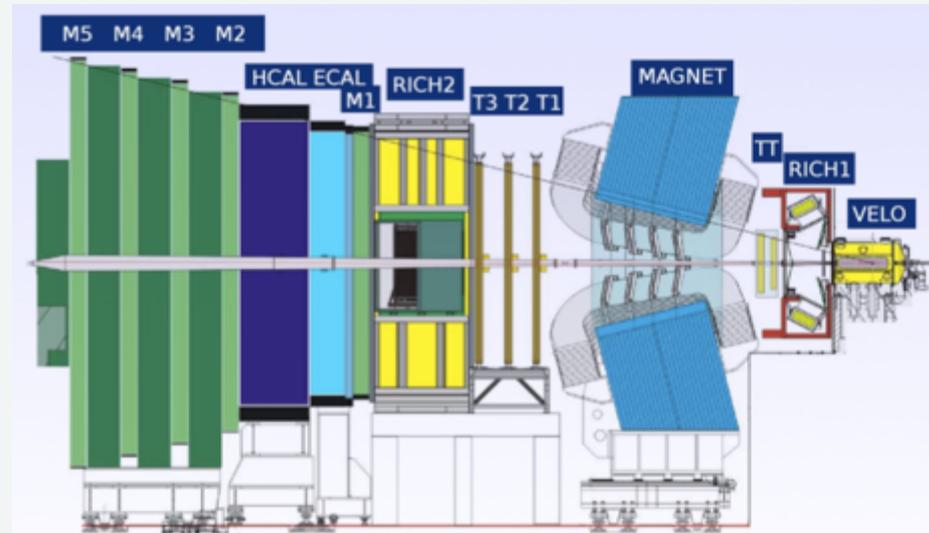
A Large Ion Collider Experiment
Etude du Plasma de quarks et gluons



LHCb

Large Hadron Collider beauty
experiment

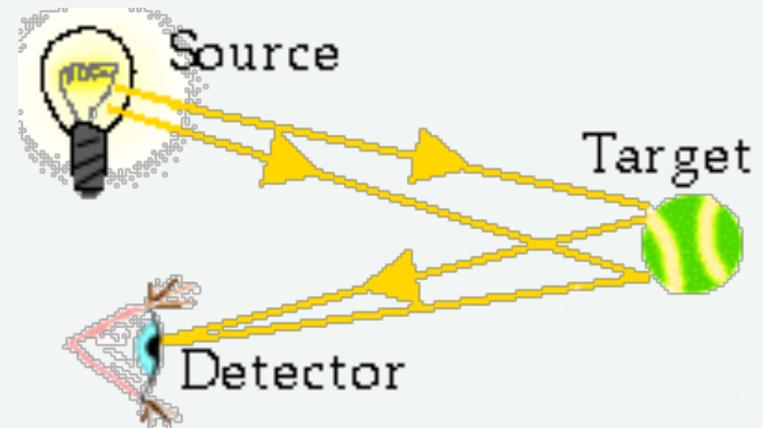
Asymétrie matière/antimatière



6- Les détecteurs de particules

Les outils expérimentaux

- Pour observer un objet :



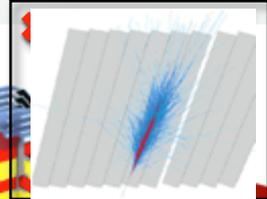
- Comment voir une particule ?
(invisible même avec un microscope)
- Source : particules subatomique de haute énergie.
(accélérateur de particules) → “source lumineuse”
- Détecteurs de particules subatomiques → “yeux”

SUPERCONDUCTING COIL

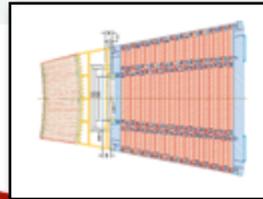
Total weight : 14,000 t
Overall diameter : 15 m
Overall length : 28 m
Magnetic field : 4 Tesla

CALORIMETERS

ECAL Scintillating PbWO₄ Crystals

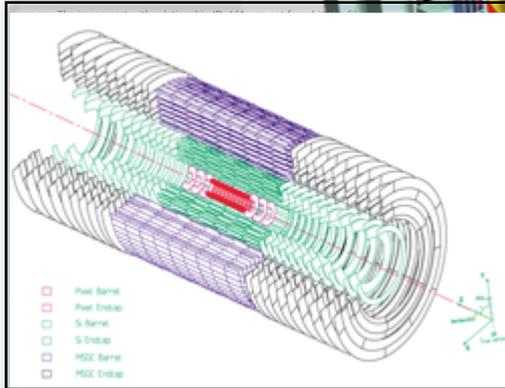


HCAL Plastic scintillator copper sandwich



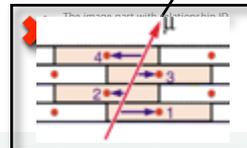
IRON YOKE

TRACKER

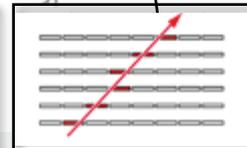


Silicon Microstrips
Pixels

MUON BARREL

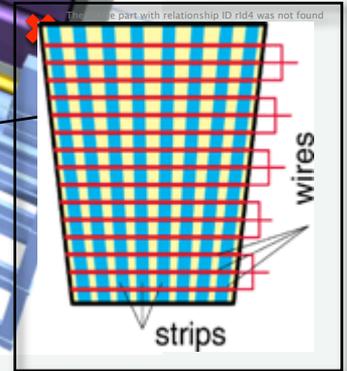


Drift Tube Chambers (DT)



Resistive Plate Chambers (RPC)

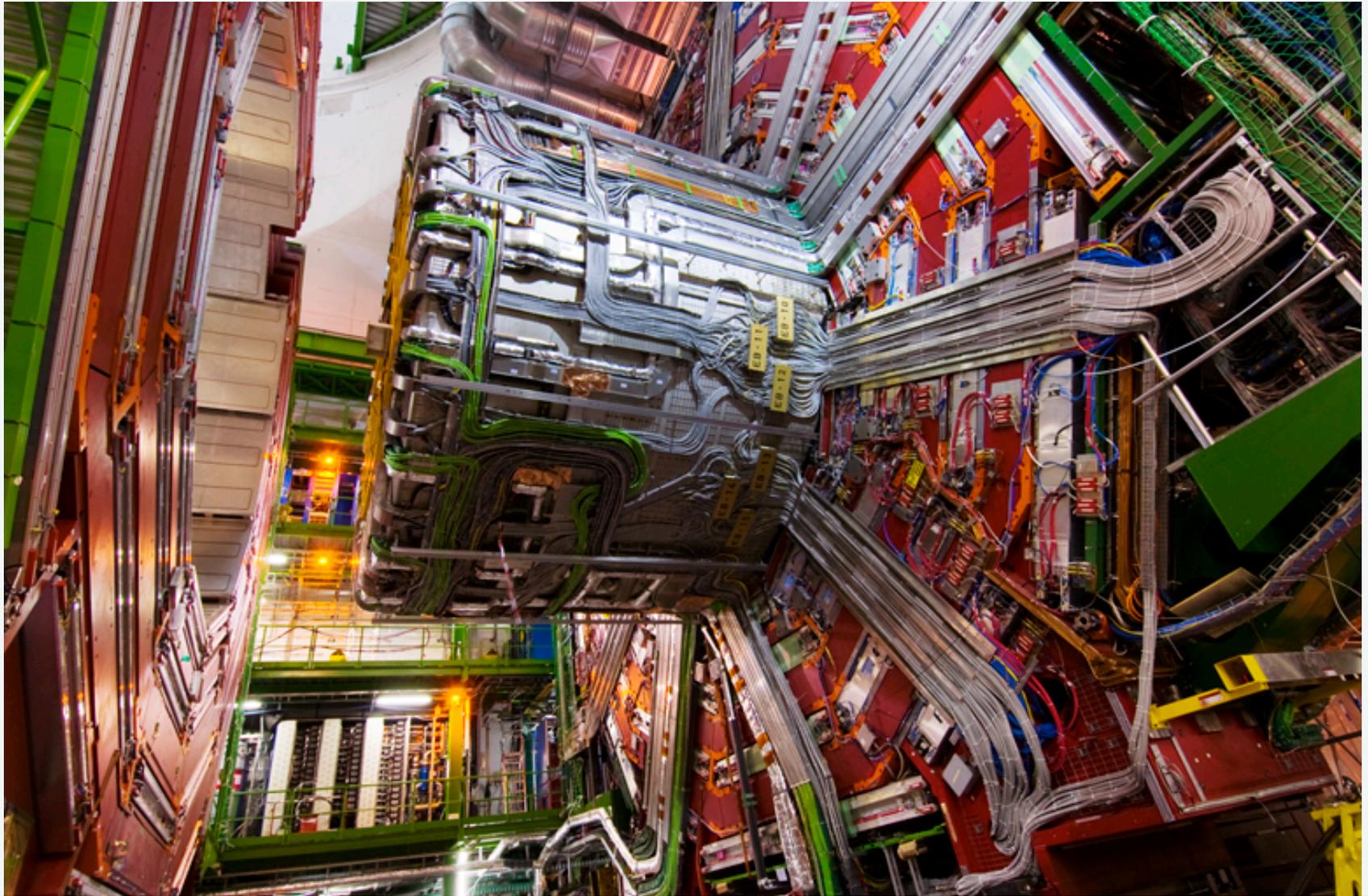
MUON ENDCAPS

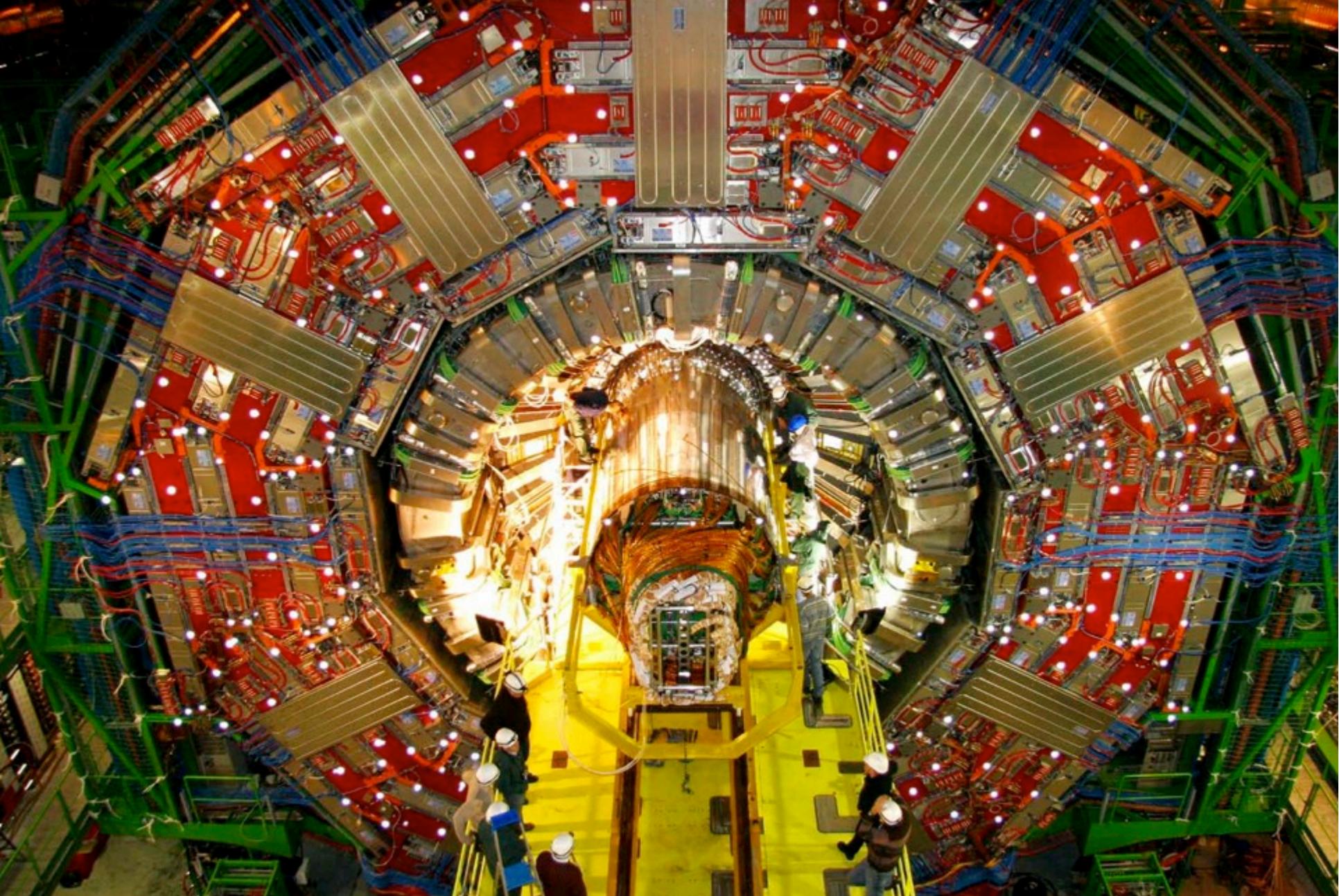


Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

Comment faire des découvertes au LHC?

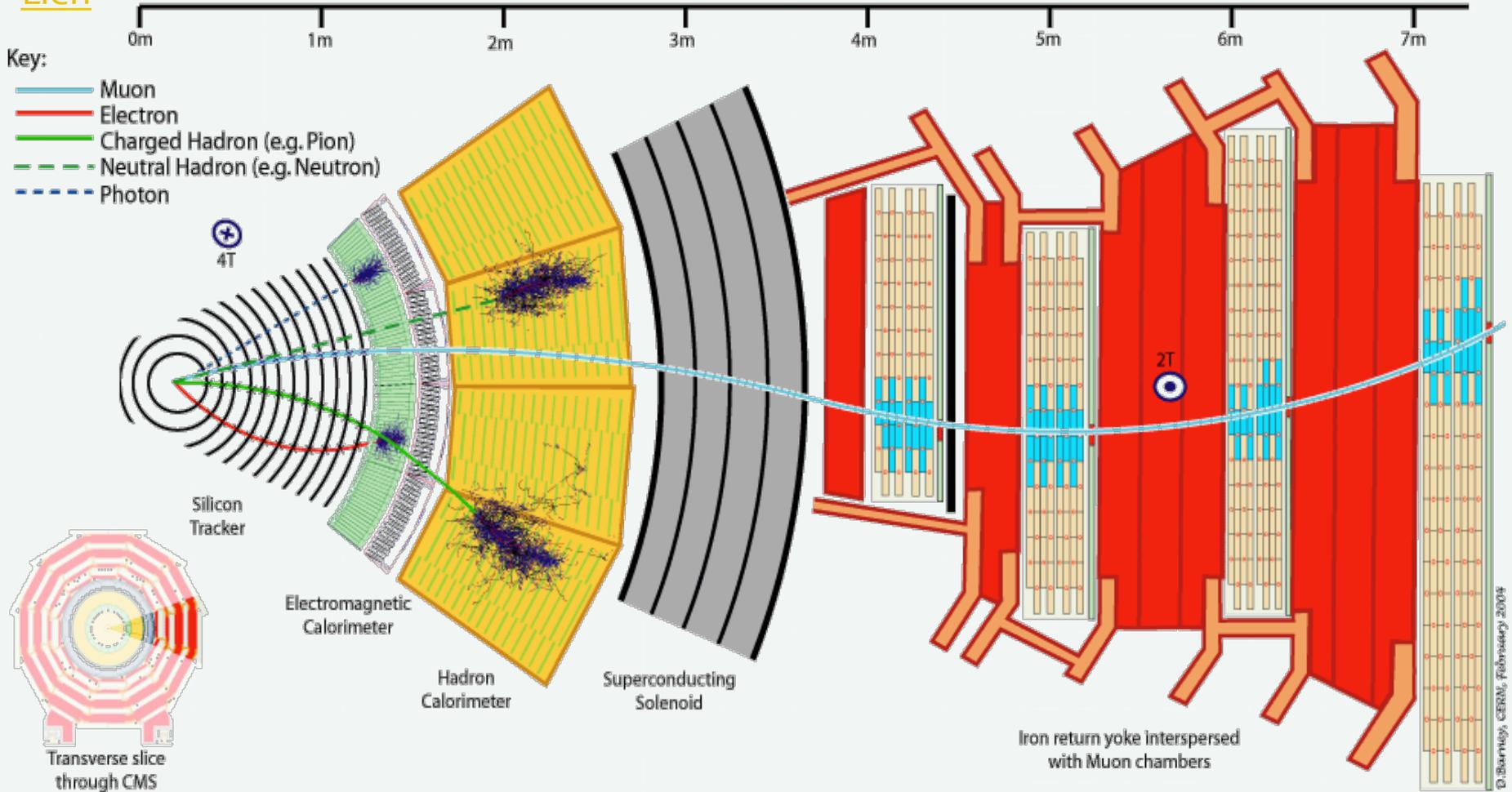
Cables, tuyaux et fibres optiques !





Identification et mesure

[Lien](#)

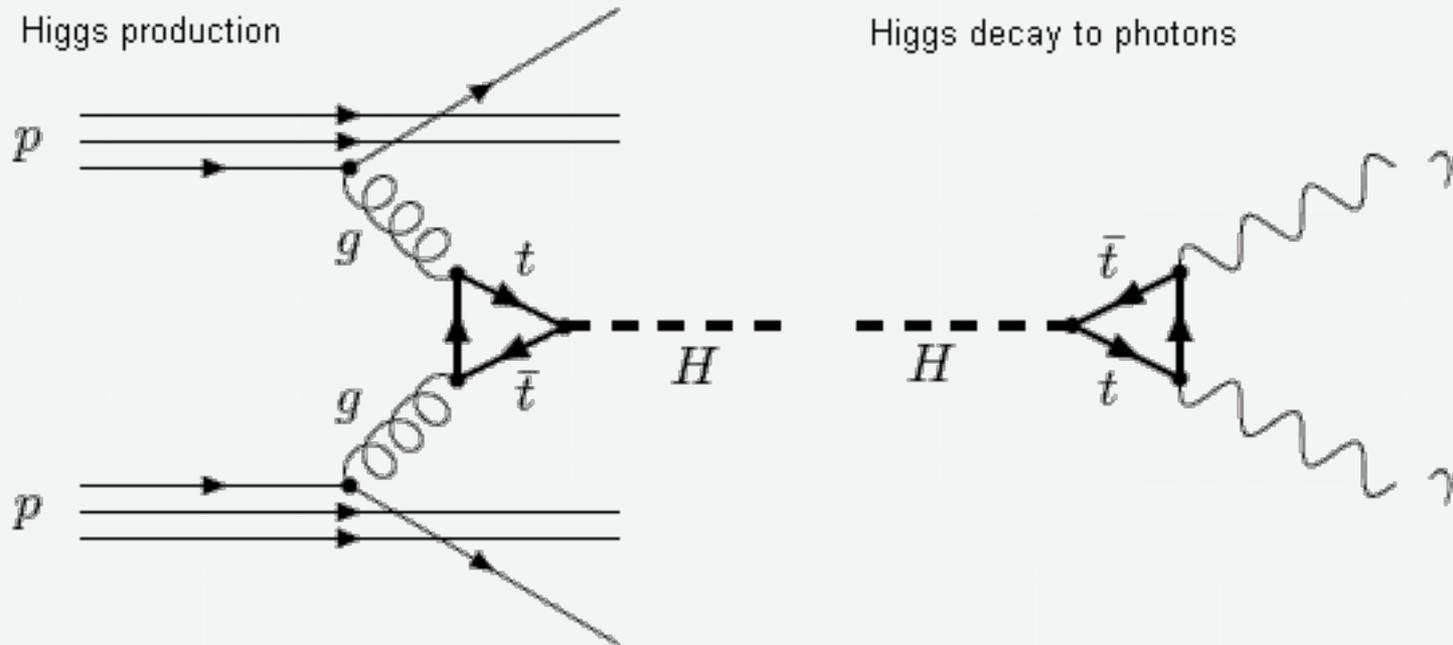


Grille de calcul

- Fréquence de collision : 40 MHz
- Besoin d'une grande puissance de calcul :
→ développement de la grille de calcul
- Worldwide LHC Computing Grid connecte 1000000 processeurs dans 34 pays avec des transferts de données ultra-rapides

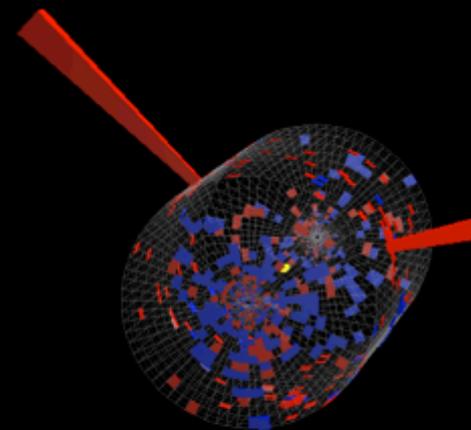
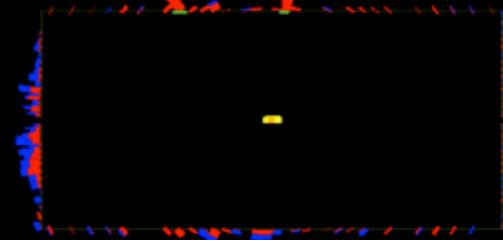
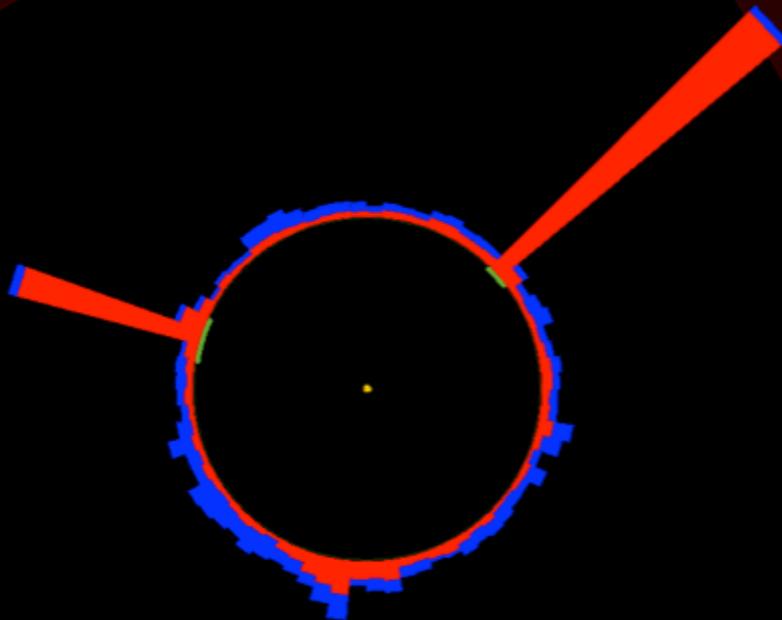


Recherche du boson de Higgs



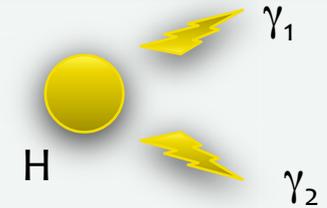
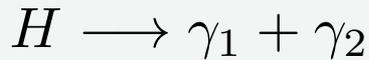
Bruits de fonds dominants : $gg \rightarrow \gamma\gamma$ et $qq \rightarrow \gamma\gamma$

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 13 22:08:14 2012 CEST
Run/Event: 194108 / 564224000



Masse invariante

- Le boson de Higgs créé se désintègre très rapidement et n'est pas visible dans le détecteur



- $E=mc^2$ est le cas particulier d'une équation plus générale : $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
Appliqué au cas du Higgs : $E_H^2 = \vec{p}_H^2 c^2 + m_H^2 c^4$

- Conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement :

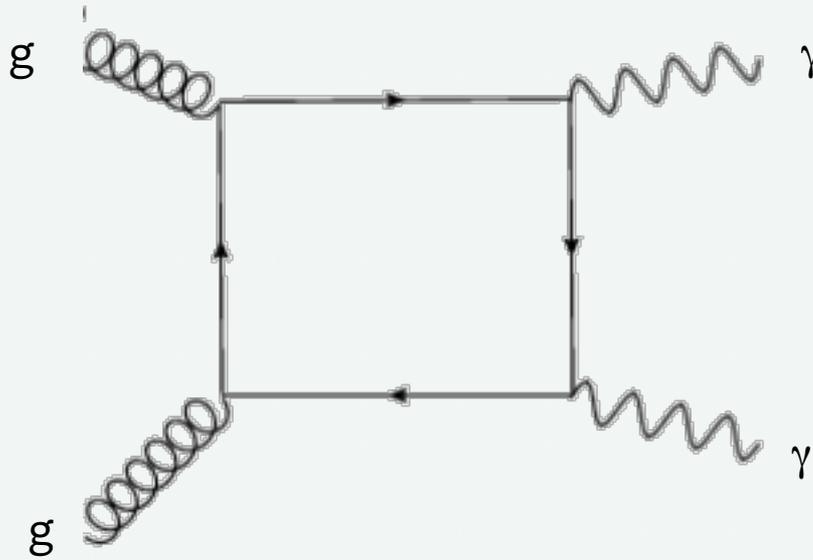
$$\begin{cases} E_H = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} \\ \vec{p}_H = \vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2} \end{cases}$$

- On peut donc remonter à la masse de la particule qui s'est désintégrée en deux photons

$$m_H c^2 = \sqrt{E_H^2 - \vec{p}_H^2 c^2} = \sqrt{(E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2})^2 - (\vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2})^2 c^2}$$

Masse invariante

Bruit de fond : $gg \rightarrow \gamma\gamma$



Non résonant

$M_{\gamma\gamma} \rightarrow$ spectre exponentiellement décroissant

La découverte

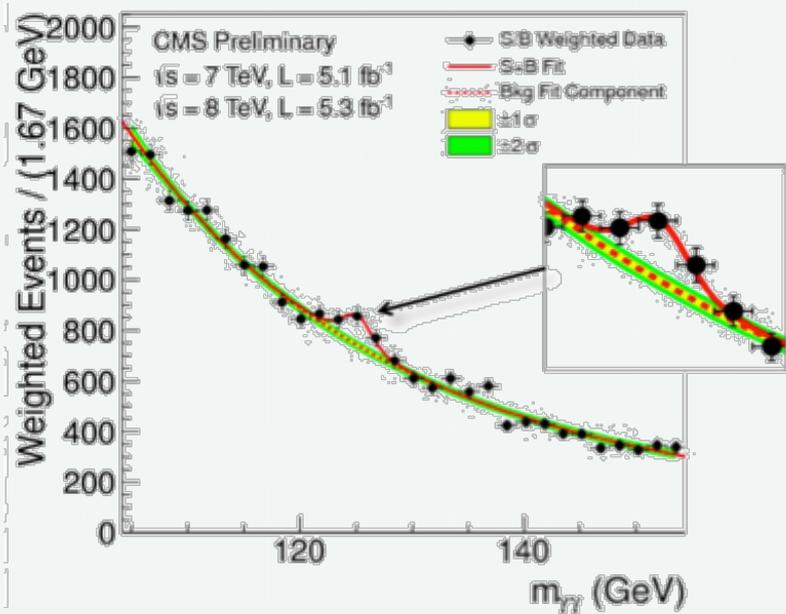
Rappel : $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

Pour une paire de photons $\gamma_1 \gamma_2$, conservation énergie-impulsion : $E_{\gamma\gamma} = E_1 + E_2$ et $p_{\gamma\gamma} = p_1 + p_2$

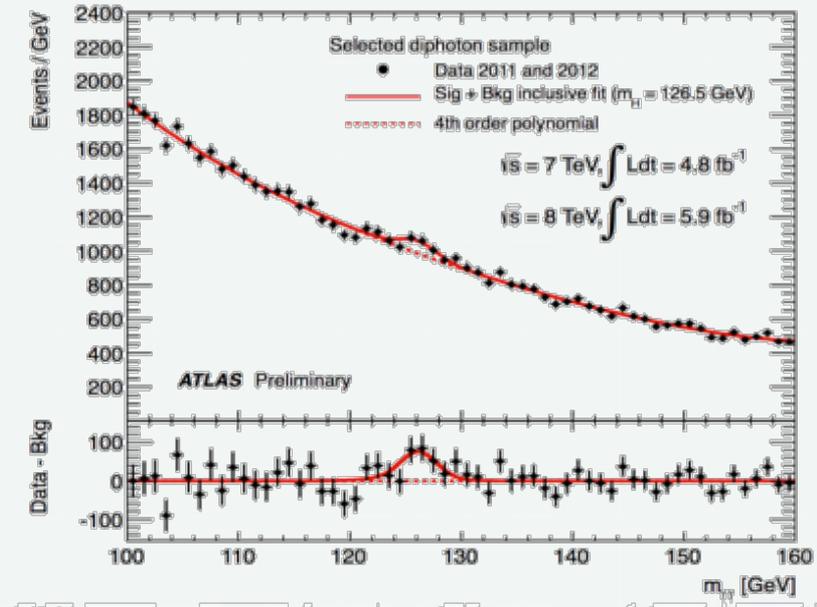
$$\Rightarrow m_{\gamma\gamma} c^2 = \sqrt{(E_{\gamma\gamma})^2 - p_{\gamma\gamma}^2 c^2}$$

Si les deux photons proviennent du Higgs ($H \rightarrow \gamma_1 \gamma_2$), alors $E_{\gamma\gamma} = E_H$ et $p_{\gamma\gamma} = p_H$,
donc $m_{\gamma\gamma} c^2 = m_H c^2$

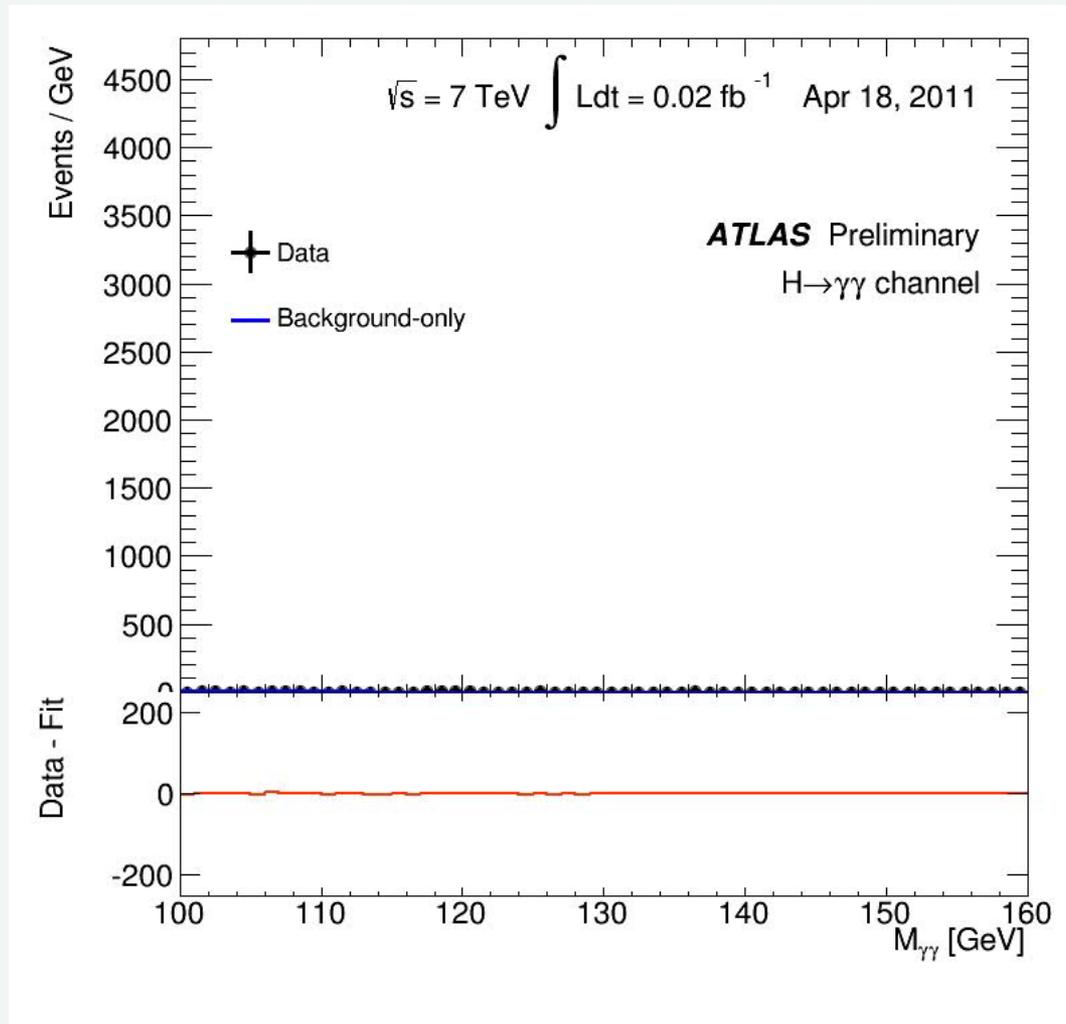
Observation de CMS



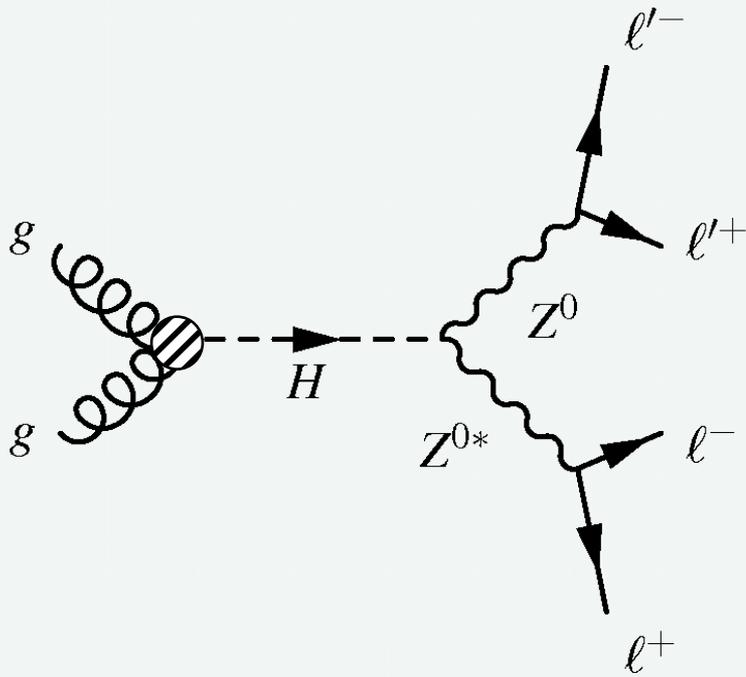
Observation d'ATLAS



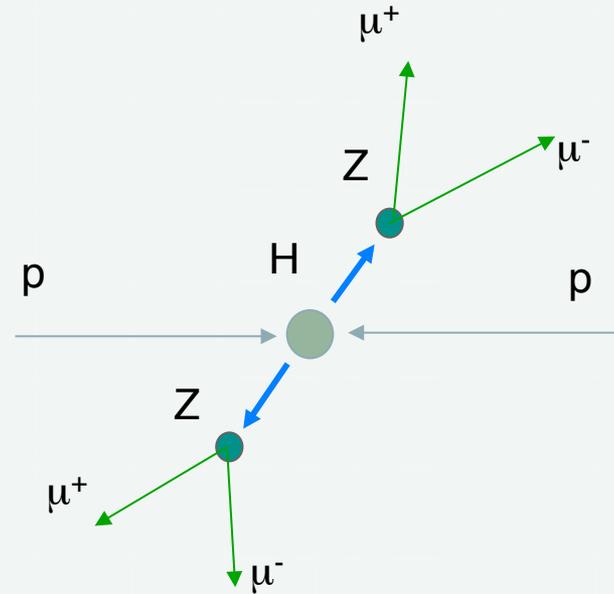
$H \rightarrow \gamma\gamma$ as a function of time



Autre mode : $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptons



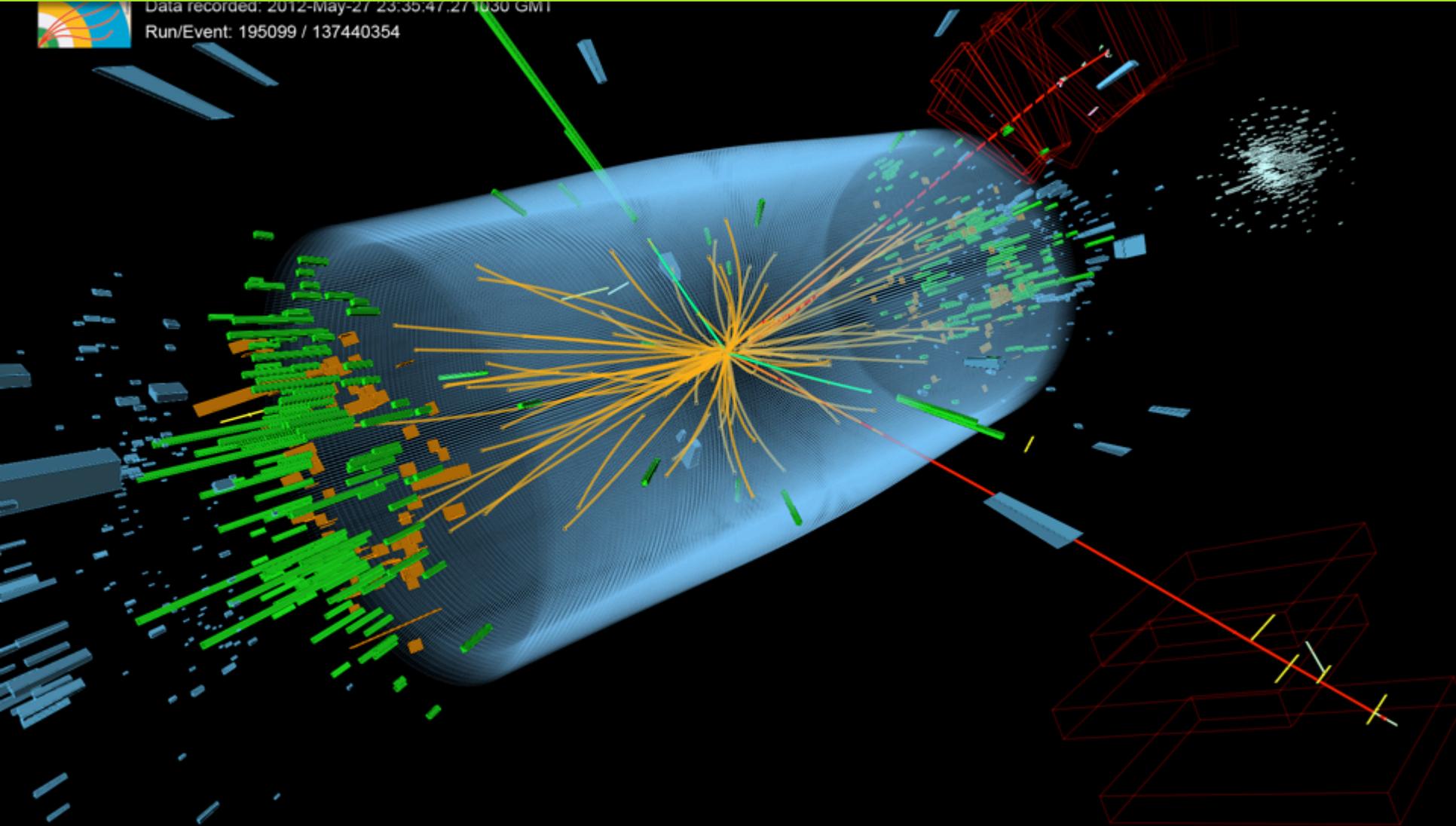
$$l = e, \mu$$



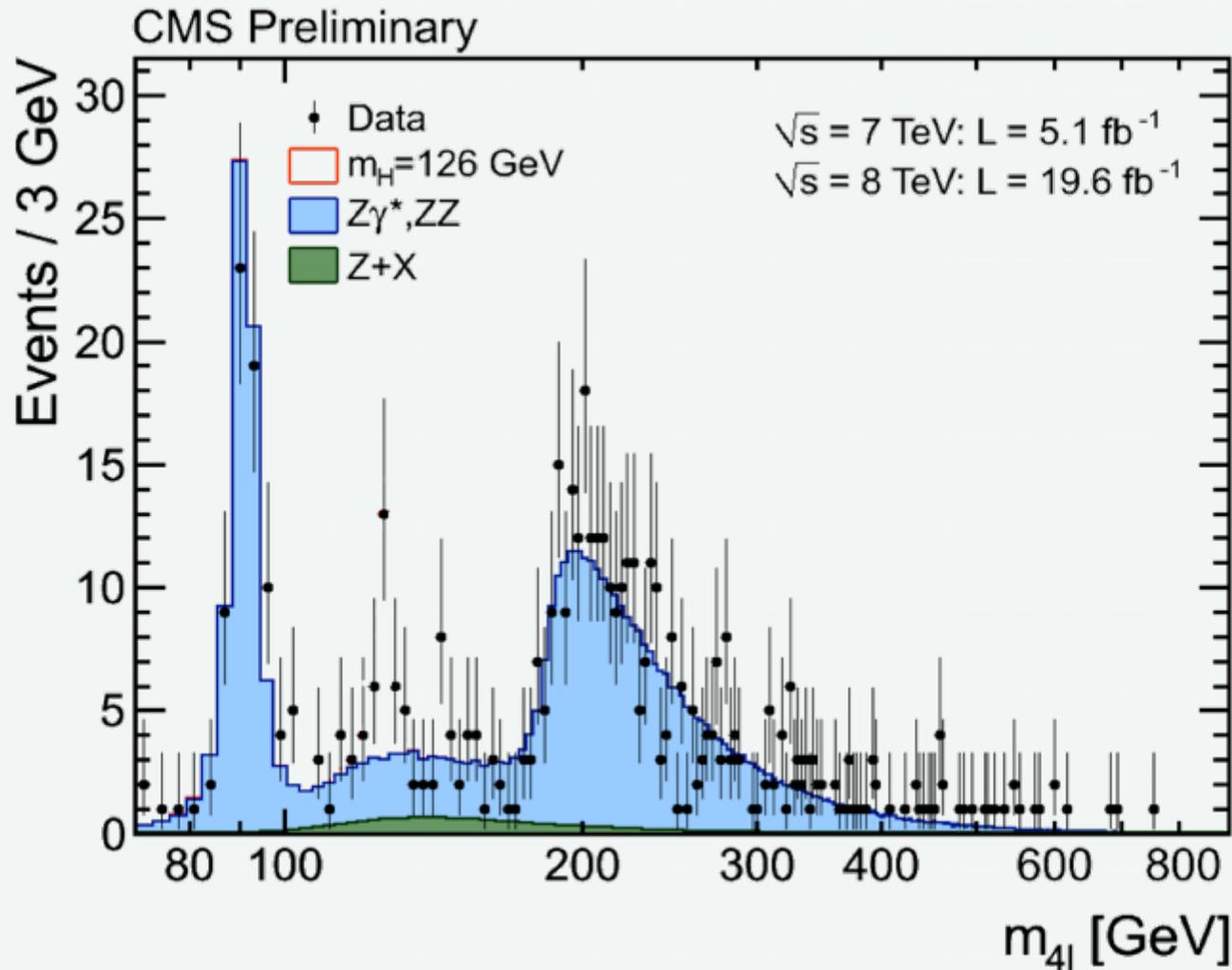
Evènement $H \rightarrow 4$ leptons



Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354

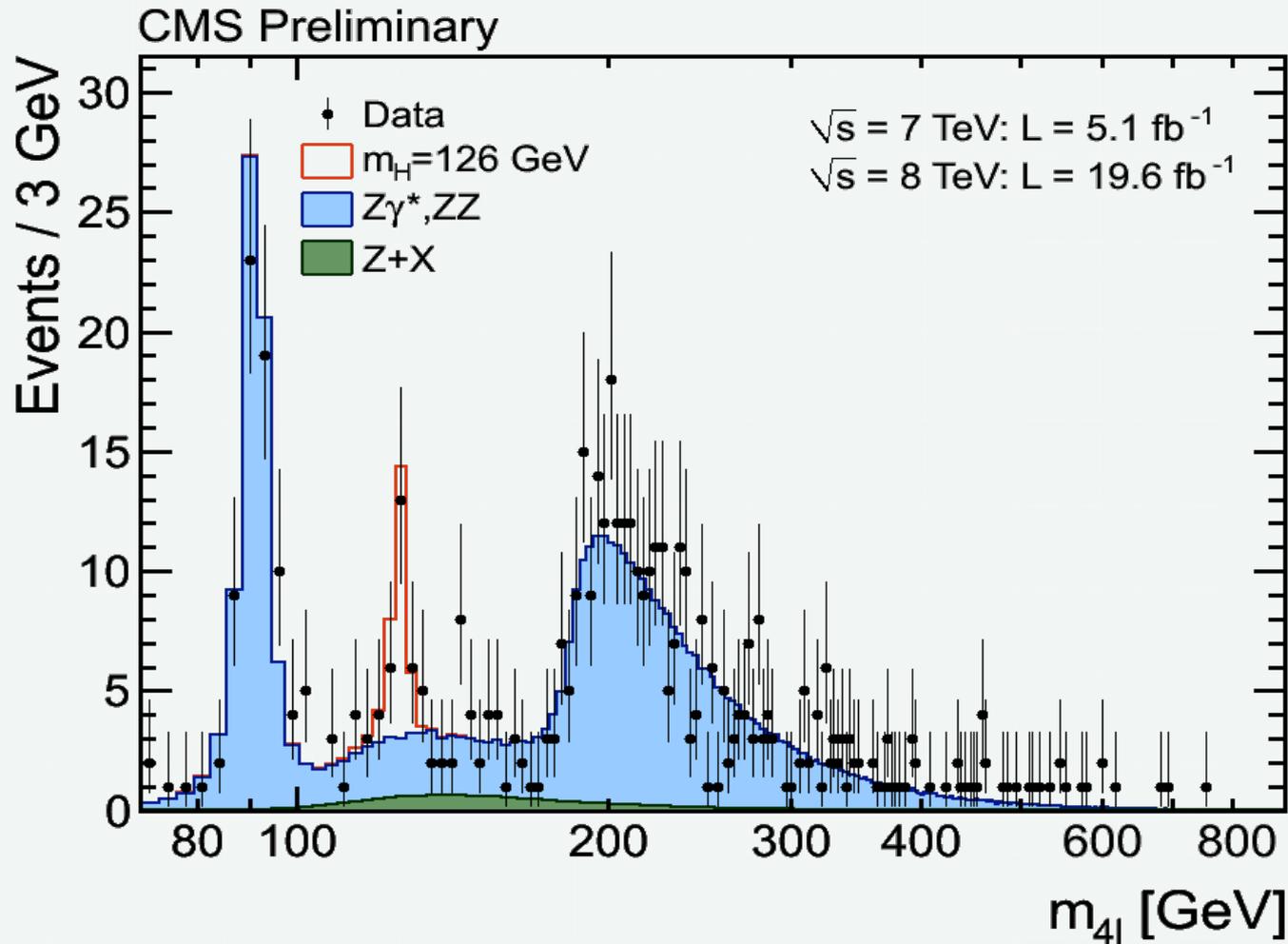


Masse invariante 4 leptons



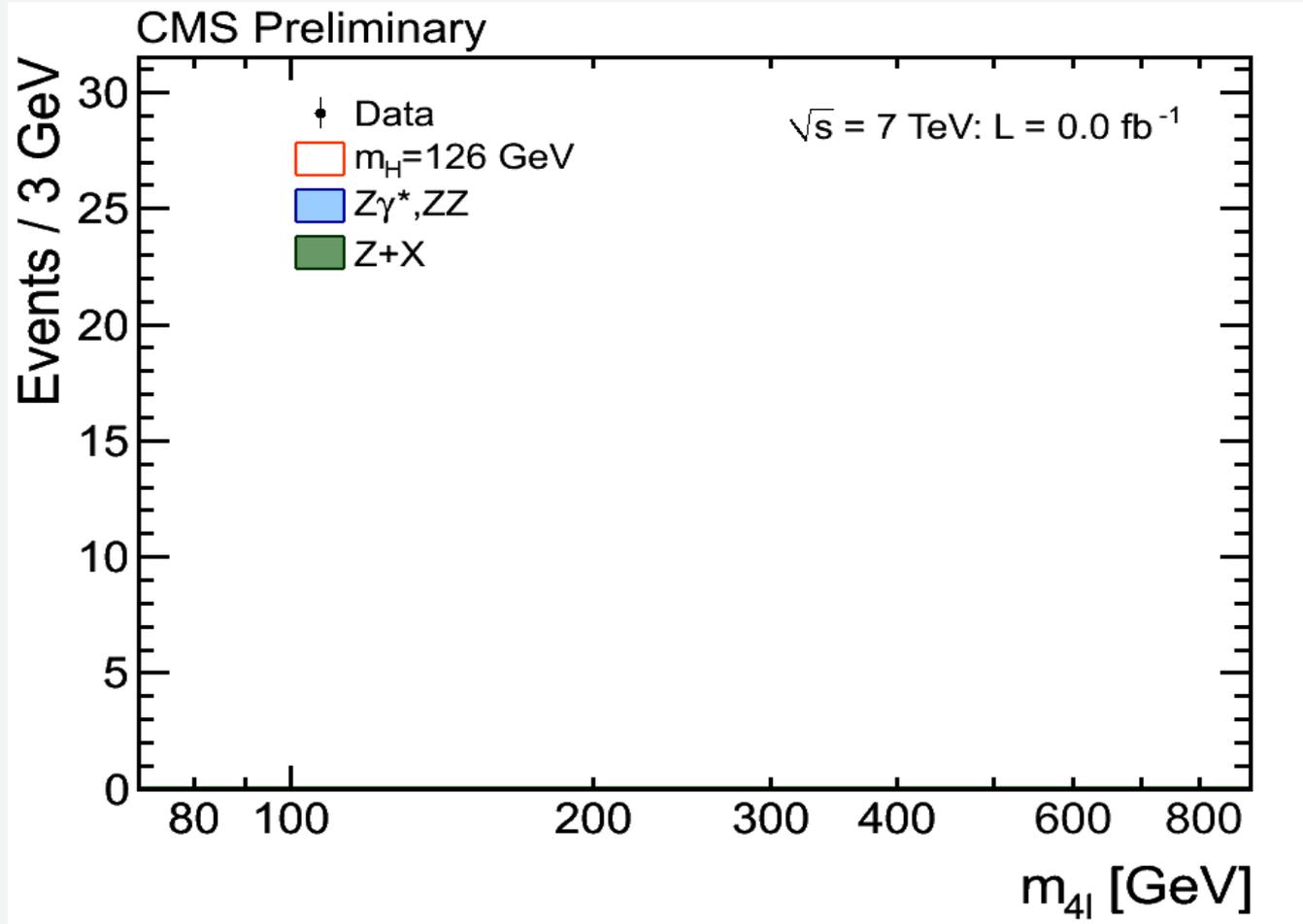
Mars 2013

Masse invariante 4 leptons



Mars 2013

H \rightarrow 4l en fonction du temps



Conclusions

- ➊ Après 20 années de recherche, développement, conception et construction l'accélérateur et les détecteurs sont en fonctionnement.
- ➋ La deuxième partie du voyage a commencé: Observer, mesurer les phénomènes à l'énergie du LHC.
- ➌ Déjà un premier résultat : observation du boson de Higgs. Il faut maintenant mesurer ses propriétés.
- ➍ Malgré le succès du modèle standard, il reste de nombreuses questions sans réponses en physique des particules.
- ➎ **Le LHC (2010-2030) ouvre une nouvelle ère de la physique!**

Pour en savoir plus ...

Revue élémentaire : <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>



N° 1 : De l'atome au noyau



N° 5 : Les Neutrinos



N° 2 : Le neutron



N° 6 : Le Modèle Standard



N° 3 : Les rayons cosmiques



N° 7 : Quand l'Univers fait boum



N° 4 : La couleur des particules



N° 8 : En route pour l'au-delà