

La physique des deux infinis

Le CERN et le LHC

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
(**CNRS/IN2P3** et **Université Paris-Sud**)

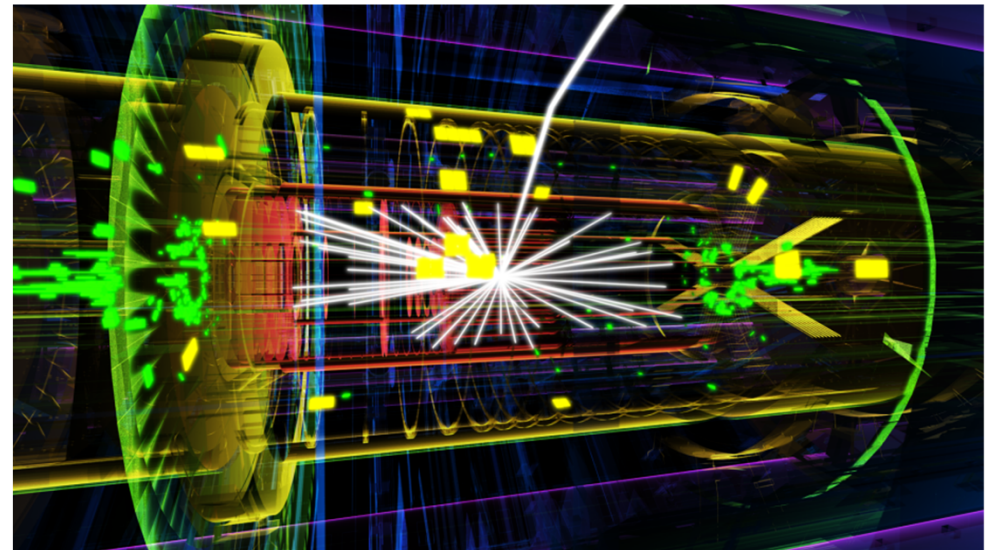


21 mai 2015

Association Carrefour des Humanités Paul Ricoeur
Lorient, Lycée Dupuy de Lôme

Plan

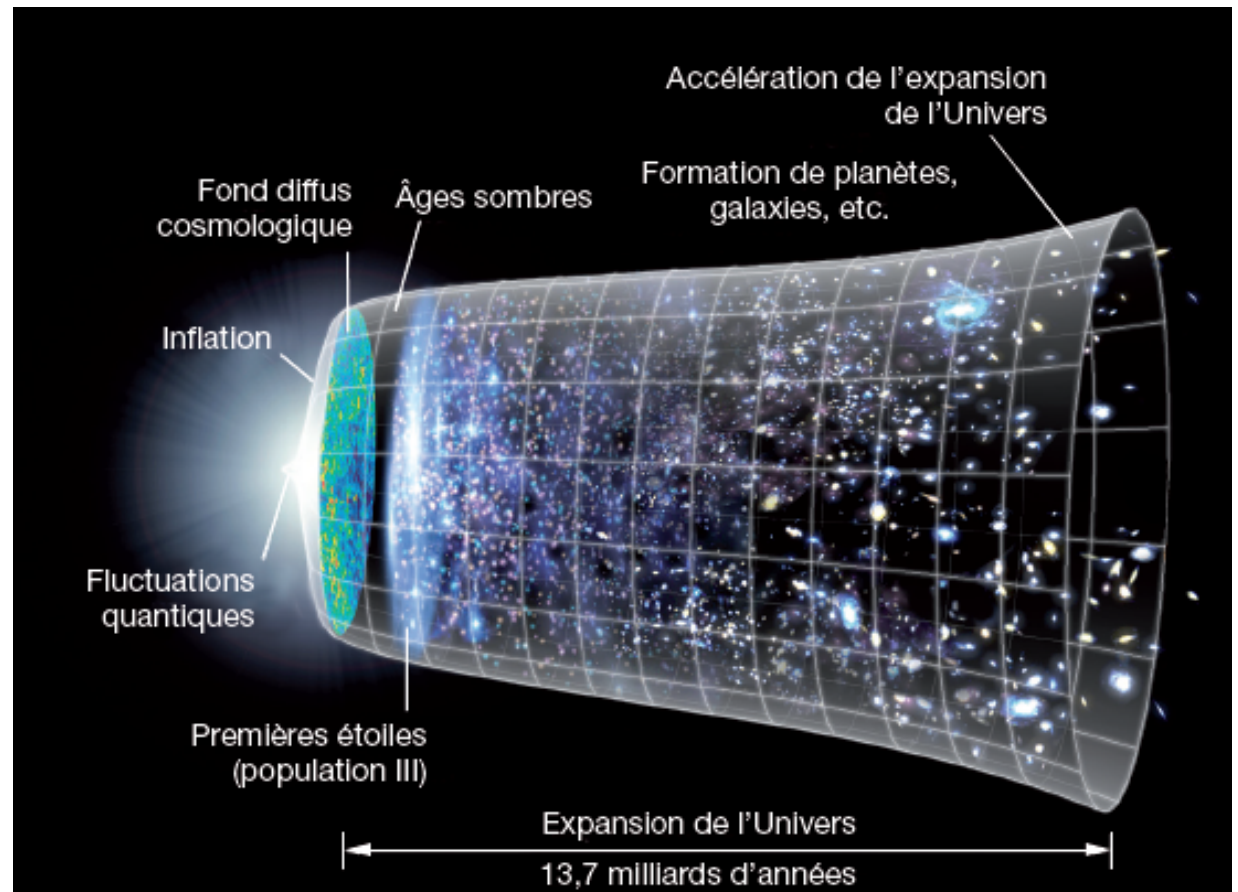
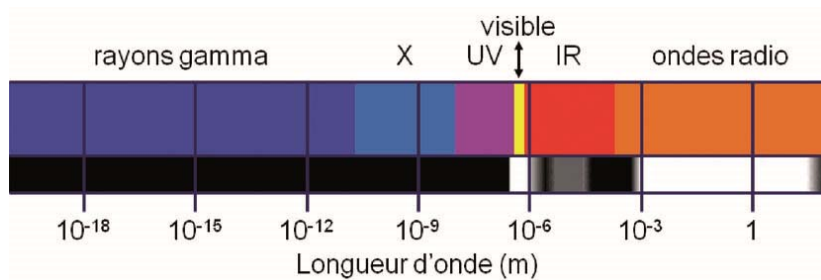
- **De l'infiniment petit à l'infiniment grand**
 - Voyage dans les deux infinis
 - L'infiniment petit
 - L'infiniment grand
 - Les liens entre l'infiniment petit et l'infiniment grand
- **Le CERN**
 - Le plus grand laboratoire de physique au monde
 - Le LHC
 - A la recherche du boson de Higgs
 - Le futur (et le **présent** !) du LHC
 - Manifestations et ressources autour du CERN et du LHC
- Le « **Passeport pour les deux infinis** »



Voyage dans les deux infinis

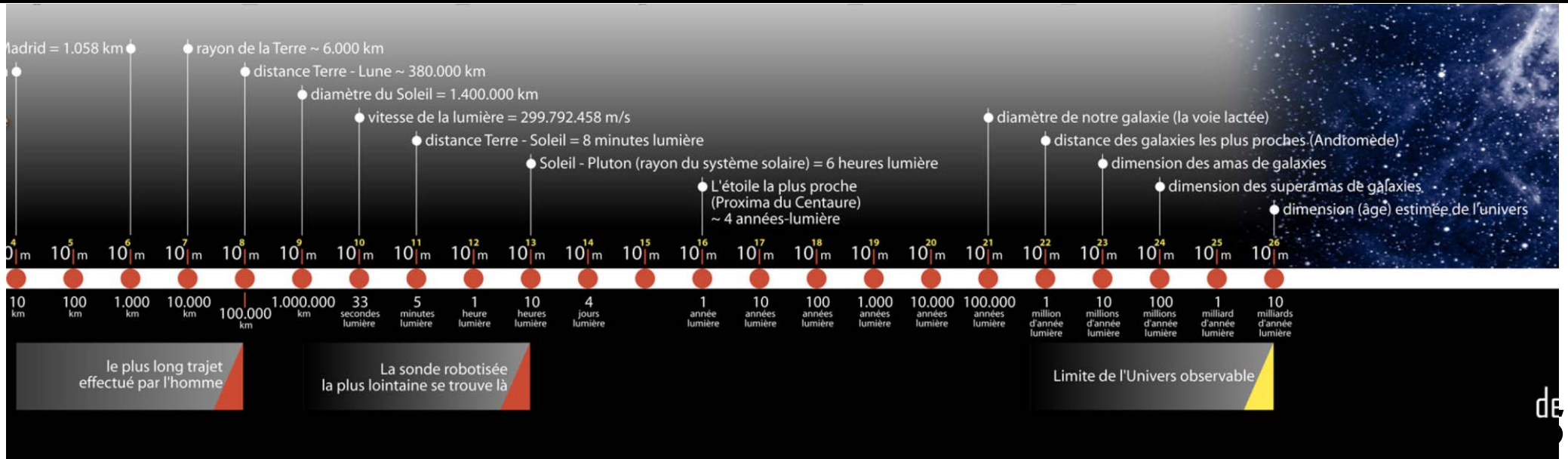
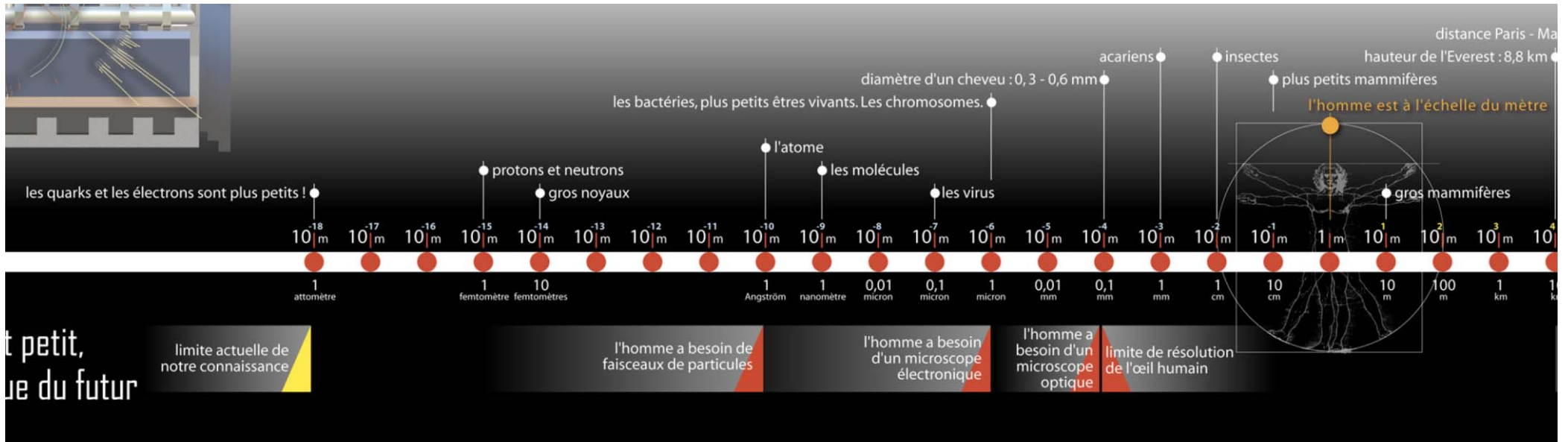
Un voyage dans le temps

- -13,7 milliards d'années : le Big-bang
- -13,7 milliards d'années + 380 000 ans : émission du rayonnement de fond diffus cosmologique (CMB)
- Antiquité
- Le XX^e siècle
 - Développement continu de la « physique des deux infinis »
- 2012 & 2013
- Et aujourd'hui ? Et demain ?



Un voyage dans les échelles de distance

- De 10^{-18} m (infiniment petit) à 10^{26} m (infiniment grand)

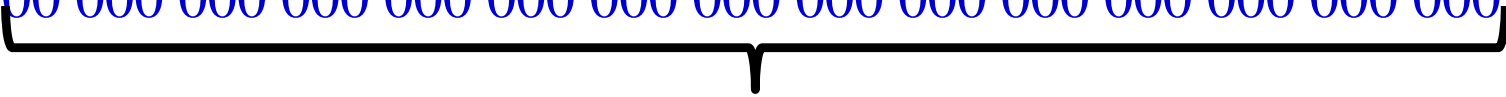


Difficile de faire plus éloigné en apparence

- $10^{26} \text{ m} / 10^{-18} \text{ m} = 10^{44}$

- Un (très très très très très) grand nombre :

100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000



44 zéros ...

→ Un nombre certainement plus grand que tous ceux que vous connaissez ou auxquels vous pouvez simplement penser ...

- Quel(s) lien(s) peut-il exister entre ces « deux infinis » aussi « distants » ?

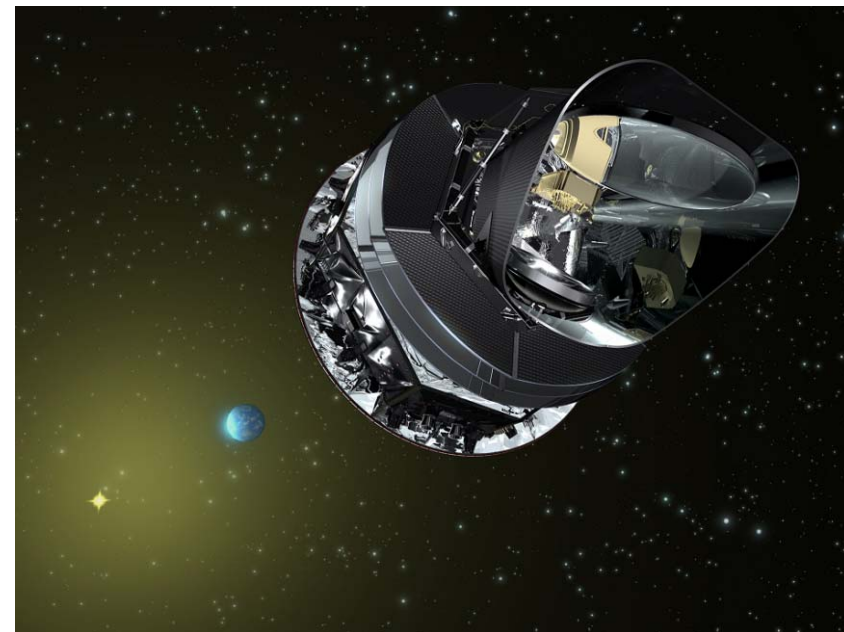
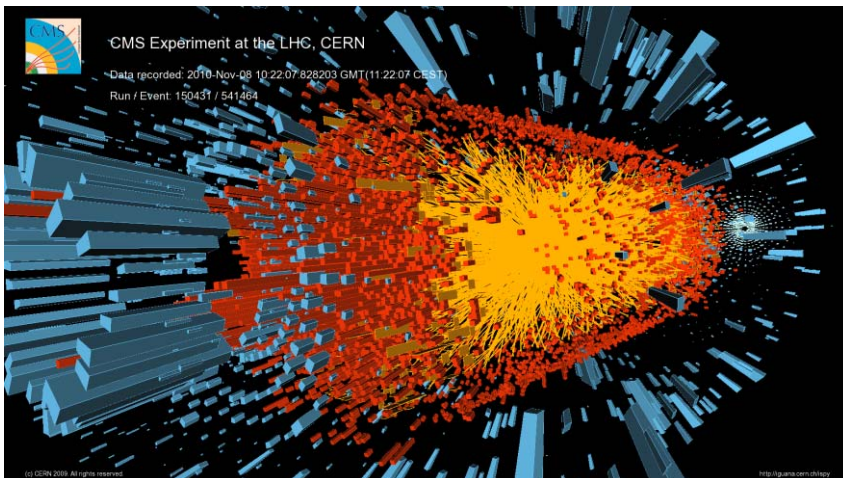
- Progrès considérables de ces deux sciences au cours du XX^e siècle

- Et également depuis le début du XXI^e ...

- Peu à peu apparition de relations, de correspondances, de points communs, etc.

Un voyage du (très) froid au (très) chaud

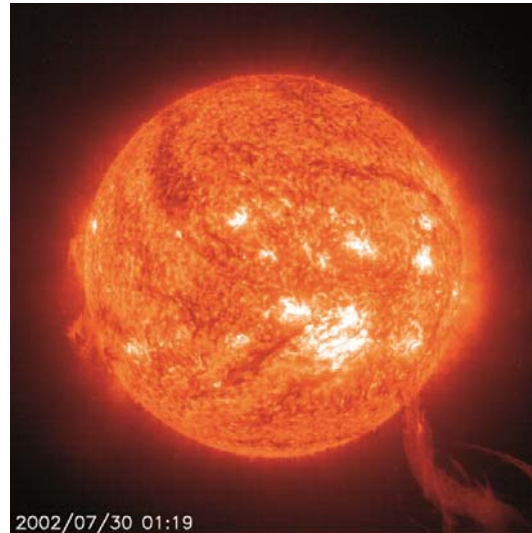
- **0,1 K** (-273,05°C)
- 1,9 K
- 2,7 K
- ...
- **1600 milliards de degrés Celsius**
- Température \leftrightarrow Energie
- **Densité d'énergie**



Un voyage auprès des forces fondamentales

- **Quatre interactions fondamentales**

- Interaction forte
- Interaction électromagnétique
- Interaction faible
- Gravitation



- Des **portées très différentes**

- D'une fraction de la taille du noyau atomique à l'infini !

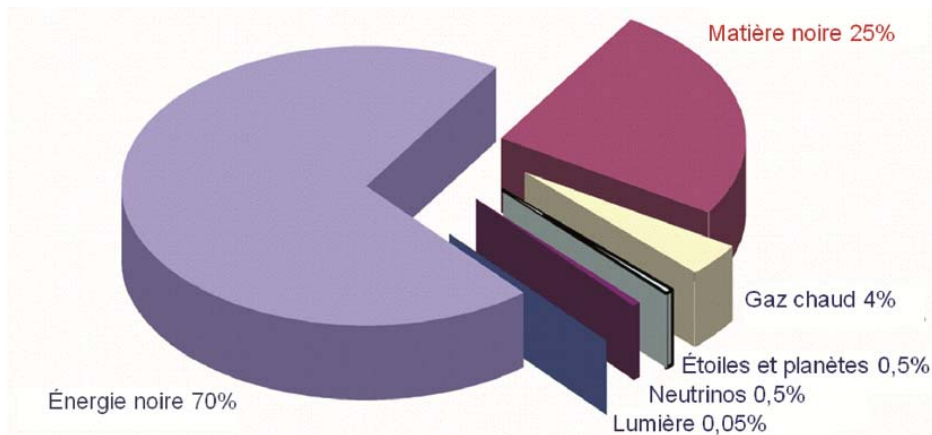
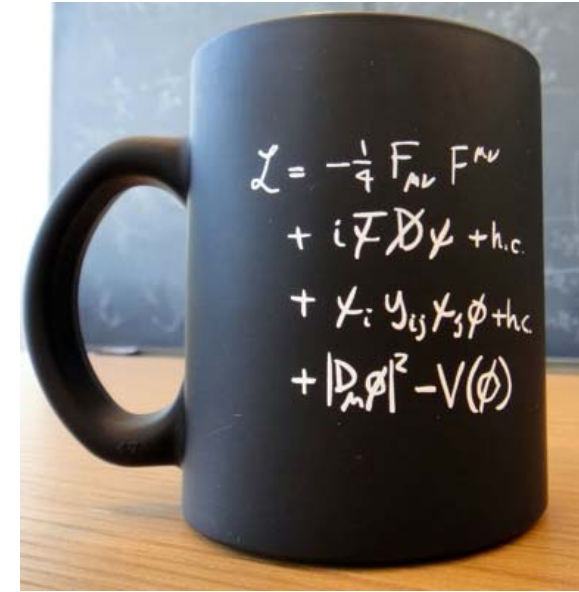
- Des **intensités très variées**

- 40 ordres de grandeur (10^{40}) !



Un voyage au-milieu des théories scientifiques

- La **relativité restreinte**
- La **mécanique quantique**
- Le **Modèle Standard de la physique des particules**
- **L'espace-temps**
- La **loi de la gravitation universelle**
- La **relativité générale**
- Le **Modèle Standard cosmologique**



Composants élémentaires de la matière

Étre humain 1m, Terre 10⁷m, Soleil 10⁹m, Galaxie 10²¹m

Cellule 10⁻⁶m, Molécule 10⁻⁹m, Atome 10⁻¹⁰m, Noyau 10⁻¹⁴m, Neutron Proton 10⁻¹⁶m

	LEPTONS	QUARKS	BOSON de HIGGS H
1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u / up, d / down
2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_{μ} neutrino muon	μ muon	c / charm, s / strange
3 ^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_{τ} neutrino tau	τ tau	t / top, b / beauty / bottom

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Particules associées
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

Chaque interaction fondamentale est transmise par des particules qui lui sont associées

ANTIMATIÈRE

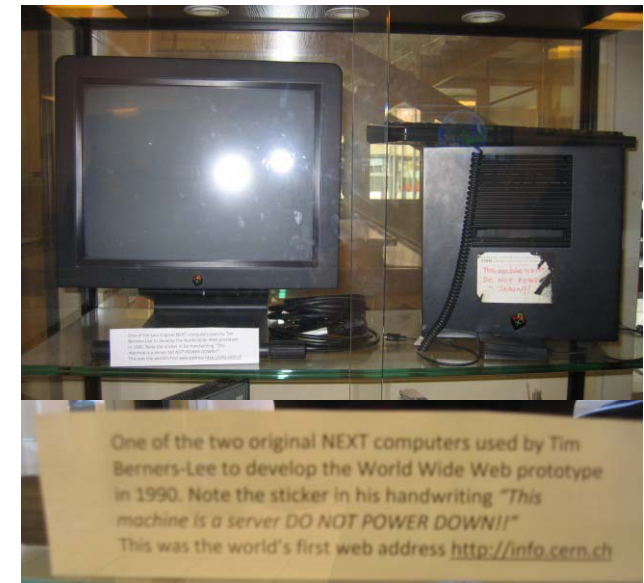
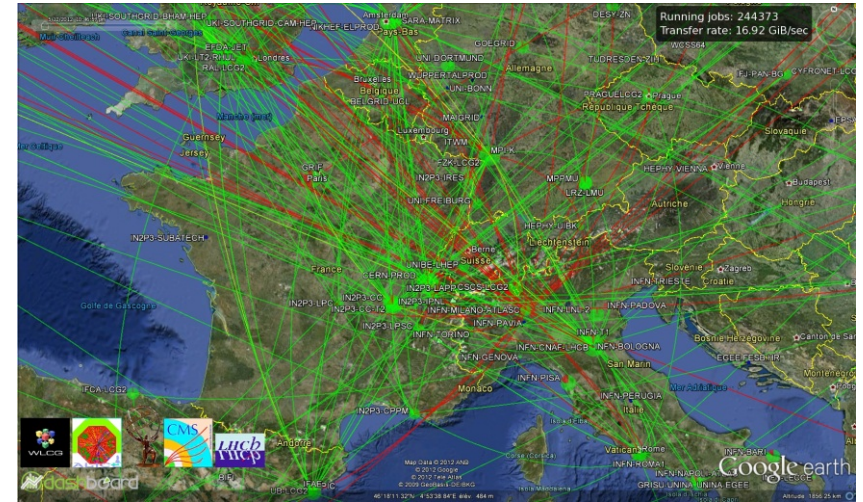
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Chaque des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil.

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

Un voyage au cœur des technologies

- Le **collisionneur LHC** et ses détecteurs associés
- Le **satellite Planck**
- **Une évolution incroyable des outils**
 - Expériences « à la main »
→ **Tout analogique & numérique**
 - **Ordinateurs** : processeurs, stockage, réseaux, etc.
- **Des retombées multiples**
 - **Internet**
 - **GPS**
 - **Imagerie médicale**
 - **Radiothérapie**

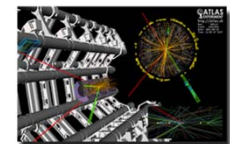
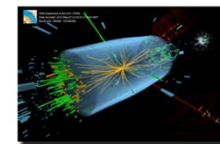


Un voyage dans la communauté scientifique

- Les **théoriciens** « imaginent » des modèles
- Les **expérimentateurs** les « testent »
→ Aller-retours incessants entre ces deux communautés scientifiques

Exemple

- **1964** : proposition du « mécanisme de Higgs » par plusieurs équipes indépendantes
 - **2012** : découverte d'un nouveau boson massif au LHC
 - **2013** : en mars, ce boson devient *un boson de Higgs*
en octobre, F. Englert et P. Higgs obtiennent le prix Nobel de physique
- Des « explorateurs-découvreurs » aux **grandes collaborations internationales** actuelles
 - **Une grande diversité de métiers**
 - **Physiciens, ingénieurs, techniciens, administratifs**
 - Prix, distinctions et récompenses



« Infiniment petit » / « Infiniment grand »

- Deux abus de langage
 - L'infini (∞) est une limite mathématique inatteignable
 - Mais les questions physiques associées sont pertinentes
 - Y-a-t-il une plus petite brique élémentaire de matière ?
 - Quelle est la taille de l'Univers ?
 - Et je ne connais pas de manière plus concise de désigner ces deux concepts ...
- Ces expressions sont bien commodes et utilisées par tous
- L'important est de savoir leur donner un sens scientifique – et sans aller au-delà
- **Infiniment petit**
 - Les particules élémentaires de la matière : électrons, quarks, etc.
 - Les interactions fondamentales qui agissent sur elles
 - **Infiniment grand**
 - L'histoire, l'évolution et la composition de l'Univers

L'infinitement petit

Introduction

- Etude des constituants les plus fins de la matière
 - Les particules élémentaires
 - **Insécables** : il n'existe pas d'objet plus petit
 - **Sans structure interne** : il n'y a « rien » à l'intérieur→ « Point matériel »
- D'après nos connaissances actuelles**
- Les interactions (« forces ») fondamentales qui agissent sur ces constituants
 - Plus on veut sonder la matière à de petites échelles, plus il faut d'énergie
 - Les accélérateurs de particules comme le LHC sont des « microscopes géants »
 - Plus l'énergie augmente et plus l'on « remonte le temps » vers le Big-bang
 - Liens entre l'infiniment petit et l'infiniment grand
 - **Modèle Standard** construit dans les années 1960-1970
 - Excellente description des résultats expérimentaux « sur accélérateurs »
 - Mais certainement pas la « théorie ultime » de l'infiniment petit

Une (très) brève histoire des particules

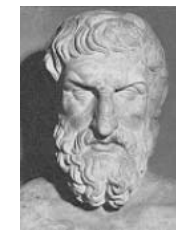
- **L'atome est un concept vieux de 2500 ans !**
→ Les philosophes cherchent à expliquer la Nature
(« *Physis* » en Grec)



- **Anaxagore** : « *Il y a quelque chose de chaque chose dans toutes les choses* »

- Atomisme : **Démocrite, Épicure, Lucrèce**

- « *Atoma* » signifie « *indivisible* » en grec
- Les atomes sont petits, élémentaires et pleins
- Les atomes se déplacent, s'assemblent et se séparent dans le vide, infini
- Il y a différents types d'atomes – les plus légers forment l'âme !
- Les atomes sont éternels et peuvent à l'infini former de nouvelles structures
→ Vision du monde opposée au Christianisme ; elle tombe dans l'oubli



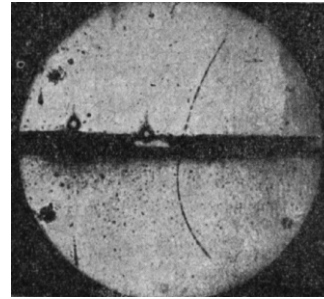
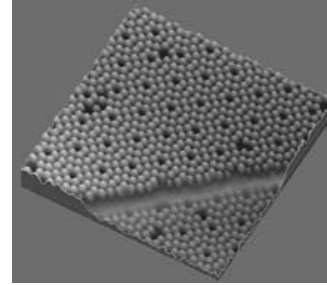
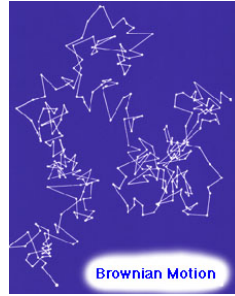
- **XVII^{ème} – XVIII^{ème} siècle** : les premiers chimistes

- **Boyle** : Une théorie scientifique valable est basée sur l'expérience
- **Lavoisier** : les molécules contiennent plus d'un élément chimique
- **Gay-Lussac** : $2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$; les éléments chimiques sont à la base de la matière
- **Dalton** : chaque élément chimique est fait d'un type d'atome unique

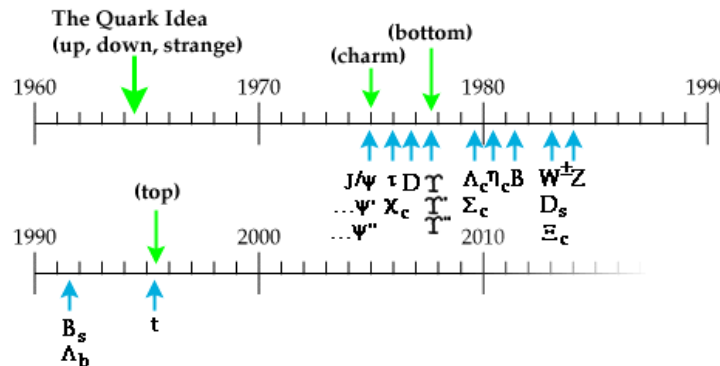
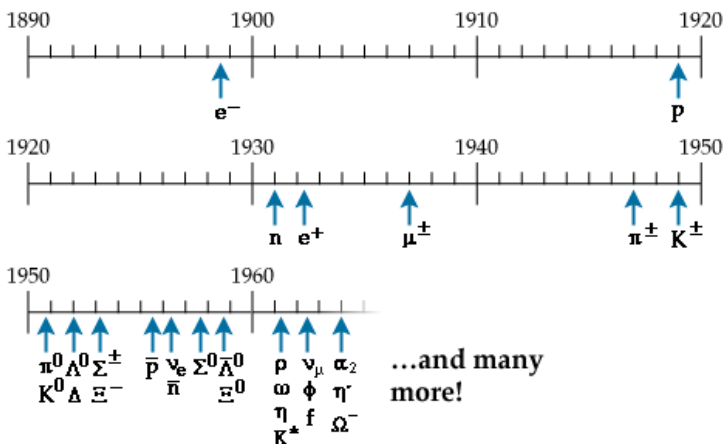


Une (très) brève histoire des particules

- **1897** : Découverte de l'électron
- **1905** : Les atomes existent !
- **1909** : Découverte du noyau
→ Les atomes sont presque vides !
- **1918** : Découverte du proton
- **1932** : Découverte du neutron
- **1933** : Découverte du positron
→ 1^{ère} particule d'antimatière
- **1936** : Découverte du muon



- Tout s'accélère **après la fin de la seconde guerre mondiale**
→ Un vrai "zoo" de particules (plusieurs centaines) !



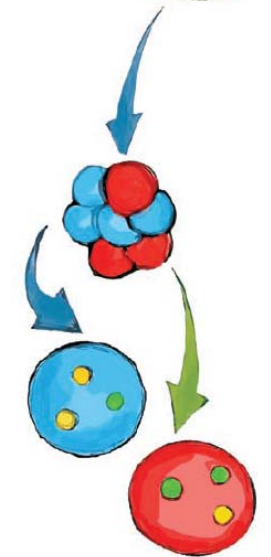
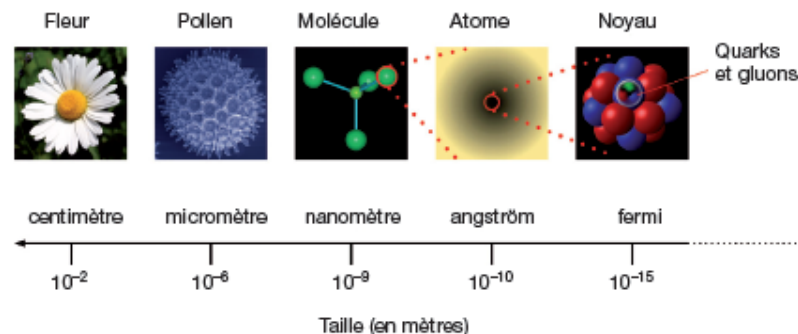
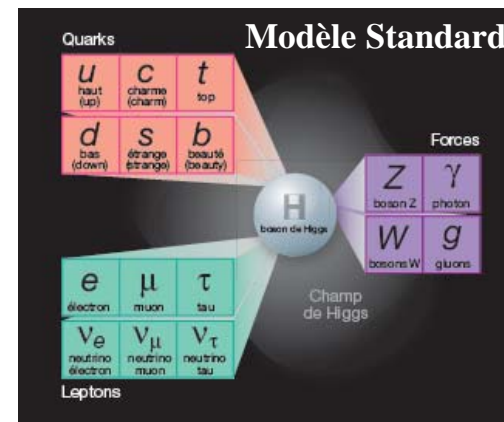
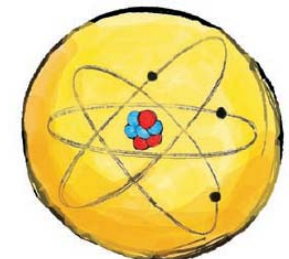
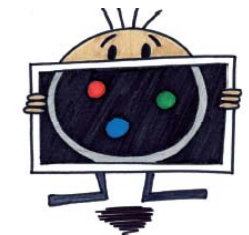
Une (très) brève histoire des particules

- La plupart de ces nouvelles particules sont faites de 2 ou 3 quarks
→ Il n'y a que **6 quarks au total**
- De **compliquée**,
la situation
redevient **simple** !

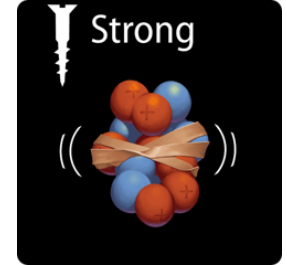
- Les constituants du noyau, les nucléons (protons et neutrons), sont formés de 3 quarks
- L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires** qui n'ont pas de structure interne (pour l'instant !?)

- Il y a **12 particules élémentaires** :
 - les **6 quarks**
 - l'**électron** et 2 « cousins » plus lourds, le **muon** et le **tau**
 - **3 neutrinos**

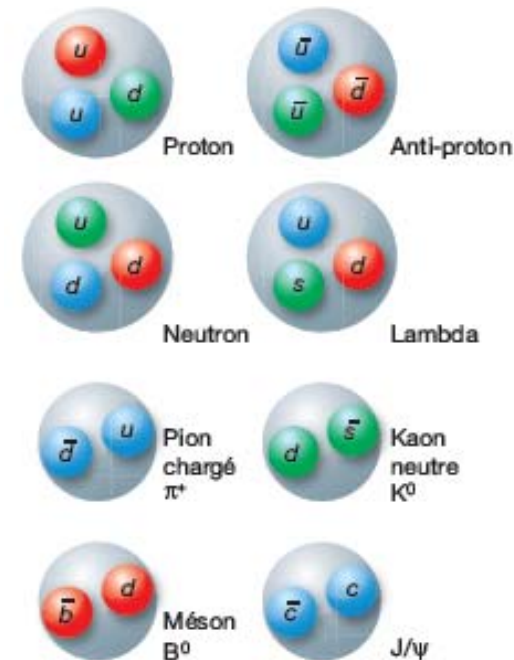
- Elles sont soumises à **3 forces** :
 - l'**interaction forte**
 - l'**interaction faible**
 - la **force électromagnétique**



Interaction forte

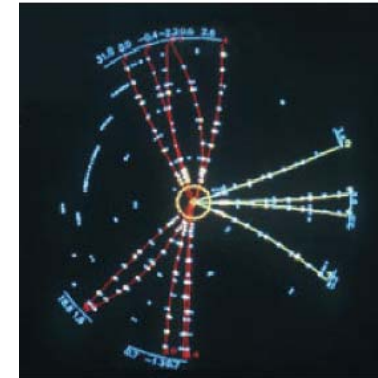
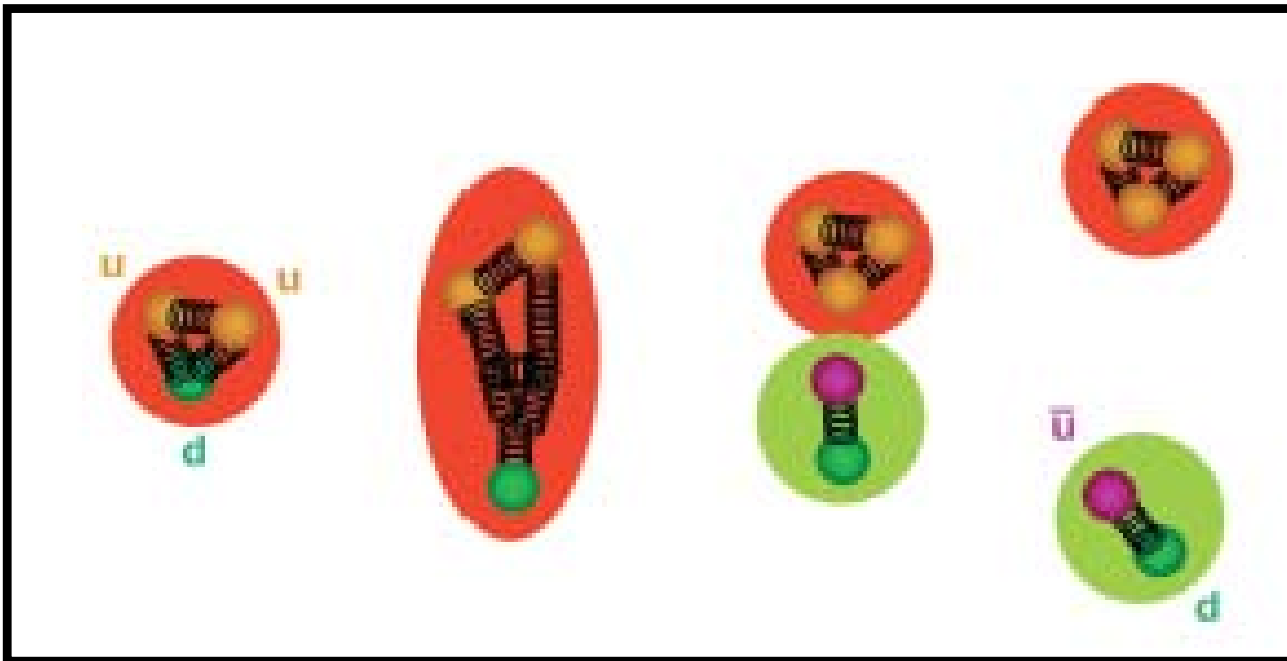


- **Nécessaire pour expliquer la cohésion des noyaux**
 - 2 protons séparés par la taille du noyau ressentent une force électromagnétique répulsive 10^{10} fois supérieure à celle qui lie l'électron et le proton de l'atome d'H
- **Portée très limitée : à peine quelques diamètres de noyaux**
 - Durée associée $\sim 10^{-23}$ s : temps caractéristique de l'interaction forte
- **Domine à l'échelle nucléaire**
 - 100 à 1000 fois plus intense que la force électromagnétique
- **L'interaction forte agit sur les quarks**
 - **Particules médiatrices** : les **gluons**
 - **Charge de « couleur »**
- **Trois couleurs : rouge, bleu, vert**
 - Chaque (anti)quark porte une (anti)couleur
 - **Les particules sont « blanches »**
 - **couleur + anti-couleur : mésons**
 - **les trois couleurs : baryons**
 - Les gluons sont eux-même colorés !
 - Interaction plus riche – et plus complexe ...



Interaction forte

- Deux propriétés fondamentales
 - Confinement : impossible d'isoler un quark



Voici ce qui se passe quand on essaye d'arracher un quark à une particule
→ Les « gluons » portent bien leur nom !

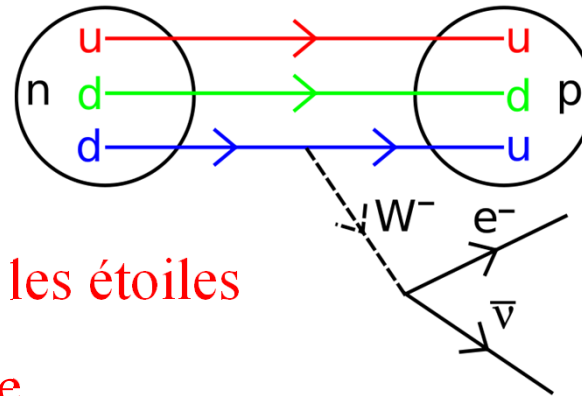
- Liberté asymptotique : l'intensité de la force diminue avec la distance

Interaction faible



- Explique la radioactivité bêta (β)

→ Par exemple la désintégration du neutron :
[Durée de vie du neutron : ~ 15 minutes]



- Gouverne les réactions thermonucléaires dans les étoiles

- Portée encore plus faible que l'interaction forte

- A peine quelques centièmes de la taille du nucléon

→ Particules médiatrices ~ 100 fois plus massives que le proton !

- Se désintègrent en un temps extrêmement court ($\leq 10^{-24}$ s)

→ Interaction presque ponctuelle

- Environ 10^{14} fois plus faible que l'interaction forte

- Charge faible : la « saveur » – exemple : chaque quark a une saveur différente

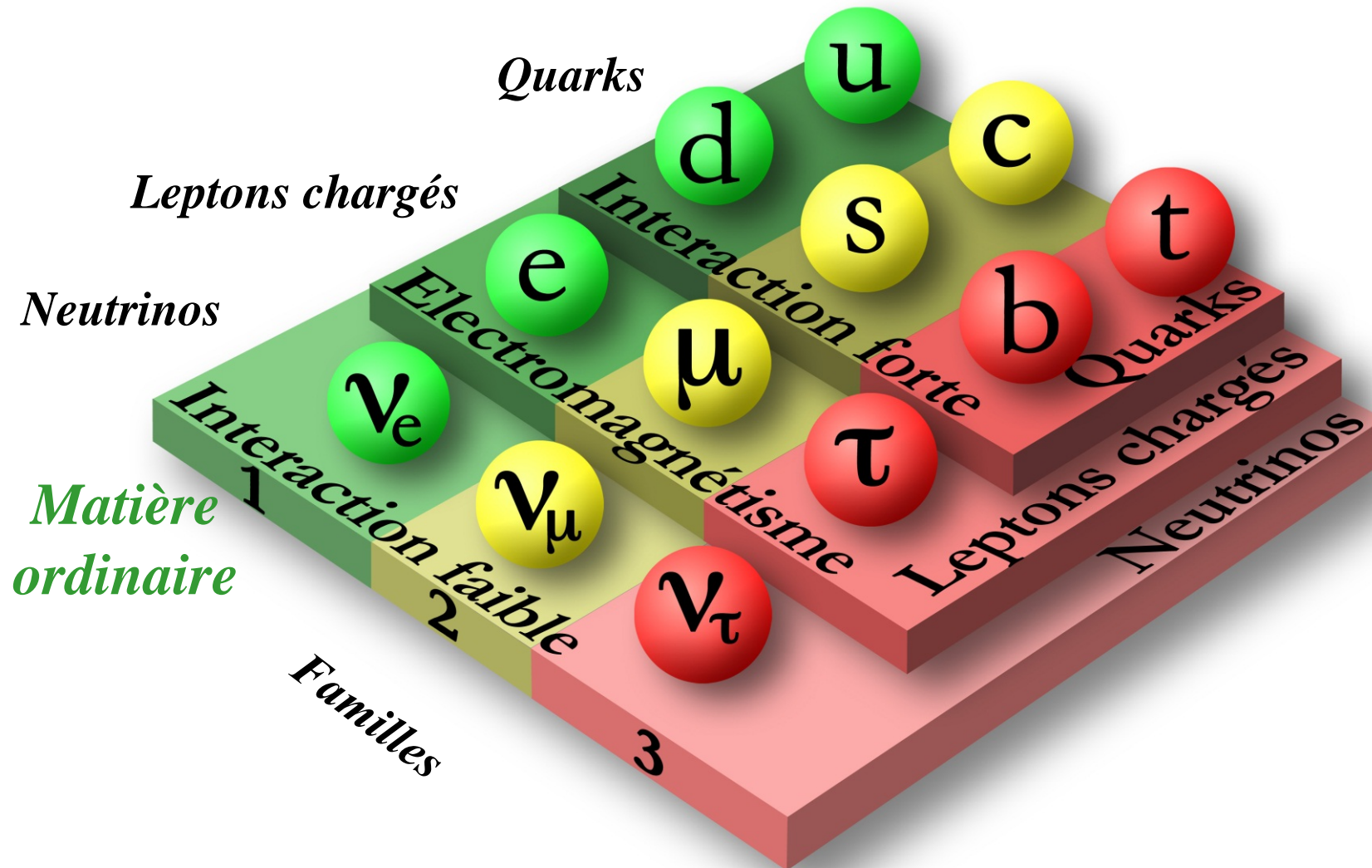
- Il n'existe pas d'états liés de particules dus à l'interaction faible

- L'interaction faible est aujourd'hui unifiée à haute énergie avec l'interaction électromagnétique

→ Voir plus loin

Bilan (1/2)

- 12 particules élémentaires (des « fermions ») réparties en 3 familles



- A chaque particule de **matière** est associée une particule d'**antimatière**

Bilan (2/2)

- 3 interactions fondamentales
 - Gravitation **complètement négligeable** à l'échelle des particules élémentaires

Les forces fondamentales

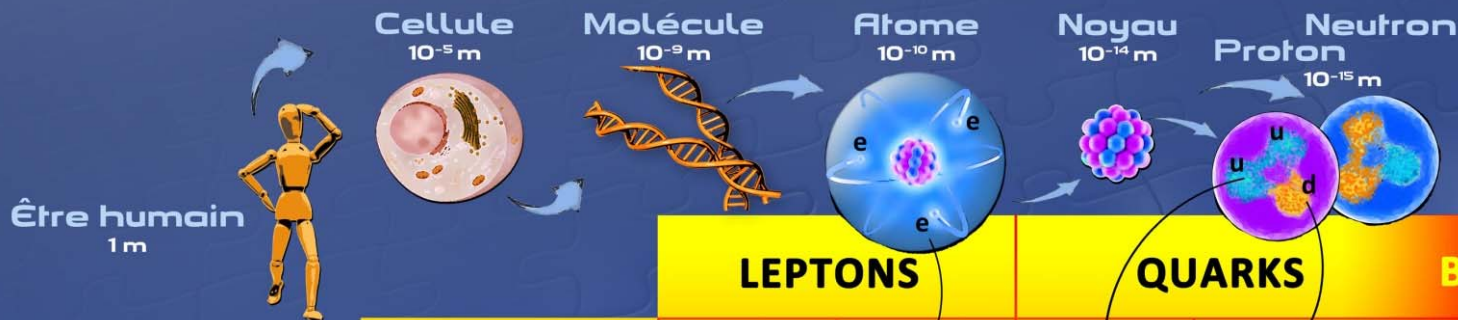
Type	Intensité relative	Particules médiatrices	Domine dans
Force forte	~ 1	Gluons	noyau atomique
Force électromagnétique	$\sim 10^{-3}$	Photon	électrons entourant le noyau
Force faible	$\sim 10^{-5}$	Boson Z^0 , W^+ , W^-	désintégration radioactive bêta
Gravitation	$\sim 10^{-38}$	Graviton ? (pas encore observé)	astres



- Une particule est sensible à une force si sa charge associée est non nulle
- L'action d'une force opère par échange de particules médiatrices, des « bosons »
 - Plus le boson médiateur est lourd, plus l'interaction est à courte portée

En résumé : la situation en 2015

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	H $t = 1.6 \cdot 10^{-13} s, q = 0, m = 125 GeV/c^2$
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

Champ de Higgs

Bosons Z, W^\pm	Désintégrations radioactives β^+ et β^- de certains noyaux instables
Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

INTERACTIONS FONDAMENTALES



Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

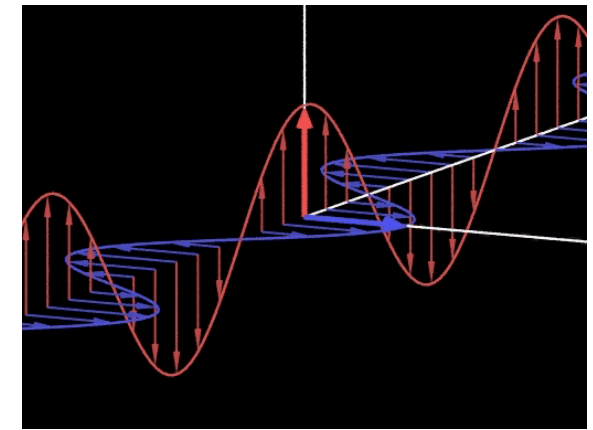
L'infinitement grand

Introduction

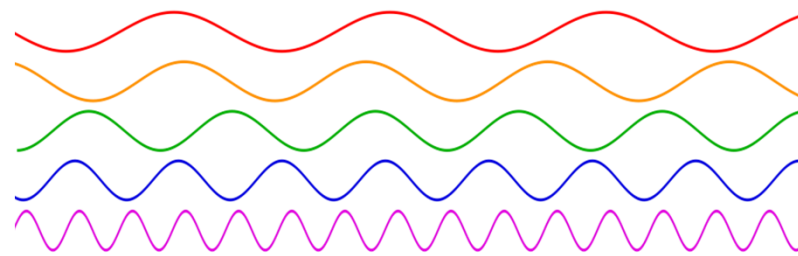
- La **cosmologie** étudie la structure et l'évolution de l'Univers
- **Âge** ?
- **Passé** ? **Avenir** ?
- **Composition** ?
- Science basée sur l'**observation** à (très très très) grande distance
- **Utilisation de tous les « messagers » possibles** – dont **la lumière**
- Nécessité d'anticiper toutes les **perturbations qui affectent les signaux reçus**, entre l'endroit de l'Univers où ils sont créés et la Terre où ils sont détectés
- Développement d'une théorie solide gouvernée par **une dizaine de paramètres**
 - **Le Modèle Standard cosmologique**
- Des faits expérimentaux n'ont pas d'explication dans ce cadre théorique
 - **Matière noire, énergie noire, asymétrie matière-antimatière**, etc.

La lumière

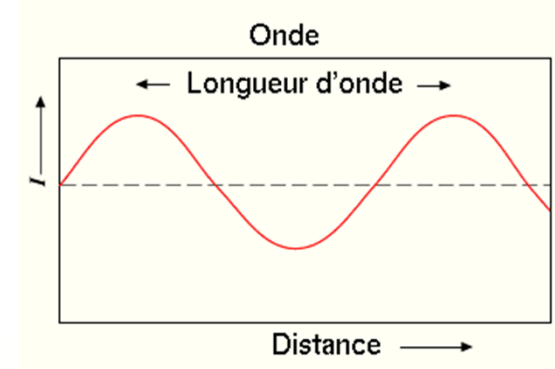
- Principal moyen d'**observer l'Univers**
 - Autres messagers : neutrinos, ondes gravitationnelles ...



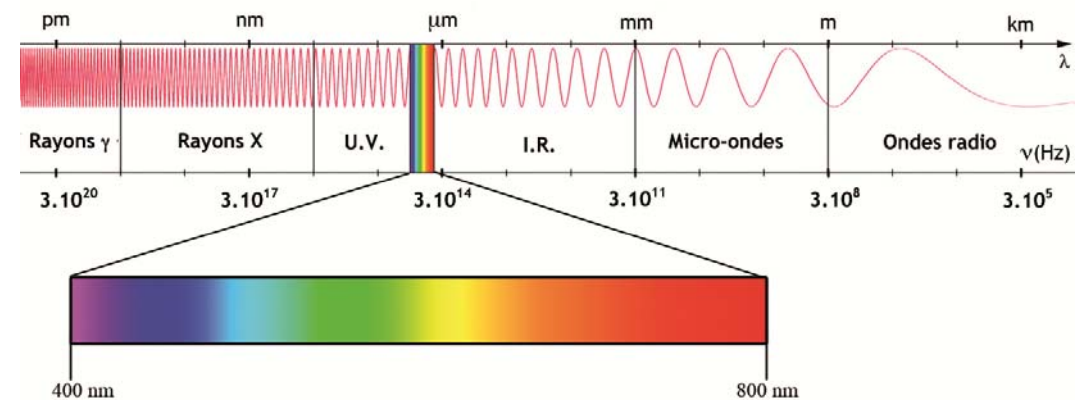
- **Onde électromagnétique**
 - Période T [seconde]
 - Fréquence ν [hertz]
 - Longueur d'onde λ [mètre]
 - Vitesse c [mètre/seconde]



- Ces grandeurs sont reliées entre elles :
 $T = 1/\nu$; $\lambda = c \times T = c/\nu$

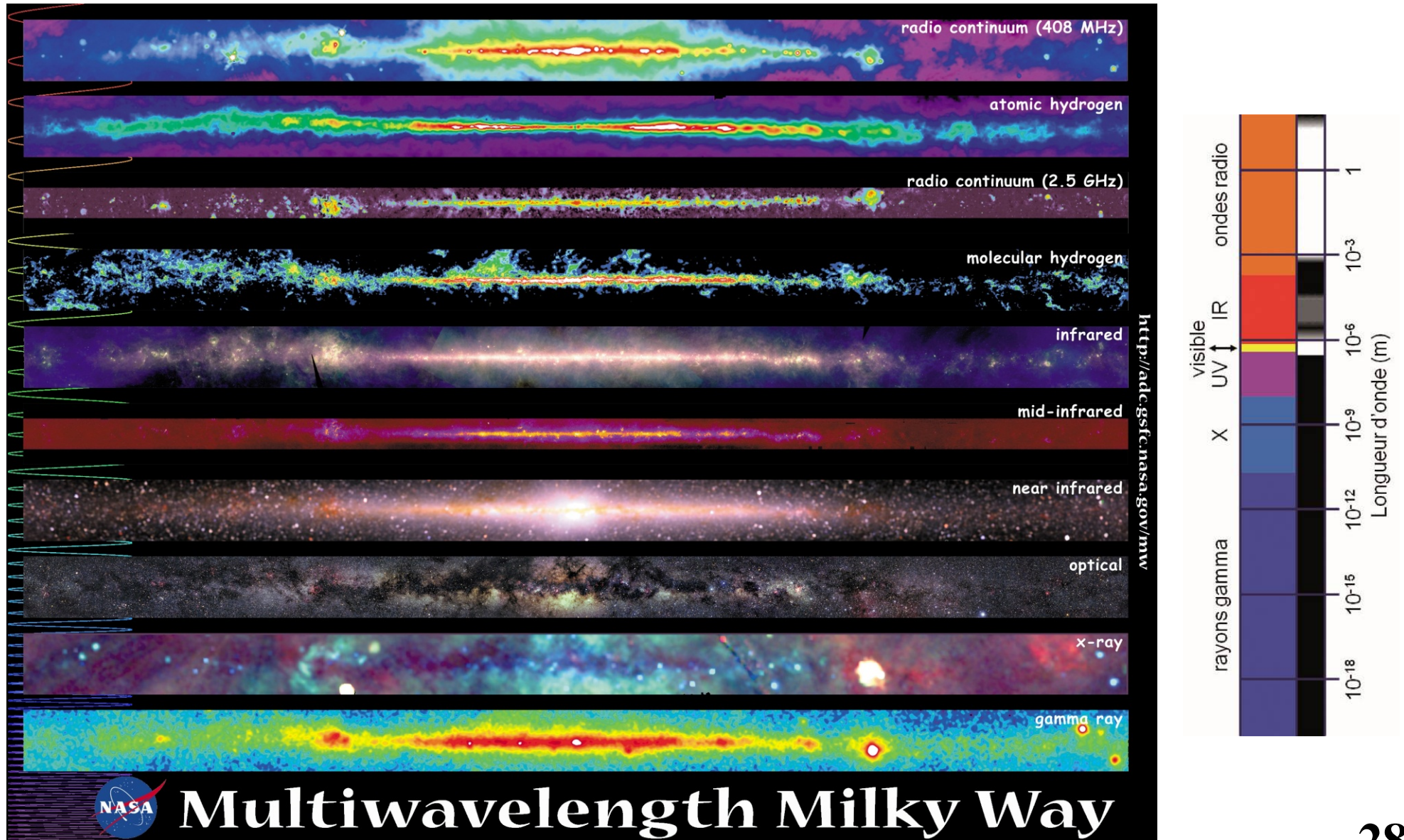


- **Le spectre électromagnétique**
va bien au-delà du domaine visible



Observation multi-longueurs d'onde

- L'Univers apparait très différent selon la manière dont on le regarde

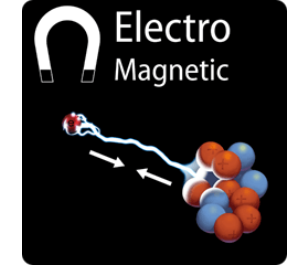


La lumière

- **Vitesse de la lumière** (dans le vide) $c = 299\,792\,458$ m/s
- La vitesse de la lumière est **finie**
 - **Voir loin c'est voir dans le passé**
- Unité de longueur adaptée pour **l'infiniment grand**
 - **Une année-lumière $\approx 9\,461$ milliards de kilomètres !**
- **Quelques distances « typiques »**

Terre-Lune	1,3 seconde-lumière	Distance étoile la plus proche	4,3 années-lumière
Terre-Soleil	8 minutes-lumière	Taille de la Voie Lactée	100 000 années-lumière
Taille du système solaire	1 jour-lumière	Âge de l'Univers	13,7 milliards d'années

Électromagnétisme



- **Electrostatique**
- **Magnétisme** – dû au mouvement des charges électriques
- **Particule médiatrice** : le **photon** de **masse nulle**
- **Force répulsive** ou **attractive** selon que les charges sont ou non de même signe
→ Bien que sa portée soit en principe infinie – force $\propto 1 / (\text{distance})^2$,
le **phénomène d'écrantage** la limite le plus souvent en pratique
 - **Exemple** : **dans 2 litres d'eau** « neutres » on trouve $\sim 10^8$ C de charges négatives
et autant de charges positives : les charges se compensent exactement
→ Deux corps chargés ainsi et placés à un mètre de distance
créeraient une force \sim au poids de la Terre pesée sur une autre Terre
- Cas de l'atome d'hydrogène dans l'état fondamental : $F_{EM} / F_{Grav} \approx 10^{39}$!!!
- **Gouverne les échelles atomiques et humaines**
 - Liaisons électrons – noyaux
 - Les structures ioniques (NaCl)
 - Les liaisons chimiques entre atomes d'une molécule
 - L'attraction entre les molécules d'un solide

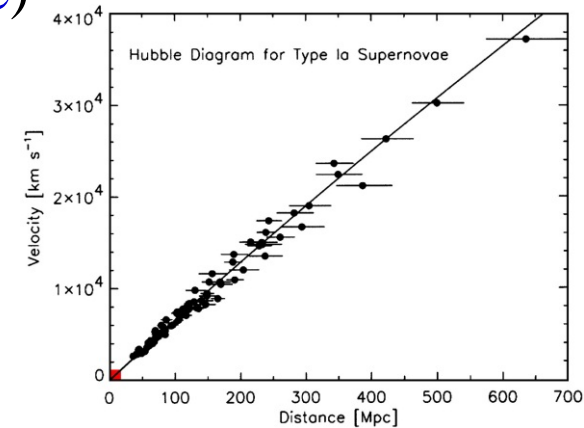
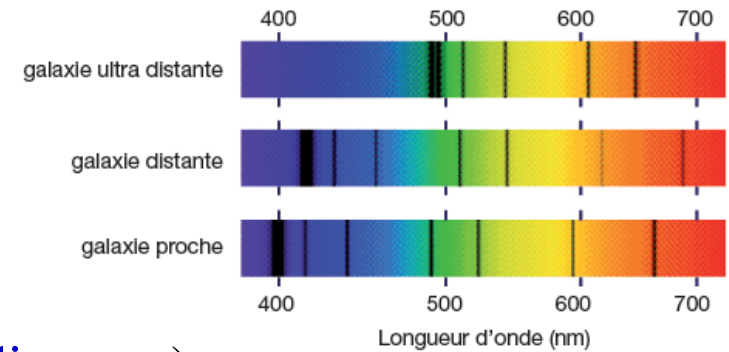
Gravitation



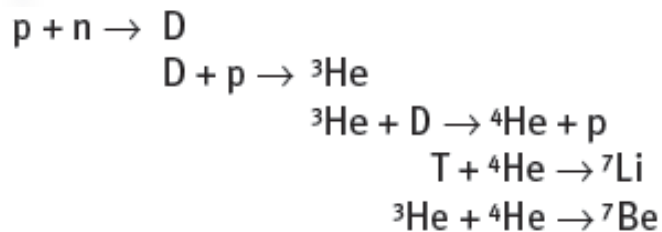
- **Seule force toujours attractive**
→ Impossible de l'absorber, de la transformer ou de s'en protéger
- Force $\propto 1 / (\text{distance})^2$: **portée (vraiment) infinie** – pas « d'écrantage »
- Loi de la gravitation universelle (Newton) → Relativité Générale (Einstein)
- **Force extrêmement faible**
→ Un aimant de frigo retient un clou attiré par la Terre entière !
- **Complètement négligeable à l'échelle des particules élémentaires pour des énergies « normales »**
→ Importante au niveau de **l'énergie de Planck** $E_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$
→ Masse, temps ($\approx 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$) et longueur de Planck ($\approx 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$)
- **Domine aux échelles astronomiques**
- **Impossibilité de décrire la Relativité Générale et les trois autres interactions (force, faible, électromagnétique) dans un cadre théorique commun**
→ Particule médiatrice hypothétique : le graviton de masse nulle

Big-bang et Modèle Standard cosmologique

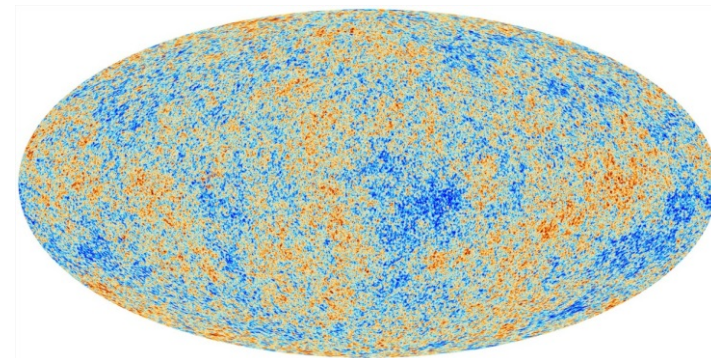
- Force de **gravitation** domine
- **Décalage vers le rouge** des raies spectrales
 → « fuite » des galaxies d'autant plus rapide que ces dernières sont éloignées (**vitesse \propto distance**)
 → **dilatation globale de l'espace-temps**
- **Abondance des éléments légers** créés dans les premières minutes après le Big-bang



Noyau	Hydrogène	Deutérium	Hélium-3	Hélium-4	Lithium-7
Proportion (en nombre)	92 %	10^{-5}	10^{-5}	8 %	10^{-10}



- **Rayonnement de fond cosmologique**
 → Corps noir à $\sim 2,7$ K
 → Photons émis lors de la recombinaison (\sim Big bang + 380 000 ans)
 → Isotropie remarquable ; les inhomogénéités annoncent les grandes structures

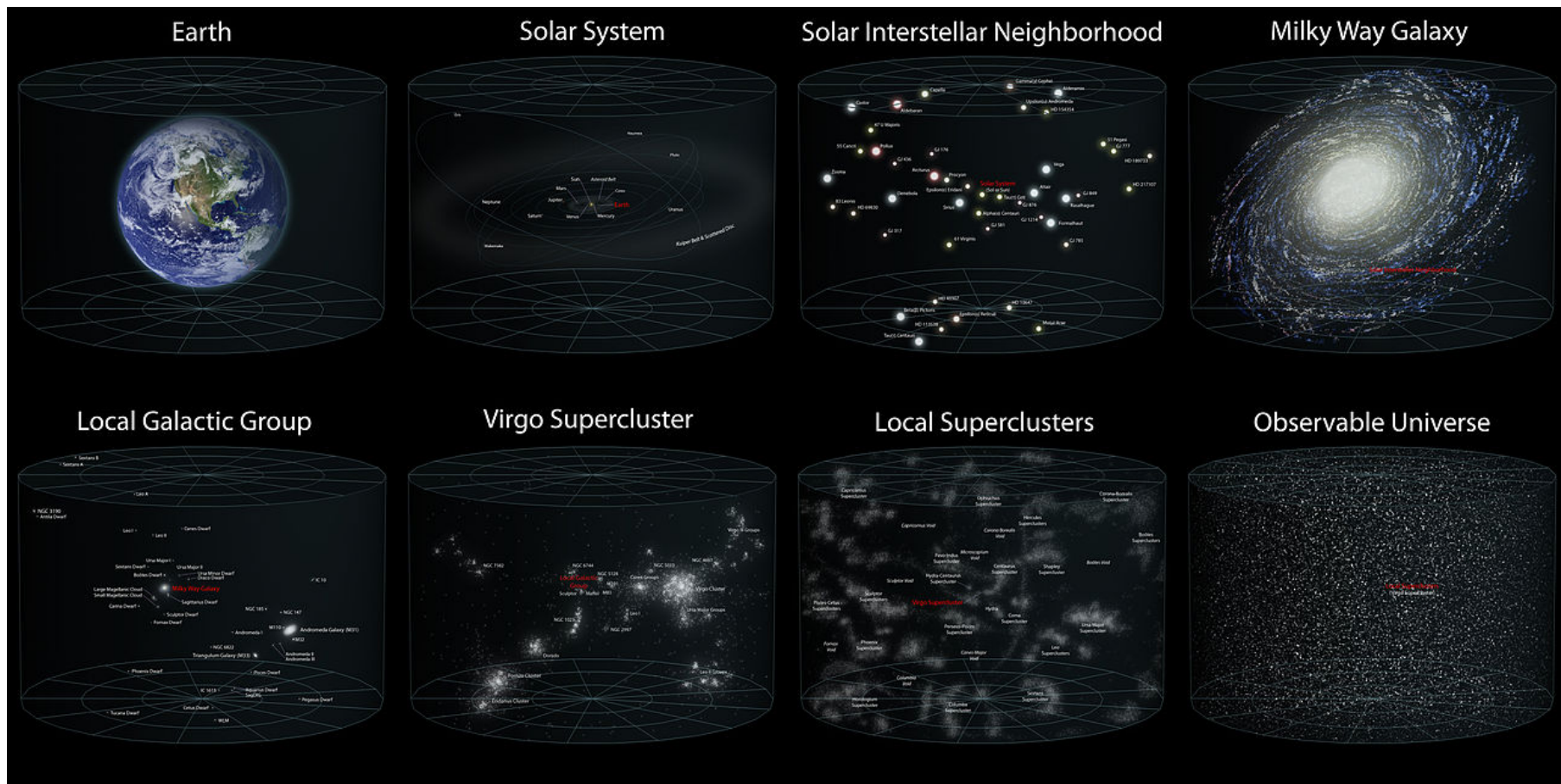


$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-4}$$

Planck

Univers homogène et isotrope ?

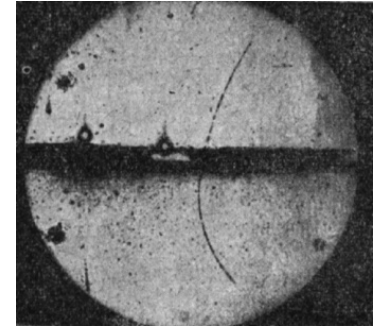
- **Homogène** : caractéristiques identiques partout
- **Isotrope** : aucune direction privilégiée
- **Vérifié à grande échelle !**
 - Contrairement à « l'Univers environnant » qui lui est franchement inhomogène



Les liens entre
l'infiniment petit
et
l'infiniment grand

Où est passée l'antimatière dans l'Univers?

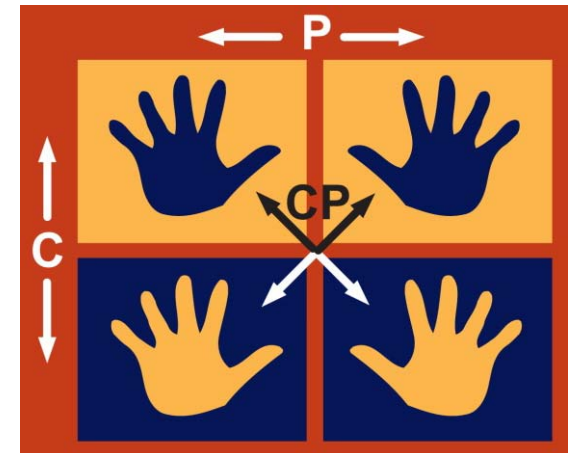
- A chaque particule de **matière** est associée une particule d'**antimatière**
 - Exemple : **le positron (e^+) est l'antiparticule de l'électron (e^-)**
 - **Mêmes propriétés, mêmes masses, charges électriques opposées**



- **Lors du Big bang, matière et antimatière ont été produites en quantités identiques**
- **L'Univers observable n'est formé que de matière**

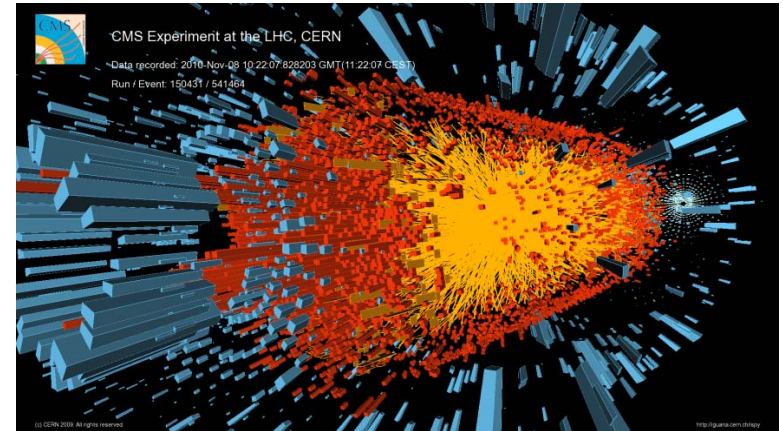
→ **Que s'est-il passé ?**

- **Le Modèle Standard, la théorie des particules élémentaires, fait une différence entre particules et antiparticules**
 - **Phénomène bien vérifié dans les expériences sur accélérateurs**
 - **On y produit de l'antimatière de manière routinière !**
 - **Mais bien trop faible pour expliquer l'asymétrie observée dans l'Univers**
- **La solution de cette énigme se trouve certainement dans une « nouvelle physique » qui reste à découvrir et qui généraliserait la théorie actuelle**



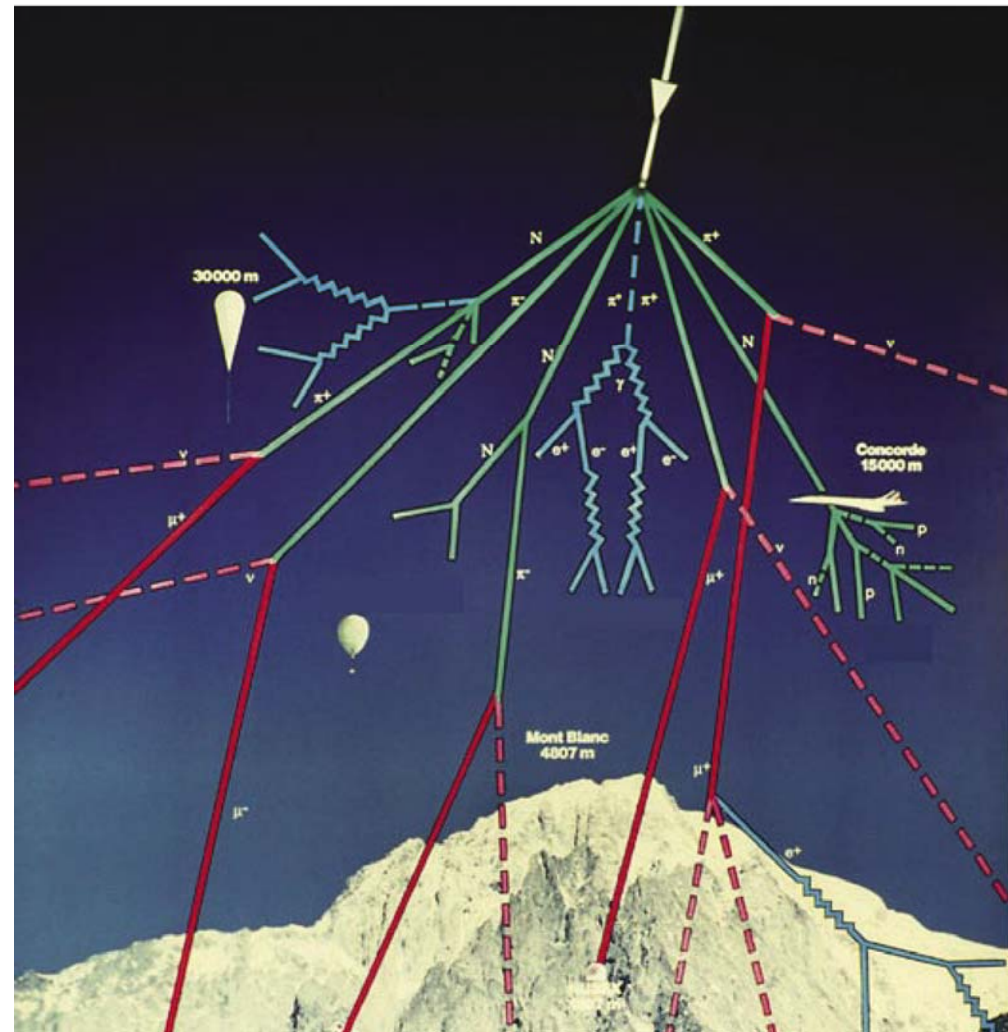
Recréer les premiers instants de l'Univers

- Les collisions entre particules sont un moyen extrêmement performant d'explorer le monde de l'infiniment petit – via la formule d'Einstein $E = mc^2$
- On obtient des densités d'énergie extrême
 - $\sim 10^{24}$ J/m²
 - Température de 1600 milliards de degrés
→ Equivalence température ↔ énergie
- Création de nouvelles particules
- Mise en évidence de comportements différents de la matière – et de nouveaux états
- L'Univers est en expansion depuis le Big bang
 - Dilution de l'énergie, diminution de la température
- Les collisions permettent de recréer – fugacement – des conditions « proches » du Big bang : moins de 1 millionième de seconde après
- Et si on voulait s'approcher encore plus près du Big bang ?
 - Impossibilité au niveau expérimental – pour le moment
 - Difficulté théorique : les équations ne fonctionnent plus – hypothèses non valables



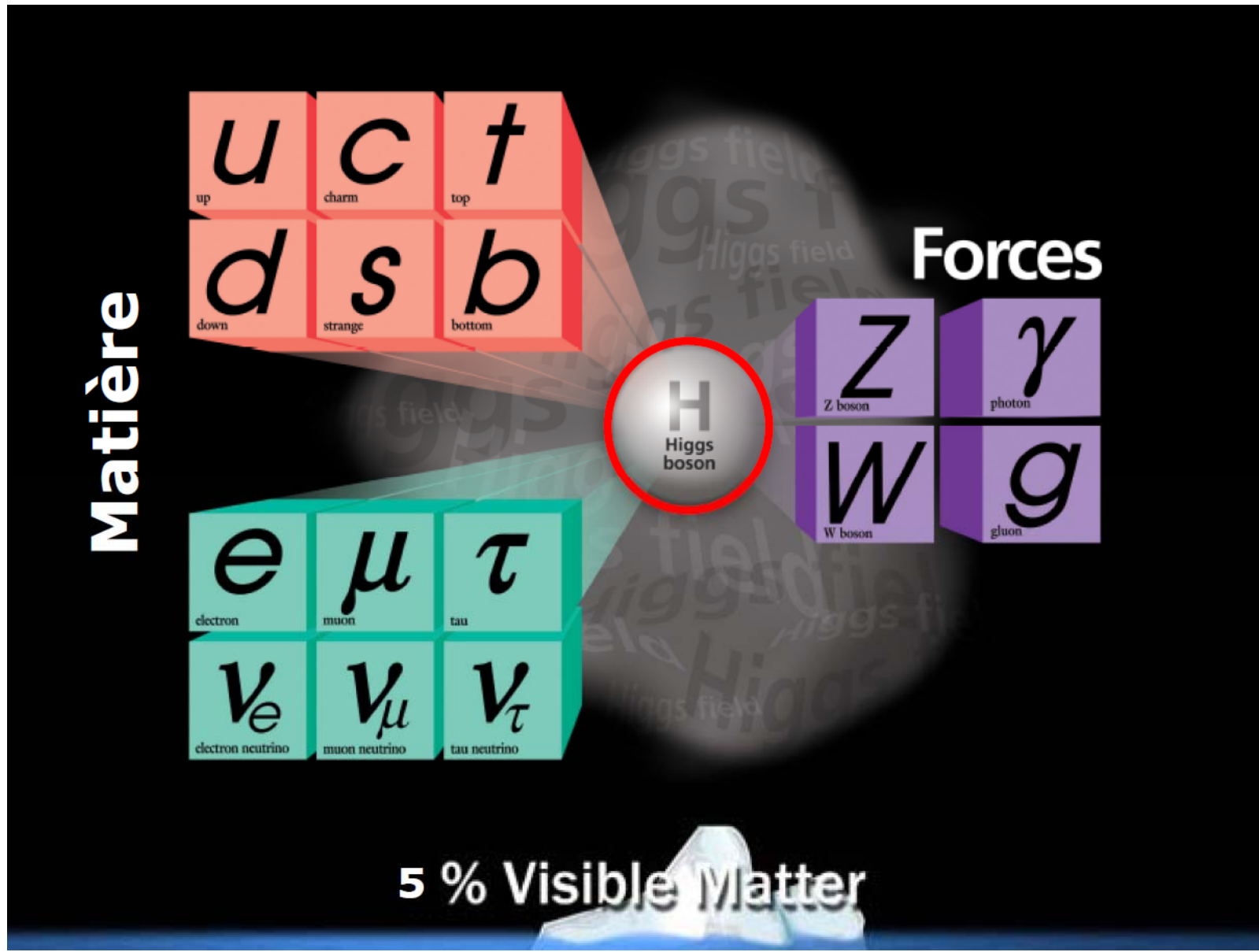
Observer (ce que nous envoie) le Cosmos

- La Terre est « bombardée » par des particules énergétiques venant de l'espace
 - Photons, protons, noyaux atomiques ...
- Leur interaction avec l'atmosphère provoque des cascades de particules détectables
 - Très rarement, on peut avoir une énergie macroscopique dans une particule élémentaire !
 - L'équivalent d'une balle frappée par une raquette de tennis
- D'où proviennent ces particules ?
- Quels mécanismes les accélèrent ?
- Observation « multi-messagers » de l'Univers
 - Spectre électromagnétique
 - Rayons cosmiques
 - Neutrinos ...



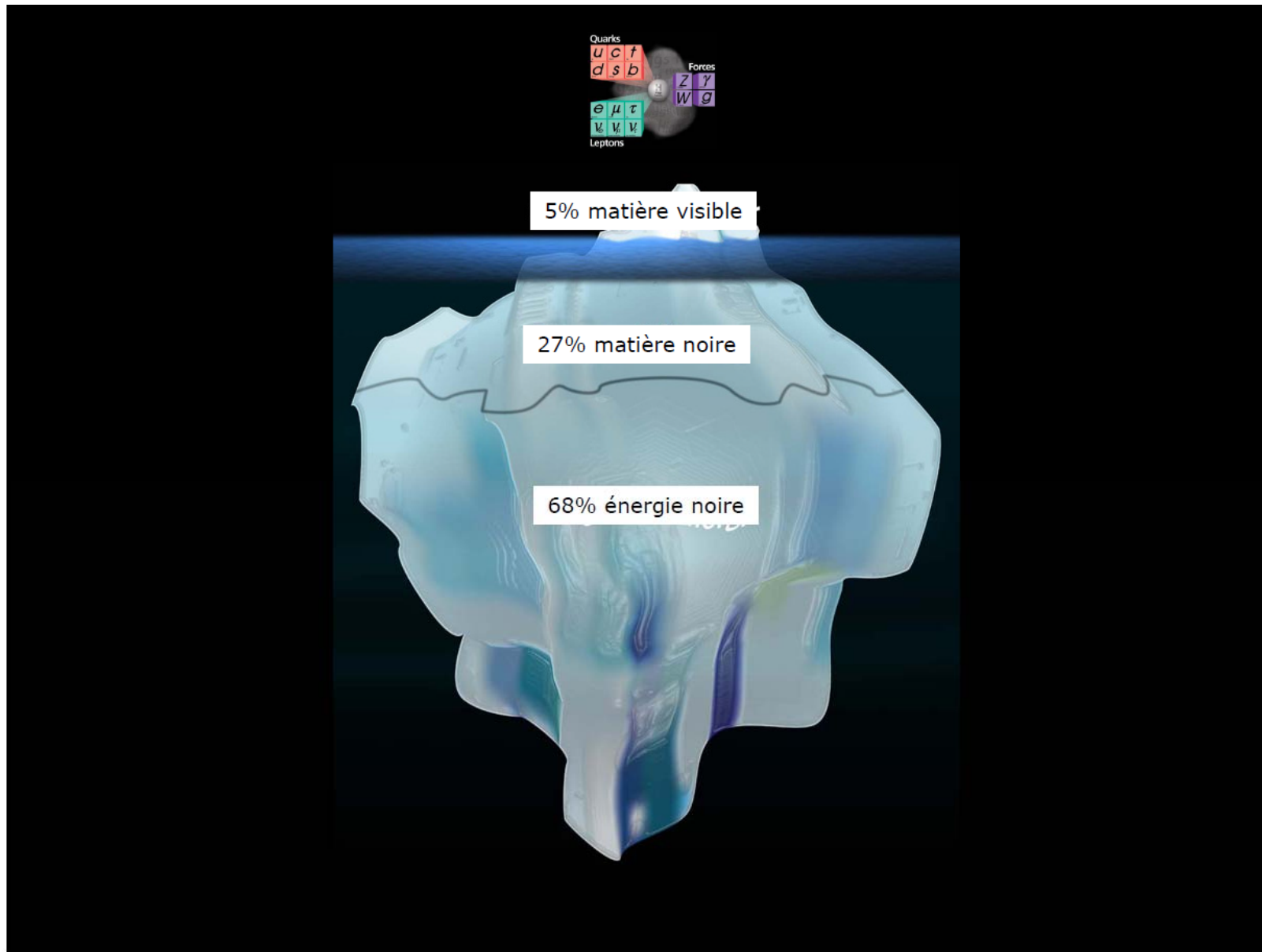
Matière noire et énergie noire

- Nous connaissons bien la matière visible ...



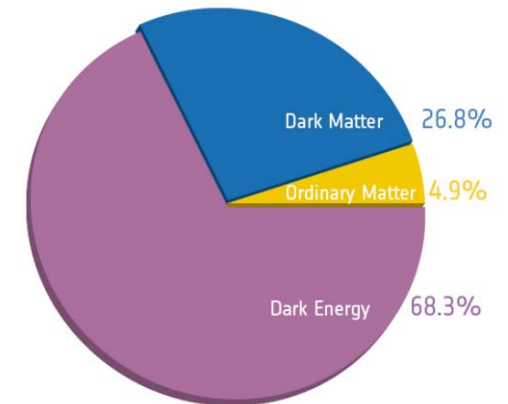
Matière noire et énergie noire

- ... mais elle ne représente que 5% du contenu énergétique total de l'Univers !



Matière noire et énergie noire

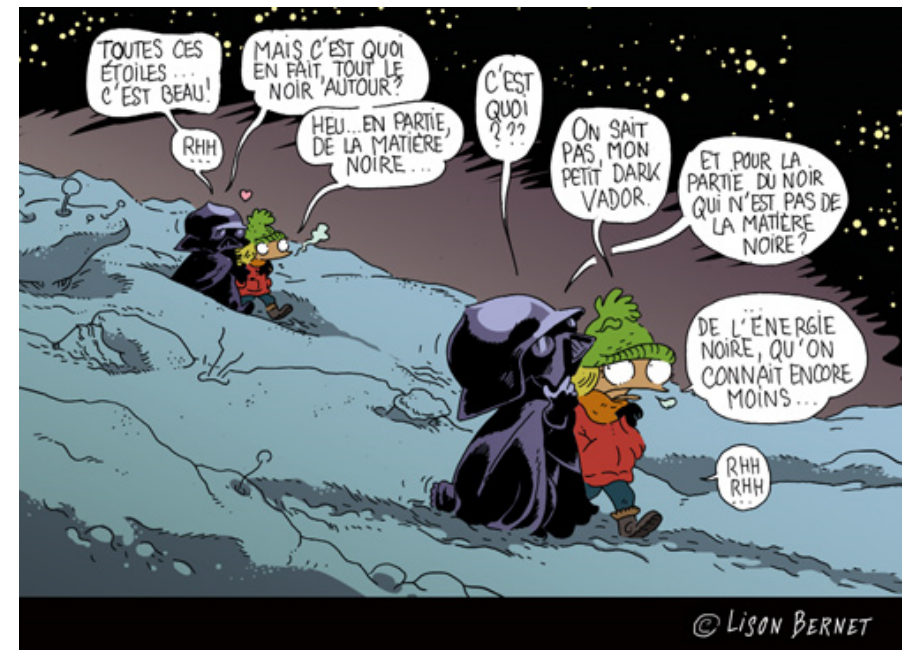
- La matière noire apparaît quand on « pèse » les galaxies
 - La matière visible ne représente qu'une (petite) partie de leur masse !
- La matière noire pourrait être formée de particules encore inconnues, stables, massives et interagissant très peu avec la matière ordinaire



- L'expansion de l'Univers semble s'accélérer
 - L'énergie noire, dont on ignore tout, serait le moteur de cette expansion

- Pour assurer sa validité, ce modèle doit être confirmé par l'expérience
 - C'est la manière « la plus simple » de décrire de manière excellente toutes les données existantes dans un même cadre

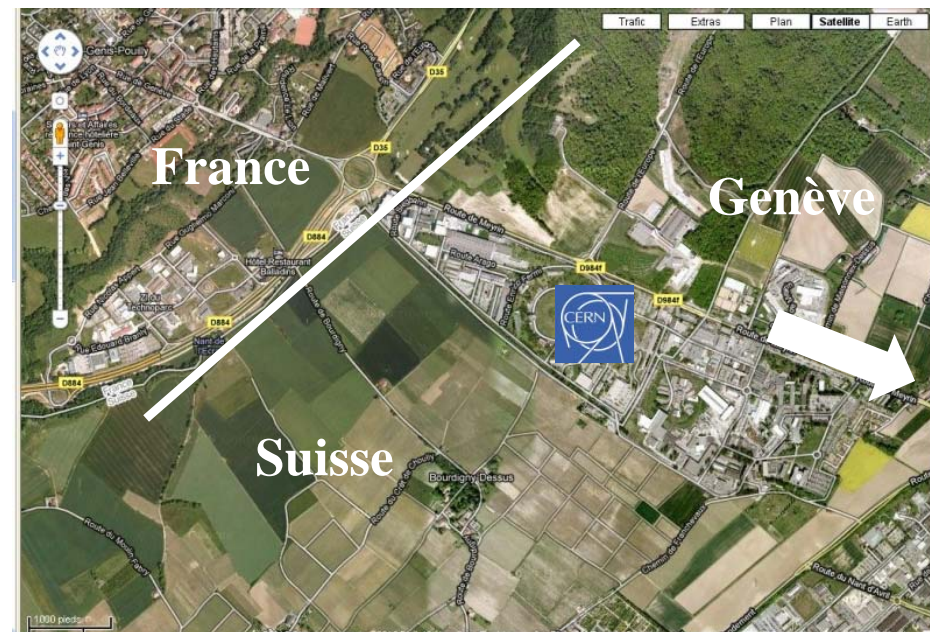
- Rien ne permet d'affirmer (ni d'infirmer) que c'est la « bonne » théorie



Le CERN

Le CERN

- **Plus grand laboratoire de physique des particules au monde :**
 - ~ 2500 personnes y sont employées
 - ~ 10000 scientifiques visiteurs chaque année
 - ~ 1000 stagiaires
- Créé le 29 septembre 1954
 - France : un des douze états fondateurs
- 21 états membres
 - + pays « observateurs »
ou « participants »
- Le CERN est situé près de Genève, à cheval sur la frontière franco-suisse
- **Le web a été inventé au CERN au début des années 1990 !**



<http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>



The screenshot shows a Netscape browser window displaying the original World Wide Web project page. The browser's address bar shows the URL <http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>. The page content includes a title "World Wide Web" and a description: "The WorldWideWeb (W3) is a wide-area [hypermedia](#) information retrieval initiative aiming to give universal access to a large universe of documents." Below this, there are several sections with links: "Everything there is online about W3 is linked directly or indirectly to this document, including an [executive summary](#) of the project, [Mailing lists](#), [Policy](#), November's [W3 news](#), [Frequently Asked Questions](#)." Other sections include "What's out there?", "Help", "Software Products", "Technical", "Bibliography", "People", "History", "How can I help?", and "Getting code".

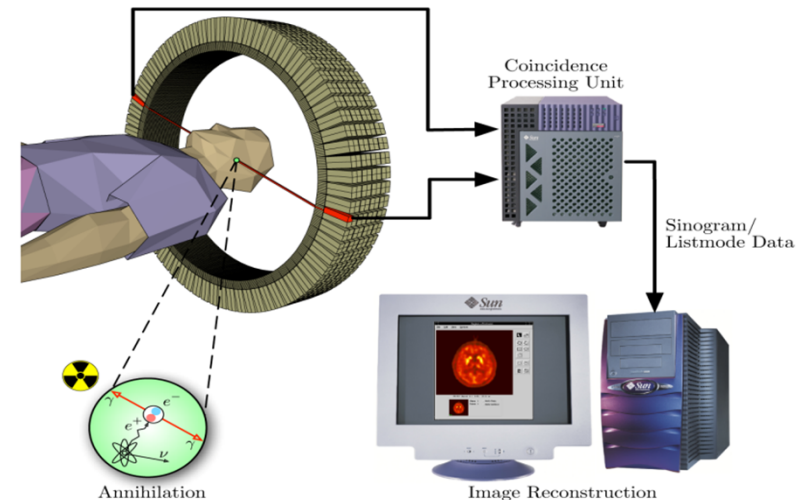
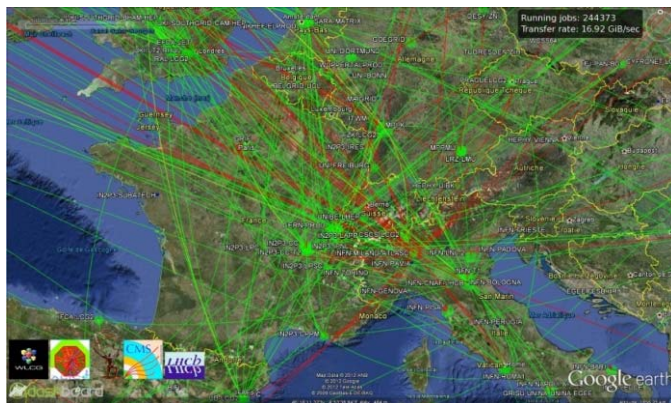
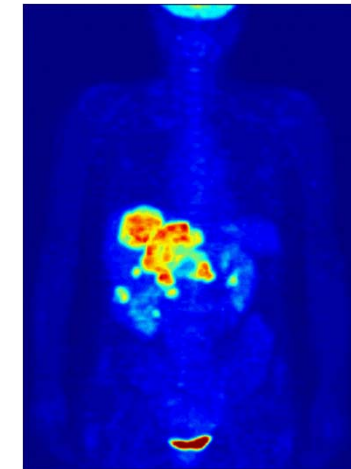
La première page web au monde !

[En fait la version de 1992. La toute première]
[version (1990) est considérée comme *perdue*.]
[Si quelqu'un a une sauvegarde ... ☺]



Retombées de la physique des particules

- Web
- La « Grille de calcul »
- L'imagerie médicale
- La radiothérapie

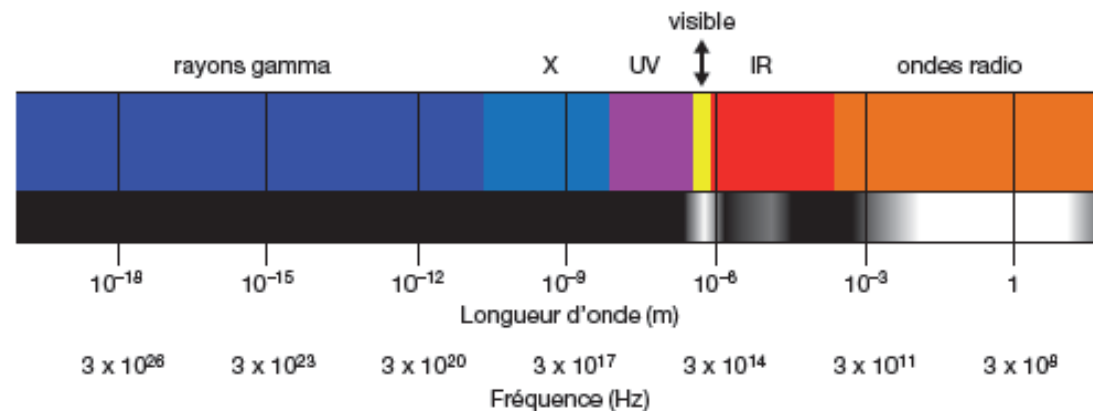


- Des développements technologiques variés
 - Chaque nouvelle expérience recule les limites de la technique
- L'industrie française bénéficie du fait que la France est un état frontalier du CERN

Le LHC

Les accélérateurs de particules

- Plus on veut sonder la matière aux petites échelles, plus il faut d'énergie
→ Exemple des ondes électromagnétiques : énergie $\propto 1 / (\text{longueur d'onde})$



- La plupart des particules sont instables \Rightarrow elles n'existent pas dans la Nature
→ Il faut les produire artificiellement
→ En grande quantité pour obtenir des mesures de qualité
→ Les accélérer pour leur donner l'énergie souhaitée
→ Les amener/créer au cœur des détecteurs construits spécialement pour les étudier

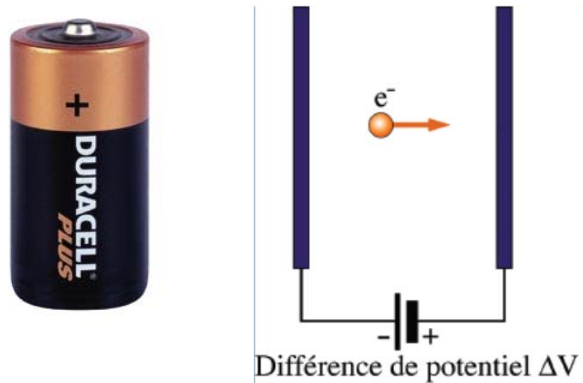
- Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

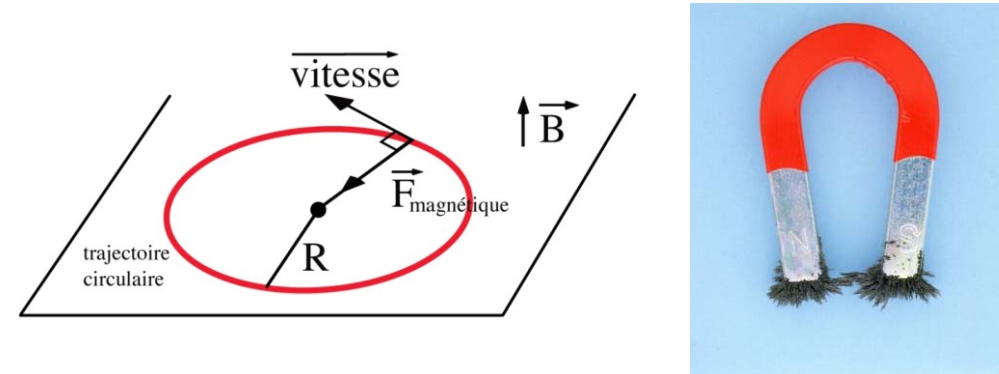
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

Les accélérateurs de particules

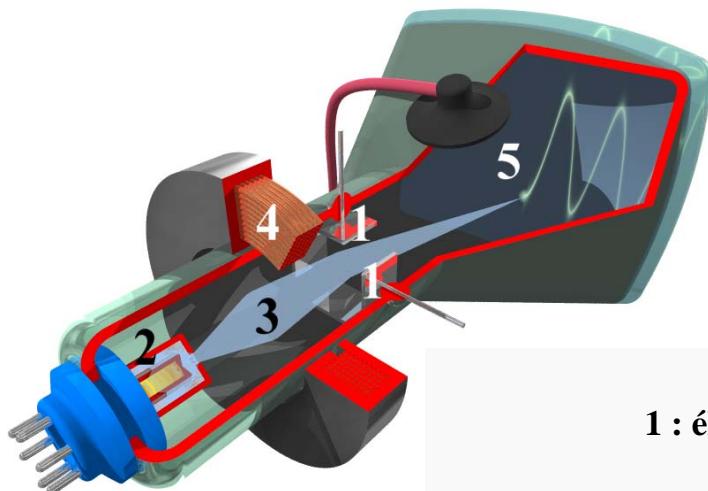
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



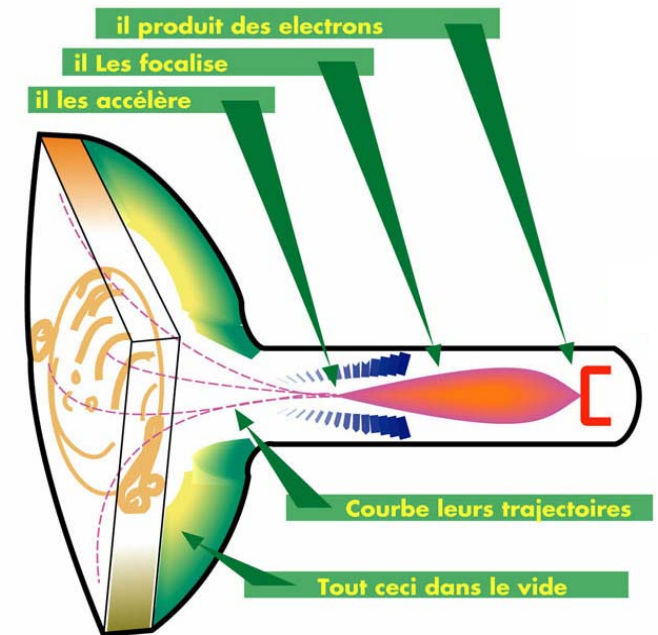
- On les pilote avec des champs magnétiques

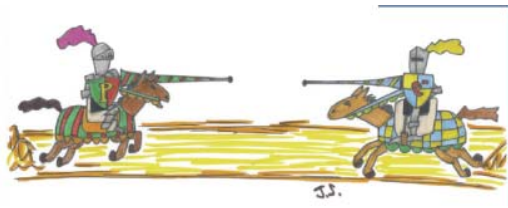


→ Les oscilloscopes et les tubes TV cathodiques sont des accélérateurs !

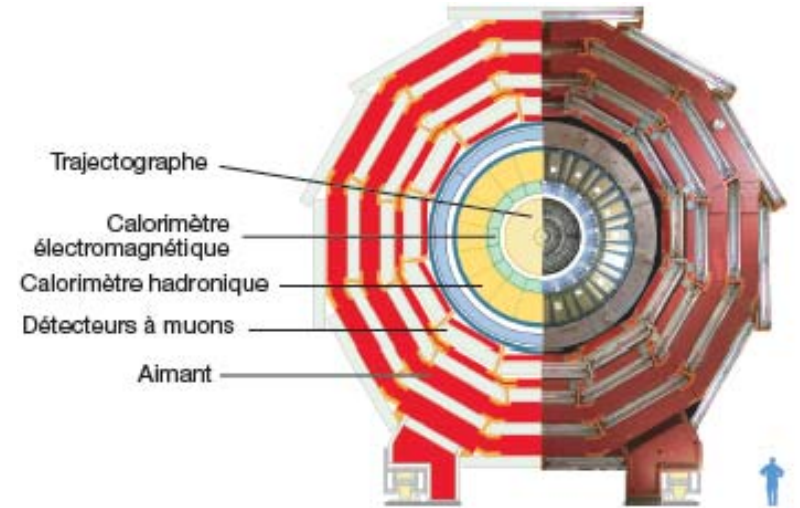
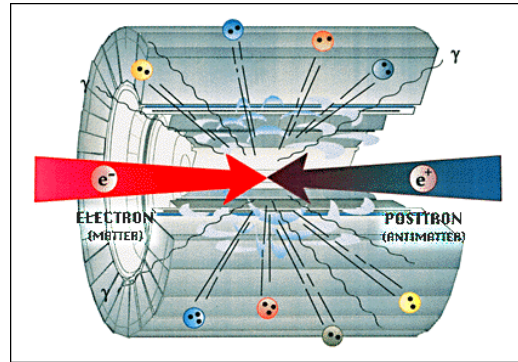
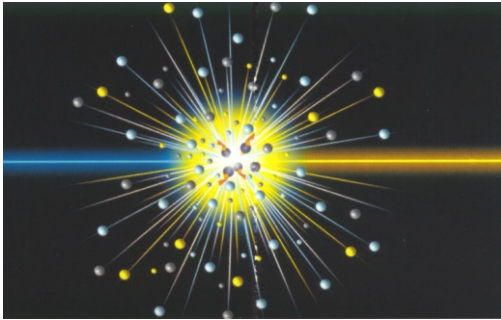
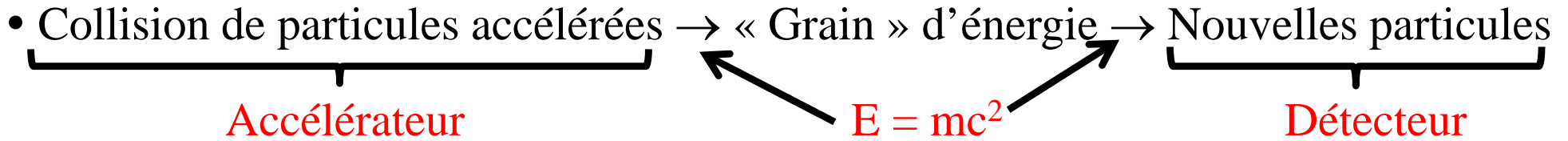
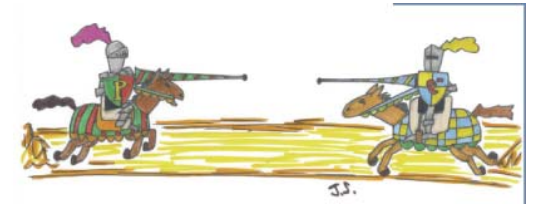


- Tube d'oscilloscope**
- 1 : électrodes déviant le faisceau
 - 2 : canon à électrons
 - 3 : faisceaux d'électrons
 - 4 : bobine pour faire converger le faisceau
 - 5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore

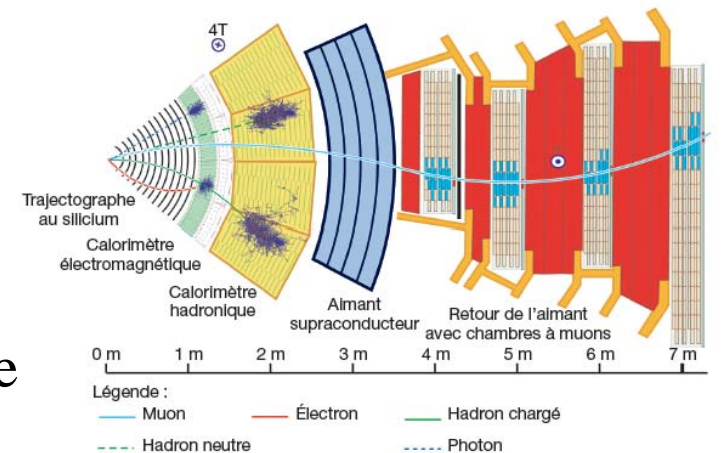




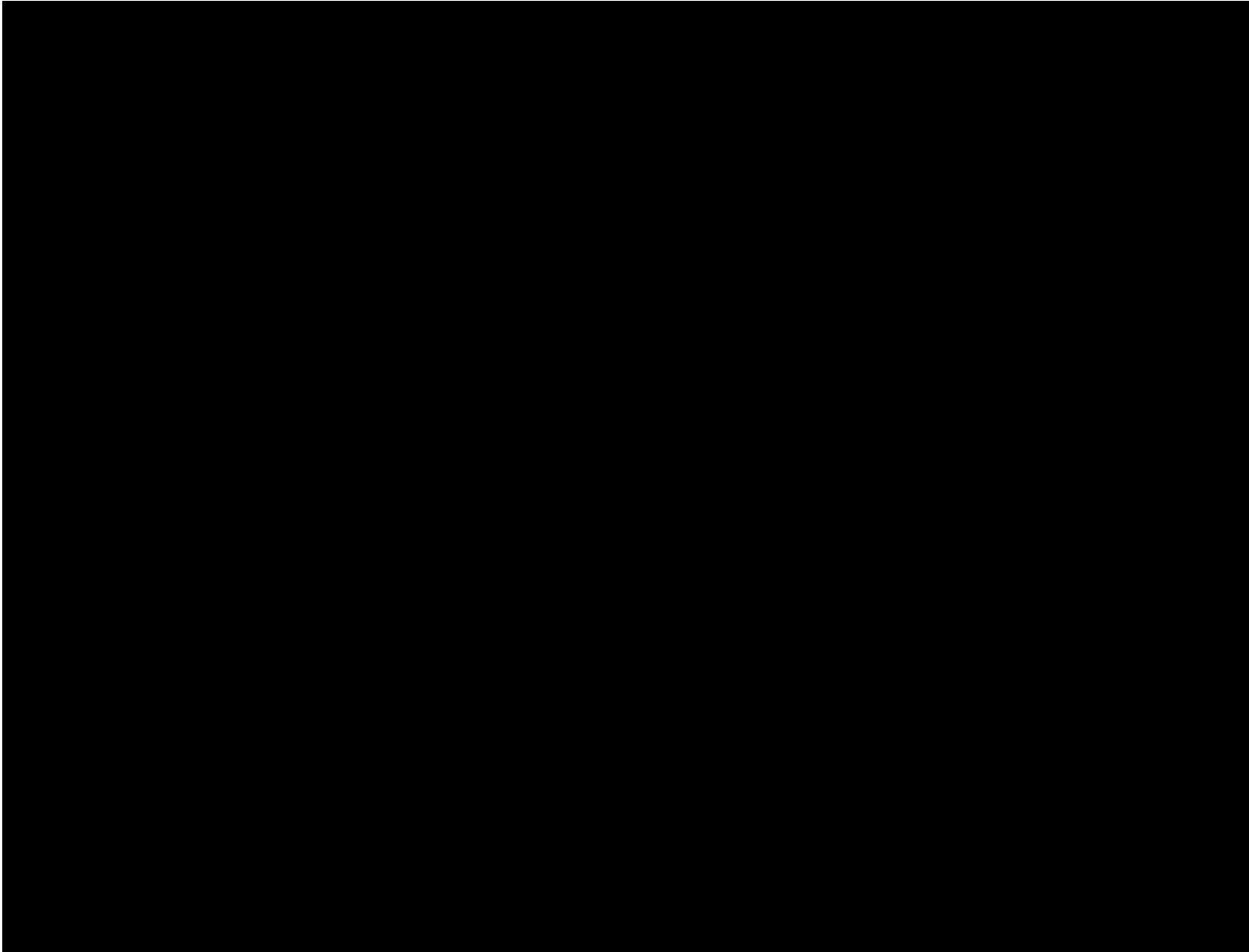
Les collisionneurs



- Accélération dans des sections droites
- Collisions dans des anneaux circulaires
 - Taille de la machine « réduite »
 - Particules produisent des collisions à chaque tour
 - Les collisions « frontales » permettent d'utiliser au mieux l'énergie disponible
- Précision d'horlogerie au-milieu d'une grosse machine
 - Taille de la zone de collision : ~ **cm** (plutôt moins)
 - Taille de l'accélérateur : ~ **km** (plutôt plus)



Intermède gourmand ...

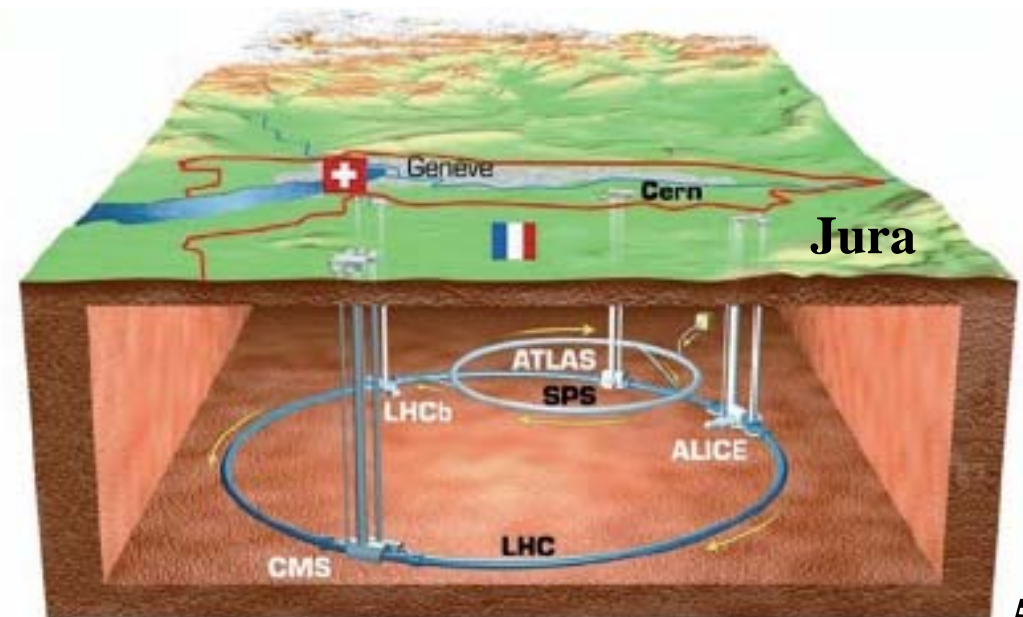


Le LHC



L'ancêtre :
Lawrence
(1930)

- 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



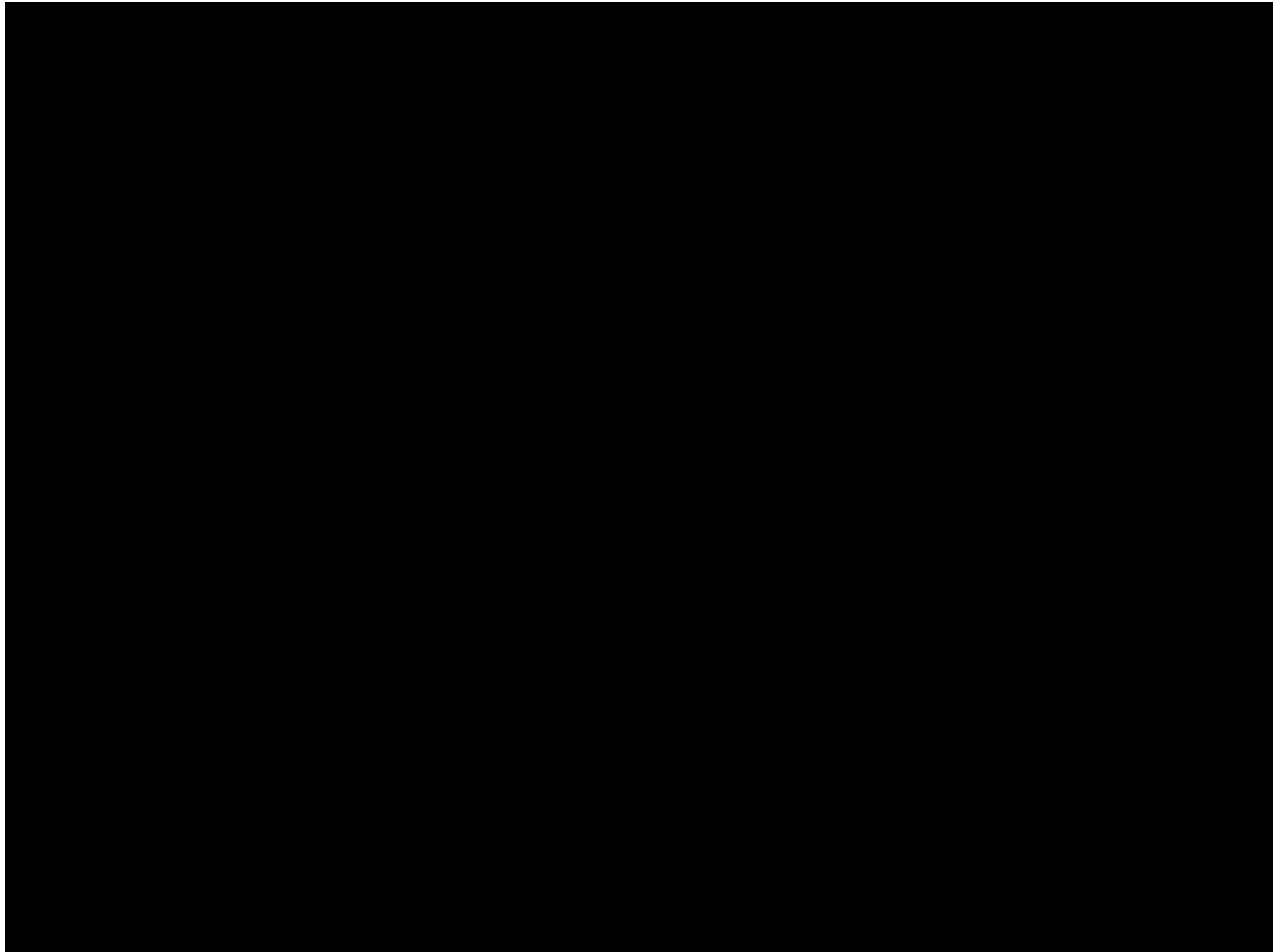
Le LHC en quelques chiffres

- **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 **9 300** environ ; ils sont refroidis à **-271,3°C**
→ **Plus froid que l'espace intersidéral !**

En fonctionnement nominal (pas encore atteint) :

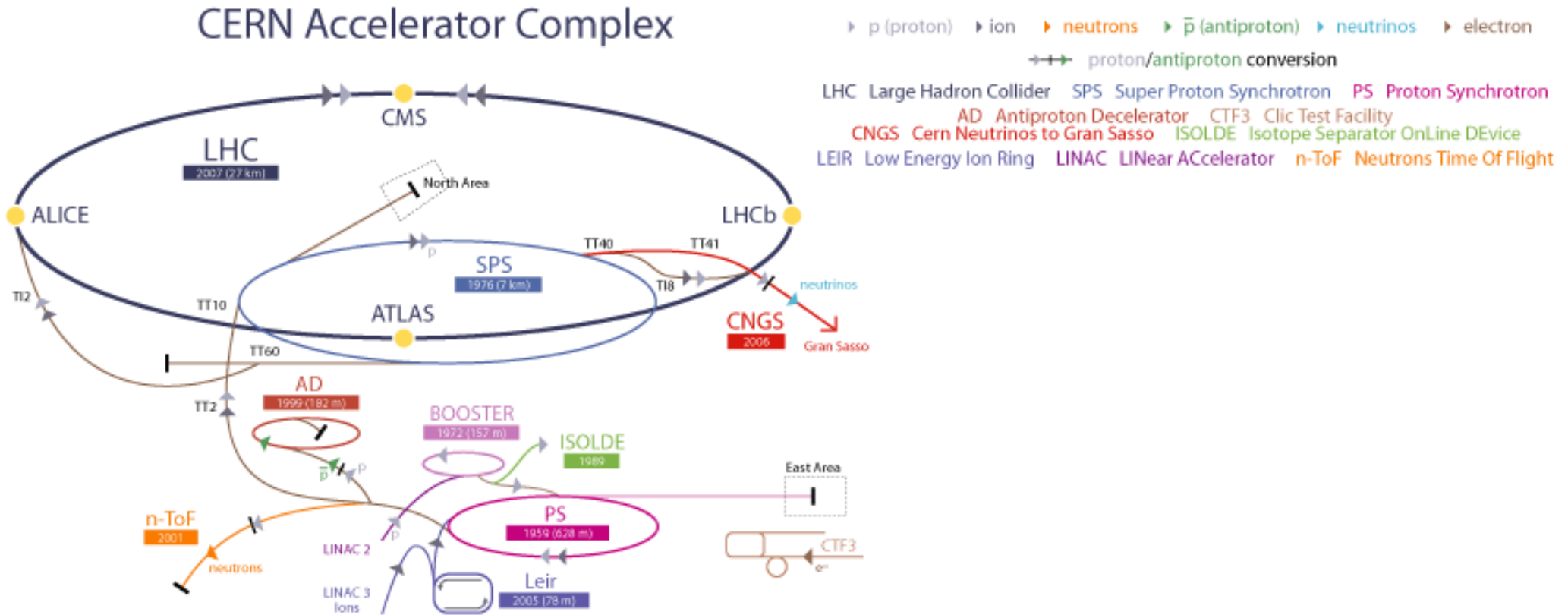
- **Les particules se croiseront ~ 40 millions de fois par seconde** dans les détecteurs et chaque interaction produira **~ 20 collisions proton-proton**
- Il y aura **~ 300 000 000 000 000 de protons** en même temps dans le LHC
- **L'énergie stockée** dans le **faisceau** équivaudra à celle de **80 kg** de TNT
aimants **240 kg**
- L'énergie nominale des collisions est **14 TeV** (**8 TeV actuellement**)

Accélération des particules au LHC



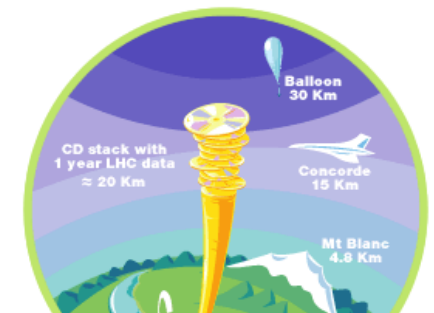
Accélération des particules au LHC

CERN Accelerator Complex

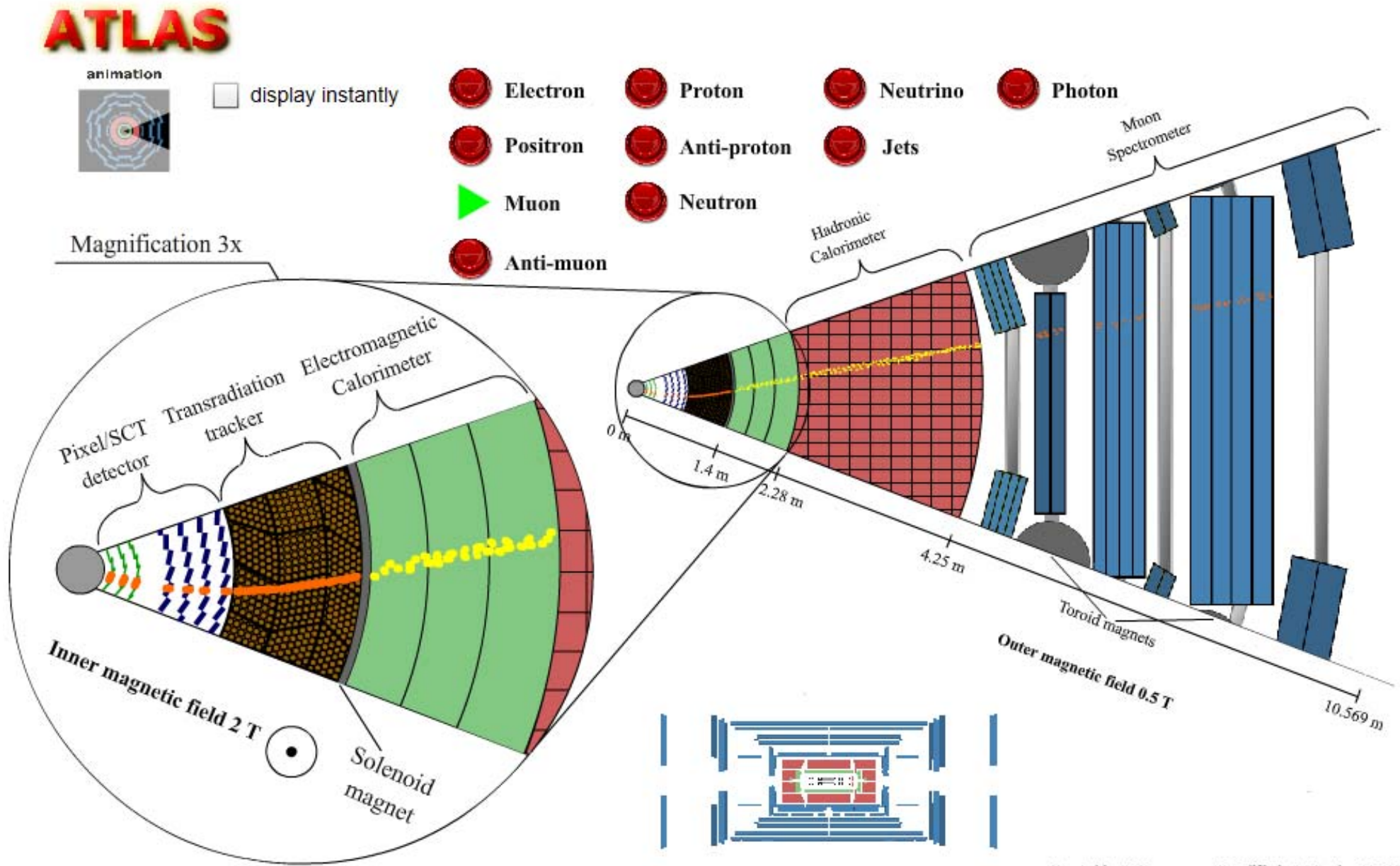


Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
 - Dimensions de **plusieurs dizaines de mètres**
 - Poids de **plusieurs milliers de tonnes** (\approx Tour Eiffel)
- Des **millions de canaux électroniques** reçoivent des informations lors des collisions
 - **Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus**
 - Surfaces/volumes actifs, câbles, alimentations, etc.
- **Volume total de données : \sim plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde**
 - Impossible de tout conserver
 - **Tri en temps réel des événements : drastique et très performant**
- Données stockées et analysées au moyen de **milliers d'ordinateurs** répartis dans des **centaines de centres de calcul du monde entier**
- Chaque collaboration du LHC compte **plusieurs milliers de membres**



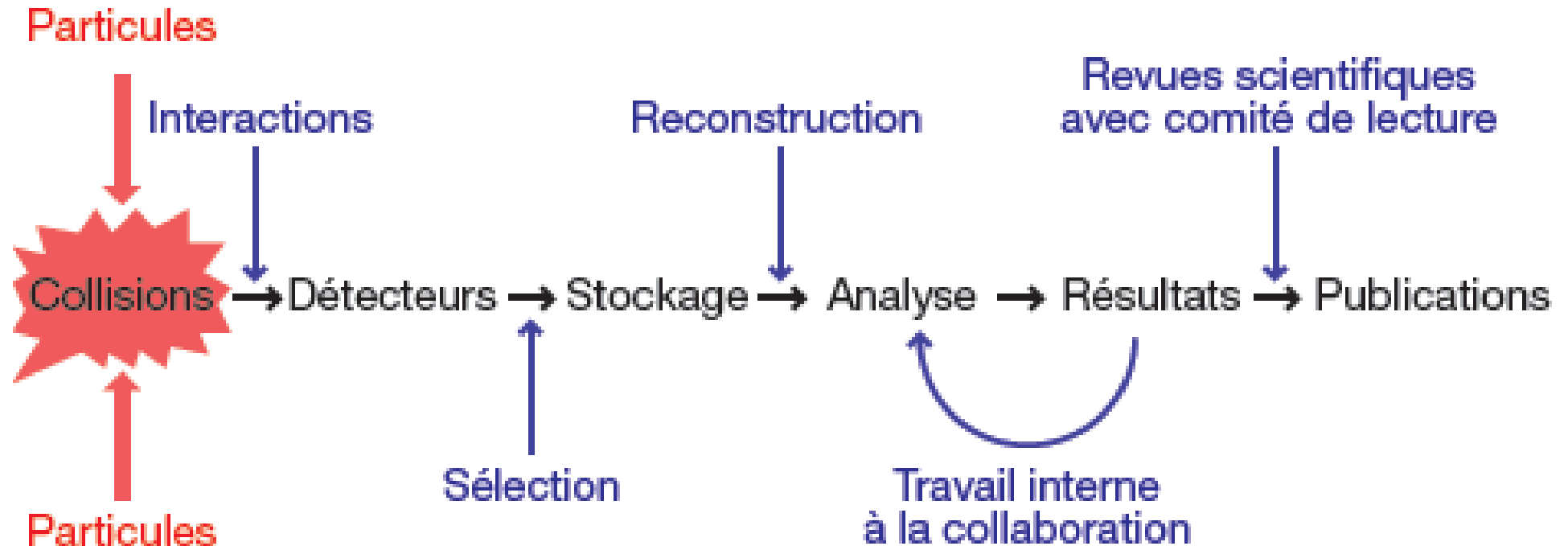
Interactions des particules avec le détecteur ATLAS



Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

Comment analyser les données du LHC ?

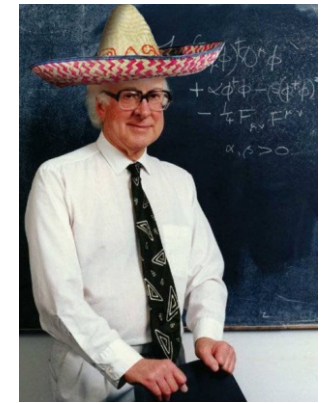
- Schéma suivi par une analyse typique :



- **Utilisation intensive d'ordinateurs** pour
 - accéder/utiliser les données enregistrées au CERN
 - **simuler** le comportement du détecteur lors du passage des particules étudiées
- **Mise en œuvre de méthodes mathématiques sophistiquées** pour obtenir les résultats les plus **précis** possibles et **tester leur validité**
- **La « maturation » d'un résultat peut prendre une année voire plus**

A la recherche du boson de Higgs

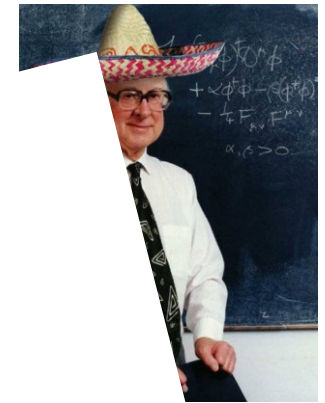
Le boson de Higgs



- **Motivation théorique** au départ :
« quelque chose » doit donner leur masse aux particules élémentaires
- **Sans ingrédient supplémentaire, la théorie échouerait à décrire la Nature** :
toutes les particules voyageraient à la vitesse de la lumière !
→ Une conséquence (parmi d'autres) : elles seraient sans masse ... **Ce qui est faux !**
- **Postulat** : un « champ » (dit de **Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble**)
emplirait tout l'espace et interagirait avec les particules
interaction \Rightarrow **ralentissement** \Leftrightarrow **masse** (vitesse < vitesse de la lumière)
- Plus une particule ralentit sous l'effet de ce champ,
plus elle est massive.
- **Peter Higgs** : si ce mécanisme est vrai,
il doit exister une particule « associée »
→ Le fameux **boson de Higgs**
- **Problème** : le boson de Higgs est la pierre angulaire du **Modèle Standard**
mais il n'a pas encore été découvert !!!!!



Le boson de Higgs

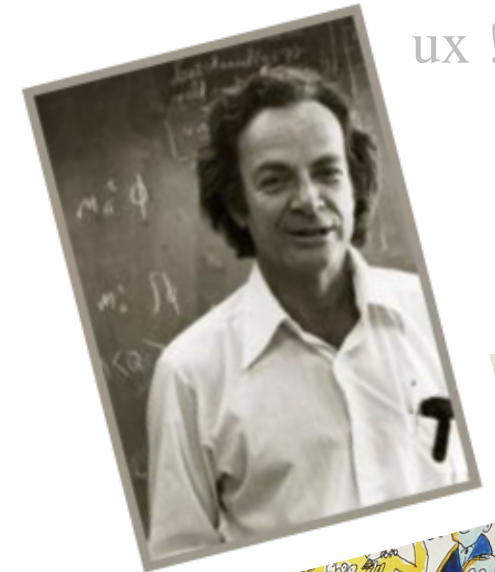


- Motivation théorique au départ :
« quelque chose » doit donner la masse

- Sans inconnues

▶ Do you want to be famous?
 ▶ Do you want to be a king?
 ▶ Do you want more than the nobel prize?
 - Then solve the mass Problem -
 R.P. Feynman

- P
pl
- Pet
il de
→ L
- Problè

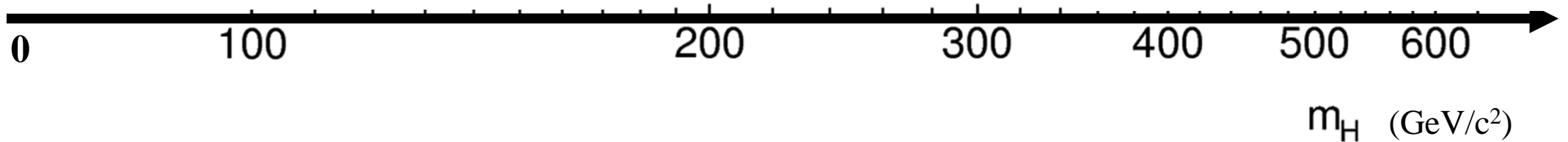


ux !



Le boson de Higgs est la pierre angulaire du Modèle Standard
 mais il n'a pas encore été découvert !!!!

La chasse au boson de Higgs



- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse

- Théorie $\Rightarrow m_H < 1000 \text{ GeV}/c^2$

Nota bene : $1 \text{ GeV}/c^2 = 1,8 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (en gros la masse d'un proton)

GeV = “Giga [10^9] électron-Volt”

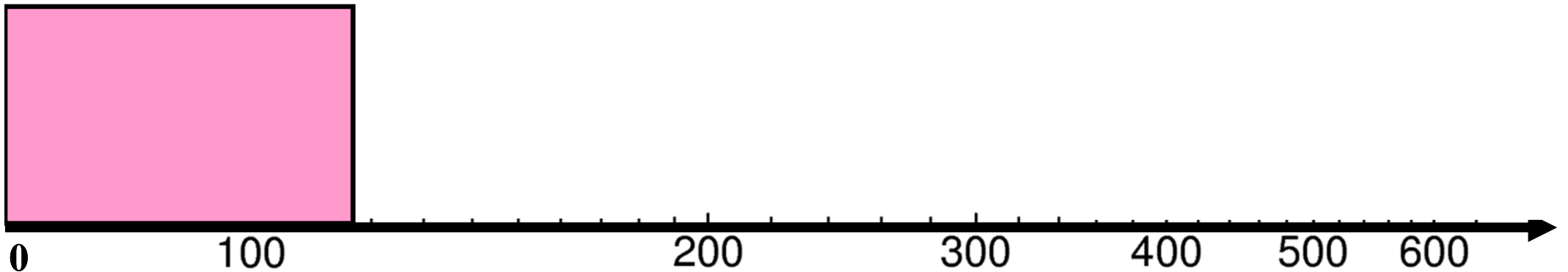
Energie actuelle de collisions au LHC : 8 \rightarrow 13 “Téra [10^{12}] électron-Volt” (**TeV**)

- Une poignée de bosons de Higgs créés par minute au LHC
 - Et seule une (très) faible fraction de ces événements sont identifiables

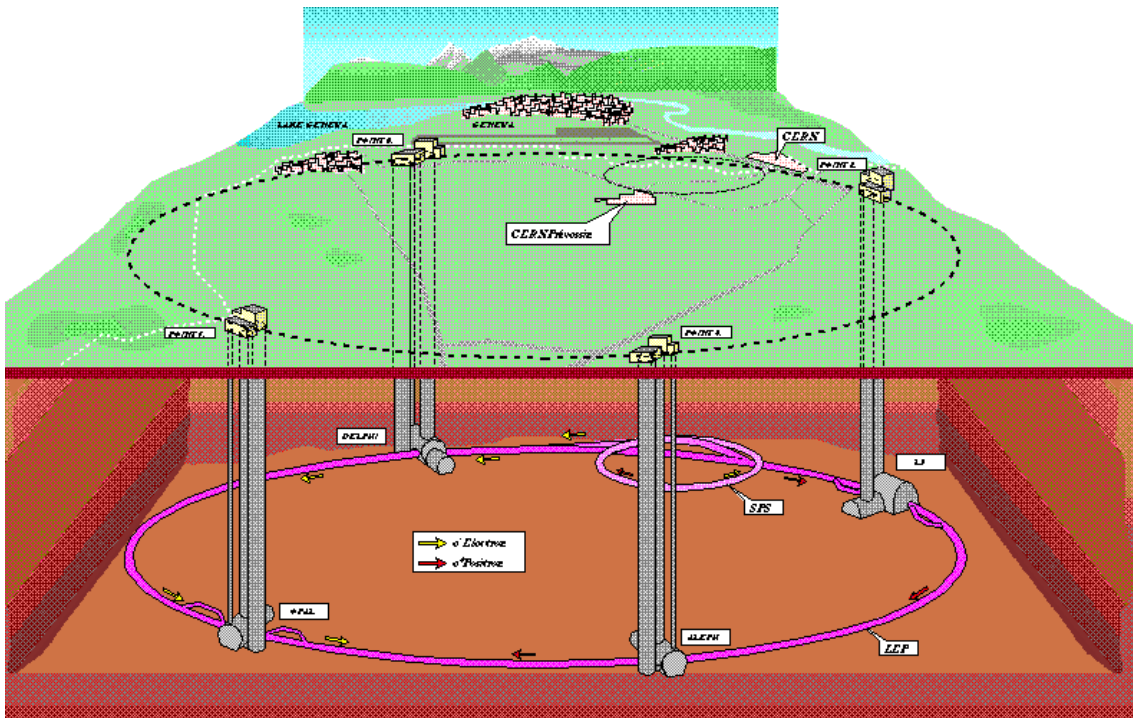
La chasse au boson de Higgs

LEP

1989-2000

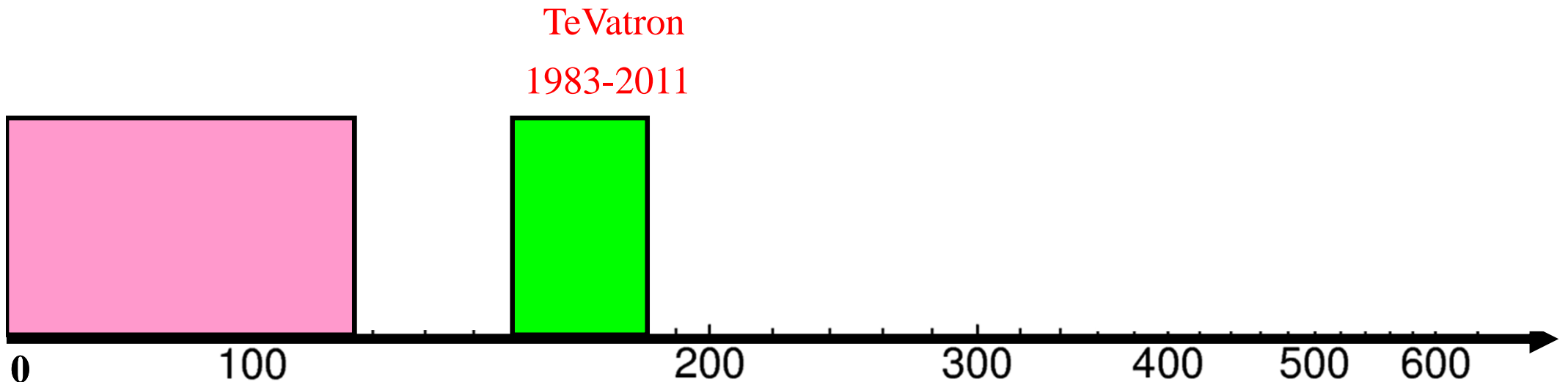


m_H (GeV/c²)



Le LEP au CERN
(près de Genève)

La chasse au boson de Higgs



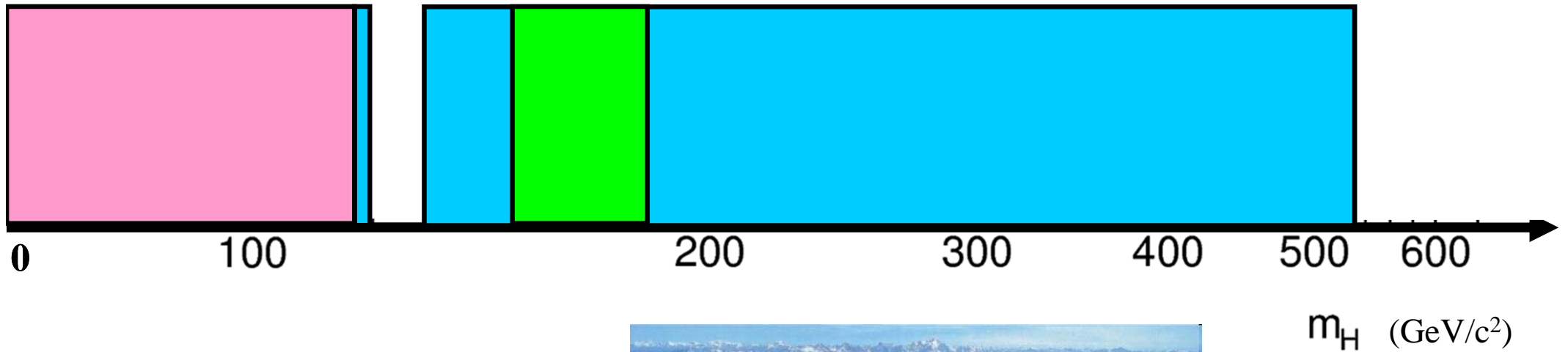
Le TeVatron
à Fermilab
(près de Chicago)



La chasse au boson de Higgs



LHC
2009-2011



Le LHC au CERN
(près de Genève)



4 juillet 2012

- Présentation des nouveaux résultats des expériences ATLAS et CMS
→ Communiqué de presse : <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2012/PR17.12F.html>

« Les expériences du CERN observent une particule dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs tant attendu »



- C'est l'accélérateur LHC qui a « offert » cette découverte aux expériences !
- Que montrent les données ?
- Et ensuite ?

4 Juillet 2012



2013

- 14 mars : mise à jour pour les « conférences d'hiver » des résultats annoncés en 2012
 - Nouveau communiqué de presse :

<http://press.web.cern.ch/fr/press-releases/2013/03/de-nouveaux-resultats-indiquent-que-la-particule-decouverte-au-cern-est-un>

« De nouveaux résultats indiquent que **la**
particule découverte au CERN est **un** boson de Higgs »

- 8 octobre : l'aboutissement d'une recherche de 49 ans ...



Le Prix Nobel de Physique 2013 a été décerné à

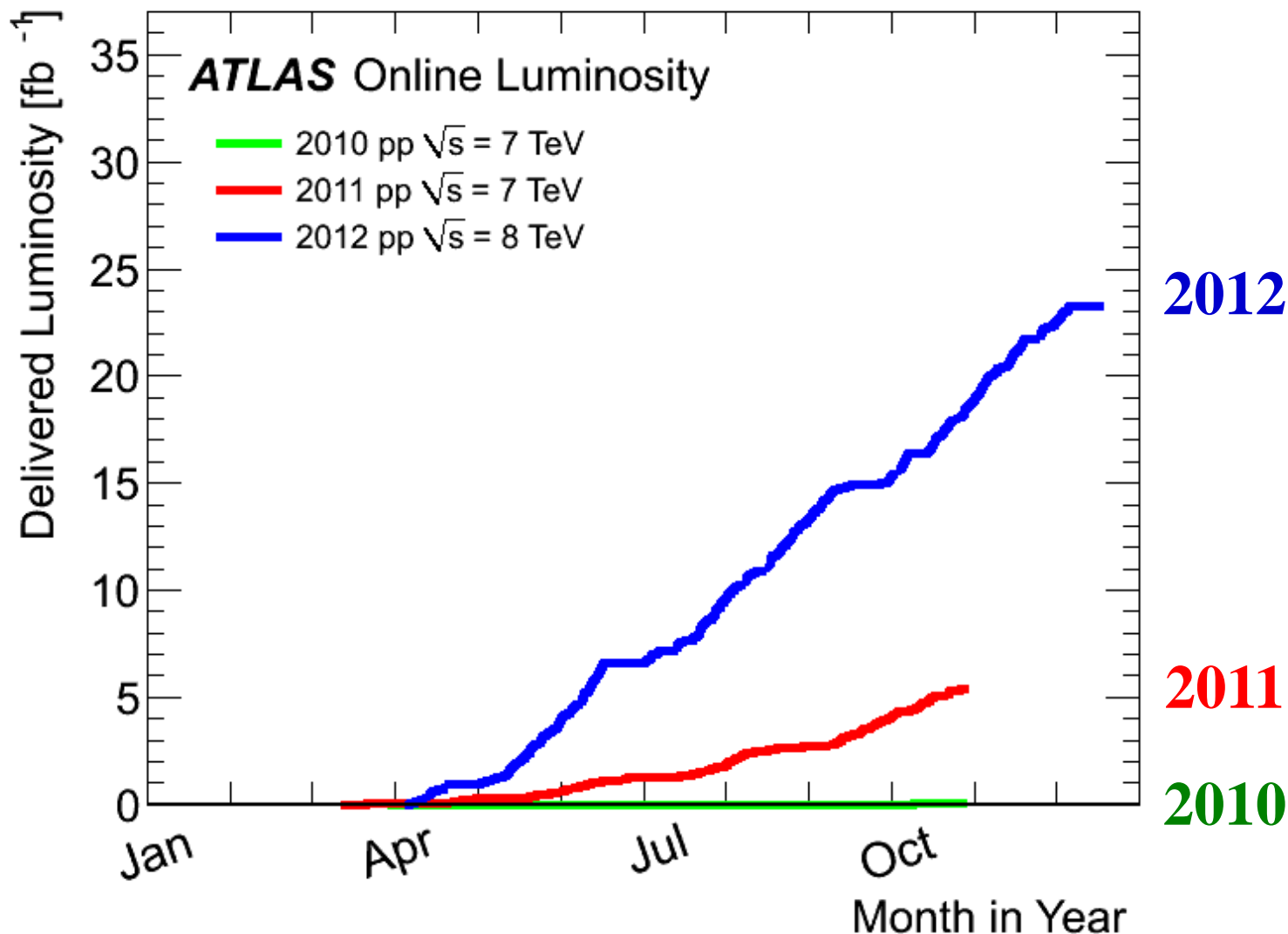
François Englert et Peter Higgs



" 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 "

Quantité de données accumulée par ATLAS

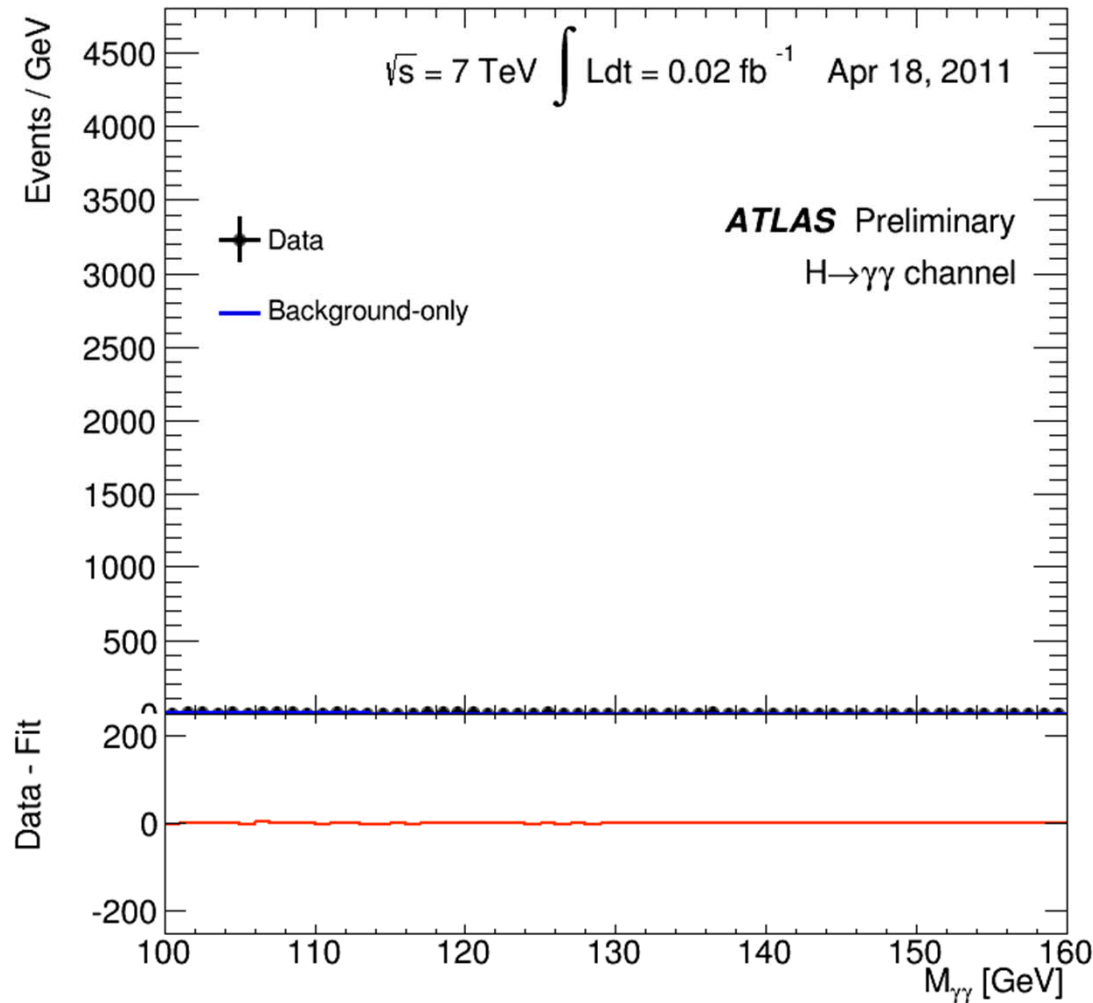
- La « **luminosité** » mesure la quantité de données récoltées par une expérience



- La **précision** d'une mesure dépend de la racine carrée de la statistique accumulée

La puissance de la statistique à l'œuvre !

- Le **signal** laissé par « un » **boson de Higgs** sort peu à peu du **bruit de fond** ...

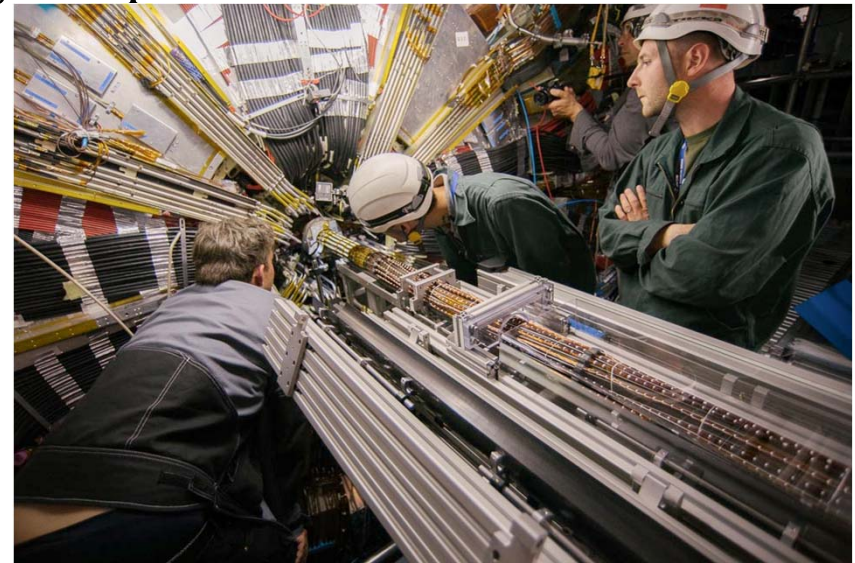


- ... à mesure que la quantité de données analysées augmente au cours du temps

Le futur du LHC

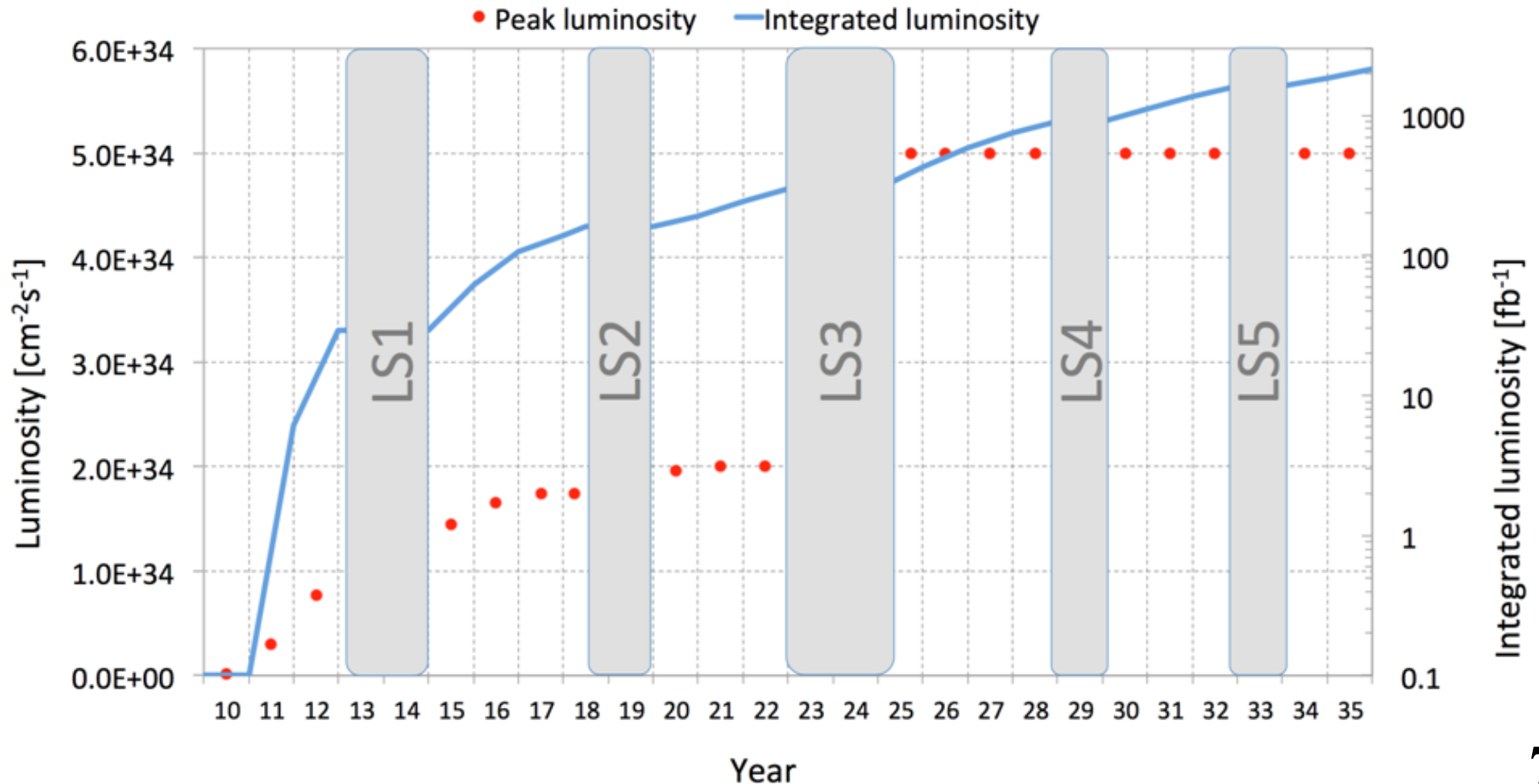
2013-2015 : 1^{er} arrêt longue durée

- **Maintenance prévue de longue date**
 - ~1 mois pour réchauffer/refroidir le LHC (accélérateur cryogénique)
- **Entretien et améliorations**
 - de l'ensemble des composants de la machine
 - et des détecteurs
- **Préparation aux prises de données futures**
 - A plus haute énergie : 8 → 13 puis 14 TeV
 - A plus haute intensité : pour enregistrer toujours plus d'événements
- Renforcement des interconnexions entre les aimants
 - Suite du programme d'amélioration consécutif à l'accident de septembre 2008
- **Redémarrage au printemps 2015**



Le programme futur du LHC

- Evolution possible du LHC jusqu'en ... 2035 !
 - **Points rouges**, échelle verticale de gauche (linéaire) : intensité des collisions
 - **Ligne bleue**, échelle verticale de droite (logarithmique) : nombre d'événements enregistrés (unité arbitraire)



Le futur ...
c'est maintenant !

20-21 mai 2015 : premières collisions à 13 TeV



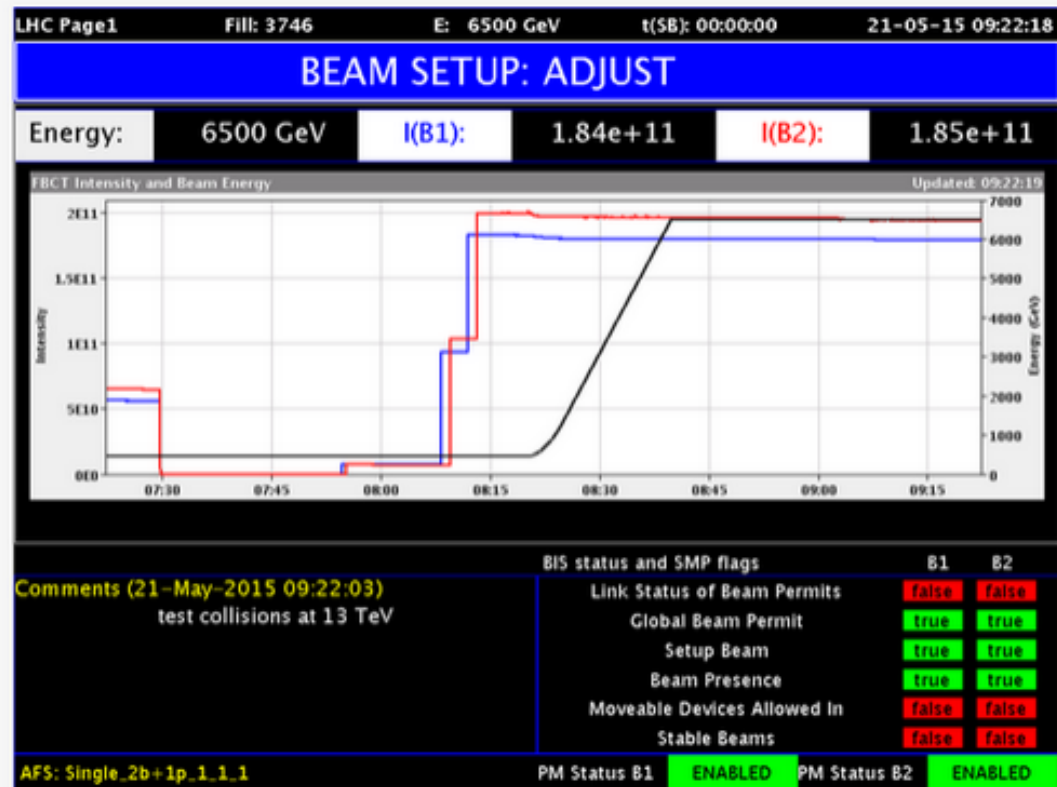
CERN @CERN · 6 h

#13TeV! Test collisions at the LHC break energy record for particle accelerators!

cern.ch/go/7LpK pic.twitter.com/SueZqcSwMG

Voir la traduction

👤 CERN, CERN en français, CERNpress et 5 autres



RETWEETS
657

FAVORIS
443



10:19 - 21 mai 2015 · Détails

20-21 mai 2015 : premières collisions à 13 TeV

LHC Page1 Fill: 3746 E: 6500 GeV t(SB): 00:00:00 21-05-15 10:02:52

BEAM SETUP: ADJUST

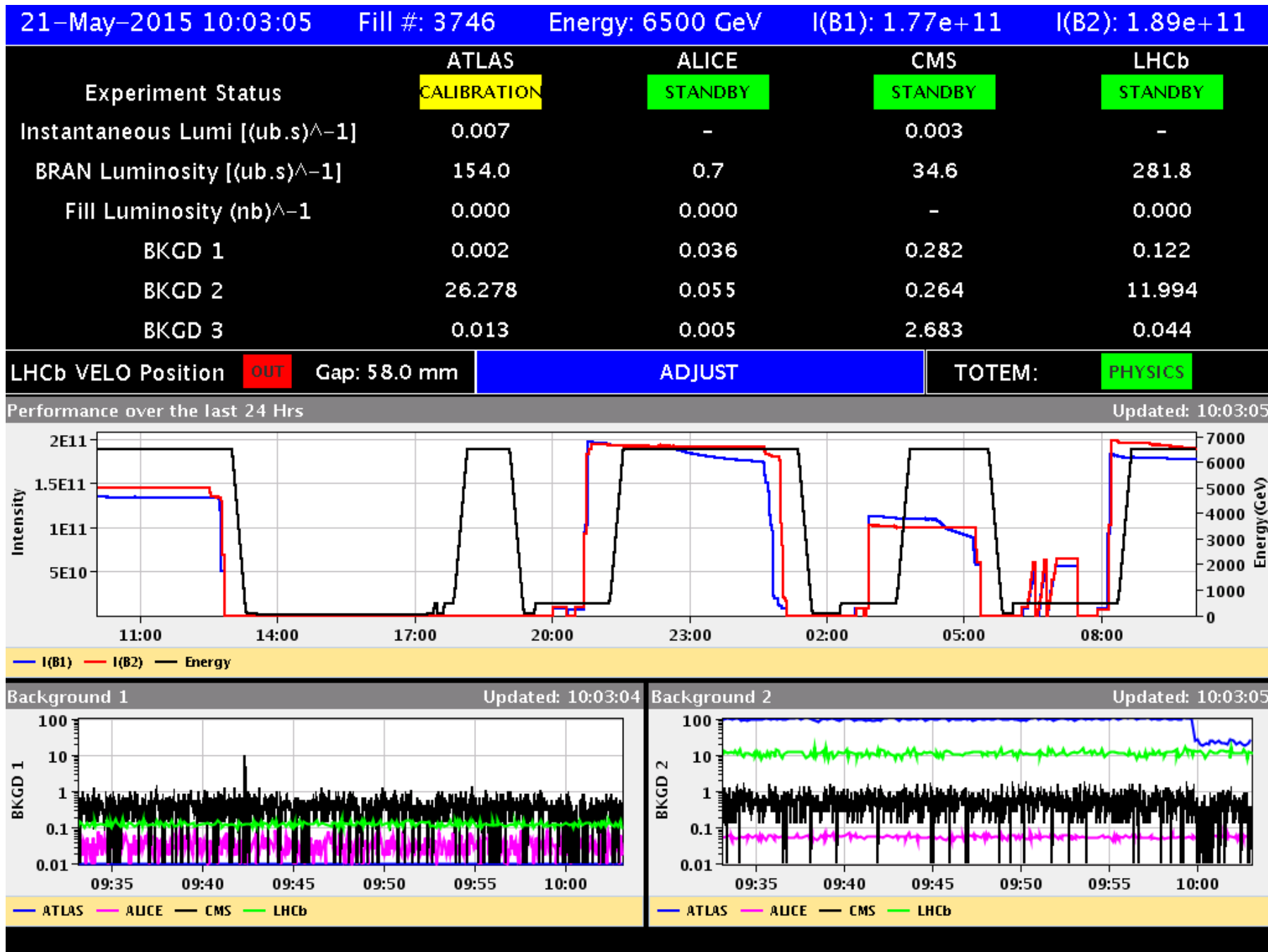
Energy:	6500 GeV	I(B1):	1.85e+11	I(B2):	1.82e+11
----------------	----------	---------------	----------	---------------	----------

FBCT Intensity and Beam Energy Updated: 10:02:51

	BIS status and SMP flags			B1	B2
<p>Comments (21-May-2015 09:22:03) test collisions at 13 TeV</p>	<p>Link Status of Beam Permits</p> <p>Global Beam Permit</p> <p>Setup Beam</p> <p>Beam Presence</p> <p>Moveable Devices Allowed In</p> <p>Stable Beams</p>	<p>false</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>false</p> <p>false</p>	<p>false</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>false</p> <p>false</p>	<p>false</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>false</p> <p>false</p>	<p>false</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>true</p> <p>false</p> <p>false</p>

AFS: Single_2b+1p_1_1_1	PM Status B1	ENABLED	PM Status B2	ENABLED
--------------------------------	--------------	----------------	--------------	----------------

20-21 mai 2015 : premières collisions à 13 TeV



20-21 mai 2015 : premières collisions à 13 TeV



CERN ✓
@CERN

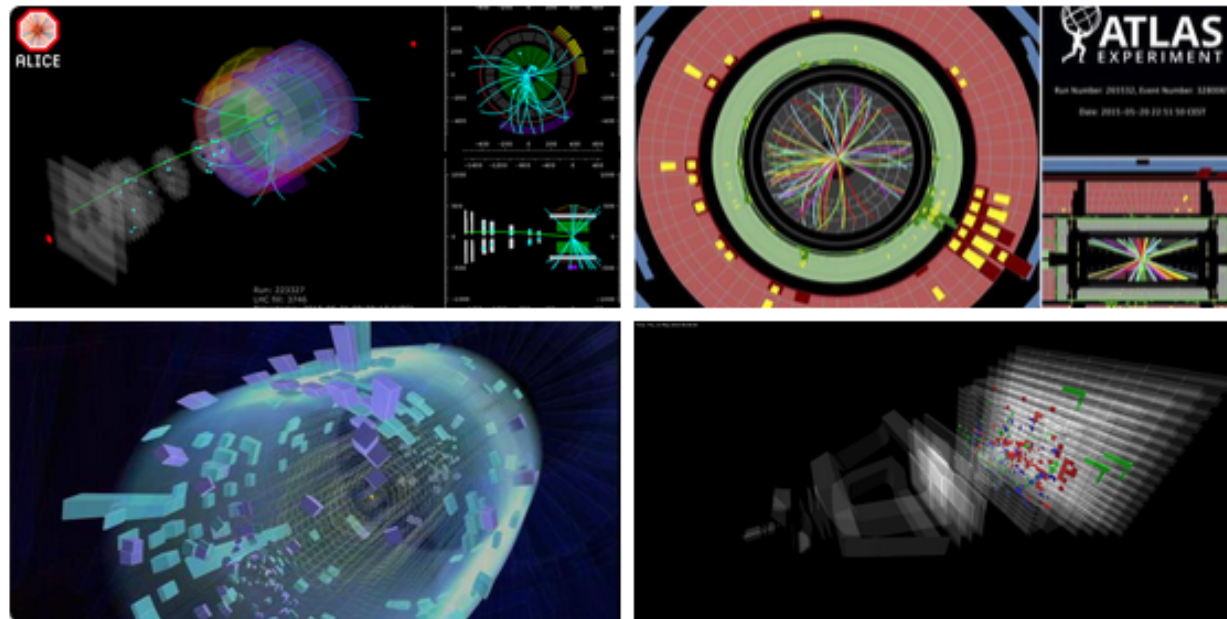


Abonné

LHC experiments see record-breaking collisions to help prepare for physics at #13TeV in June! cern.ch/go/fqR8

🌐 Voir la traduction

👤 CERN, CERN en français, CERNpress et 5 autres



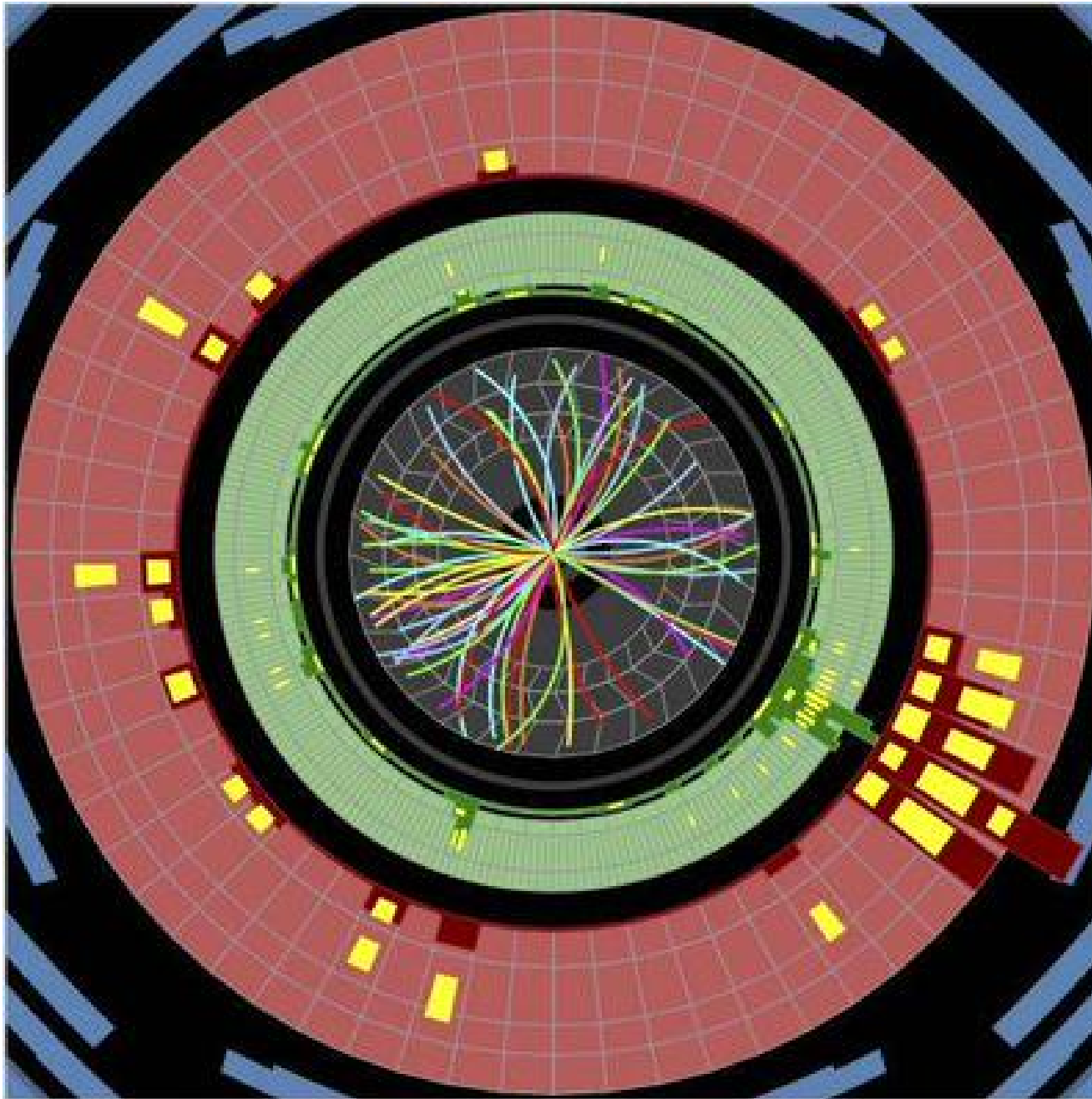
RETWEETS
117

FAVORIS
102

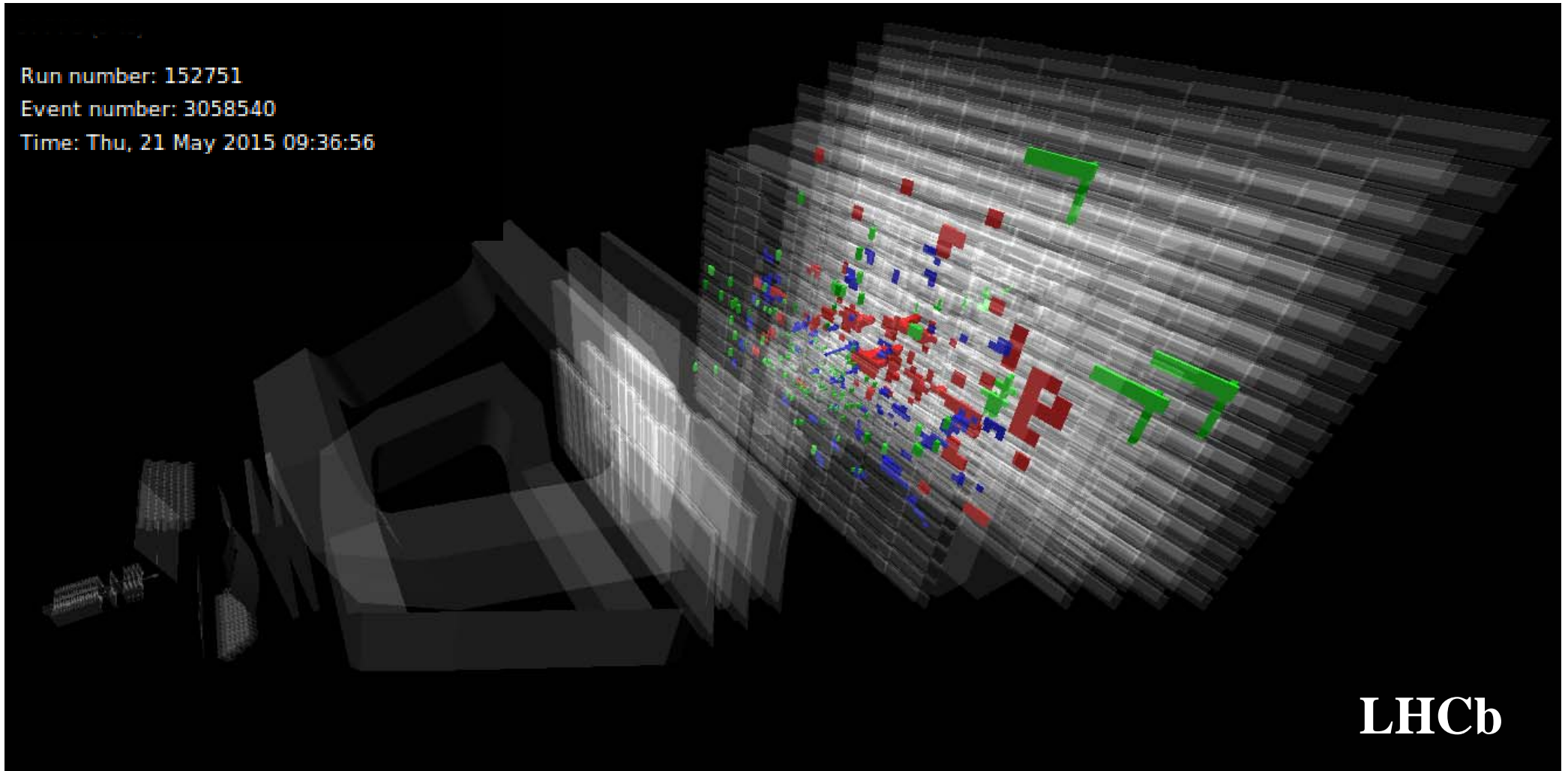


15:25 - 21 mai 2015

20-21 mai 2015 : premières collisions à 13 TeV



20-21 mai 2015 : premières collisions à 13 TeV



Manifestations et ressources autour du CERN et du LHC

Exposition au Palais de la Découverte

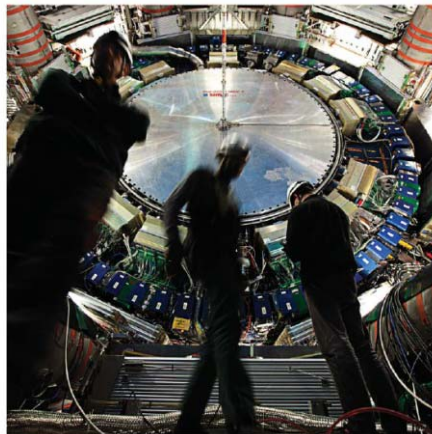
- A Paris, du 17 octobre 2014 au 19 juillet 2015



- <http://www.palais-decouverte.fr/fr/au-programme/expos-temporaires/le-grand-collisionneur-lhc>
- Exposition créée par le Science Museum de Londres
- Adaptée en partenariat avec le [CNRS/IN2P3](#) et le [CEA/IRFU](#)
→ **Des contenus supplémentaires et originaux**

Exposition au Palais de la Découverte

- Exposition « Experts en la matière
Regards sur le Cern »
 - 60 portraits de personnes « liées » au CERN
 - Physiciens, ingénieurs, techniciens, administratifs
 - Etudiants, enseignant, lycéen,
 - Architecte, réalisateur connu, dessinatrice
- 60 dyptiques
 - Portrait + image associée

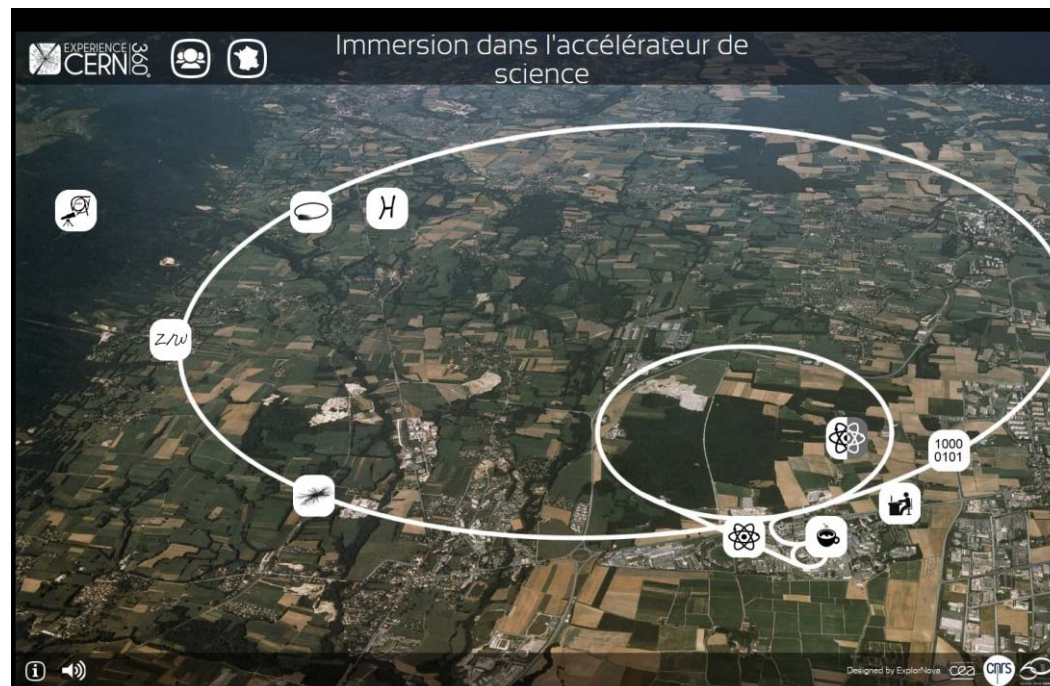


- Plus d'informations :

http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin_Palais/fichiersContribs/au-programme/expos-temporaires/lhc/Experts-en-la-matiere-webdoc.pdf

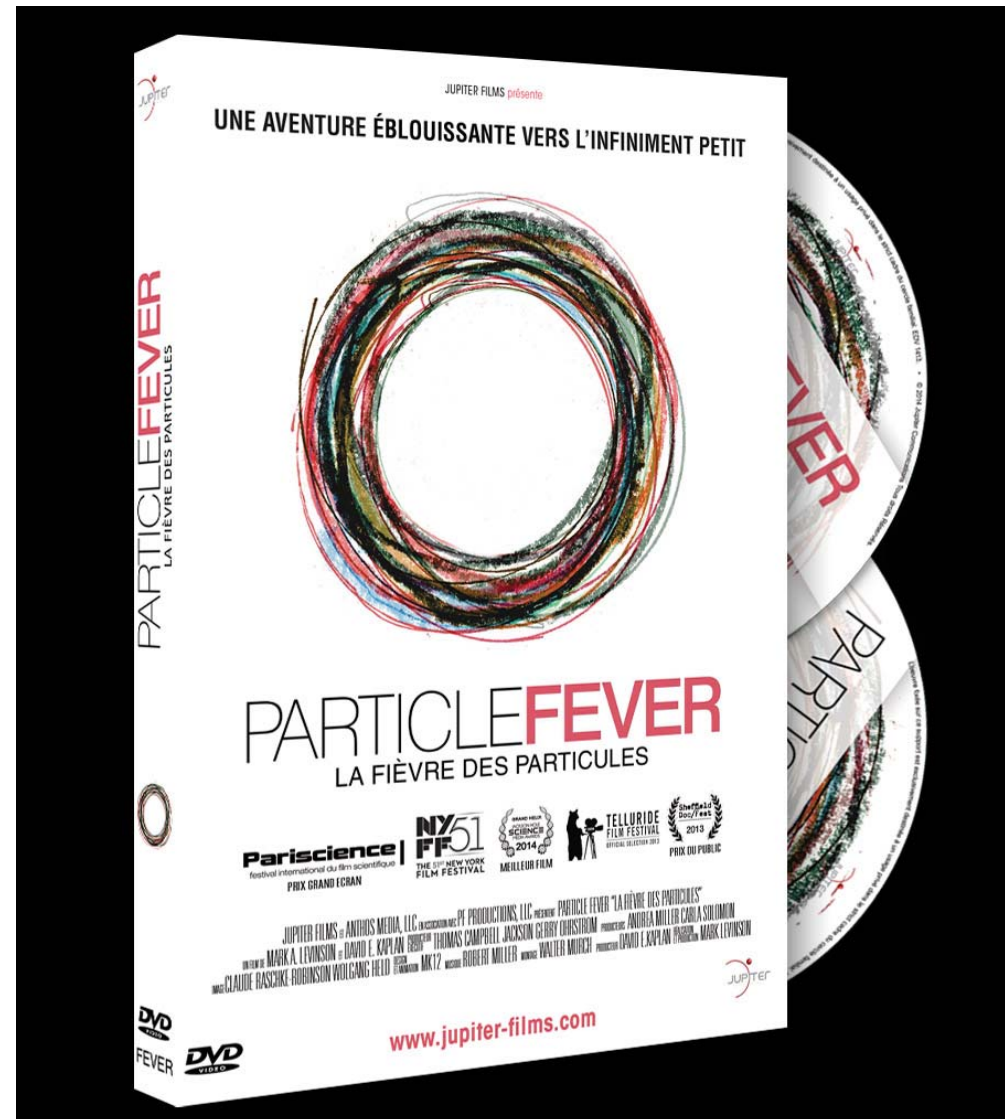
Web documentaire « Expérience CERN 360 »

- Une **visite virtuelle du CERN**
- Adresse web : <http://experience-cern360.fr>
- 10 points d'entrée pour découvrir les différentes facettes de ce grand laboratoire
- De nombreuses ressources dans chaque espace
 - Photos panoramiques haute-définition à 360 degrés
 - Ressources multimédia : vidéos, animations, etc.
 - Les 60 portraits conçus pour l'exposition au Palais de la Découverte



Film « La Fièvre des Particules »

- Un documentaire américain qui retrace le démarrage du LHC jusqu'à la découverte du boson de Higgs en juillet 2012
 - Primé dans plusieurs festivals du film scientifique
- Sorti en France le 5 novembre 2014
 - Projections en salles de cinéma et dans les établissements scolaires
- Distributeur en France : [Jupiter Communications](http://www.jupiter-films.com)
- Sortie récente d'un double DVD
 - Le film
 - Des bonus
 - Interviews de chercheurs



Pour en savoir plus sur le LHC

- Le site **LHC-France**
<http://www.lhc-france.fr>
- Site grand public du **CERN**
<http://public.web.cern.ch/public/welcome-fr.html>
- Sites grand public des **expériences du LHC** :
 - ALICE <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>
 - ATLAS <http://atlas.ch/>
 - CMS <http://cms.web.cern.ch/cms/index.html>
 - LHCb <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public>
- Films disponibles gratuitement sur le web :
 - Film “Bottle to Bang” produit et dirigé par Chris Mann (© CERN, 2008)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1125472>
 - Film « LHC First Physics » (© CERN video productions, 2010)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1259221>

Le Passeport pour les deux infinis

Le passeport pour les 2 infinis

- Un livre **réversible** de 192 pages couleur (Dunod)
 - Côté **pile** : **vers l'infiniment petit**
 - Côté **face** : **vers l'infiniment grand**
- **Courts articles** (2 pages)
 - **Principales notions du domaine**
 - **Description des grandes expériences actuelles** (Planck, LHC, etc.)
 - Quelques fiches plus appliquées + un **glossaire** fourni pour conclure chaque partie
- **Plus de cinquante contributeurs** du CNRS, du CEA et de l'Université
- **Comité de rédaction de sept chercheurs et ingénieurs**
- **Première parution en 2010 ; seconde édition mise à jour pour la rentrée 2013**
- **Livre disponible gratuitement pour les enseignants du secondaire et du supérieur**
→ **Site web** : <http://www.passeport2i.fr>
- **Fiches pédagogiques** élaborées par des professeurs à partir d'articles du livre
- **Rencontres** avec des enseignants et le grand public

