

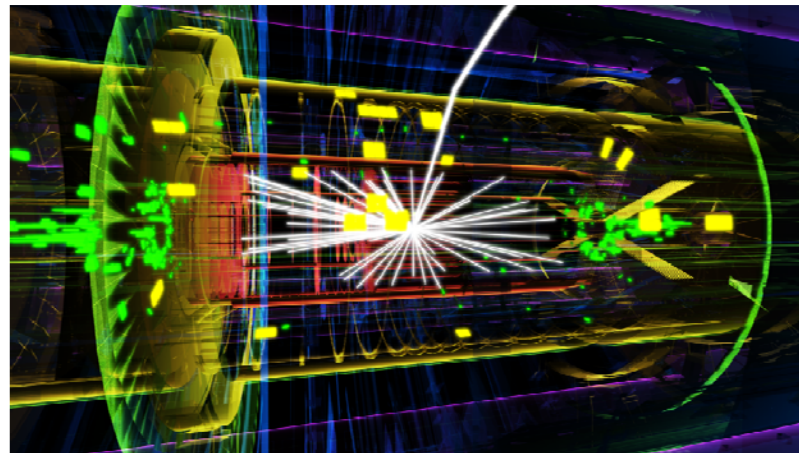
Conférence sur le Large Hadron Collider (LHC)

03 février 2011

Visite Underwriters Laboratories France

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

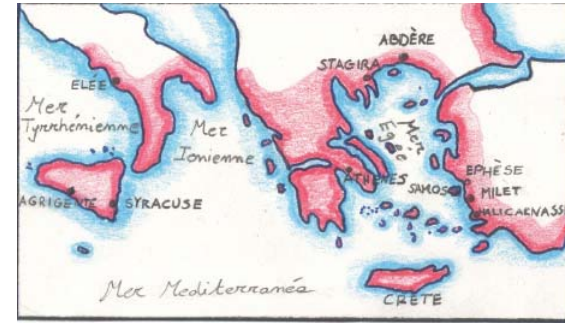
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3)



Une (très) brève histoire des particules

Une (très) brève histoire des particules

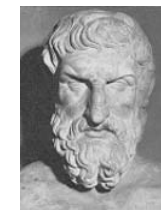
- L'atome est un concept vieux de 2500 ans !
→ Les philosophes cherchent à expliquer la Nature
(« *Physis* » en Grec)



- 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

- 1869, **Mendeleiev** : la **classification périodique des éléments**



1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															9 B	10 C	11 N	12 O	13 F	14 Ne
19 Na	20 Mg															31 Al	32 Si	33 P	34 S	35 Cl	36 Ar
39 K	40 Ca	41 Sc	42 Ti	43 V	44 Cr	45 Mn	46 Fe	47 Co	48 Ni	49 Cu	50 Zn	51 Ga	52 Ge	53 As	54 Se	55 Br	56 Kr				
57 Rb	58 Sr	59 Y	60 Zr	61 Nb	62 Mo	63 Tc	64 Ru	65 Rh	66 Pd	67 Ag	68 Cd	69 In	70 Sn	71 Sb	72 Te	73 I	74 Xe				
87 Cs	88 Ba	89 La	90 Hf	91 Ta	92 W	93 Re	94 Os	95 Ir	96 Pt	97 Au	98 Hg	99 Tl	100 Pb	101 Bi	102 Po	103 At	104 Rn				
89 Fr	90 Ra	91 Ac	92 Uq																		
Lanthanides and Actinides																					
The f-block elements (lanthanides and actinides) are shown below the main table, with Mendelevium (Md) highlighted in a red box.																					

- Uniquement basée sur l'expérience
- Confirmation des décennies après, une fois la structure atomique connue
- Mendeleiev a laissé des cases vides dans son tableau pour des éléments alors inconnus mais qui seront découverts plus tard... comme prévu !
- **Mendelevium** (101^{ème} élément, 1957)

- **Radioactivité** : émission spontanée de radiation (= d'énergie)



Röntgen (1895)
Découverte des rayons X



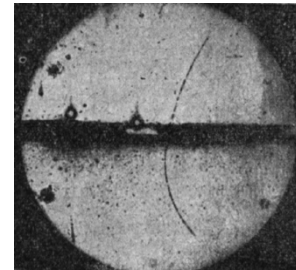
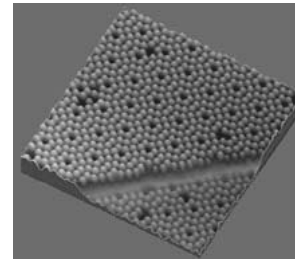
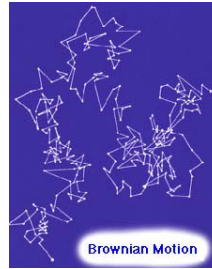
Becquerel (1896)
Découverte de la radioactivité naturelle



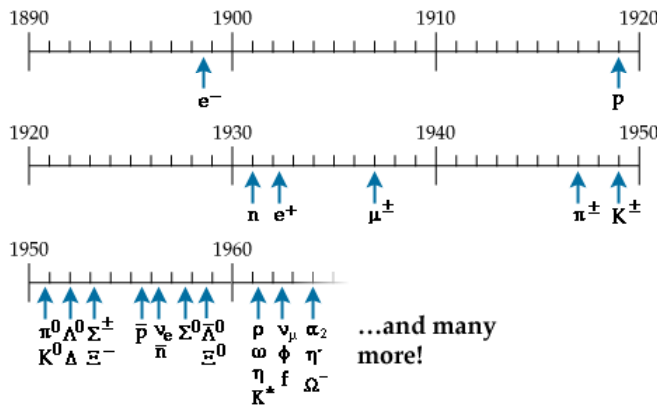
Pierre et Marie Curie
découvrent le polonium et le radium (**1898**)

Une (très) brève histoire des particules

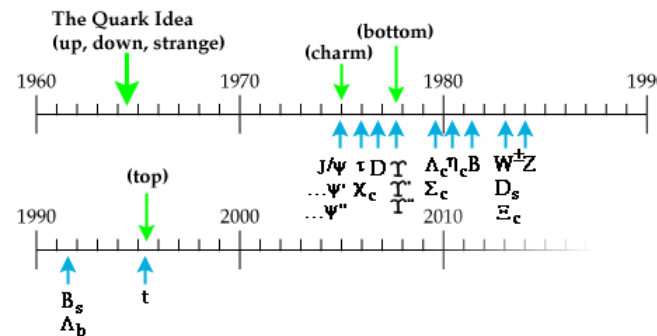
- 1897 : Découverte de l'électron
- 1905 : Les atomes existent !
- 1909 : Découverte du noyau
→ Les atomes sont presque vides !
- 1918 : Découverte du proton
- 1932 : Découverte du neutron
- 1933 : Découverte du positron
→ 1^{ère} particule d'antimatière
- 1936 : Découverte du muon



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



...and many more!

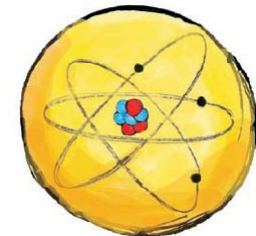
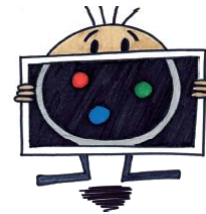


Une (très) brève histoire des particules

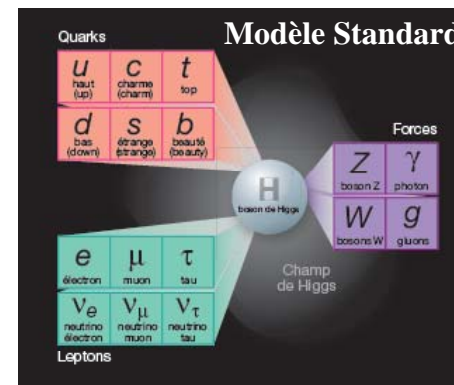
- La plupart de ces nouvelles particules sont faites de 2 ou 3 quarks
→ Il n'y a que **6 quarks au total**

De **compliquée**,
la situation
redevient **simple** !

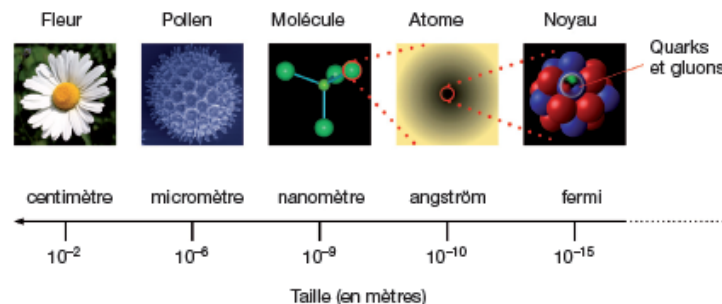
- Les constituants du noyau, les nucléons (protons et neutrons), sont formés de 3 quarks
- L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires** qui n'ont pas de structure interne (pour l'instant !?)



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



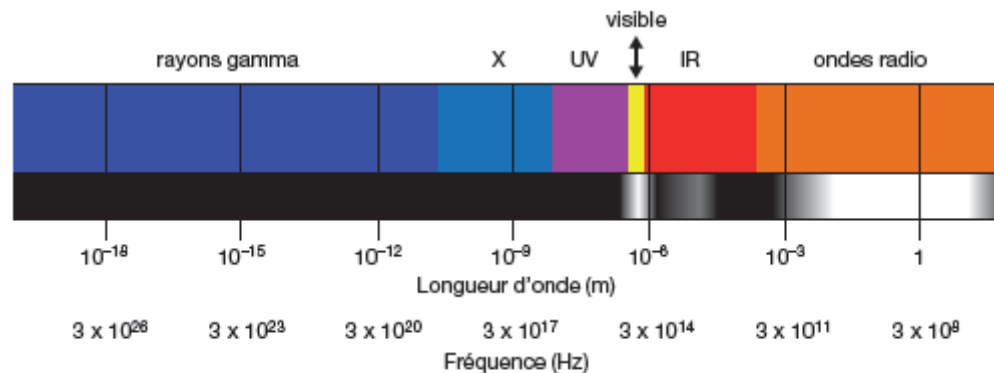
- Elles sont soumises à **3 forces** :
 - l'**interaction forte**
 - l'**interaction faible**
 - la **force électromagnétique**



Accélérateurs, collisionneurs & détecteurs

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

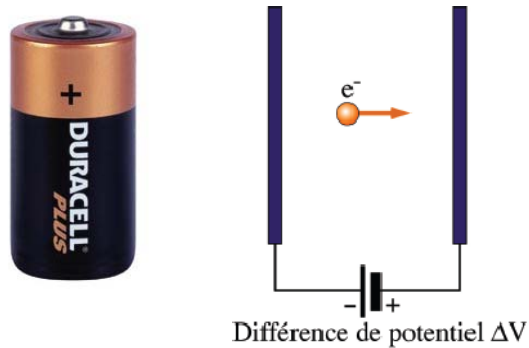
- Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

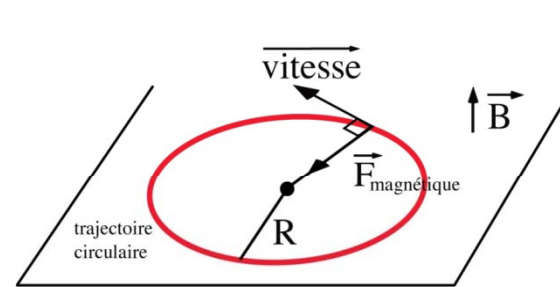
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

Les accélérateurs de particules

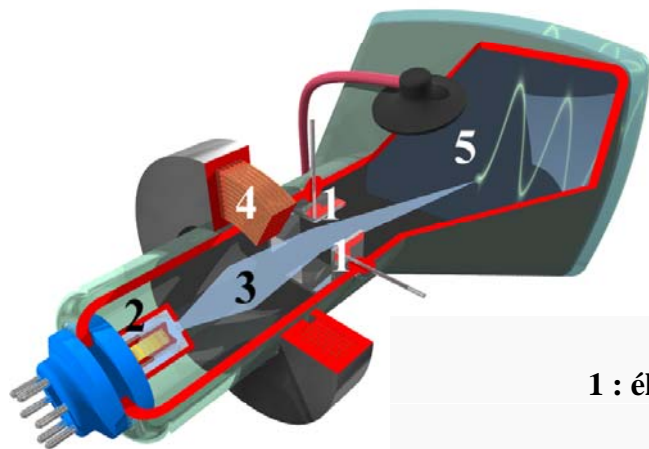
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



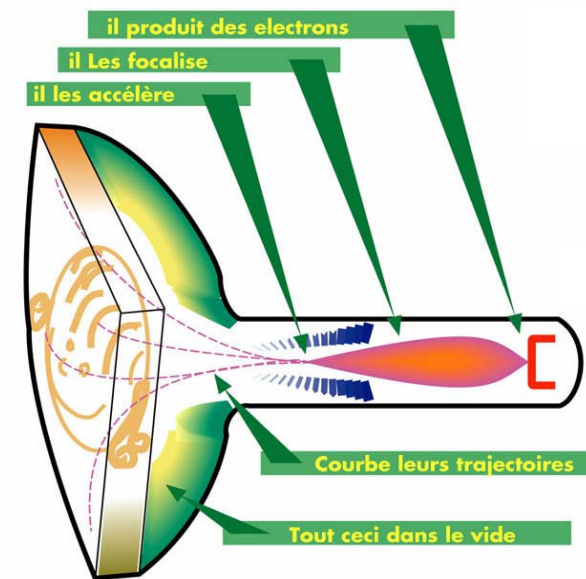
- On les pilote avec des champs magnétiques



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

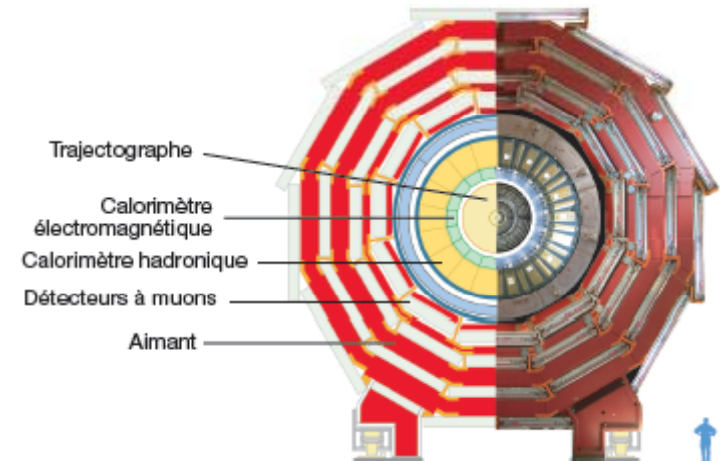
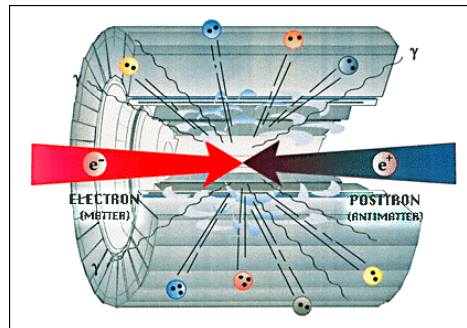
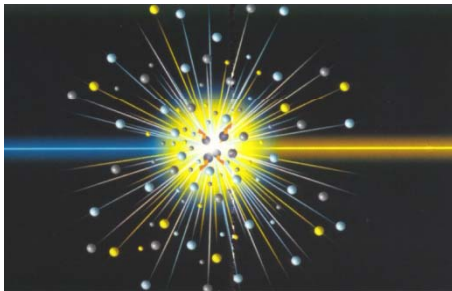
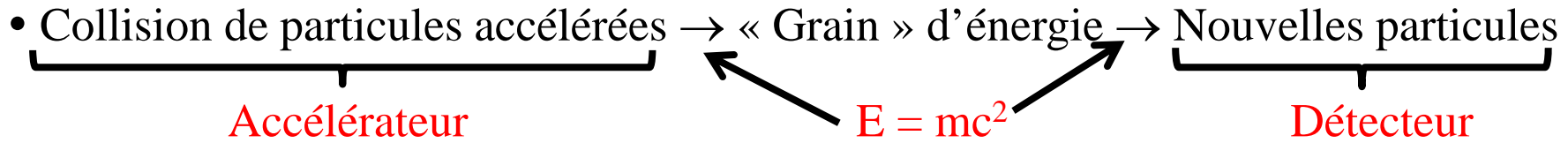


Tube d'oscilloscope
1 : électrodes déviant le faisceau
2 : canon à électrons
3 : faisceaux d'électrons
4 : bobine pour faire converger le faisceau
5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore

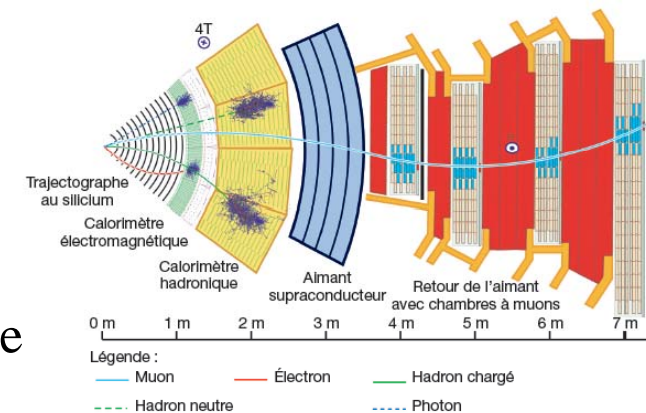




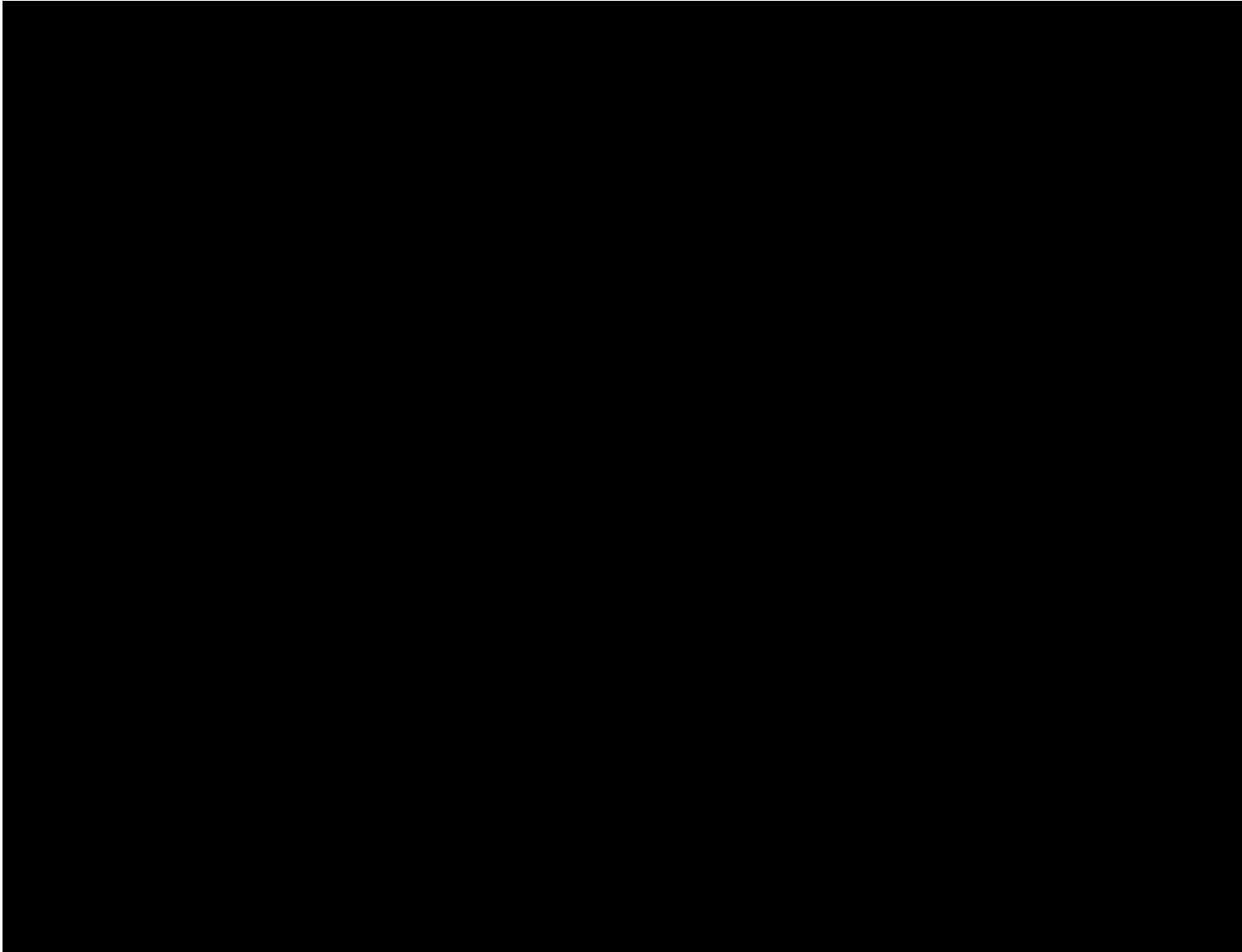
Les collisionneurs



- 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 collisionneur LHC au CERN

Le CERN

- Nom officiel : « **Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire** »

- **Plus grand laboratoire de physique des particules au monde** :

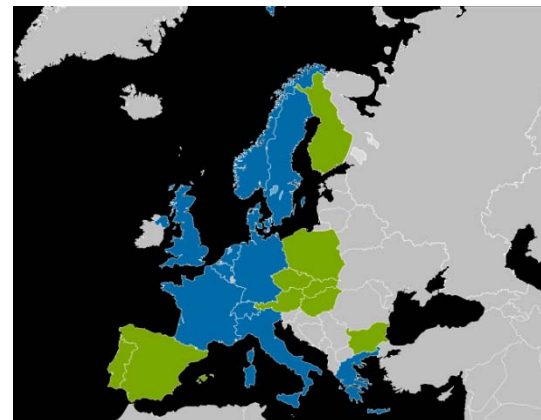
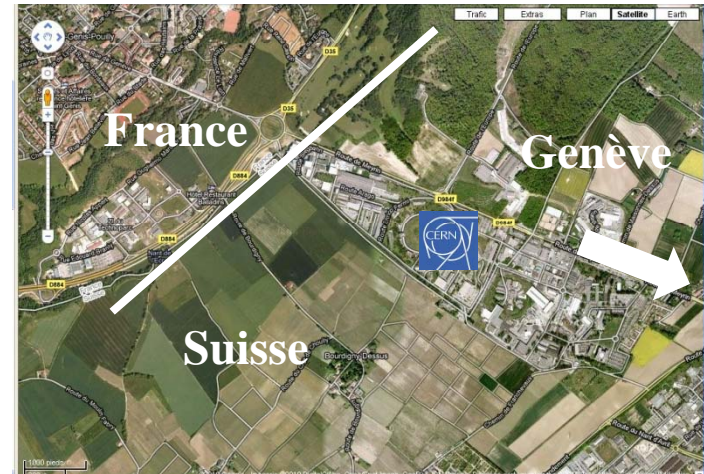
- ~ **3000** employés à plein temps
- ~ **6500** scientifiques y réalisent leurs expériences

- Créé le **29 septembre 1954**

- **Vingt états membres**

- + pays « observateurs »
ou « participants »

- Le CERN est situé près de Genève,
à cheval sur la frontière franco-suisse



Pays fondateurs

**Pays devenus
membres ensuite**

- **Internet a été inventé au CERN au début des années 1990 !**

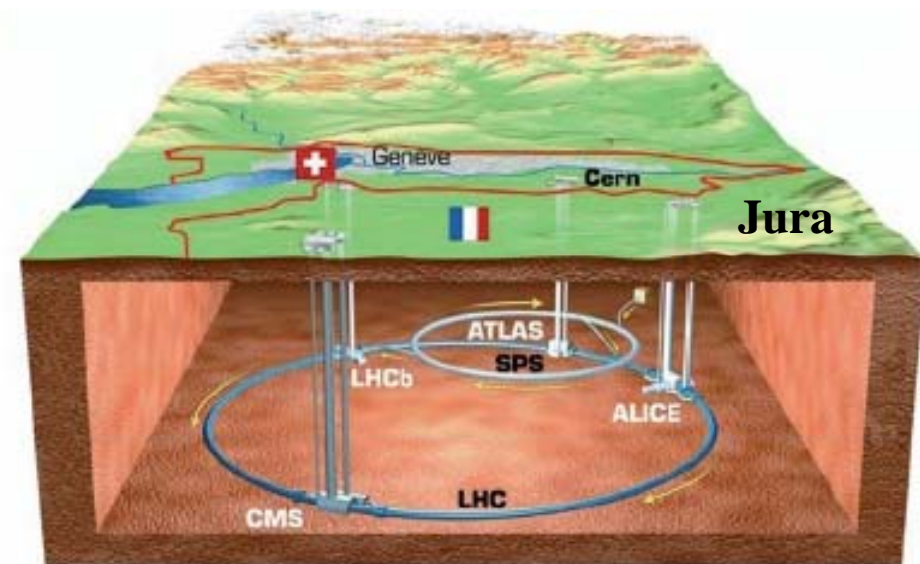


Le LHC



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 des collisions sera de **14 TeV** (**7 TeV actuellement**)

Un petit tour du côté des détecteurs

- **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**

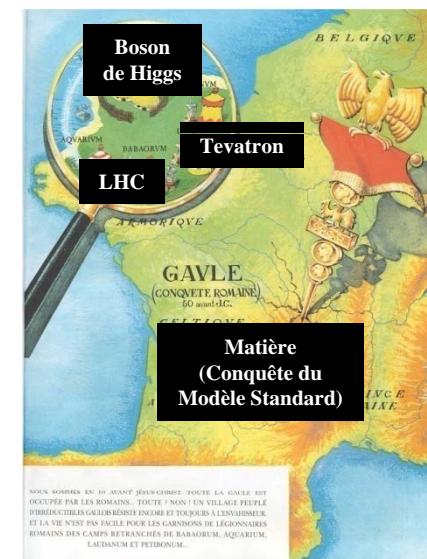


Pourquoi construire le LHC ?

- **Coût accélérateur + détecteurs : ~7 milliards d'euros**
→ Partagé par de nombreux états sur une longue période
- **Budget annuel du CERN : ~700 millions d'euros**
→ **Moins de 2 euros par an et par européen**
- **Curiosité envers la Nature, recherche, progrès scientifique**
→ **Le propre de l'espèce humaine**
→ **Tant qu'on n'a pas découvert un nouveau phénomène, on ne peut pas imaginer à quoi il pourrait servir !** Exemples : le **laser**, **internet**, etc.



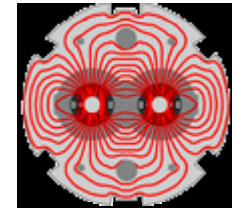
- Le Modèle Standard marche très (trop) bien mais il y a des phénomènes qu'il ne peut pas expliquer
- Une particule prédite manque à l'appel : le **boson de Higgs** !
- Le Modèle Standard ignore complètement la gravité et n'est pas valable à toute énergie. Beaucoup de ses caractéristiques (masses, etc.) n'ont pas d'explication.



- **Avec le LHC on décuple presque la gamme d'énergie accessible expérimentalement**

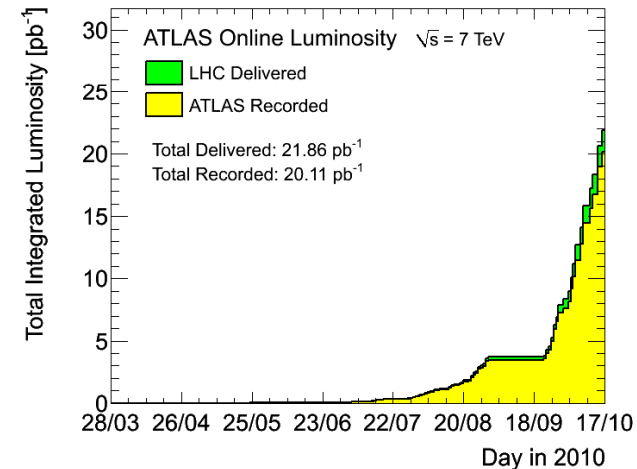
Le LHC ne s'est pas construit en un jour

- **1994** : Approbation du projet LHC par le CERN
→ Démarrage de la R&D et des études de faisabilité dans les **années 1980**
- **1996-1998** : Approbation des 4 grandes expériences
- **2000** : arrêt de l'accélérateur précédent (le LEP)
→ Démantèlement (même tunnel !) et **démarrage de la construction du LHC**
- **Fin 2007-début 2008** : fin de la construction après plusieurs retards
- **10 septembre 2008** : **démarrage officiel du LHC** 😊
→ Premier tour complet de protons dans l'anneau de 27 km
- **19 septembre 2008** : **incident électrique** ☹️
 - au niveau d'une interconnexion entre 2 aimants
 - **14 mois d'arrêt**
- **23 octobre 2009** : **redémarrage** 😊
→ Suivi d'une montée en puissance graduelle
- **30 mars 2010** : **premières collisions à 7 TeV** 😊 😊 😊
→ **Début de l'exploitation scientifique du LHC**



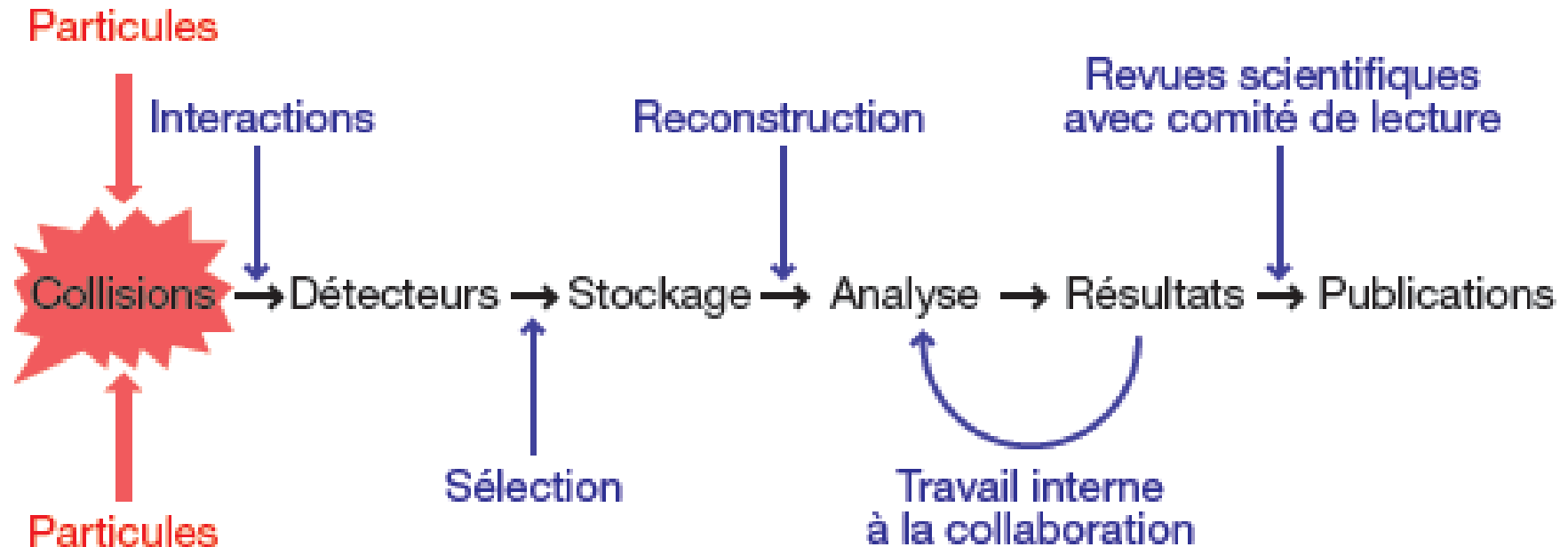
Le meilleur est à venir

- **Objectif premier du LHC** : répondre à la question, « **Le boson de Higgs existe-t-il ?** »
- **Autres buts de physique** :
 - Chercher des signes de physique nouvelle au-delà du Modèle Standard
 - Tester des théories plus générales, proposées pour compléter le Modèle Standard
 - Découvrir la nature de la mystérieuse matière noire
 - Améliorer notre connaissance des différences entre matière et antimatière
 - Observer et étudier un nouvel état de la matière nucléaire, le plasma de quark-gluon, qui a dû exister juste après le Big-bang
 - ???
- **Depuis la fin mars, le taux de collisions a augmenté de manière très significative** :
 - L'objectif est d'accumuler d'ici fin 2011 une quantité de données suffisante pour produire des résultats de physique compétitifs
- **La prise de données est prévue jusqu'en 2030**, avec des améliorations techniques régulières au cours des années (**énergie, taux de collisions**, etc.)



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

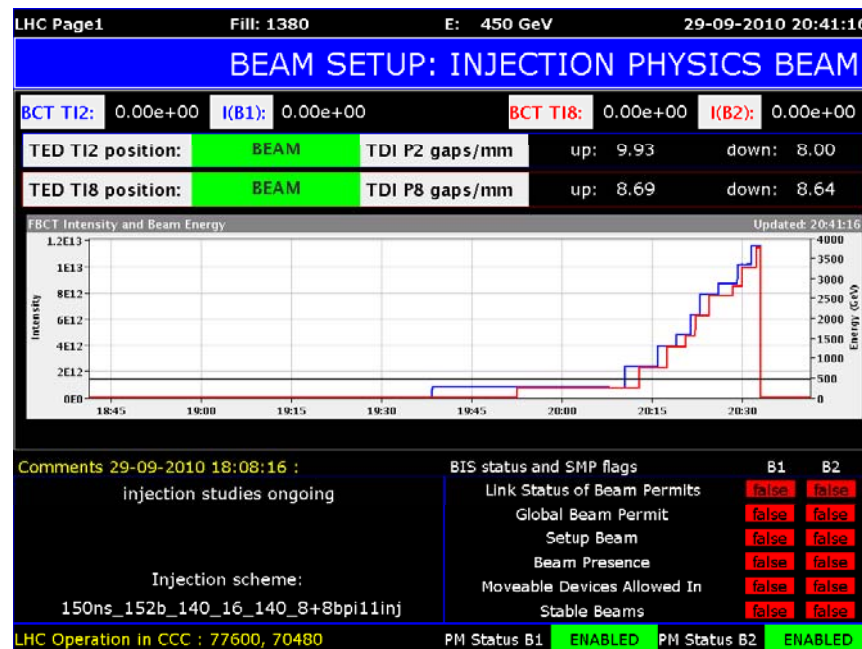
Au fait, que se passe-t-il au LHC actuellement ?

- Statut de l'accélérateur

- <http://op-webtools.web.cern.ch/op-webtools/vistar/vistars.php?usr=LHC1>
- <http://op-webtools.web.cern.ch/op-webtools/vistar/vistars.php?usr=LHC2>
- <http://op-webtools.web.cern.ch/op-webtools/vistar/vistars.php?usr=LHC3>

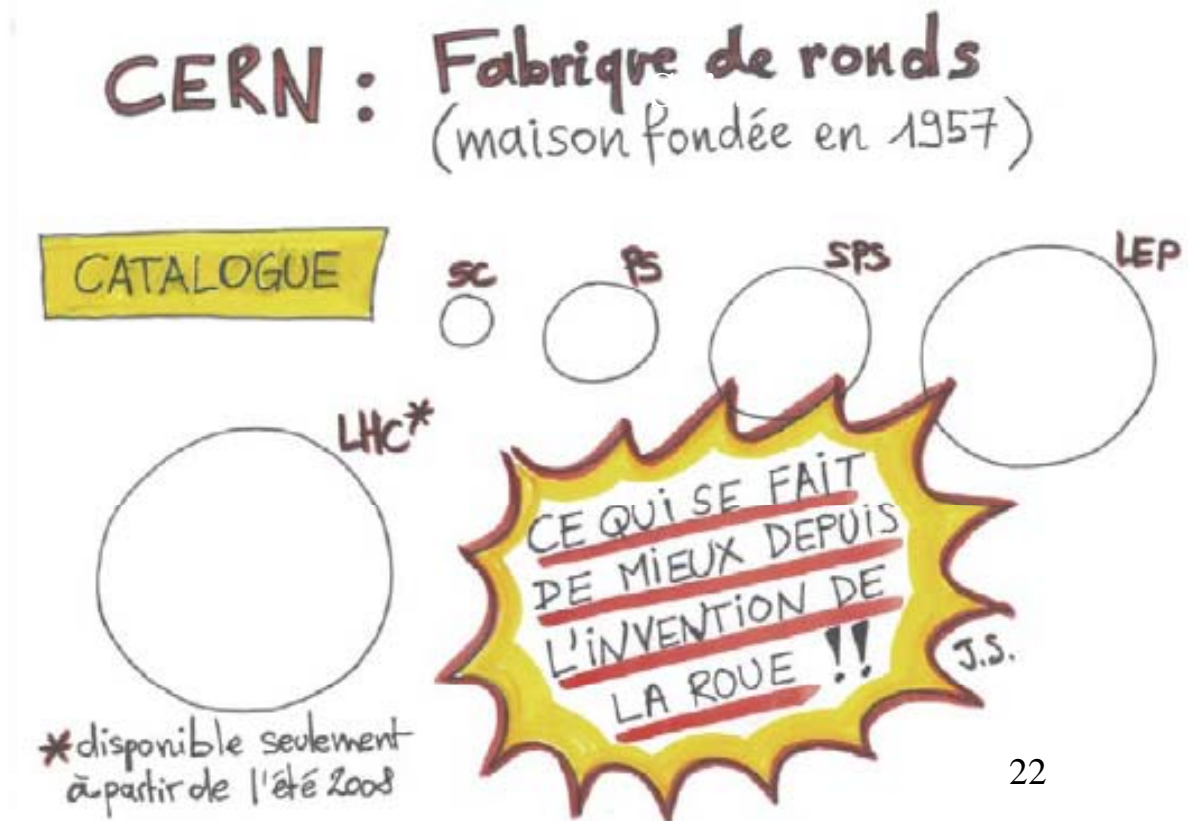
- Informations en provenance de détecteurs

- <http://atlas-live.cern.ch>
- <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Collaboration/LHCbStDis.html>



Conclusions sur le LHC

- Le LHC est le projet le plus important de la physique des particules
- Il est attendu par l'ensemble de la communauté scientifique. Ses résultats (qu'ils soient positifs ou négatifs) auront une grande importance sur le futur de la discipline
- LHC = défi technologique et scientifique
- Le LHC est prévu pour durer au moins 1 génération
- Science fondamentale
- De nombreuses applications
- Des métiers passionnants
- De l'aventure garantie !!!



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> [**Projection maintenant**]
 - Film « LHC First Physics » (© CERN video productions, 2010)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1259221>

La communication au LAL
comm@lal.in2p3.fr

Le LAL & la communication

- **Visites grand public** et de **scolaires** sur demande
<http://indico2.lal.in2p3.fr/indico/categoryDisplay.py?categId=123>
- Participation chaque année aux **Masterclasses** du **CERN**
<http://www.physicsmasterclasses.org/index.php?cat=country&page=fr>
- La revue de vulgarisation « **Élémentaire** »
<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>
- Le « **Passeport pour les 2 Infinis** »
<http://www.passeport2i.fr/>
- **Sciences-ACO** – que vous allez visiter dans quelques minutes !
<http://sciences-aco.lal.in2p3.fr/>
- L'**affiche des composants élémentaires** de la matière
<http://quarks.lal.in2p3.fr/afficheComposants/index.html>

La revue Élémentaire

- **Revue de vulgarisation** (2003-2010)
format A4, ≥ 64 pages, en couleur
- **Cible** : grand public avec une formation scientifique niveau secondaire
- **Fil rouge** : le LHC
- **De nombreux sujets abordés** :
 - Grandes questions scientifiques
 - Articles théoriques
 - Perspectives historiques
 - Développements technologiques
 - Retombées
- **8 numéros publiés**
→ 1 thème central pour chaque numéro
- Tous disponibles sur le site de la revue



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**
- **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
- **DVD** en projet
- **Forum, tutorat, salle virtuelle sur 2nd life**, etc.



Merci pour votre visite !

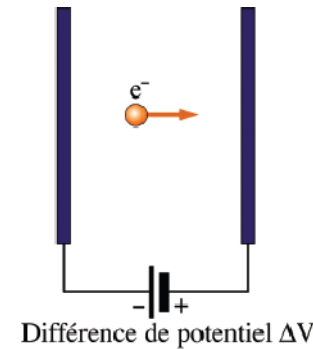
**Et maintenant, direction
SCIENCES-ACO !**

Collisions à 7/14 TeV : quésako ?

Particules accélérées par une différence de potentiel

→ unité commode : l'électron-volt (eV)

Énergie gagnée par une particule
de charge élémentaire dans une
différence de potentiel de 1 V

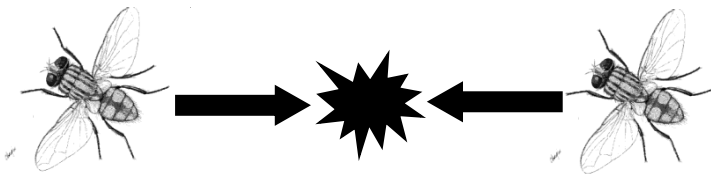


• En physique des particules on utilise des multiples de cette unité

- le kilo électron-volt : 1 keV = 1 000 eV ← ~ TV
- le méga électron-volt : 1 MeV = 1 000 000 eV
- le giga électron-volt : 1 GeV = 1 000 000 000 eV ← ~ LEP
- le téra électron-volt : 1 TeV = 1 000 000 000 000 eV ← ~ LHC

• 1 TeV ≈ énergie cinétique d'une... mouche en vol !

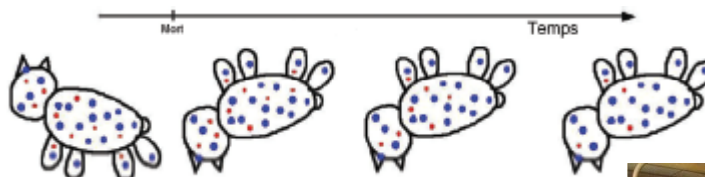
→ Quid des collisions entre mouches ?



Des retombées !?

- Le **web** !
- **Technologies** : matériaux, détecteurs, électroniques, ordinateurs, réseaux, etc.

- **Datation** (^{14}C , etc.)

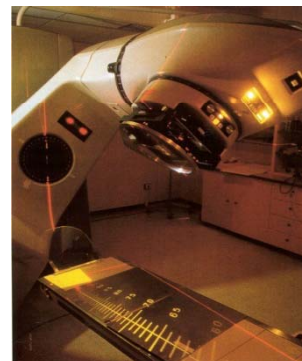


- **Radiographie**



- **Médecine**

- **Radiothérapie**
- **Imagerie médicale**



- **Fission nucléaire**

→ **Production d'électricité**

- **Fusion nucléaire dans le futur ?**

→ **Source d'énergie des étoiles**

