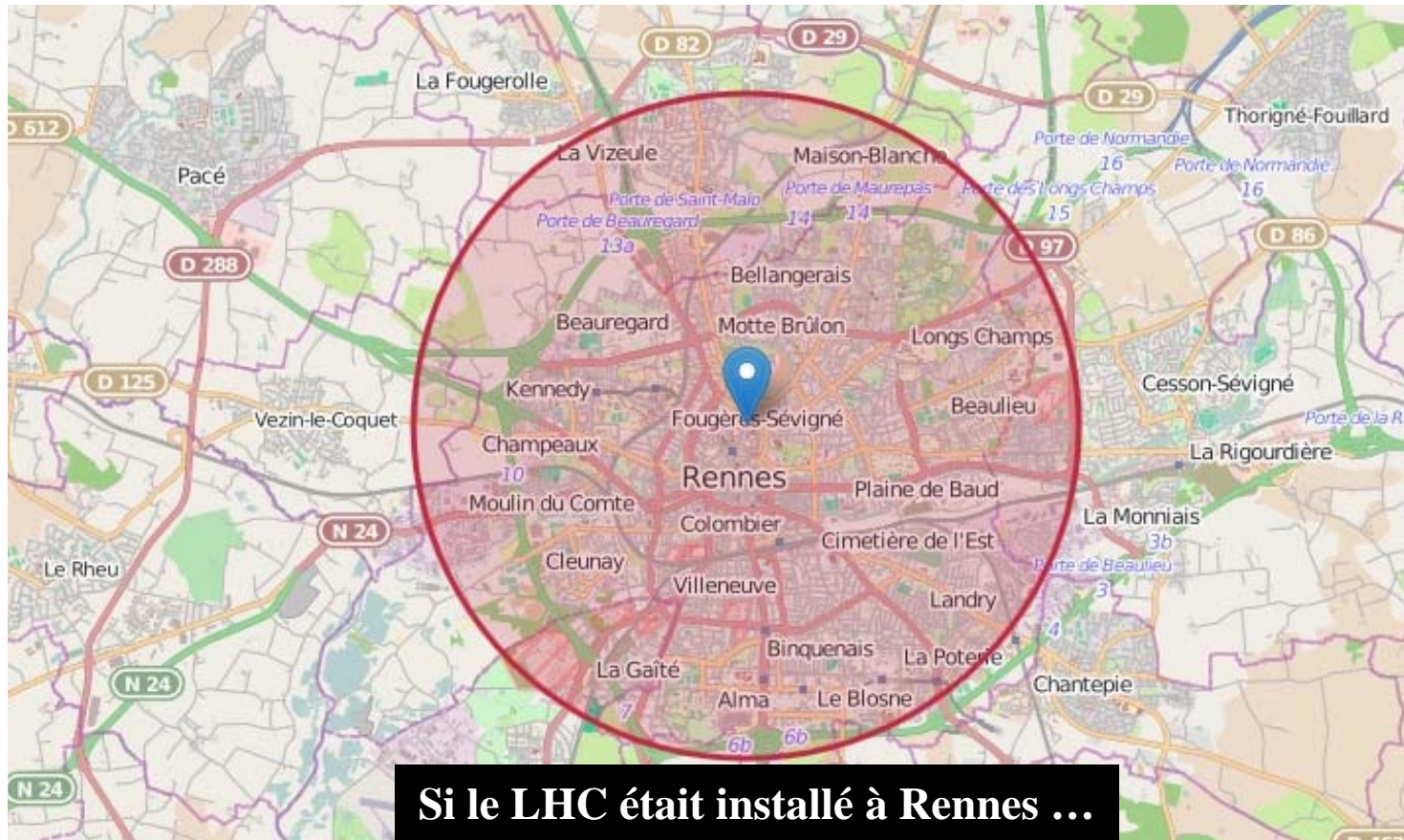


Bon anniversaire le CERN : 60 ans !



1er décembre 2014 – Association le Kiosque Citoyen, Rennes

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

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



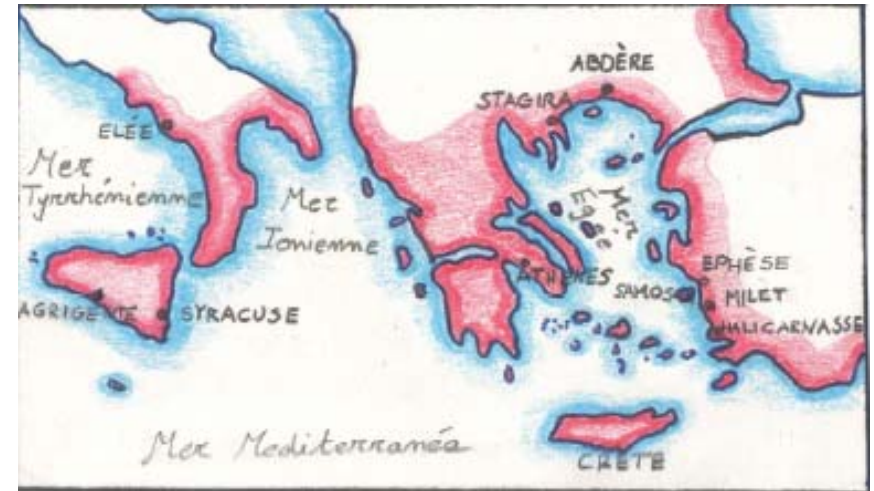
Au sommaire ce soir

- **L'infiniment petit**
 - Introduction historique
 - Echelle des distances
 - Le Modèle Standard de la physique des particules
 - L'affiche des composants élémentaires de la matière 2014
- **Le CERN**
 - Le plus grand laboratoire de physique au monde
 - 60 ans de recherche fondamentale
- **Le LHC**
 - L'accélérateur
 - Les détecteurs
 - La recherche du boson de Higgs
- **Evénements en rapport avec les 60 ans du CERN**
 - L'exposition « Le Grand Collisionneur LHC »
 - 60 portraits : « Experts en la matière – Regards sur le Cern »
 - Le webdocumentaire « Expérience CERN 360 »
 - Le film « La Fièvre des particules »

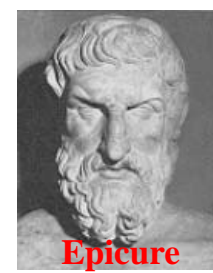
L'infinitement petit

Un zeste de philosophie antique

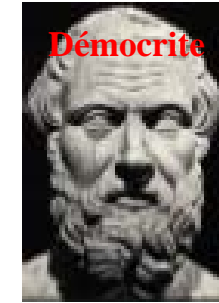
- L'**atome** : un concept vieux de 2500 ans
- **Une question naturelle** :
« De quoi est fait le monde ? »
- **Des réponses surnaturelles** : des créatures extraordinaires (dieux, titans, esprits...) créent, modèlent et ordonnent l'Univers entier
- Tout change à partir du VI^{ème} siècle avant J-C
→ Les philosophes cherchent à **comprendre** et à **expliquer** la **Nature** (*Physis* en grec)
- **Thales de Millet** : « L'eau est la cause matérielle de toutes les choses »
- **Héraclite d'Ephèse** : « Tout varie, rien ne perdure »
- **Empedocle** : « L'Univers est une combinaison de 4 éléments : l'Eau, la Terre, le Feu et l'Air ; ils sont gouvernés par 2 forces fondamentales : l'Amour et la Haine. »
- **Anaxagore** : « Il y a quelque chose de chaque chose dans toutes les choses »
→ Toute chose est faite de « grains indivisibles » infiniment petits, infinis en nombre, toujours intimement combinés ou séparés.
- l'**Atomisme** : **Démocrite**, **Epicure** et **Lucrèce**



L'Atomisme



- « **Atoma** » signifie « **indivisible** » en Grec
 - ⇒ Les atomes sont petits, élémentaires et pleins
 - ⇒ Autour il y a le vide (infini) dans lequel les atomes peuvent se déplacer, se grouper or se disperser



- **Les êtres vivants et les choses sont créés par des assemblages d'atomes**
- Il y a de **nombreux types d'atomes différents**
- Toutes les sensations (chaud, froid, amer, sucré, salé...) peuvent être expliquées par les différents types d'atomes et leurs assemblages
- Les atomes les plus légers forment l'âme
- A la mort, les atomes se séparent et sont relâchés dans le vide.
Comme ils sont éternels, ils peuvent à nouveau se rassemble plus tard pour former de nouvelles structures/ de nouveaux univers
- Après des siècles de controverses philosophiques (pour/contre les atomes), cette conception de la Nature **disparaît pour un millénaire** quand le **Christianisme** devient la religion dominante de l'empire romain.

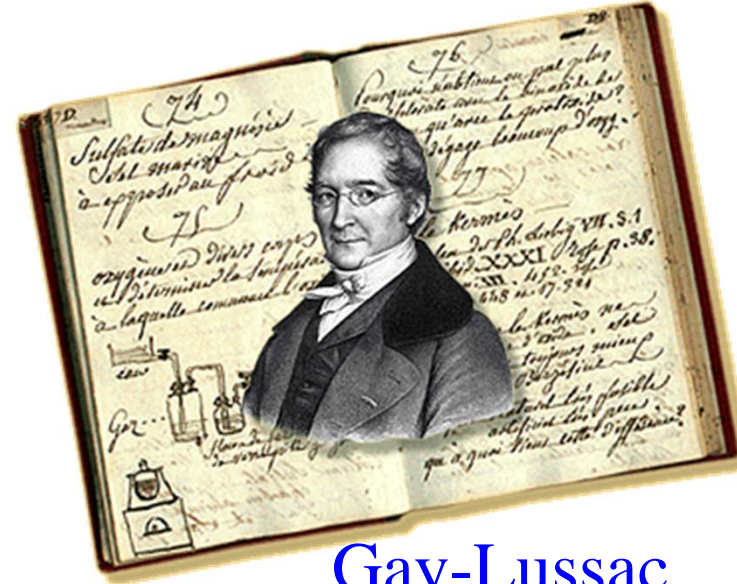
Les premiers chimistes



Boyle



Lavoisier



Gay-Lussac



Cavendish

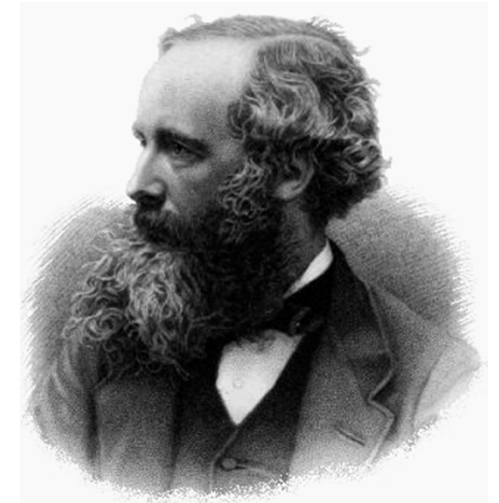


Dalton

- **Boyle** : Une théorie scientifique valable repose sur l'expérience.
- **Lavoisier** : les « composés » (molécules) sont faits de plus d'un élément
- **Gay-Lussac** : l'Hydrogène et l'oxygène se combinent dans des rapports précis pour donner de l'eau : $2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
⇒ éléments chimiques = composants de base de la matière
- **Dalton** : chaque élément chimique est fait d'un seul type d'atomes.
Environ 20 atomes différents sont connus à l'époque.

L'électromagnétisme

- **James Clerk Maxwell** (1864) : « La convergence des résultats semblent montrer que lumière et magnétisme sont deux facettes d'une même substance et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans le champ selon les lois de l'électromagnétisme »



- **L'électricité et le magnétisme sont un seul et même phénomène dont les manifestations sont différentes**
- Les champs se propagent dans l'espace, sous forme d'ondes, et à la vitesse de la lumière, constante.
- Fondations de la **physique moderne**, de **l'ingénierie électrique**, de **l'astronomie**, des **communications radio**, de **la télévision...**
- **Einstein** parlant des travaux de **Maxwell** : « [Ce sont] les plus profonds et les plus fertiles en physique depuis l'époque de **Newton** »

La classification périodique

1869

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

101^{ème} élément :
Le Mendelevium
(1957)

Mendeleïev



- Une classification plus que brillante :
 - ✓ intuitive, basée sur les résultats expérimentaux
 - ✓ expliquée seulement des dizaines d'années plus tard une fois la structure électronique des atomes connue.
- Mendeleïev a laissé des emplacements libres pour des éléments encore inconnus mais qui *devaient* exister d'après sa théorie → Tous furent effectivement découverts !

Découverte de la radioactivité



Röntgen (1895)
Rayons X



Becquerel (1896)
Radioactivité naturelle

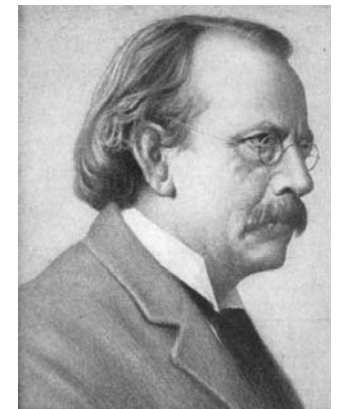


Pierre and Marie Curie
Le Polonium et
le Radium (1898)

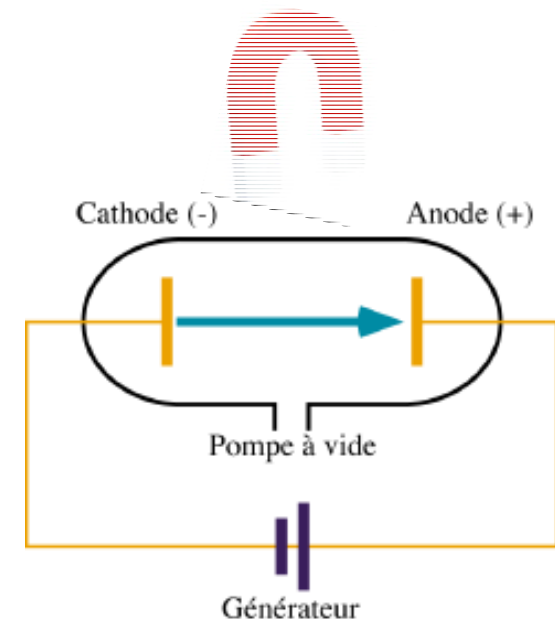
La radioactivité est une émission spontanée de radiation
(= d'énergie) par un objet : carbone-14, uranium ...

Ces découvertes auront un impact essentiel [sur la science du XX^{ème} siècle
sur le monde entier

La découverte de l'électron



- Joseph John (« J.J ») Thomson (1897)
→ Etude des rayons cathodiques
- Charge négative
- Sensibilité à un champ électrique
→ **Caractéristiques des particules chargées**
- Rapport charge sur masse ~ 1000 plus élevé que pour un atome d'hydrogène
→ **Ces nouveaux « corpuscules » sont soit très chargés, soit très petits**
- Ce rapport est indépendant du matériel utilisé pour réaliser l'expérience
→ **Ces rayons sont universels**



Les atomes existent-ils vraiment ?

Robert Brown (1827)



Mouvement d'un grain de pollen dans de l'eau

Quelle est son origine ?

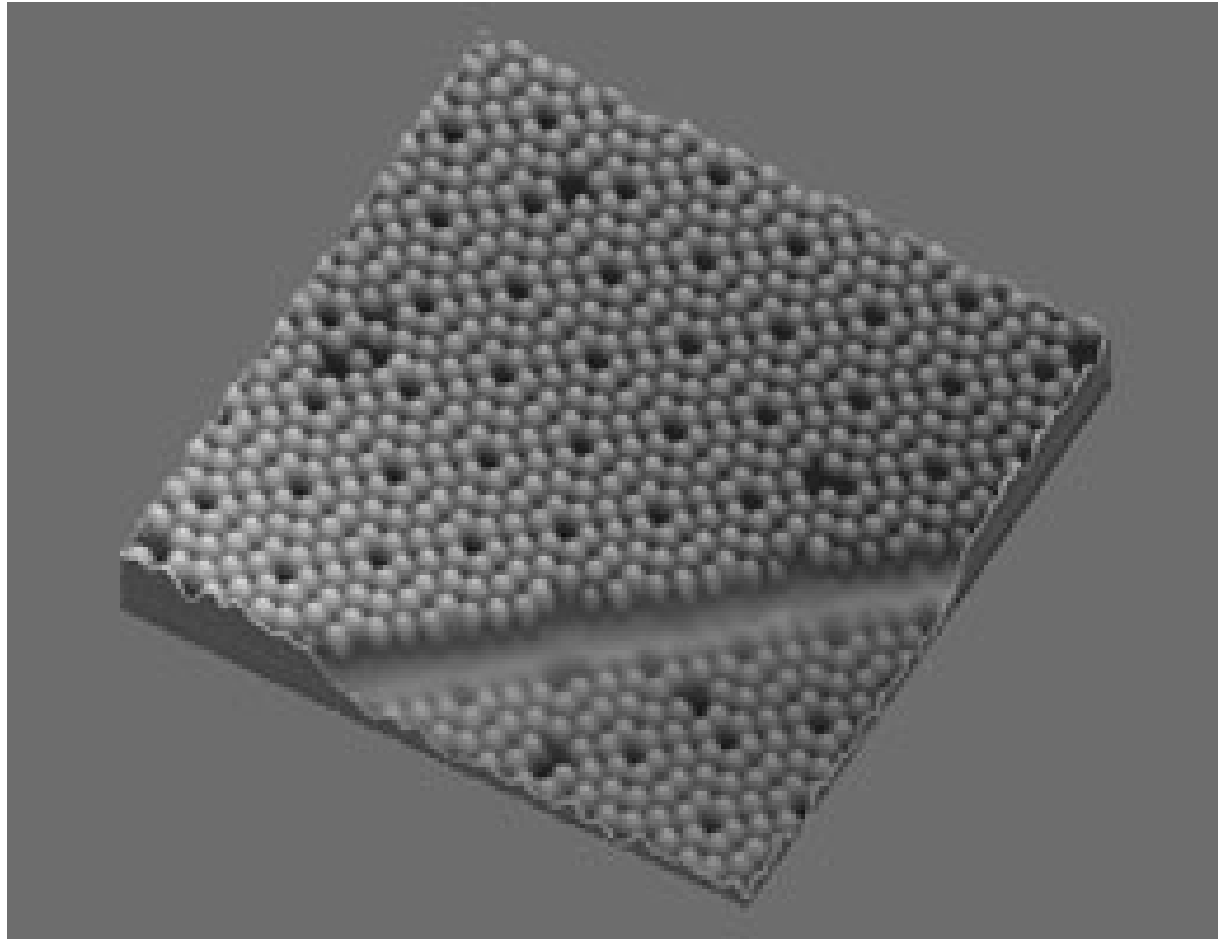
1905 (« annus mirabilis »)

Ce mouvement est dû à des collisions aléatoires et répétées entre le grain de pollen et les molécules d'eau

Il y a à peine un siècle !



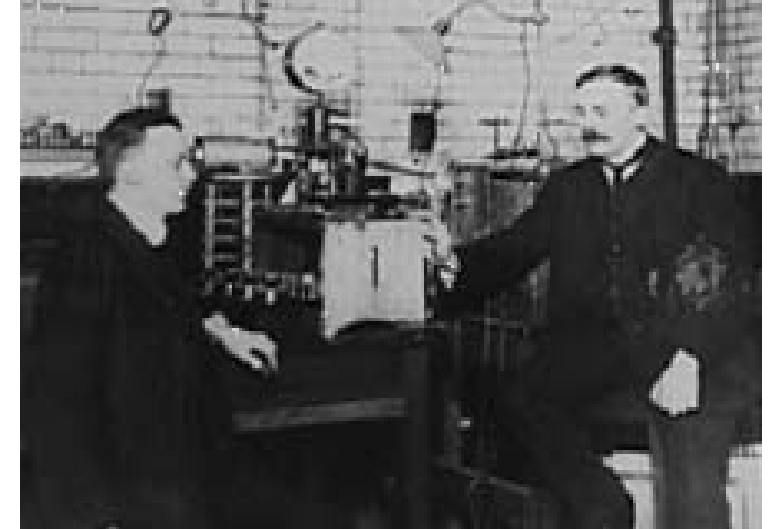
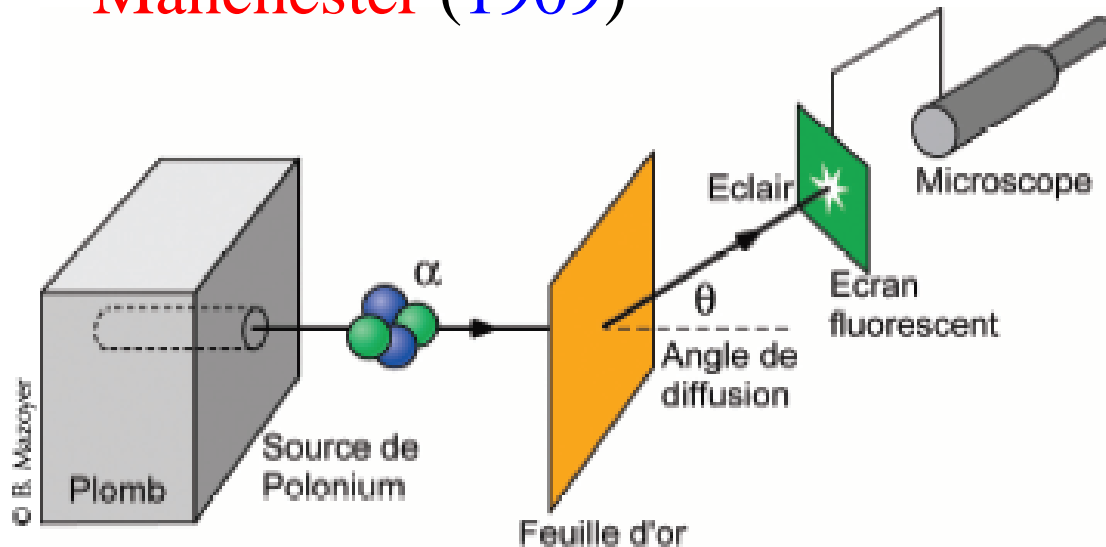
Oui ils existent !



Atomes de silicium observés à l'aide d'un
Microscope électronique à effet tunnel
Université de Lund (Suède)

Les atomes sont presque vides

Manchester (1909)

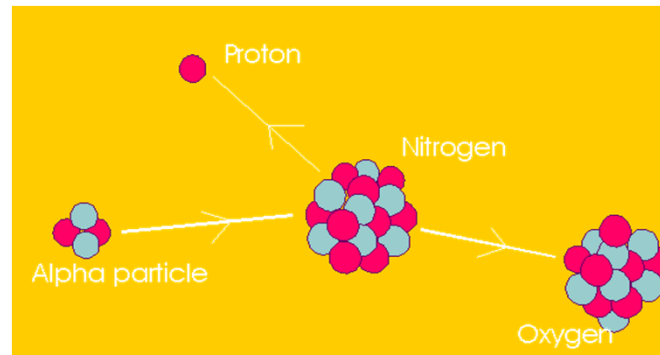
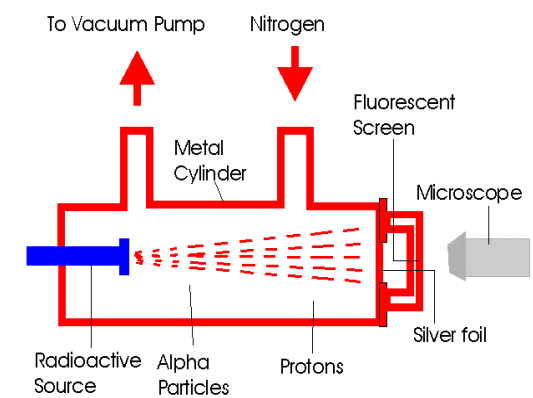


Geiger & Rutherford

- Des noyaux d'Helium (particules α) vont frapper une **fine feuille d'or**
- La plupart des noyaux ne sont pas déviés \Rightarrow ils ne voient « rien » !
- Une petite fraction repart « **en arrière** »
 \Rightarrow ils ont heurté quelque chose de petit et de dur : **le noyau atomique**
10 000 fois plus petit que l'atome !

Découverte du proton

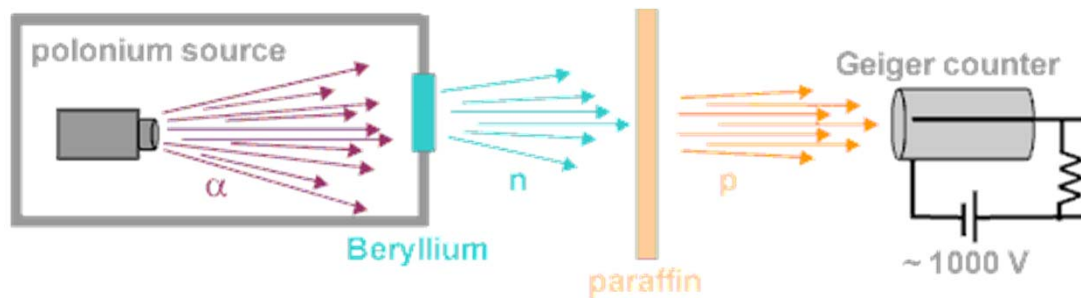
- Ernest Rutherford (1918)
- Diffusion de particules α sur du diazote
 - Rutherford observe la trace de noyaux d'hydrogène
 - Il prouve que cet hydrogène provient nécessairement du diazote
 - **L'azote doit donc contenir le noyau d'hydrogène !**



- **Il propose de faire du noyau d'hydrogène une particule élémentaire ...**
- ... baptisée « proton » en l'honneur de **William Prout** qui, en 1815 (!), avait fait l'hypothèse que la masse atomique de chaque élément était un multiple entier de celle de hydrogène, suggérant ainsi que l'atome d'hydrogène était la seule particule vraiment élémentaire.

Découverte du neutron

- « Neutrone » \Leftrightarrow « gros neutre » en Italien
- Une radiation inconnue émise par une cible de béryllium bombardée par des particules (noyaux d'Helium)



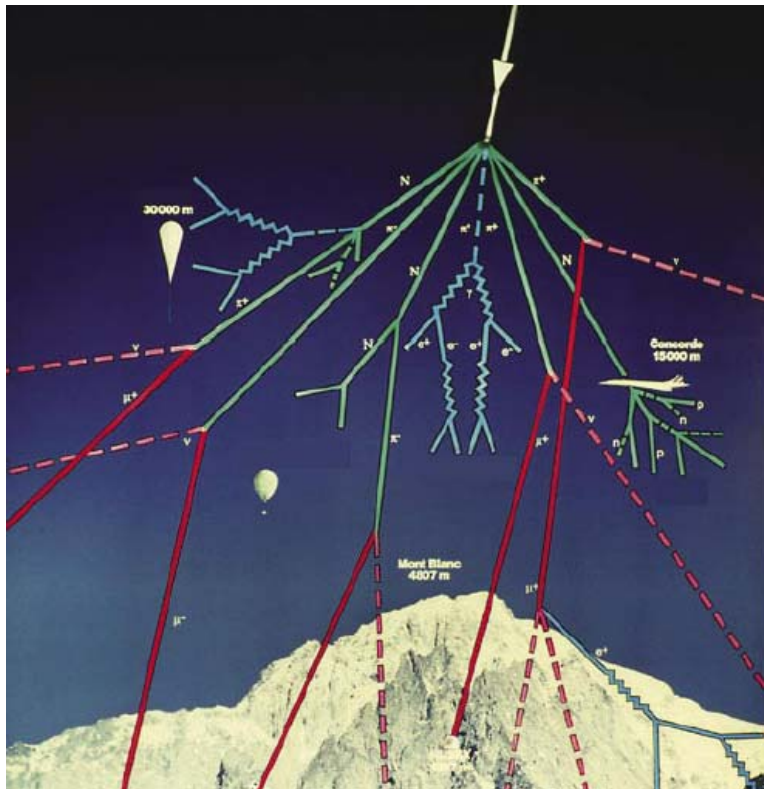
- Phénomène observé d'abord en France par **Irène** et **Frédéric Joliot-Curie**
→ Ils en font une mauvaise interprétation
- **James Chadwick** réalise une expérience similaire
et **en tire la bonne conclusion qu'il publie en janvier 1932**
- **Les Joliot-Curie** et **Chadwick** reçoivent des prix Nobel en 1935
Radioactivité artificielle Neutron

Les rayons cosmiques

- Des particules énergétiques en provenance de l'espace :
~90% protons, ~9% noyaux d'Hélium, ~1% électrons...
- Sources: le Soleil, des étoiles particulières, situées dans notre galaxie ou au-delà
- Peuvent être aussi énergétiques qu'une balle de tennis !



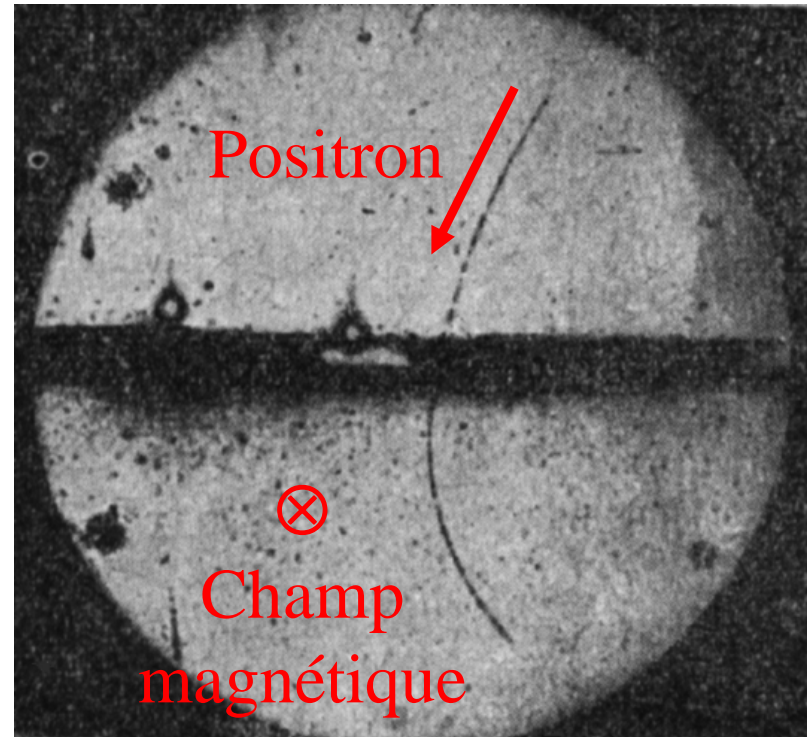
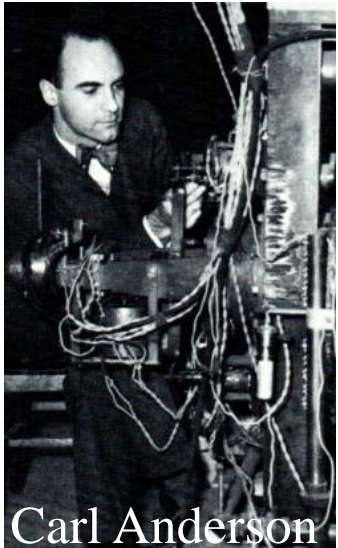
Victor Hess



Aurore vue de la navette spatiale



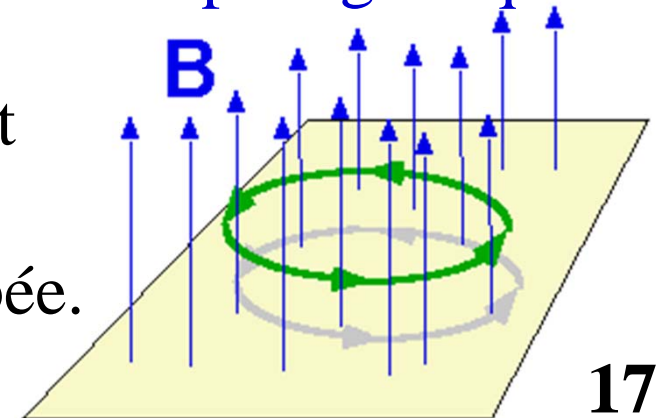
Découverte du positron (1932)



- Charge positive
- Plus léger qu'un proton
- Première particule d'**antimatière**
- Prédite par le théoricien **P.A.M. Dirac** in 1928.

Mouvement d'une particule dans un **champ magnétique**

Plus sa vitesse est élevée, moins sa trajectoire est courbée.



Découverte du muon

- A nouveau **Carl Anderson** (1936)
- Le **muon** a la même charge que l'électron
- Sa masse est entre celle de l'électron et du proton

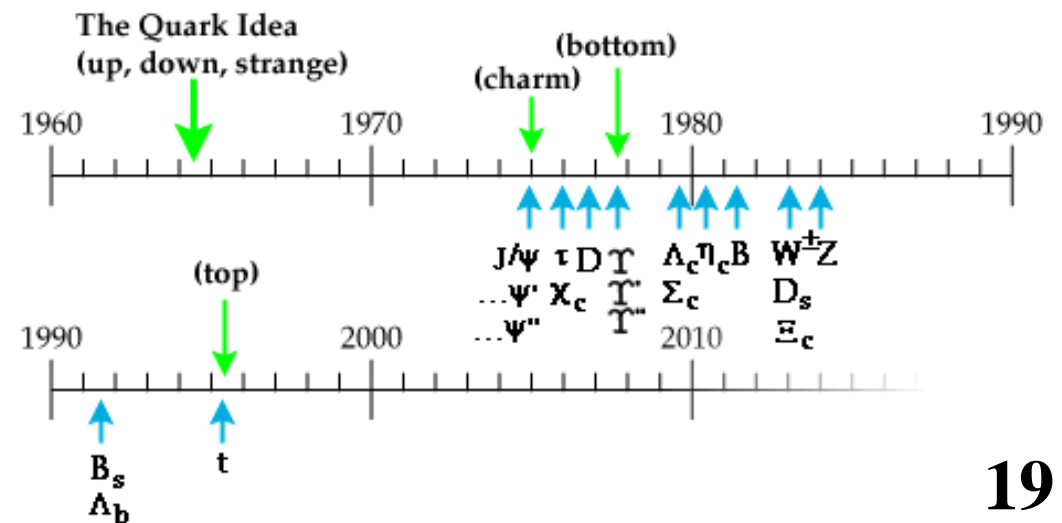
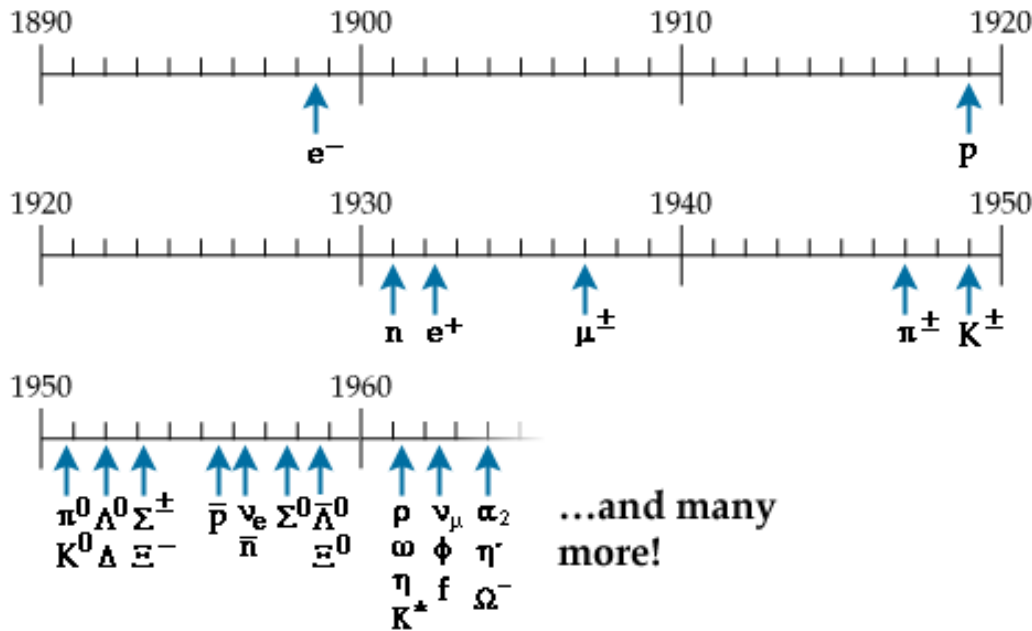
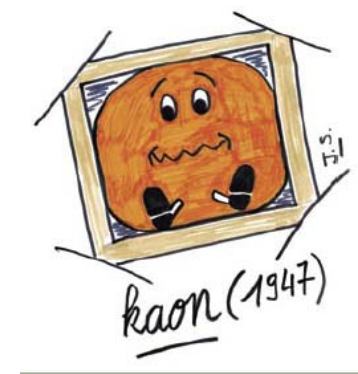
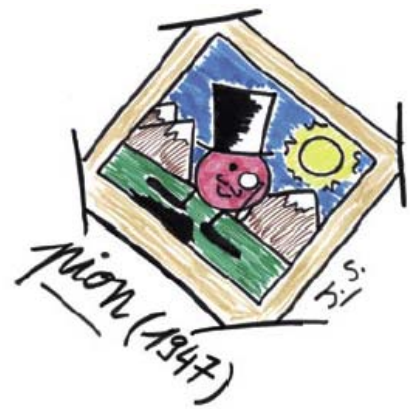
→ On n'attendait pas ce nouveau membre de la famille des particules!



I. Rabi, Prix Nobel de Physique 1944

→ **Aucune théorie disponible pour expliquer l'existence de cette nouvelle particule**

Un vrai « zoo » de particules

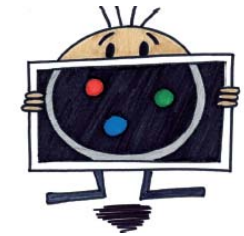


Les particules élémentaires

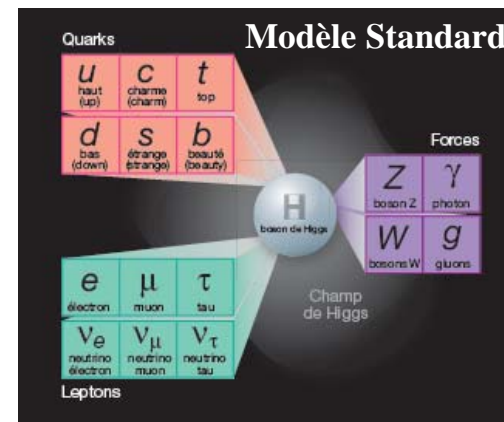
- La plupart de ces nouvelles particules sont faites de 2 ou 3 quarks
→ Il n'y a que **6 quarks au total**

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

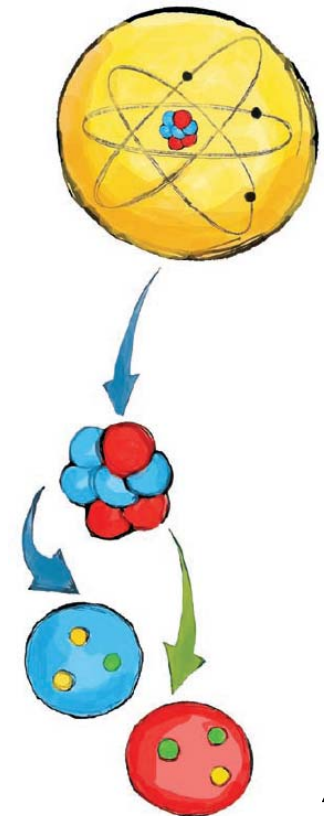
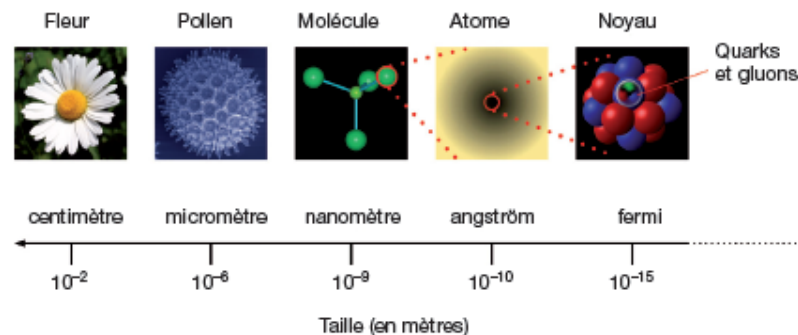
- Les constituants du noyau, les nucléons (protons et neutrons), sont formés de 3 quarks
- L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires** qui n'ont pas de structure interne (pour l'instant !?)



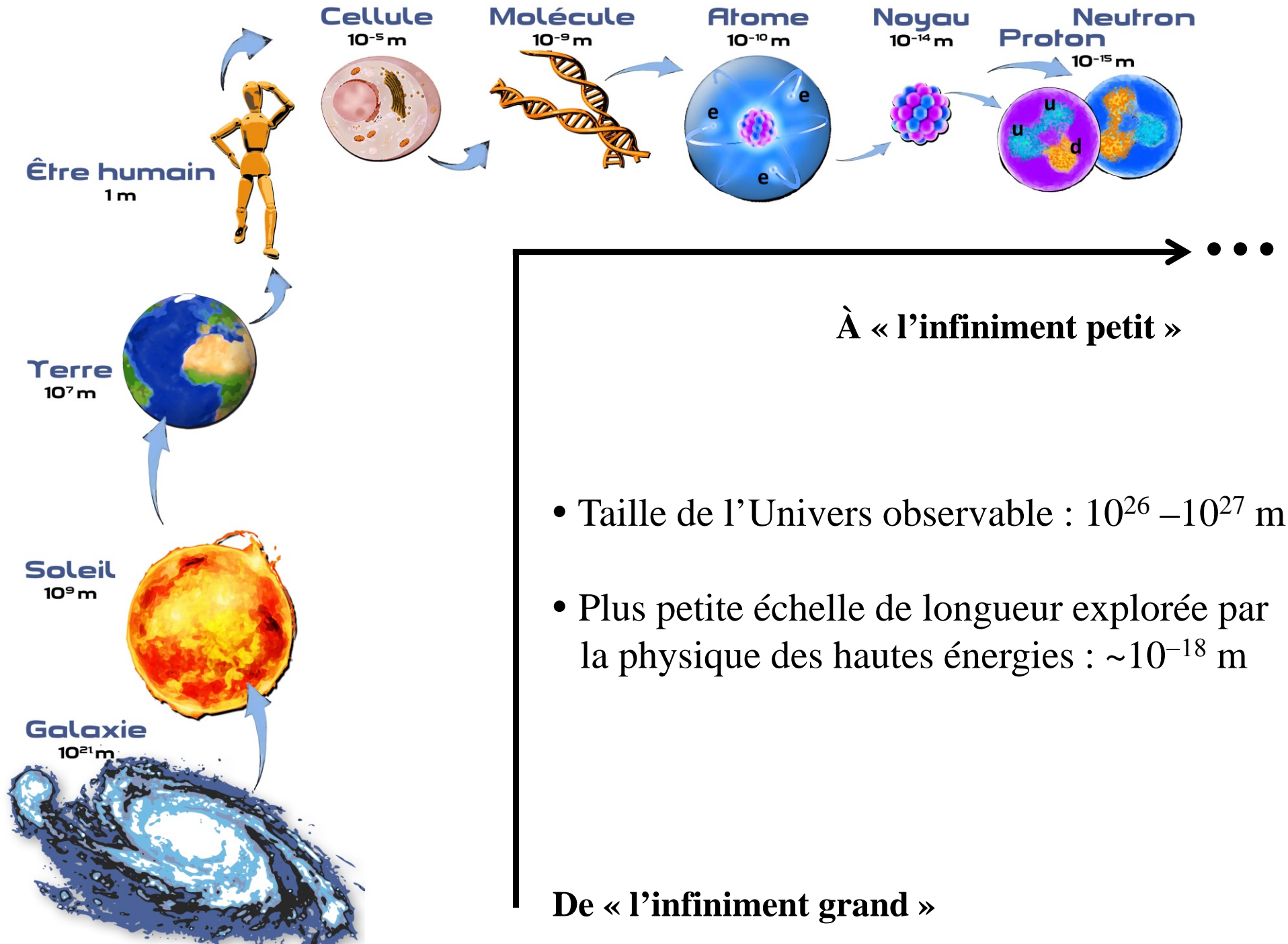
- Il y a **12 particules élémentaires** :
 - les **6 quarks**
 - l'**électron** et 2 « cousins » plus lourds, le **muon** et le **tau**
 - **3 neutrinos**



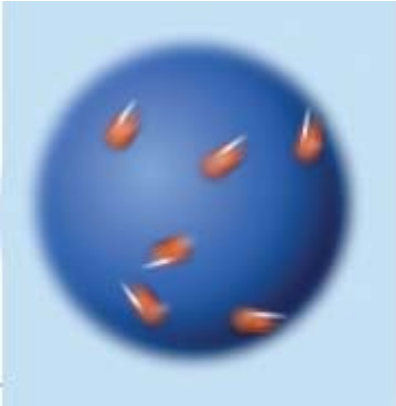
- Elles sont soumises à **3 forces** :
 - l'**interaction forte**
 - l'**interaction faible**
 - la **force électromagnétique**



Une échelle des distances



A quoi ressemble un atome ?



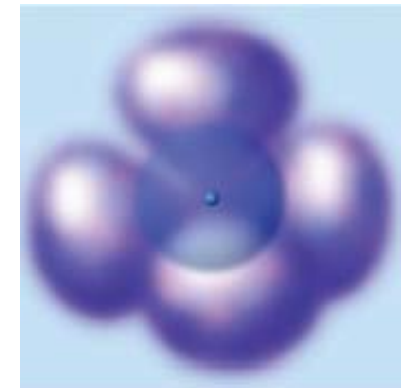
Thomson (1903)
Modèle du
« Plum-Pudding »



Rutherford (1909)



Bohr (1913)

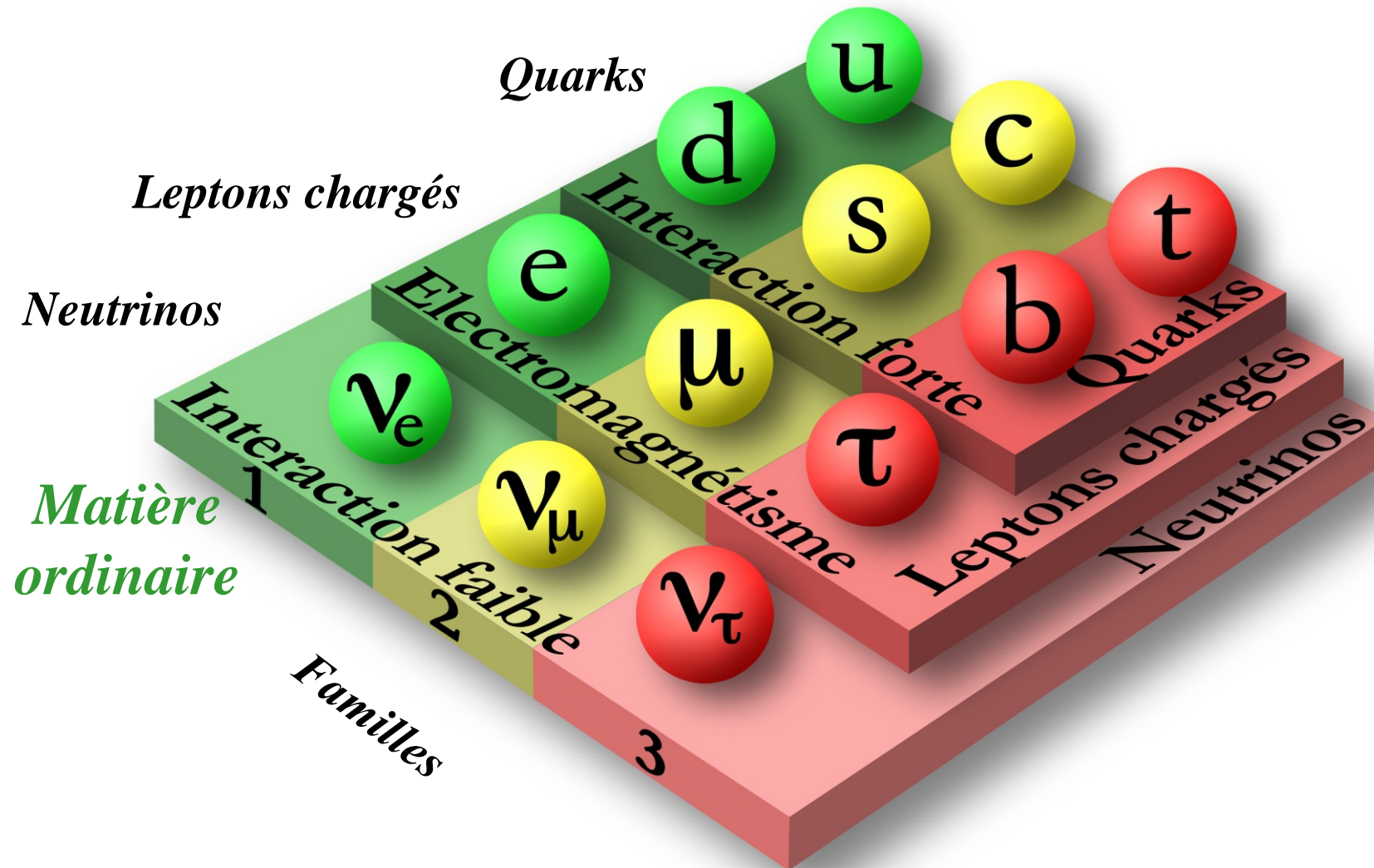


Atome « moderne »

- Les électrons se trouvent sur différents niveaux d'énergie
- Ce sont plutôt des « nuages » que des particules ponctuelles
→ Leur évolution est gouvernée par des probabilités

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

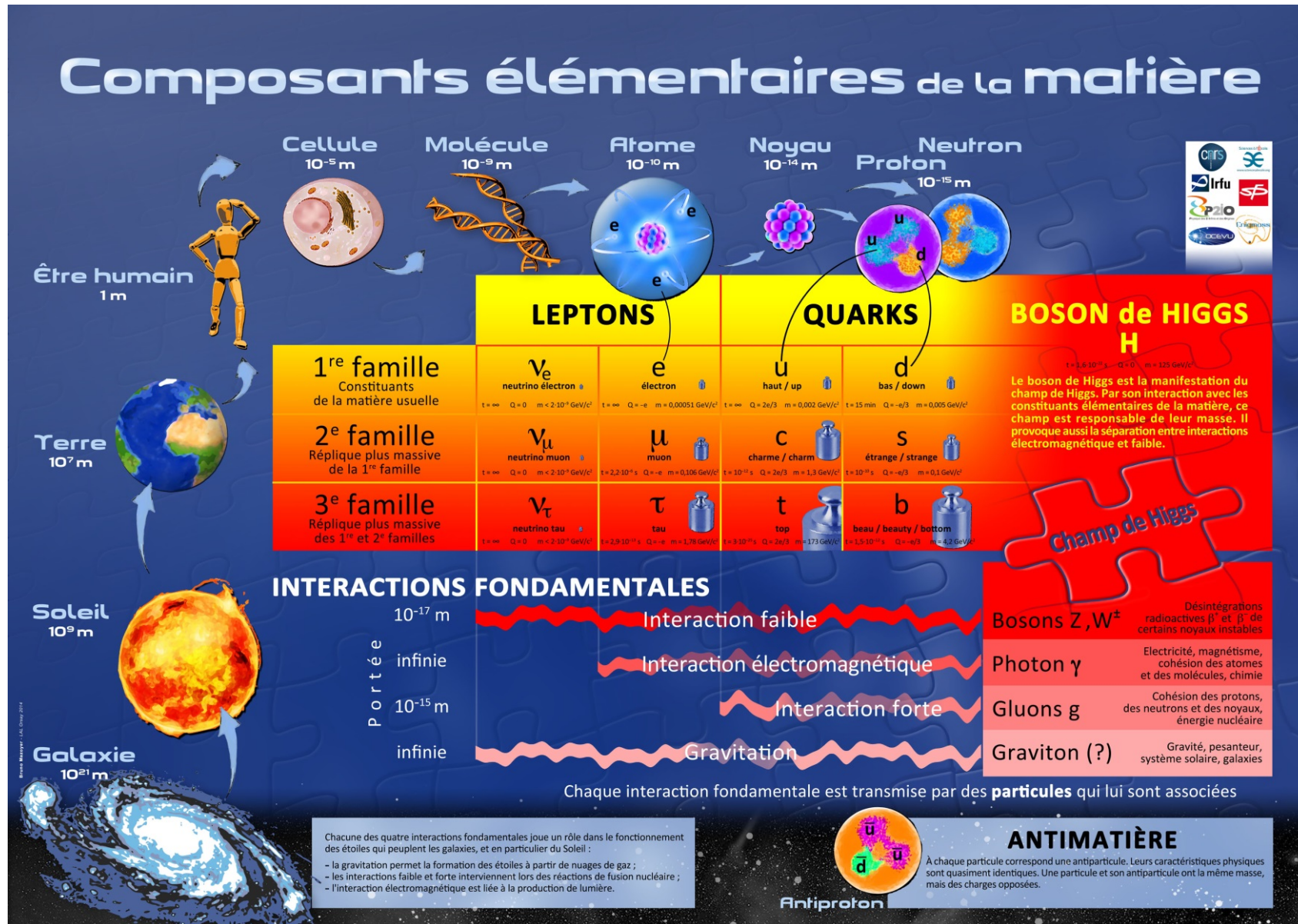
Type	Intensité relative	Particules médiatrices	Domine dans
Force forte	~ 1	Gluons	noyau atomique
Force électromagnétique	$\sim 10^{-3}$	Photon	électrons entourant le noyau
Force faible	$\sim 10^{-5}$	Boson Z^0, W^+, W^-	désintégration radioactive bêta
Gravitation	$\sim 10^{-38}$	Graviton ? (pas encore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

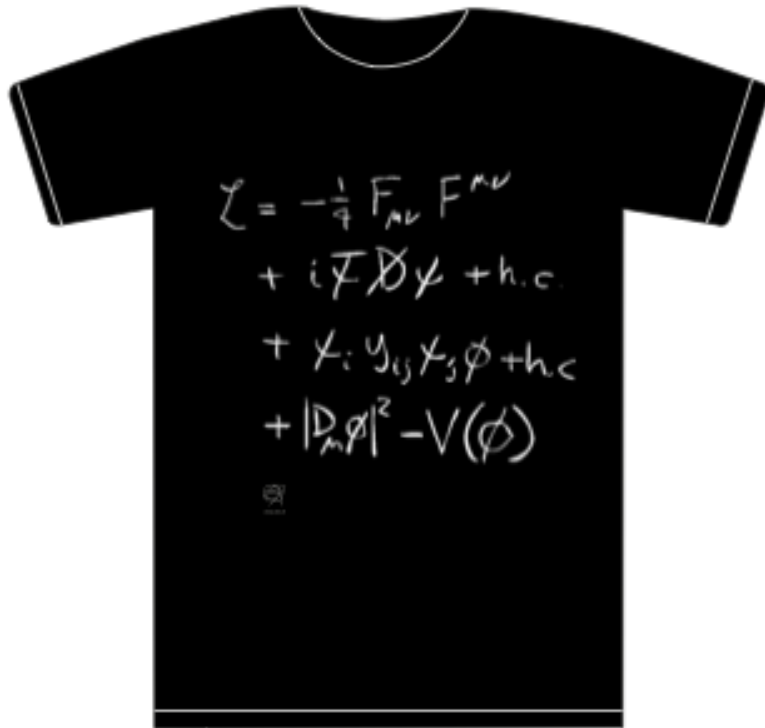
L'affiche des Composants élémentaires de la matière

- Mise à jour en 2014 ; diffusion lycées + centres de culture scientifique en 2015



Vu sous l'angle des Mathématiques ...

- Le **Lagrangien**
du **Modèle Standard**



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\nu \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c \\
 & - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu \Lambda_\nu \partial_\mu \Lambda_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
 & - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
 & - i g c_w \left[\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
 & - i g s_w \left[\partial_\nu \Lambda_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \Lambda_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \Lambda_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
 & - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) \\
 & + g^2 s_w c_w \left[\Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] \\
 & - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h \left[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2 \right] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
 & - \frac{1}{2} i g \left[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2} g \left[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
 & + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + i g s_w M \Lambda_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1 - 2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
 & - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + i g s_w \Lambda_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \left[H^2 + (\phi^0)^2 \right. \\
 & \left. + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} i g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w \Lambda_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
 & + \frac{1}{2} i g^2 s_w \Lambda_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 \Lambda_\mu \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - e^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \nu^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda \\
 & - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g s_w \Lambda_\mu [-(e^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] \\
 & + \frac{i g}{4c_w} Z_\mu^0 \left[(\nu^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
 & + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\nu^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(e^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
 & + \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[-\phi^+ (\nu^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[H (e^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (e^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] \\
 & + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) \right] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[m_d^\lambda (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) \right] \\
 & - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{i g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- \\
 & + \bar{X}^0 \left(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) \\
 & + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w \Lambda_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H \\
 & + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1 - 2c_w^2}{2c_w} i g M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \frac{1}{2c_w} i g M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + i g M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) \\
 & + \frac{1}{2} i g M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0)
 \end{aligned}$$

Le CERN

La genèse du CERN

- 1949 : idées de **coopération scientifique à l'échelle européenne**
 - **Réconciliation par la science** après la seconde guerre mondiale
- **Dans quel domaine ?**
 - Physique nucléaire ↔ enjeux militaires clairs
 - **Physique des particules** : domaine de recherche fondamentale, « neutre »
- Louis de Broglie propose la **création d'un grand laboratoire européen**
- Février 1952 : mise en place du **Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire**
- 1^{er} juillet 1953 : signature, au siège de l'Unesco, de la convention donnant naissance au CERN
- 17 mai 1954 : démarrage des travaux à Meyrin
- **29 septembre 1954 : création de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire**
 - Acronyme conservé (car déjà habituel) : **CERN**



Ils ont été à l'origine du CERN en France



Raoul Dautry
(1880-1951)
Ingénieur et
homme politique



Lew Kowarski
(1907-1979)



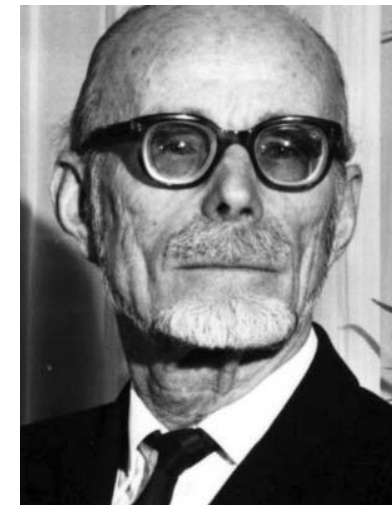
Louis de Broglie
(1892-1987)



Francis Perrin
(1901-1992)



François de Rose
(1910-2014)
Diplomate



Pierre Auger
(1899-1993)

Le CERN, vu par lui-même

- <http://home.web.cern.ch/fr/about>

Le CERN en bref

Comment l'univers a-t-il commencé? Les physiciens du CERN cherchent des réponses, en utilisant les accélérateurs de particules les plus puissants.

Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques très complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière : les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la Nature.

Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent le résultat de ces collisions.

Fondé en 1954, le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Il a été l'une des premières organisations à l'échelle européenne et compte aujourd'hui vingt et un États membres.



Le CERN, vu par lui-même

- <http://home.web.cern.ch/fr/about>

Le nom

Le CERN est aujourd'hui l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire. » À l'origine, l'acronyme correspondait à « Conseil européen pour la Recherche nucléaire », un organe provisoire institué en 1952, qui avait pour mandat de créer en Europe une organisation de rang mondial pour la recherche en physique fondamentale. » À l'époque, la recherche en physique fondamentale avait pour principal objectif la compréhension de l'intérieur de l'atome, c'est-à-dire du noyau, d'où l'emploi du qualificatif « nucléaire ».

Lorsque le Laboratoire vit officiellement le jour, en 1954, le Conseil provisoire fut dissous et la nouvelle organisation fut baptisée Organisation européenne pour la Recherche nucléaire. L'acronyme CERN fut toutefois conservé.

Aujourd'hui, notre compréhension de la matière va au-delà du noyau, et le principal domaine de recherche du CERN est la physique des particules, à savoir l'étude des composants fondamentaux de la matière ainsi que des forces auxquelles ils sont soumis. C'est pourquoi le CERN est souvent appelé « Laboratoire européen pour la physique des particules ».

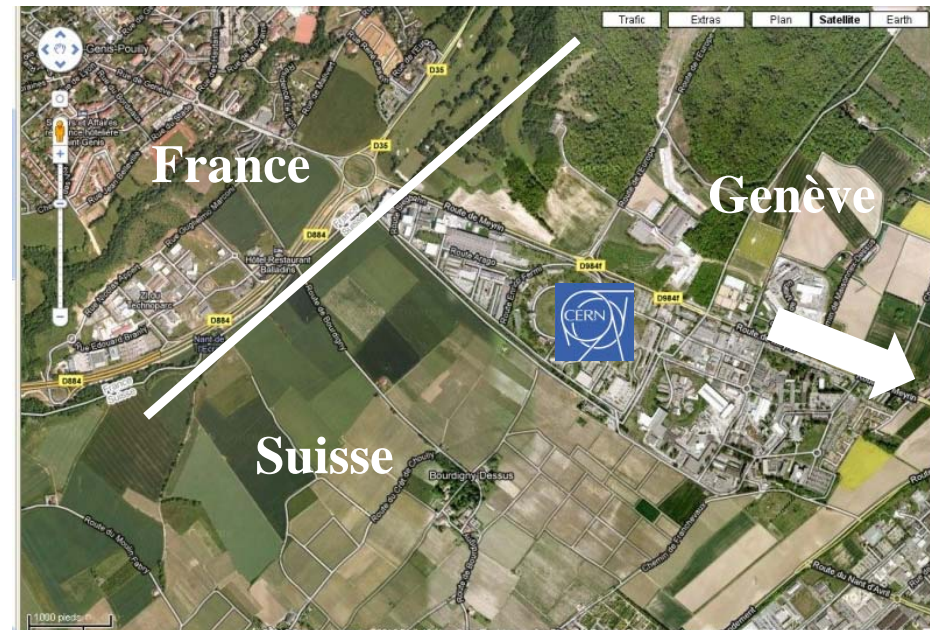
Le CERN se consacre à la recherche scientifique fondamentale. C'est d'ailleurs ce qui ressort de sa Convention constitutive :

« L'Organisation assure la collaboration entre les États européens pour les recherches nucléaires de caractère purement scientifique et fondamental, ainsi que pour d'autres recherches en rapport essentiel avec celles-ci.

L'Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles. »

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".

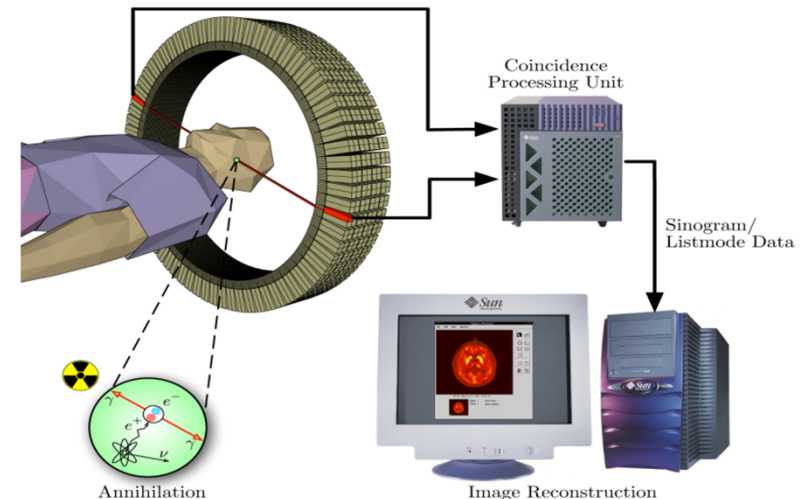
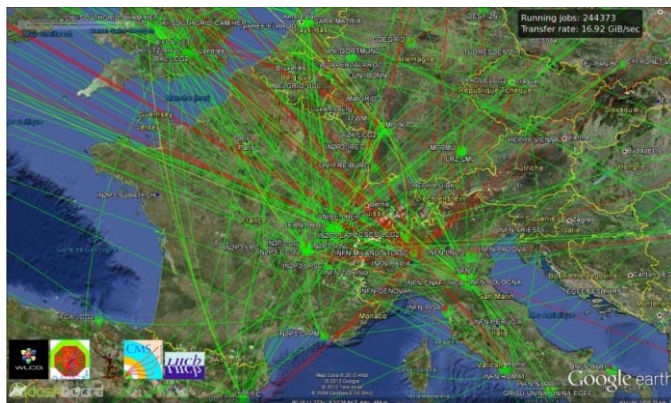
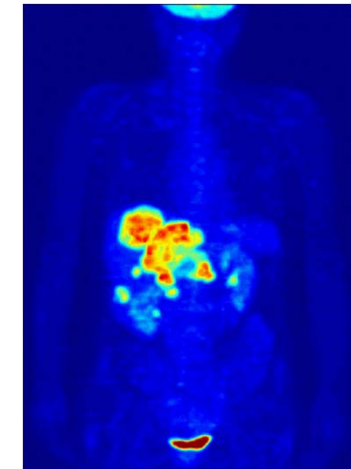
La première page web au monde !

[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

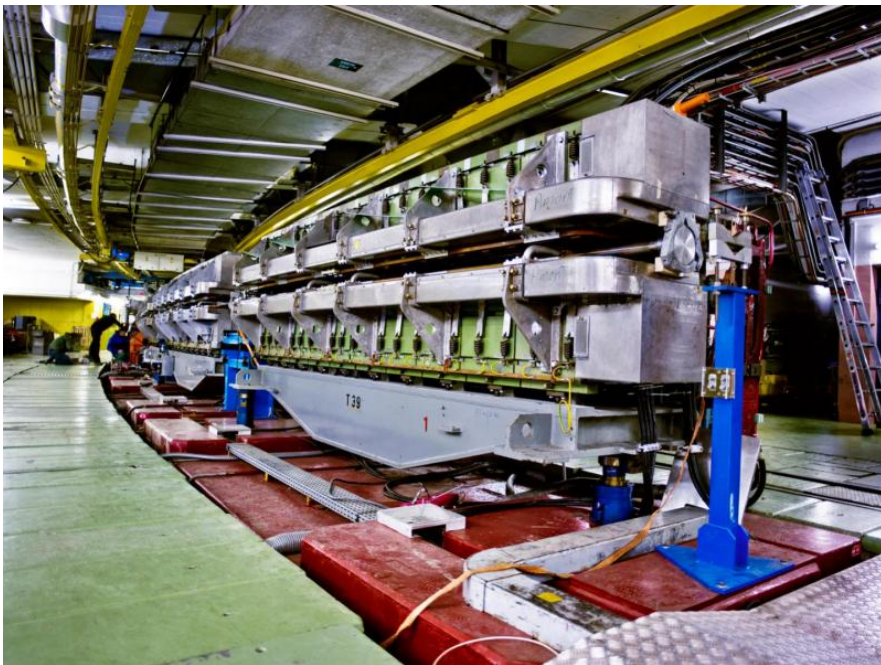
60 ans de CERN en images

- 1957 : le premier accélérateur, le **SynchroCyclotron (SC)**
- En fonctionnement jusqu'en 1990 ; se visite aujourd'hui



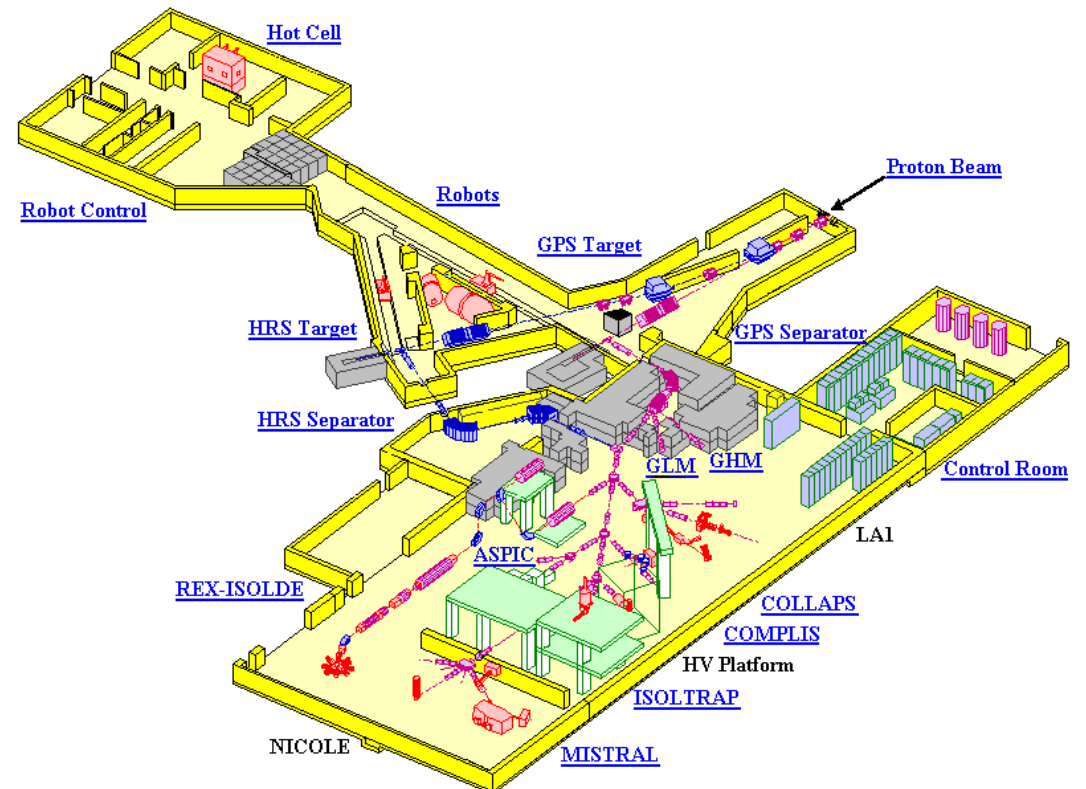
60 ans de CERN en images

- 1960: mise en service du **Synchrotron à Protons (PS)**
 - L'accélérateur de l'époque le plus puissant au monde
- Toujours en fonctionnement aujourd'hui.
 - Faisceaux mille fois plus denses qu'à ses débuts
 - Notamment injectés dans le LHC



60 ans de CERN en images

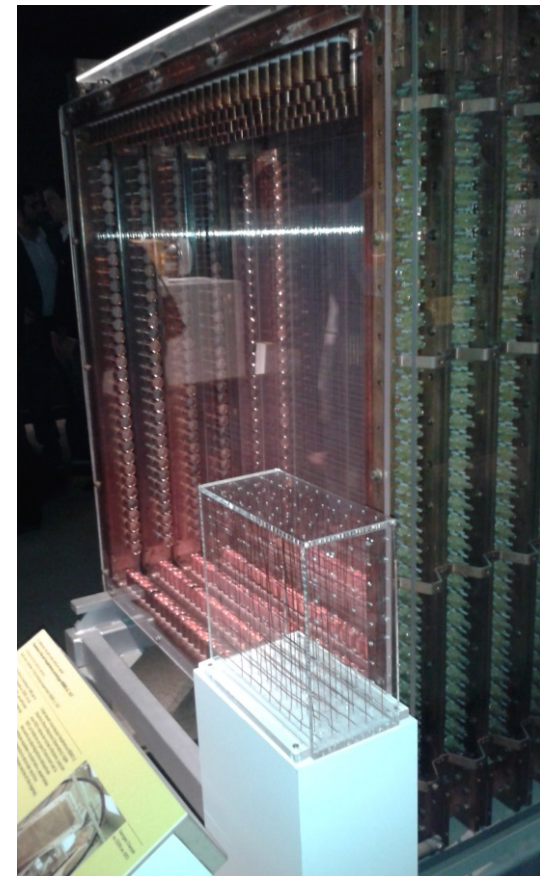
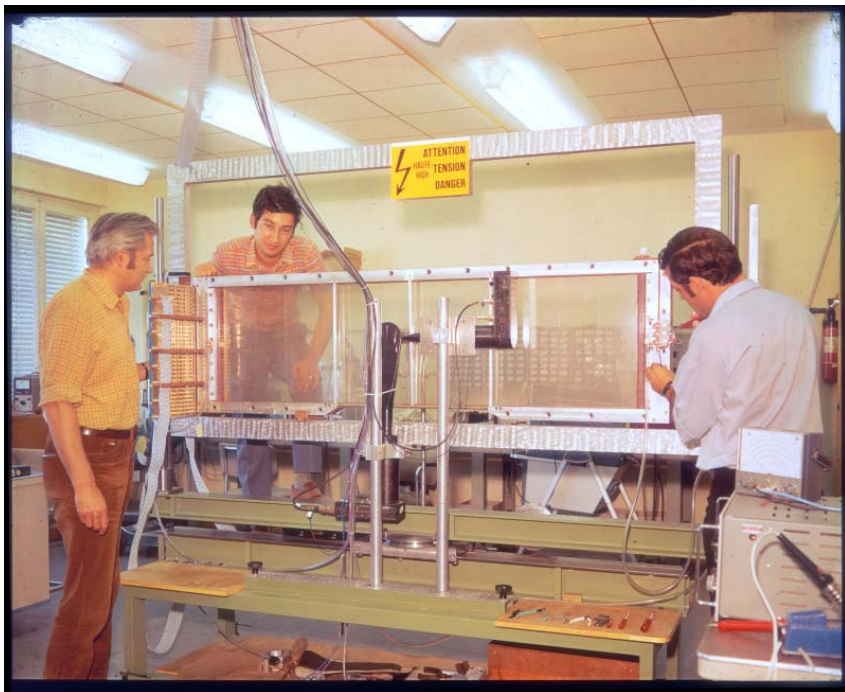
- L'installation **Isolde** (Isotope Separator On Line Device) produit depuis 1967 des noyaux atomiques instables.
- Domaines d'applications : physique nucléaire, médecine et électronique



60 ans de CERN en images

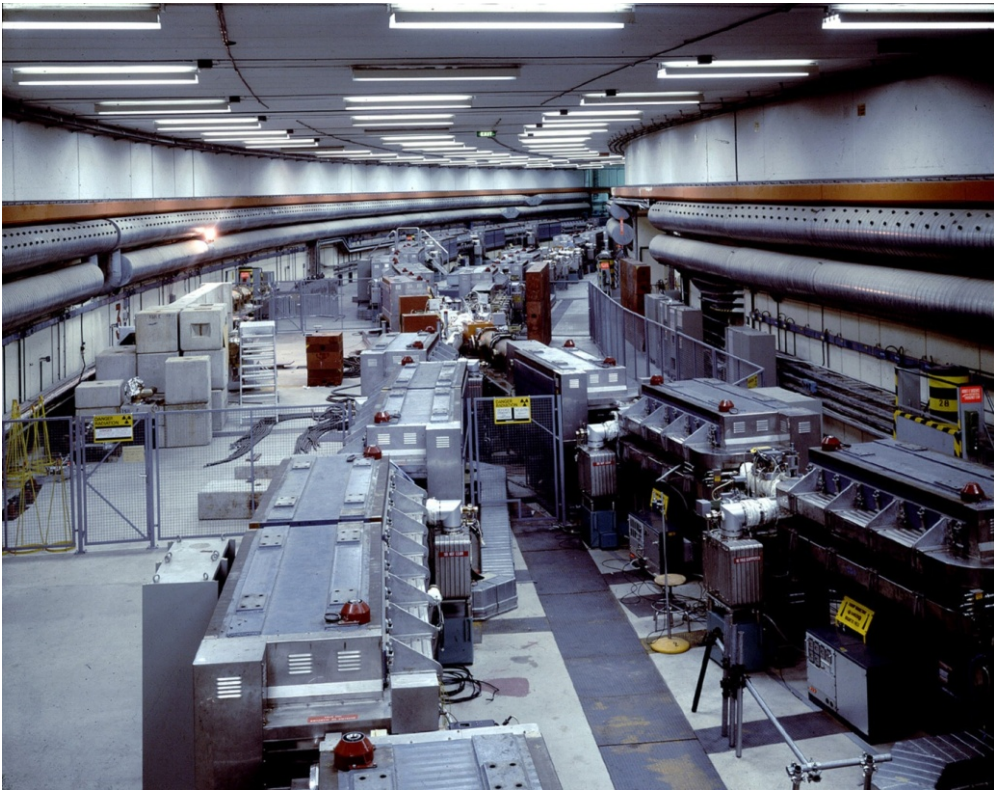
- 1968 : **Georges Charpak**, prix Nobel de physique 1992, invente la **chambre proportionnelle multifils**
- Ce détecteur, sans temps mort et lu directement par électronique, permet de gagner d'un seul coup un facteur 1000 sur le nombre de traces enregistrées par rapport aux chambres à bulles.

→ Début de l'ère électronique + informatique



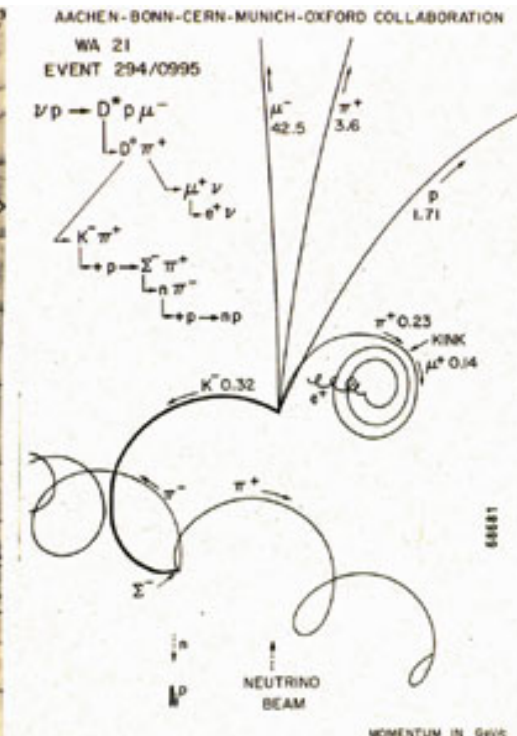
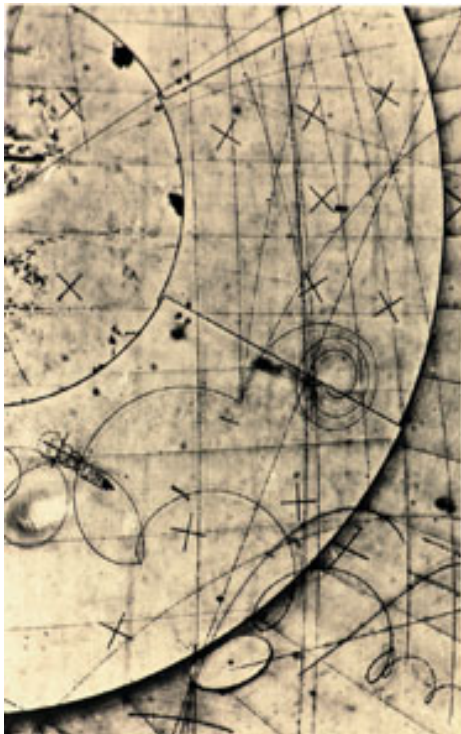
60 ans de CERN en images

- 1971 : **les Anneaux de Stockage à Intersections (ISR)**
 - Le premier collisionneur à protons au monde.
- Deux anneaux entrelacés de 300 m de diamètre.
- Ils se rencontrent en huit points et sont alimentés par le PS



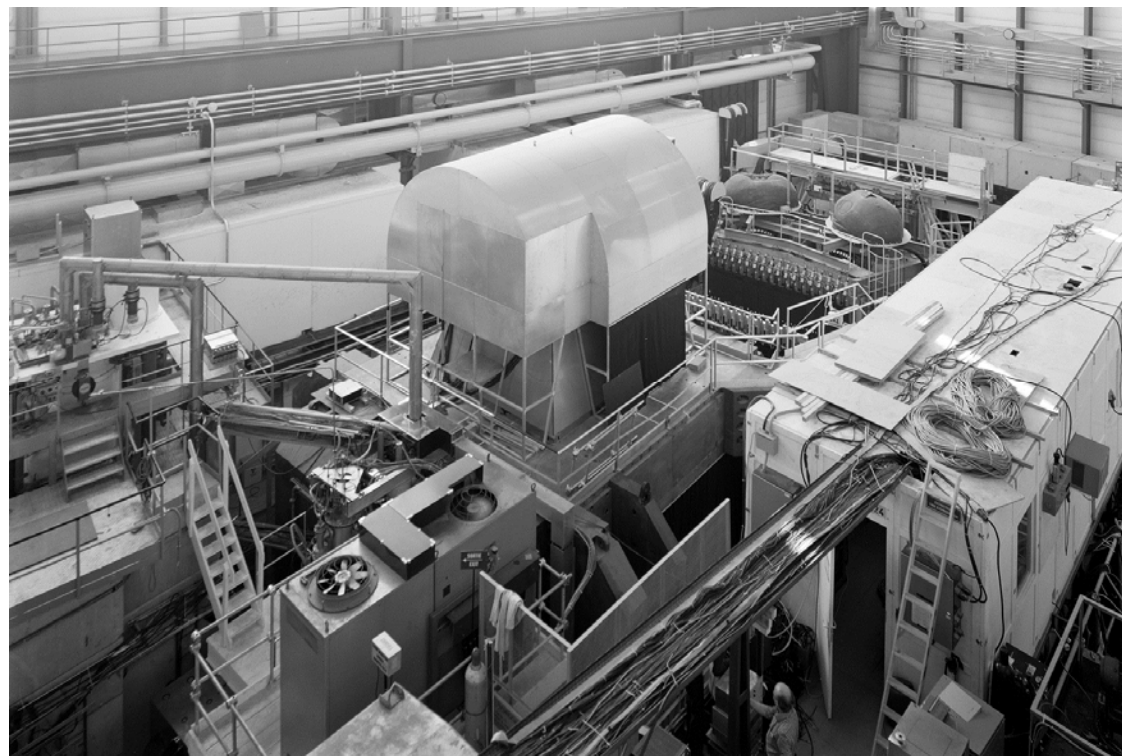
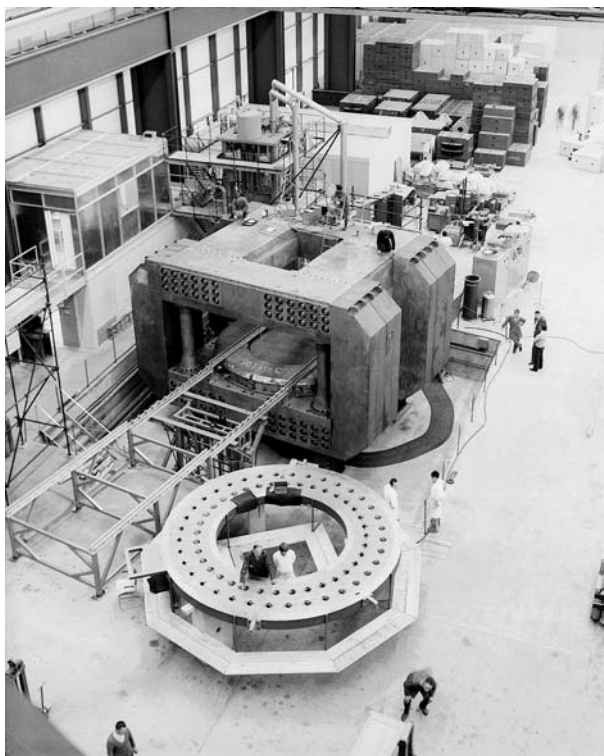
60 ans de CERN en images

- **La Grande Chambre à Bulles Européenne (BebC)**
 - Elle contient un grand volume d'hydrogène liquide maintenu dans un état proche de l'ébullition.
- Observation des trajectoires des particules, grâce aux bulles produites lors de leur passage dans l'hydrogène.



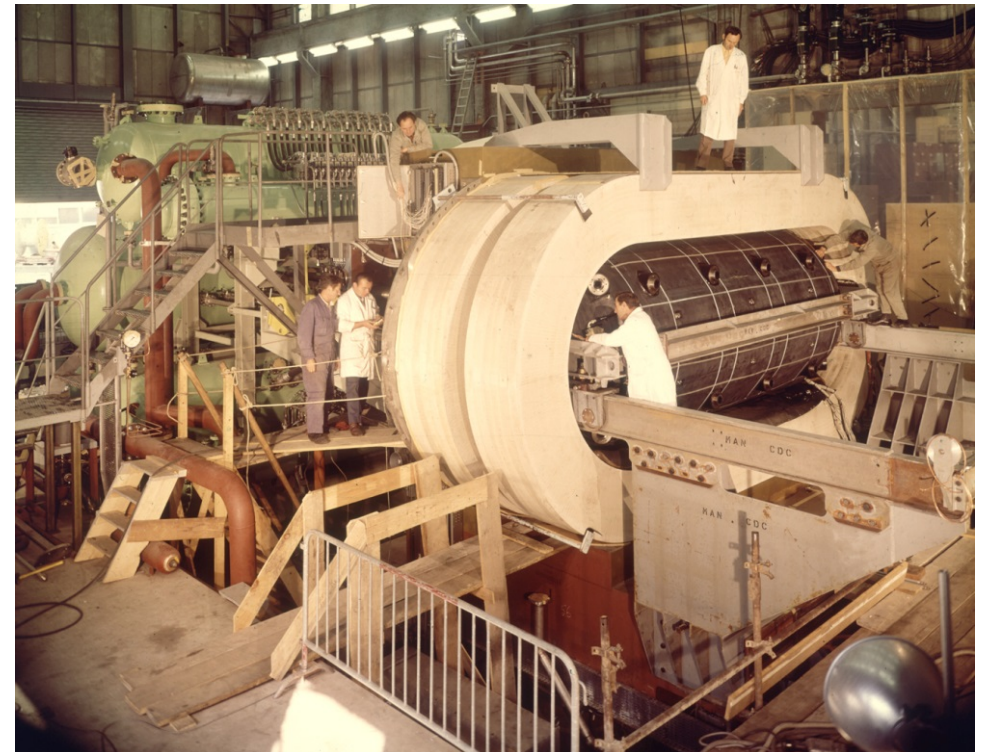
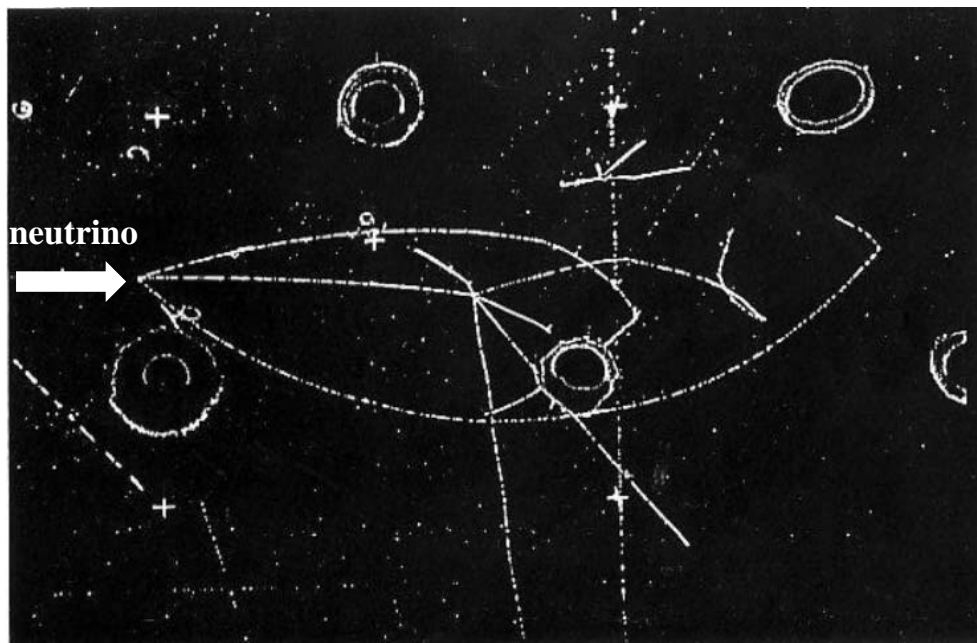
60 ans de CERN en images

- 1972 : mise en service du **spectromètre Omega**
 - Aimant supraconducteur de 15000 tonnes
- Chambres à étincelles remplacées par des chambres multifils proportionnelles
- Utilisé par 48 expériences jusqu'en 1996



60 ans de CERN en images

- La **chambre à bulles Gargamelle** détecte en 1973 les « courants neutres faibles »
 - Prédiction du Modèle Standard ainsi confirmé
- Phénomène très subtil :
3 événements sur plus d'1 million de clichés
 - Analysés à la main ...



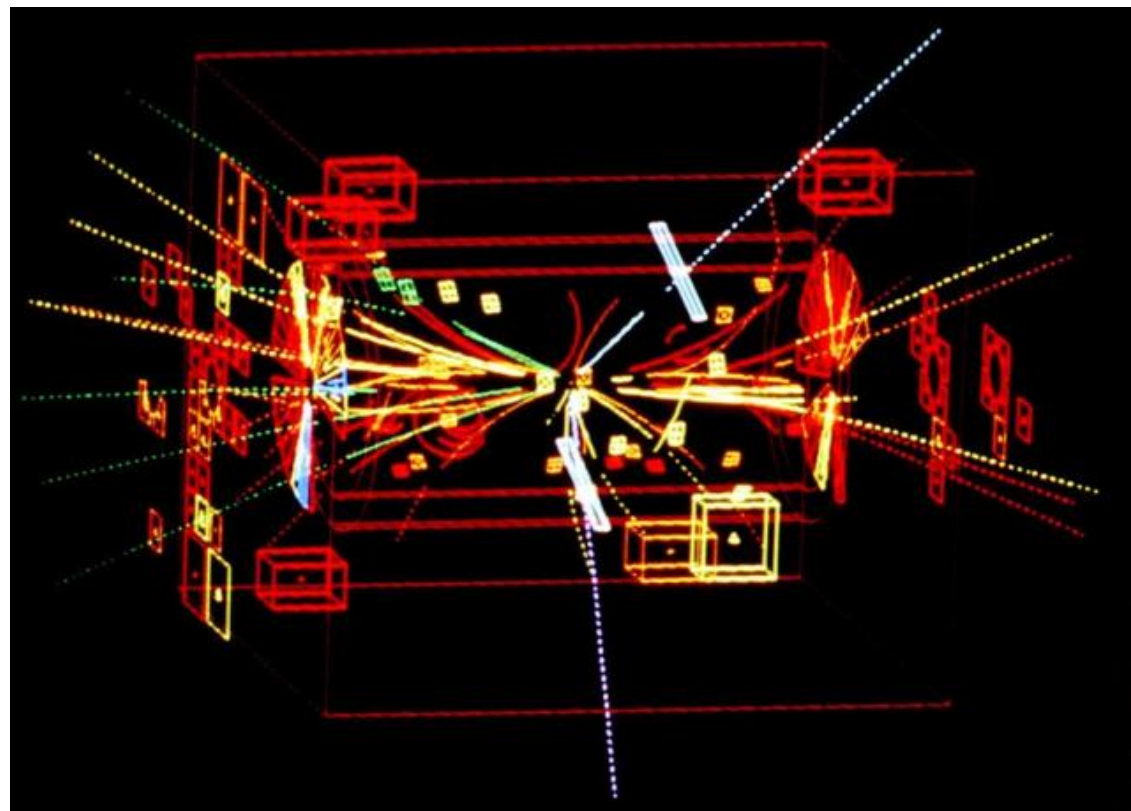
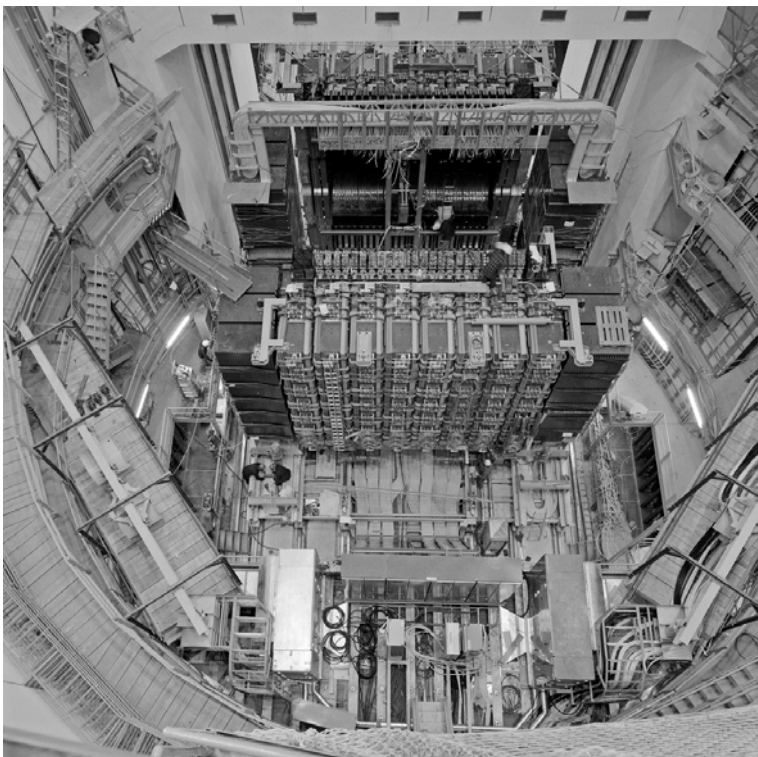
60 ans de CERN en images

- 1976 : le **Super Synchrotron à Protons (SPS)**, un tunnel de 7 km à 40 m sous terre, est le premier accélérateur transfrontalier du CERN
 - A cheval entre la France et la Suisse
- Il accélère aujourd'hui les faisceaux de protons avant leur injection dans le LHC.



60 ans de CERN en images

- 1983 : les détecteurs **UA1** (pour « Underground Area 1 », ici en photo) et **UA2** découvrent les bosons W et Z (les particules médiatrices de l'interaction faible) sur le collisionneur $Sp\bar{p}S$
 - Le boson Z véhicule les courants neutres mis en évidence par Gargamelle.



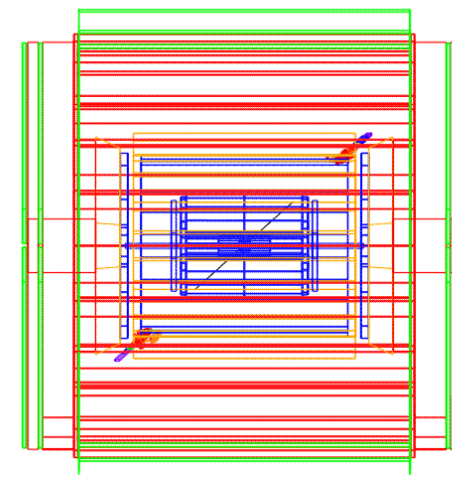
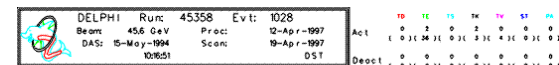
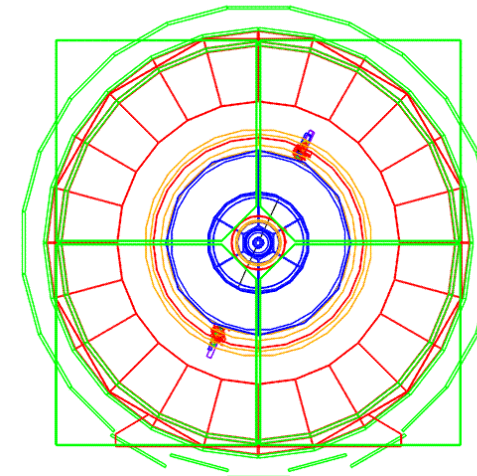
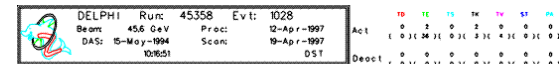
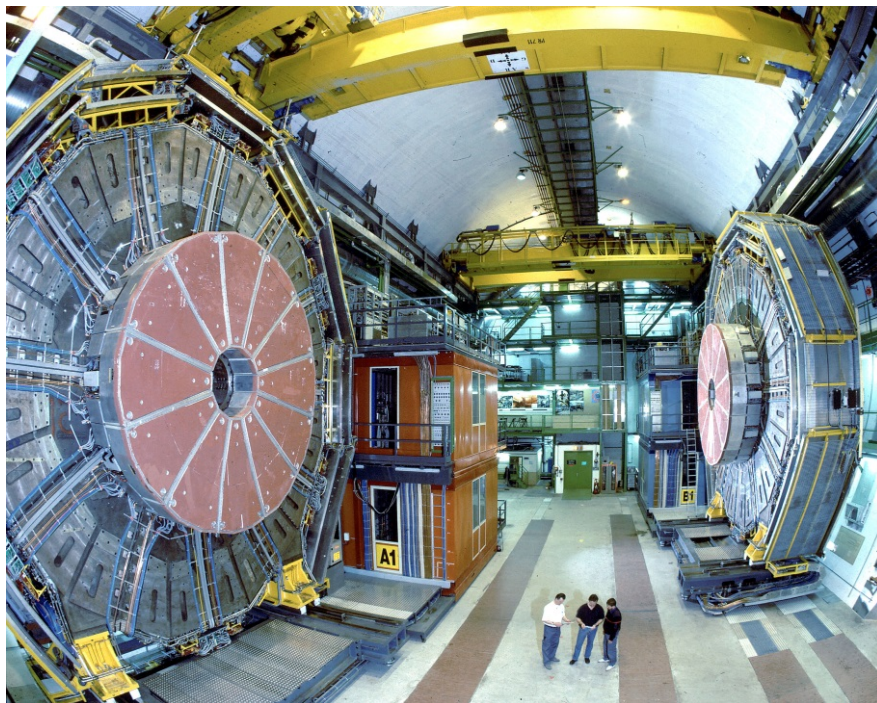
60 ans de CERN en images

- 1989-2000 : le **Grand Collisionneur Electron-Positron (LEP)**
- Installé dans un tunnel de 27 km creusé pour l'occasion
 - Celui qui abrite aujourd'hui le LHC
- Le LEP est alimenté en particules par le SPS



60 ans de CERN en images

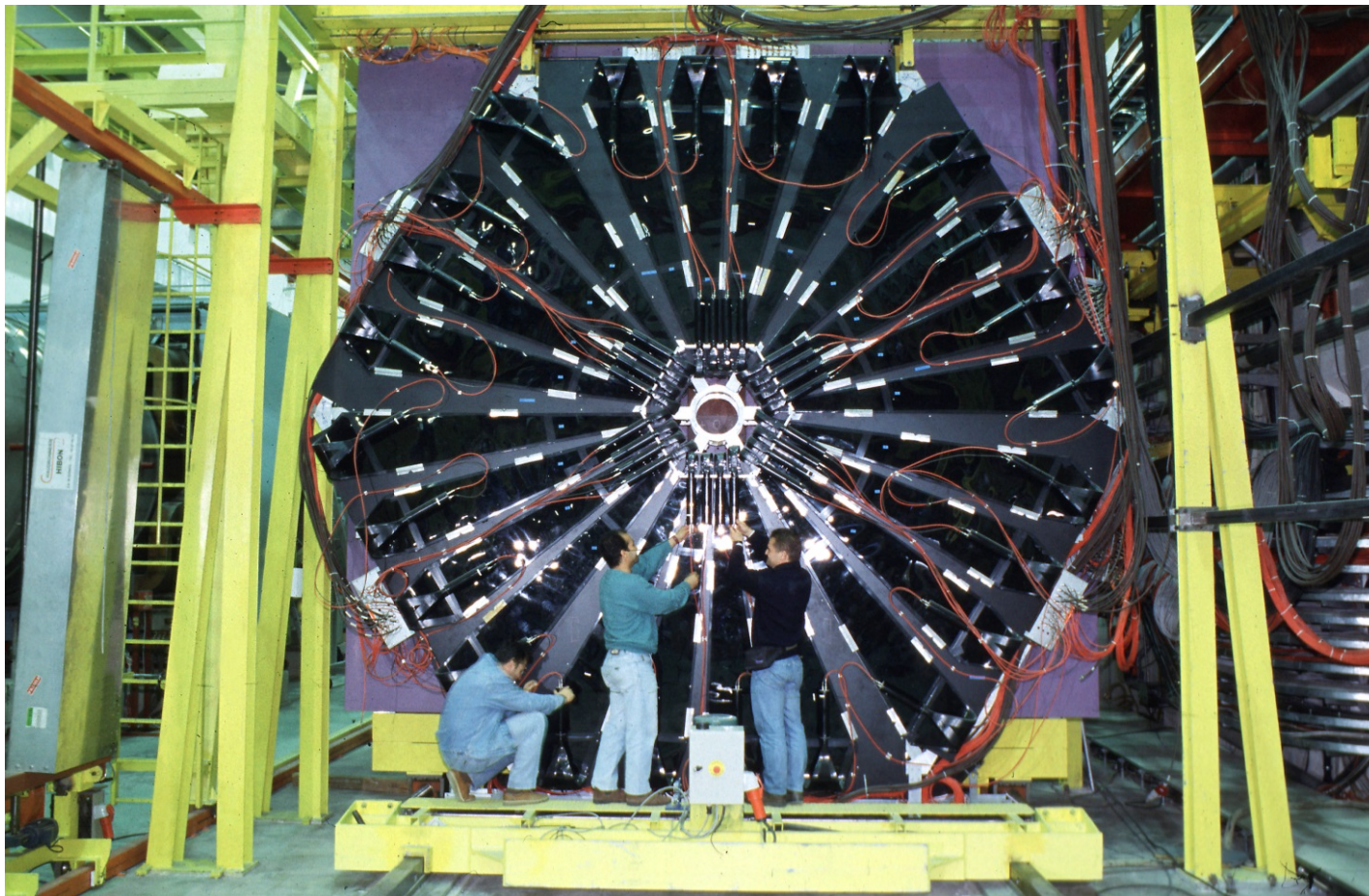
- Quatre détecteurs polyvalents étaient installés sur le LEP pour observer les collisions entre électrons et positrons de haute énergie : **Aleph** (en photo ici), **Delphi**, **L3** et **Opal**.



- Ils ont permis de réaliser de très nombreuses mesures de précision.

60 ans de CERN en images

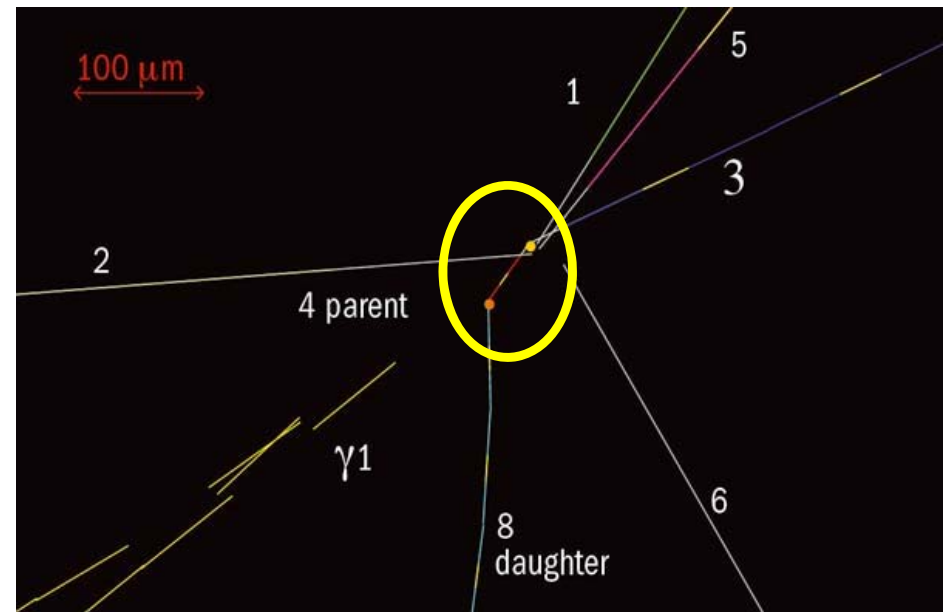
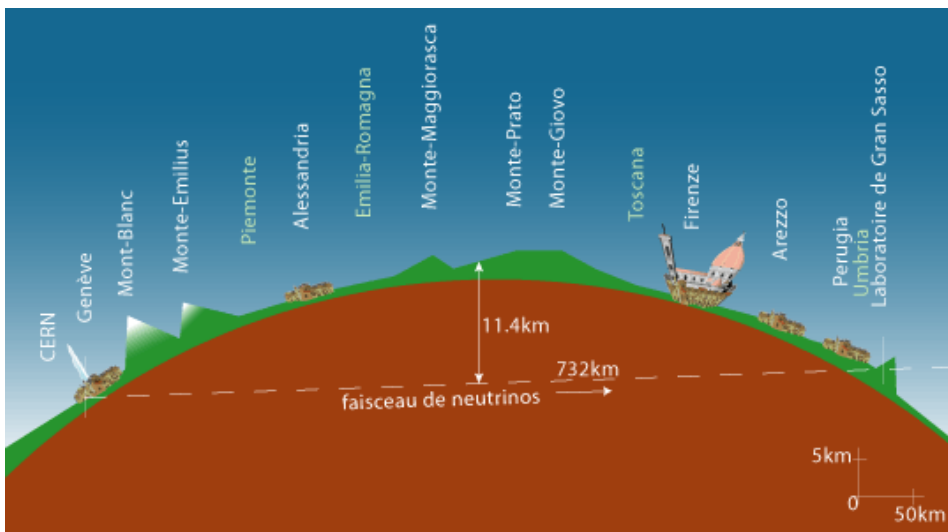
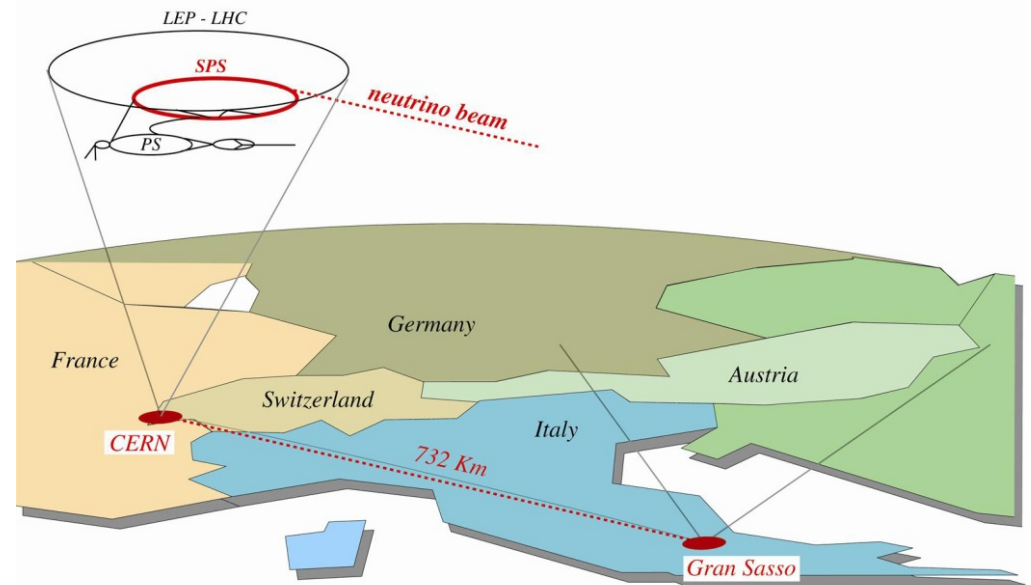
- Début des années 2000 : l'expérience **NA50** utilisant des ions lourds contribue à mettre en évidence « le plasma de quarks gluons » : un état très particulier de la matière qui serait survenu quelques microsecondes après le Big-Bang.



60 ans de CERN en images

- Envoi d'un faisceau de neutrinos vers le laboratoire souterrain du Gran Sasso
 - Distant du CERN de 732 km
- Objectif : étudier le phénomène d'oscillation des neutrinos

CERN to Gran Sasso Neutrino Beam



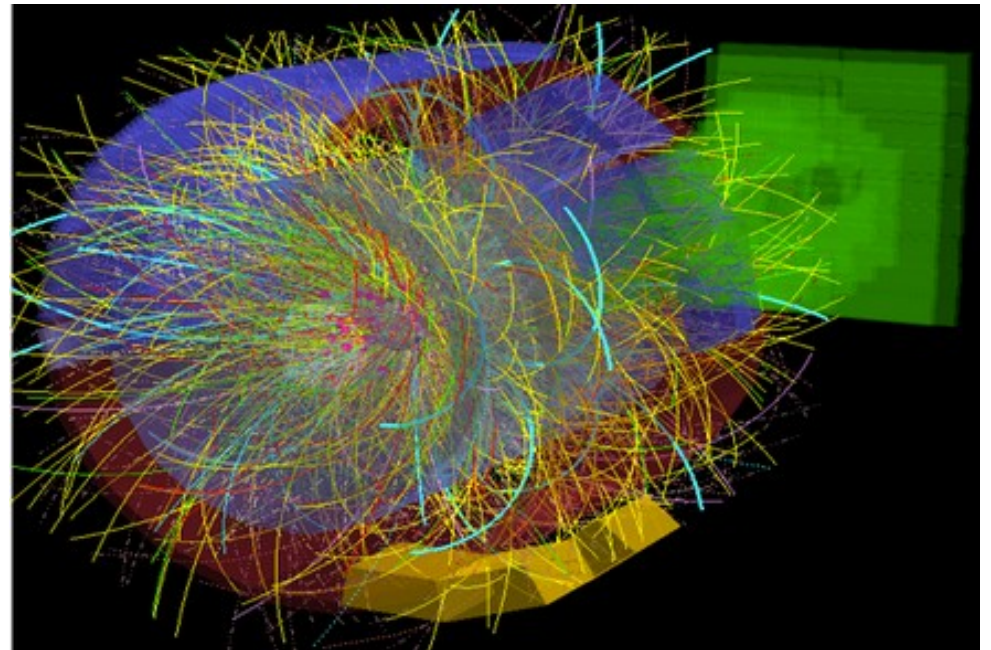
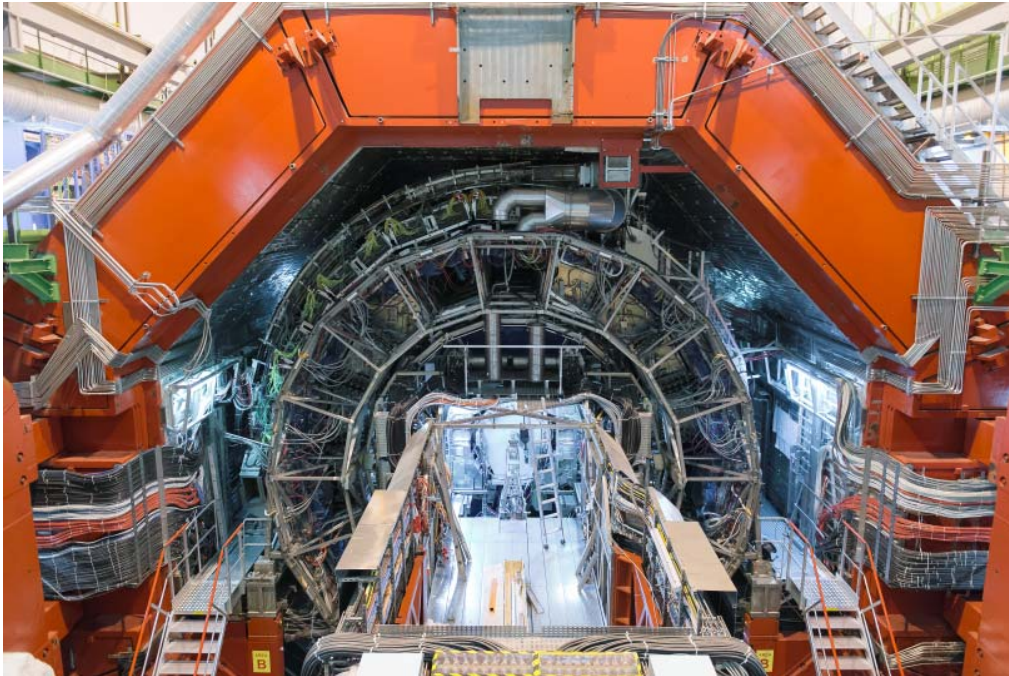
60 ans de CERN en images

- Le **décélérateur d'antiprotons (AD)** est une installation unique qui, depuis l'an 2000, produit des antiprotons de basse énergie notamment utilisés pour explorer les propriétés de l'antimatière (en produisant des atomes d'antihydrogène).



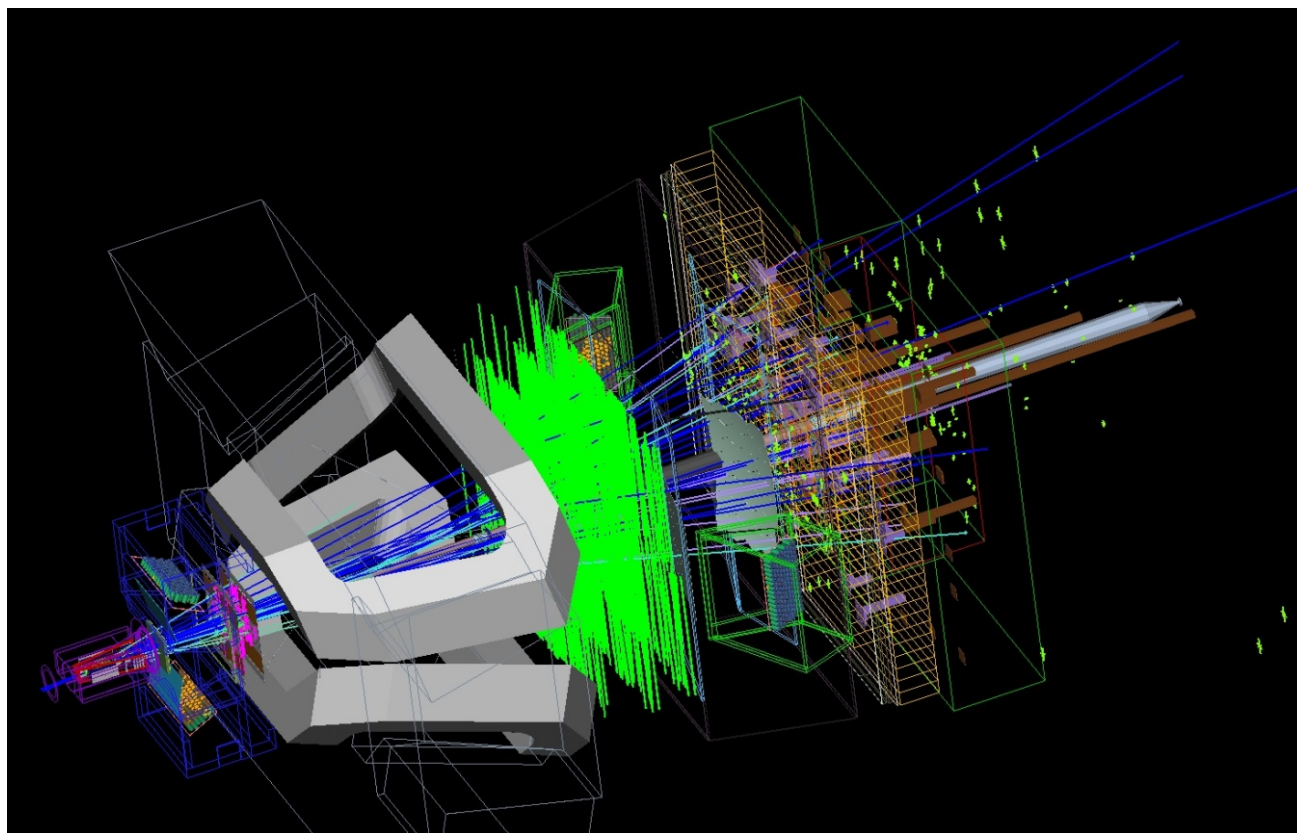
60 ans de CERN en images

- L'étude du « plasma de quarks gluons » continue aujourd'hui grâce au détecteur **Alice (A Large Ion Collider Experiment)** du LHC.
- Des collisions entre ions plomb y récréent les conditions nécessaires à la formation de cet état de la matière :
 - une température cent mille fois plus élevée que le cœur du soleil
 - une densité extrême (environ 40 milliards de tonnes par centimètre cube)



60 ans de CERN en images

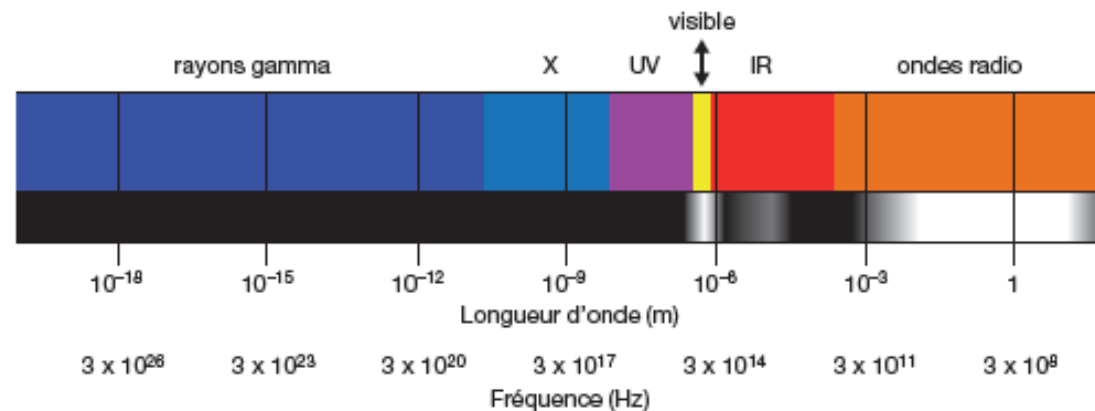
- L'expérience **LHCb** du LHC réalise des mesures de précision, notamment à l'aide des mésons B, qui sont des sondes très performantes pour étudier les différences entre matière et antimatière



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

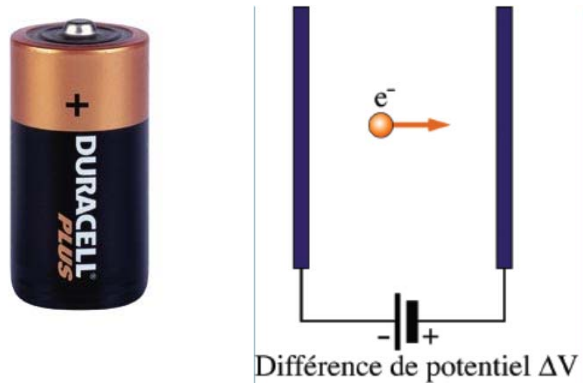
- Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

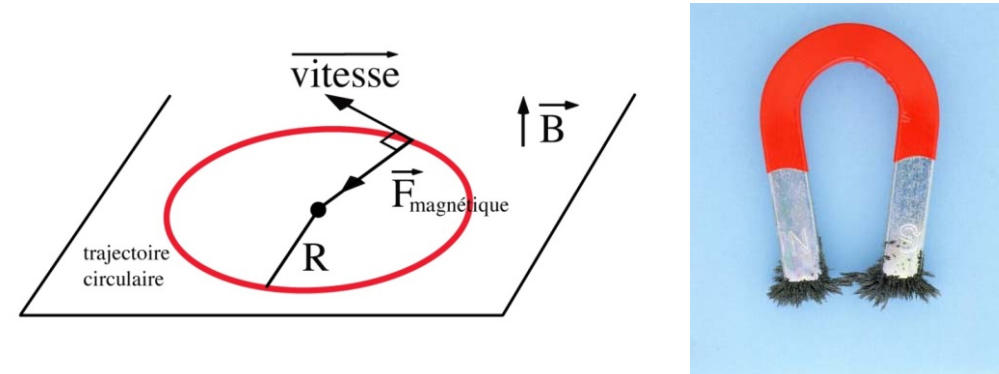
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

Les accélérateurs de particules

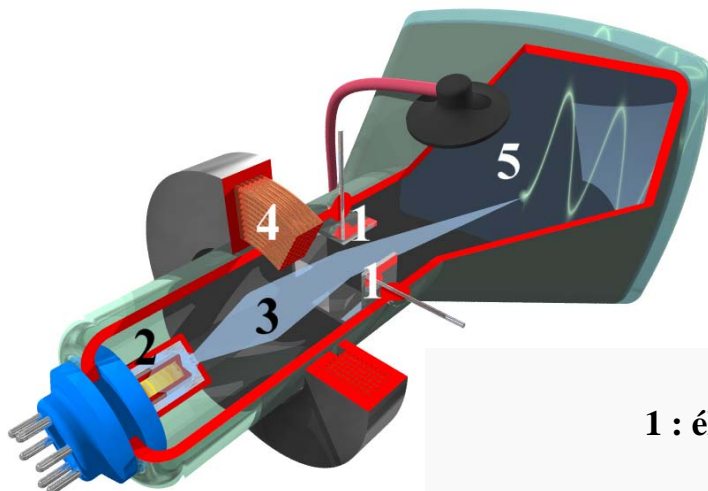
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



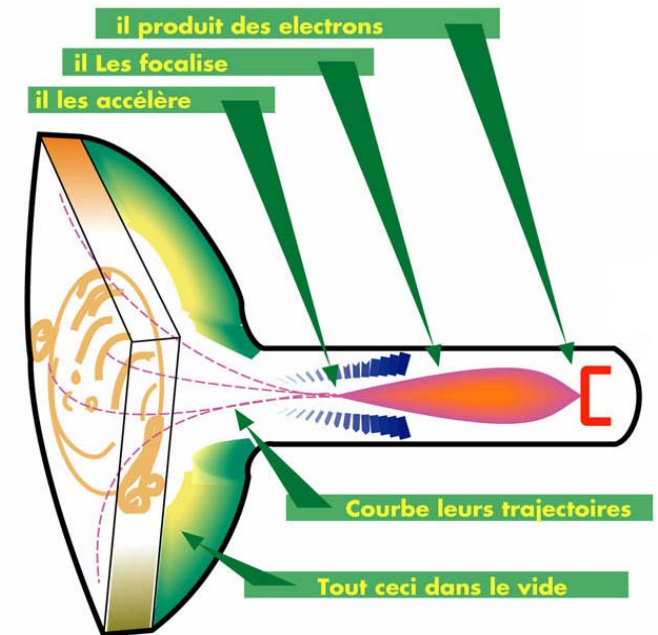
- On les pilote avec des champs magnétiques

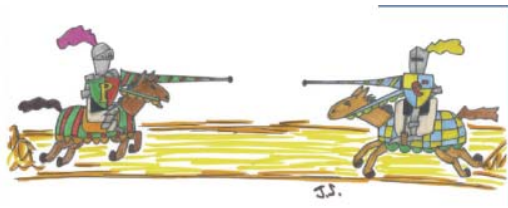


→ Les oscilloscopes et les tubes TV cathodiques sont des accélérateurs !

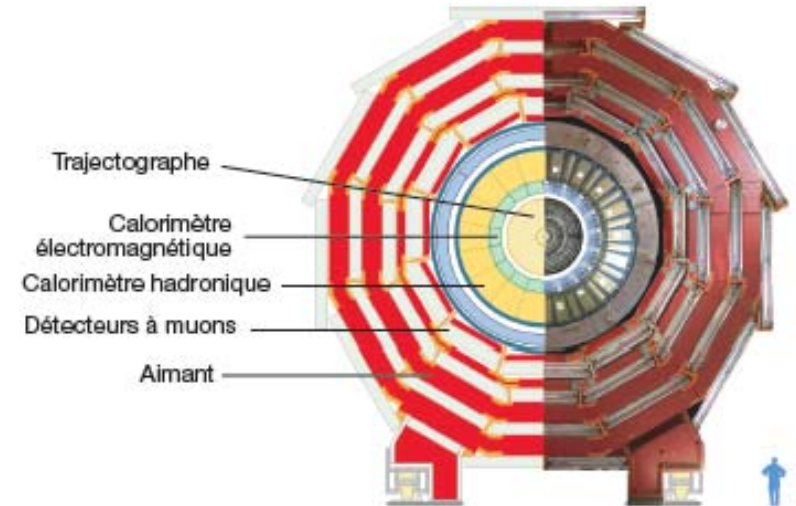
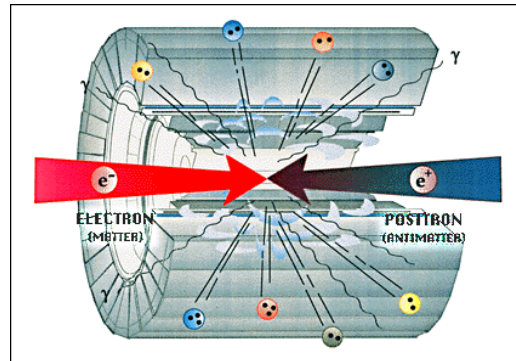
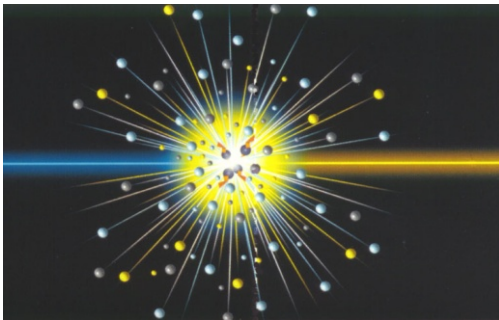
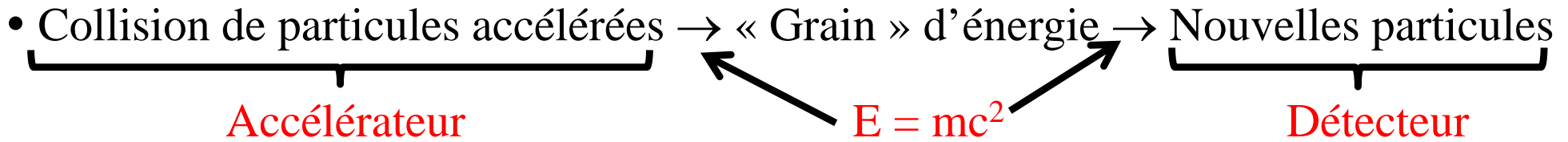
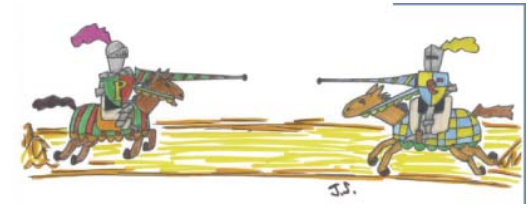


- Tube d'oscilloscope**
- 1 : électrodes déviant le faisceau
 - 2 : canon à électrons
 - 3 : faisceaux d'électrons
 - 4 : bobine pour faire converger le faisceau
 - 5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore

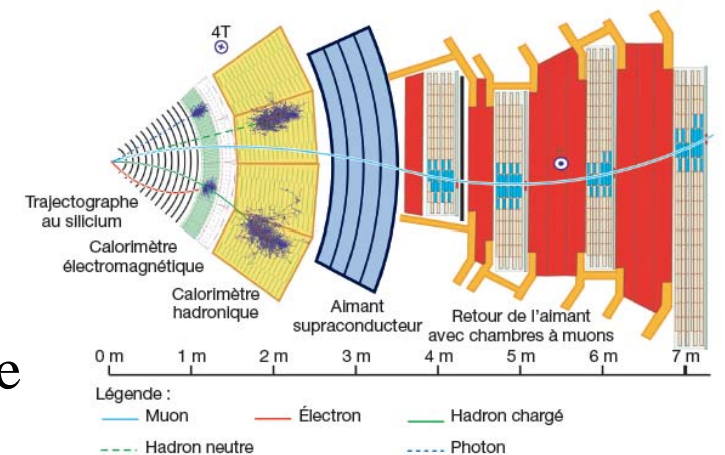




Les collisionneurs



- 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 ...

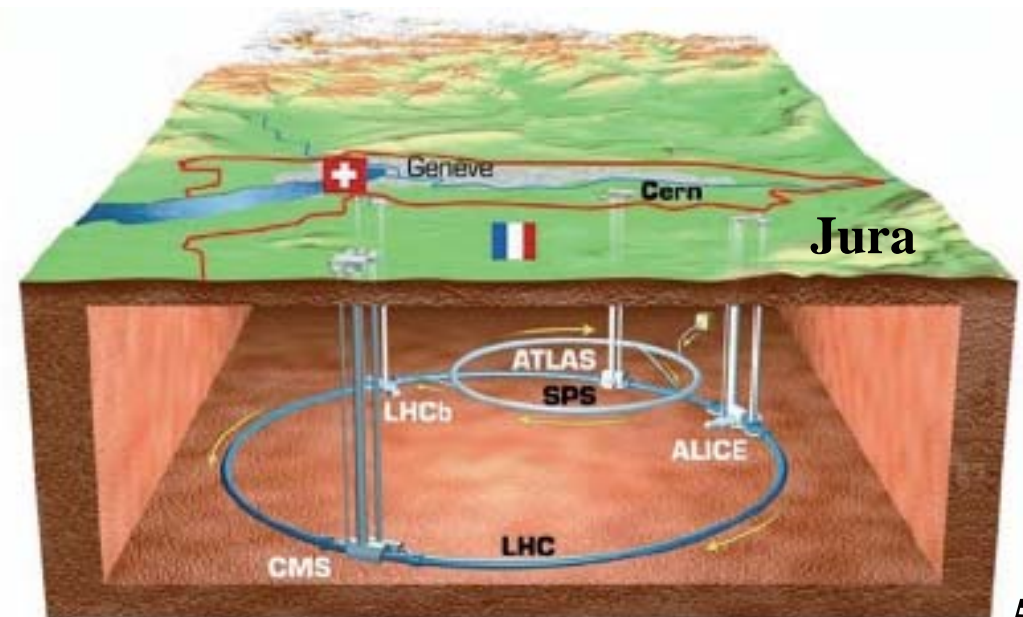


Le LHC



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



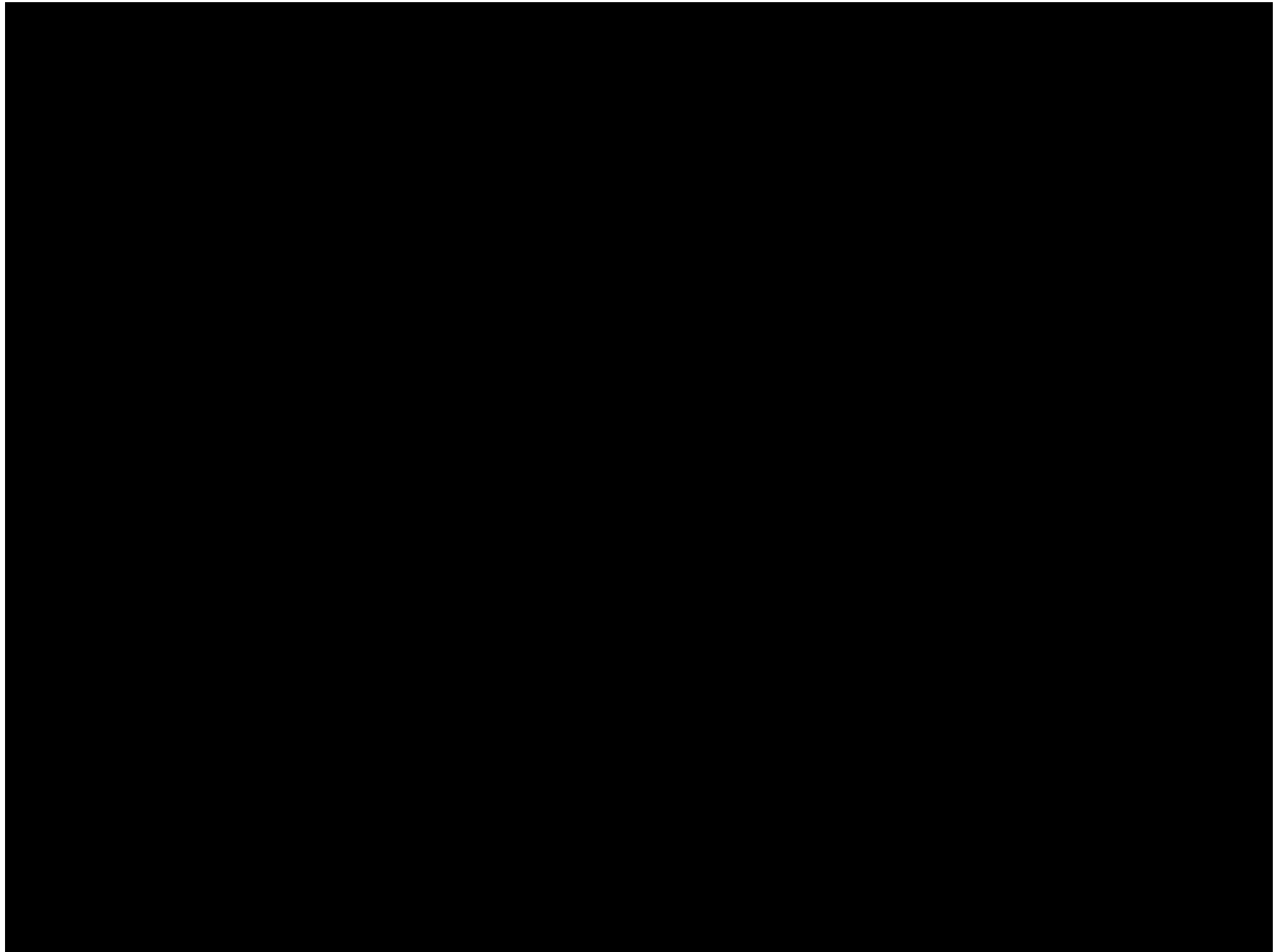
Le LHC en quelques chiffres

- **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) :

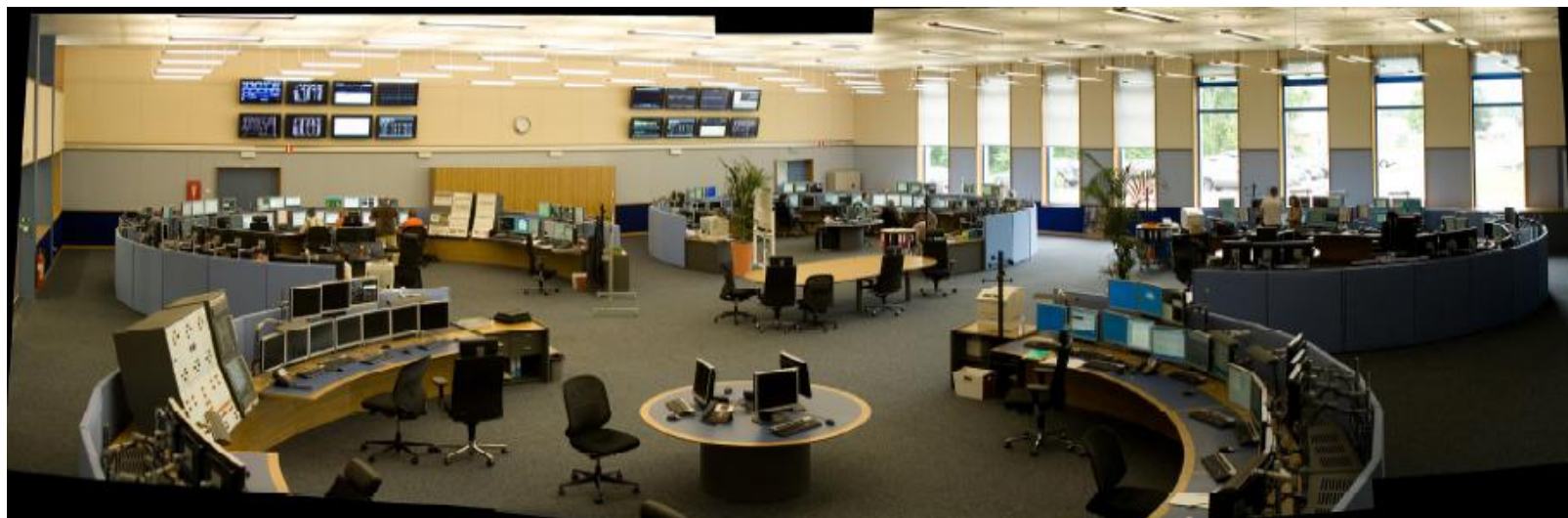
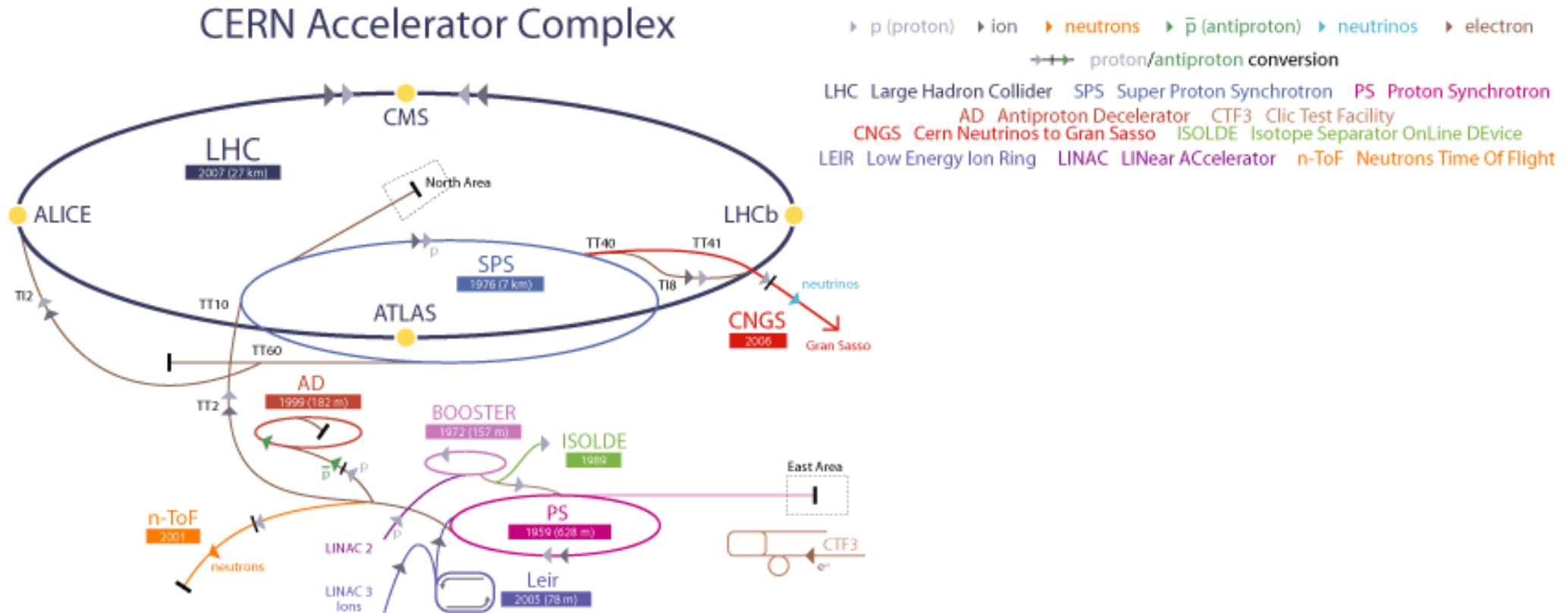
- **Les particules se croiseront ~ 40 millions de fois par seconde** dans les détecteurs et chaque interaction produira **~ 20 collisions proton-proton**
- Il y aura **~ 300 000 000 000 000 de protons** en même temps dans le LHC
- **L'énergie stockée** dans le **faisceau** équivaudra à celle de **80 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



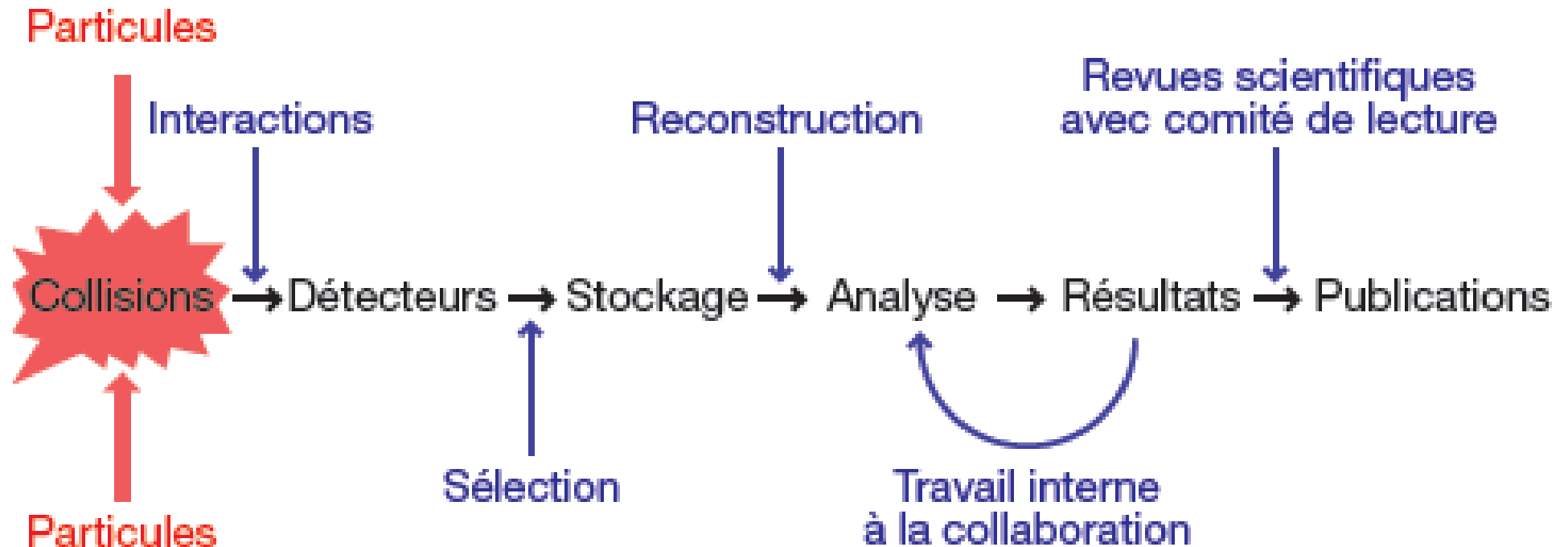
Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **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**



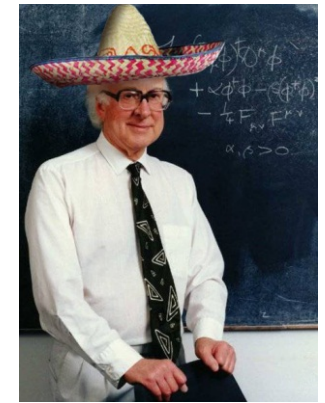
Comment analyser les données du LHC ?

- 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**

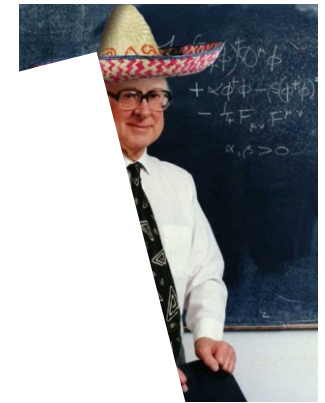
Le boson de Higgs



- **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

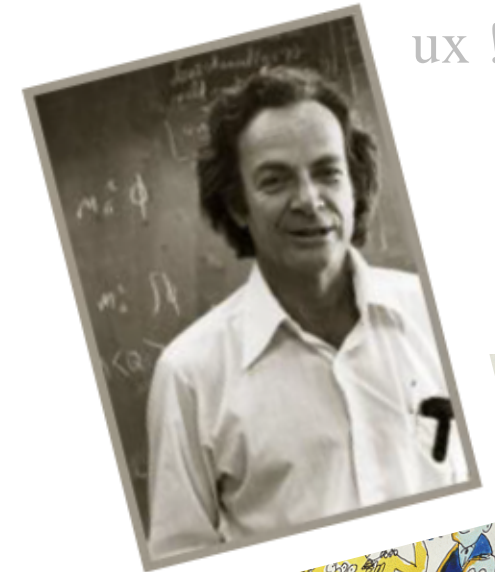


- Motivation théorique au départ :
« quelque chose » doit donner la masse

- 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

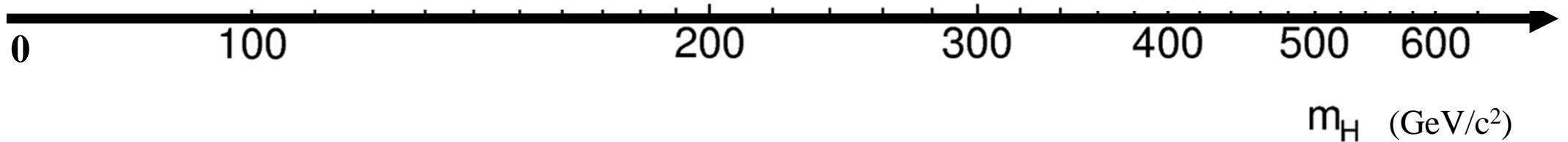


ux !



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 : $1 \text{ GeV}/c^2 = 1.8 \times 10^{-25} \text{ kg}$ (en gros la masse d'un proton)

GeV = “Giga [10^9] électron-Volt”

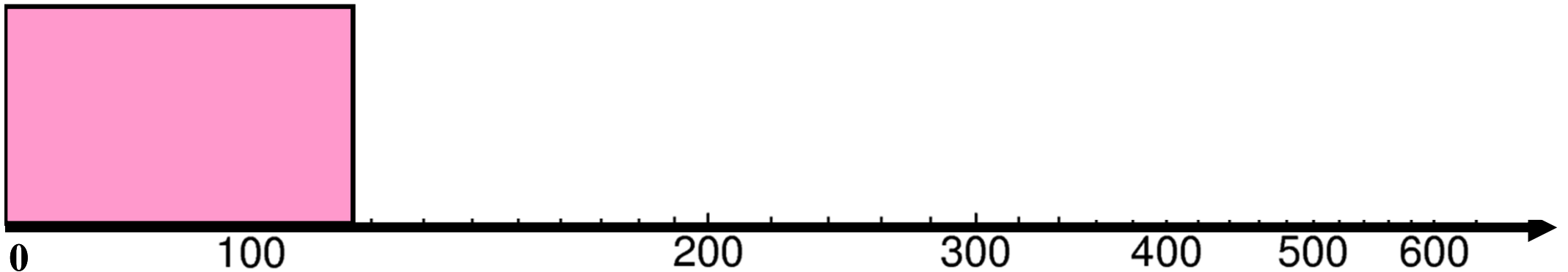
Energie actuelle de collisions au LHC : 8 “Téra [10^{12}] électron-Volt” (**TeV**)

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

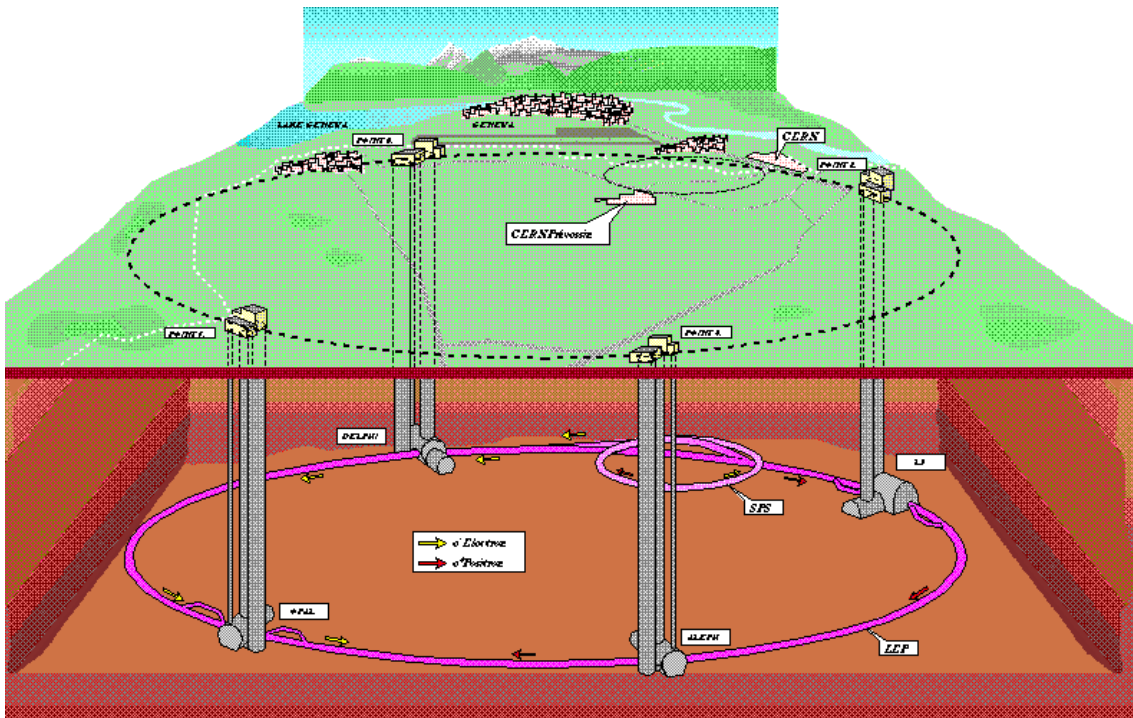
La chasse au boson de Higgs

LEP

1989-2000

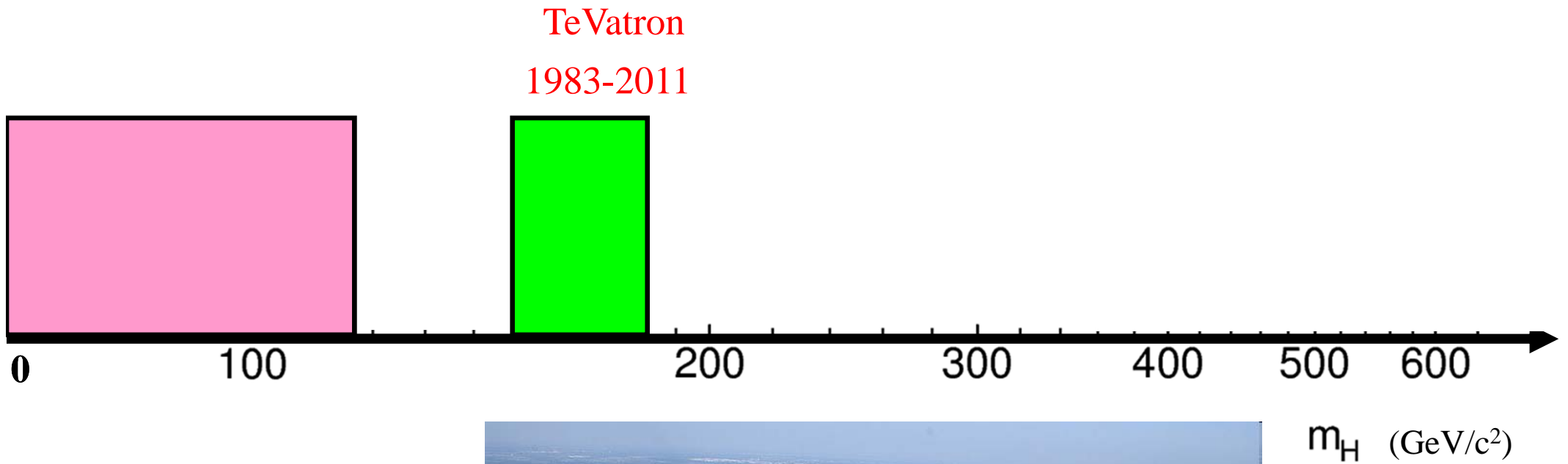


m_H (GeV/c²)



Le LEP au CERN
(près de Genève)

La chasse au boson de Higgs



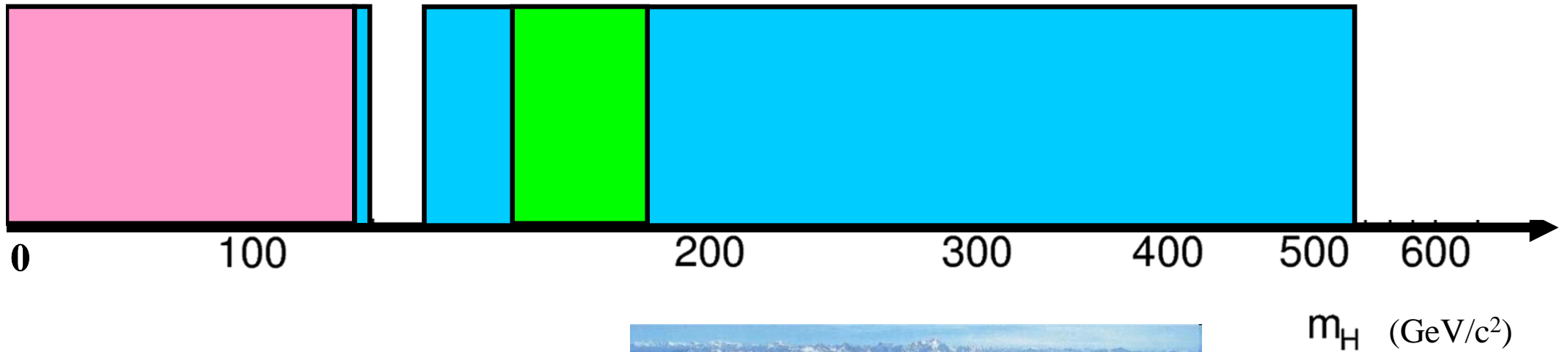
Le TeVatron
à Fermilab
(près de Chicago)



La chasse au boson de Higgs



LHC
2009-2011

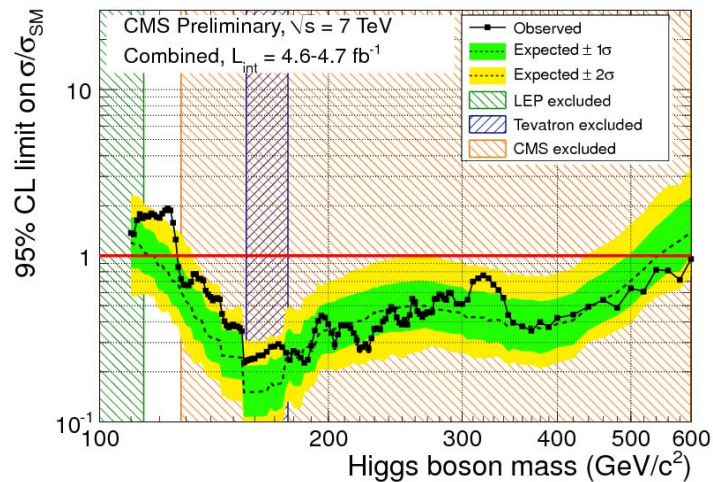


Le LHC au CERN
(près de Genève)

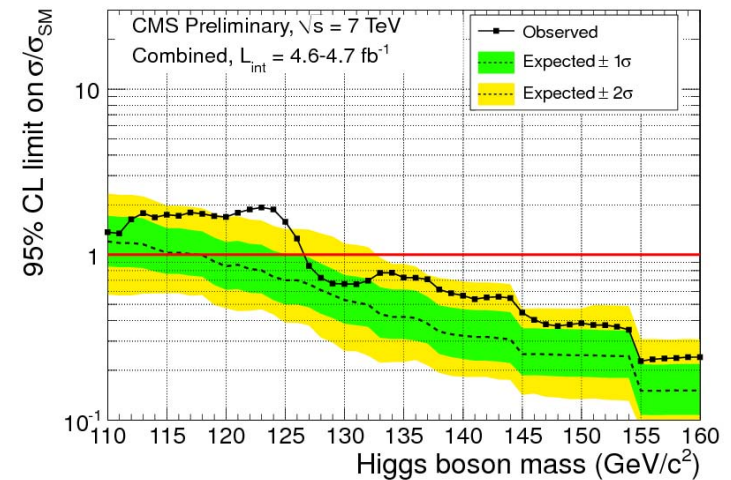


Résultats en décembre 2011

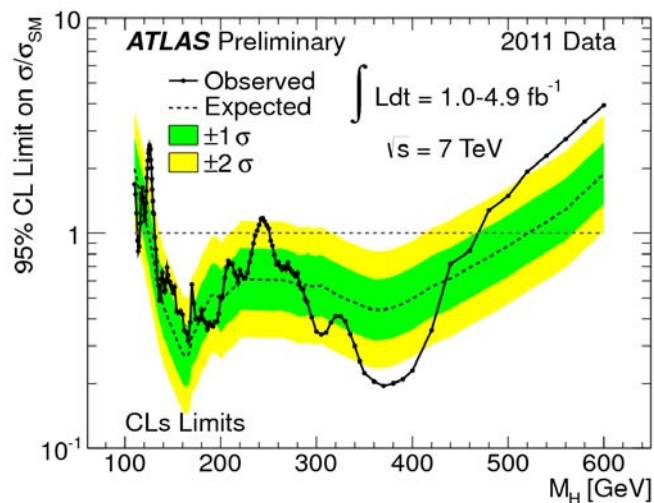
- Résultats de l'expérience **CMS** sur les données 2011



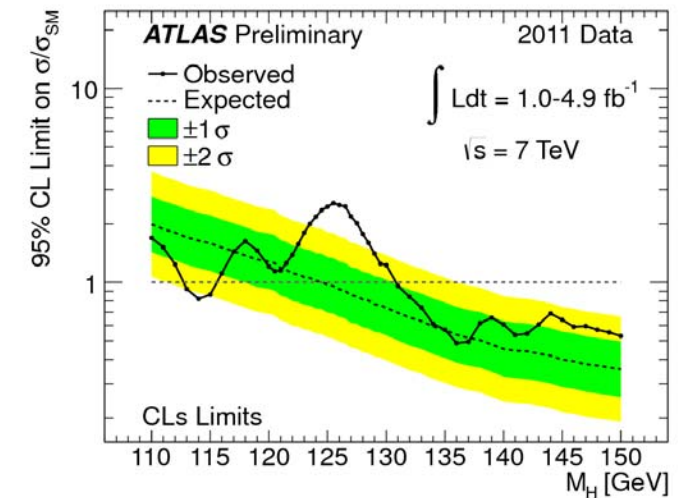
Zoom



- Résultats de l'expérience **ATLAS** sur les données 2011



Zoom



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 maintenant ?

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

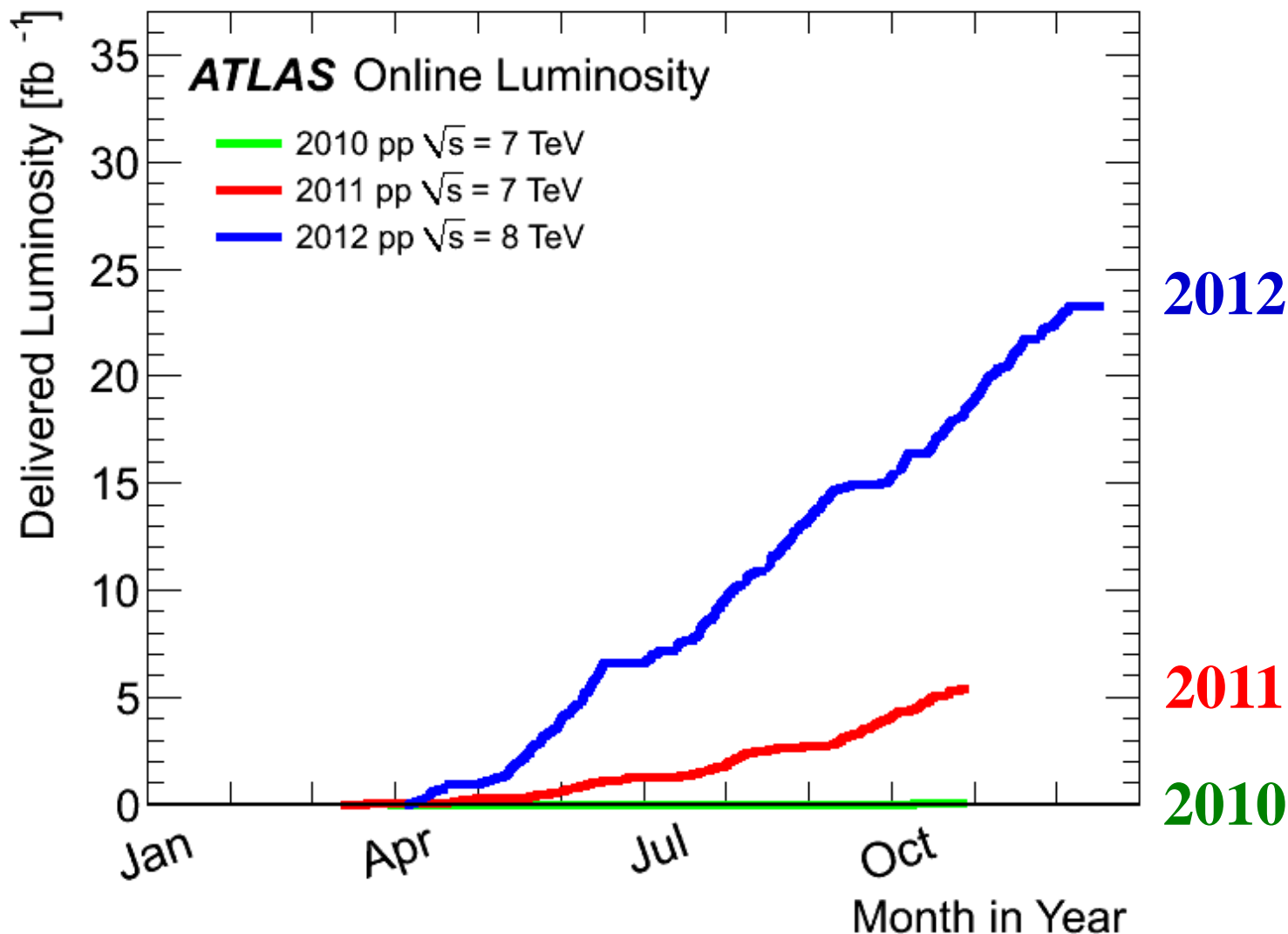
François Englert et Peter Higgs



" 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

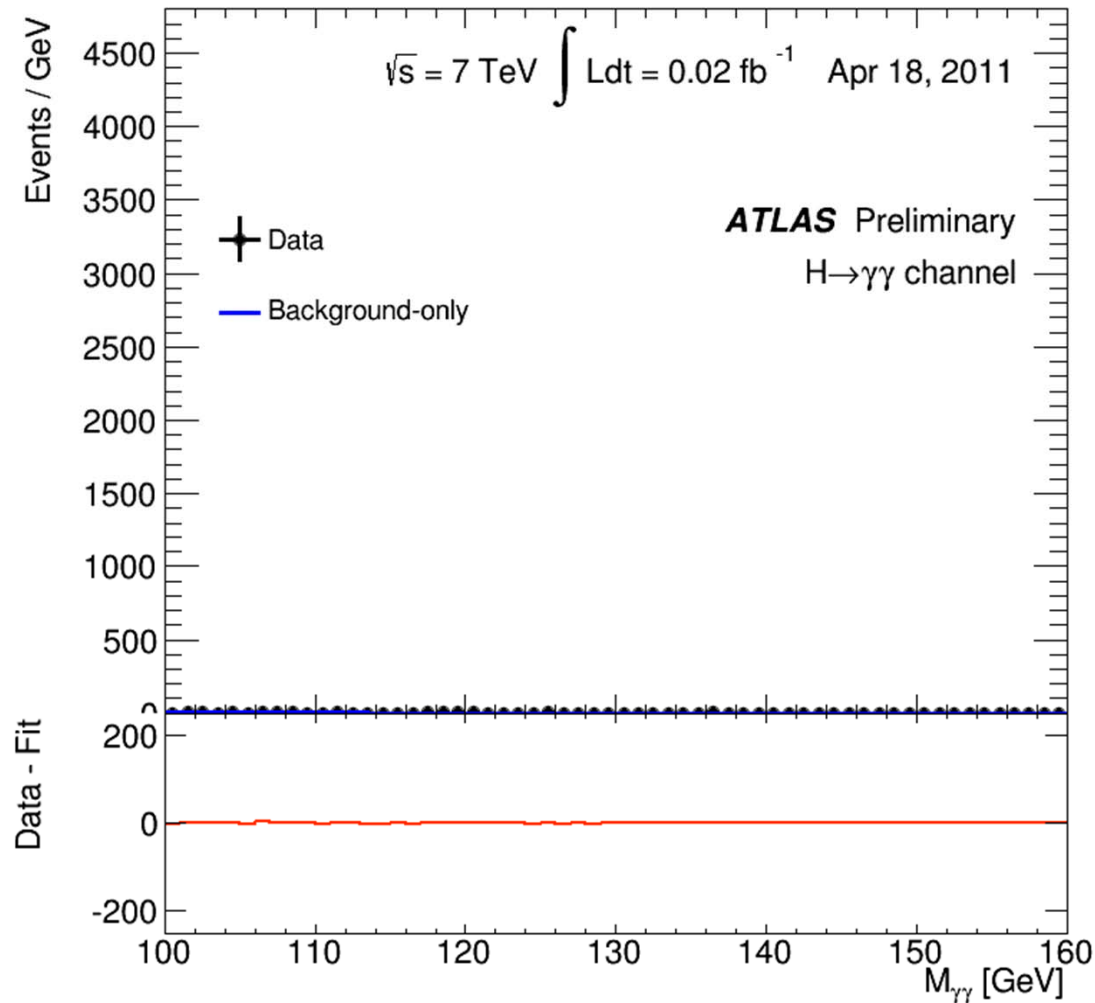
- La « **luminosité** » mesure la **quantité de données récoltées** par une expérience



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

La puissance de la statistique à l'œuvre !

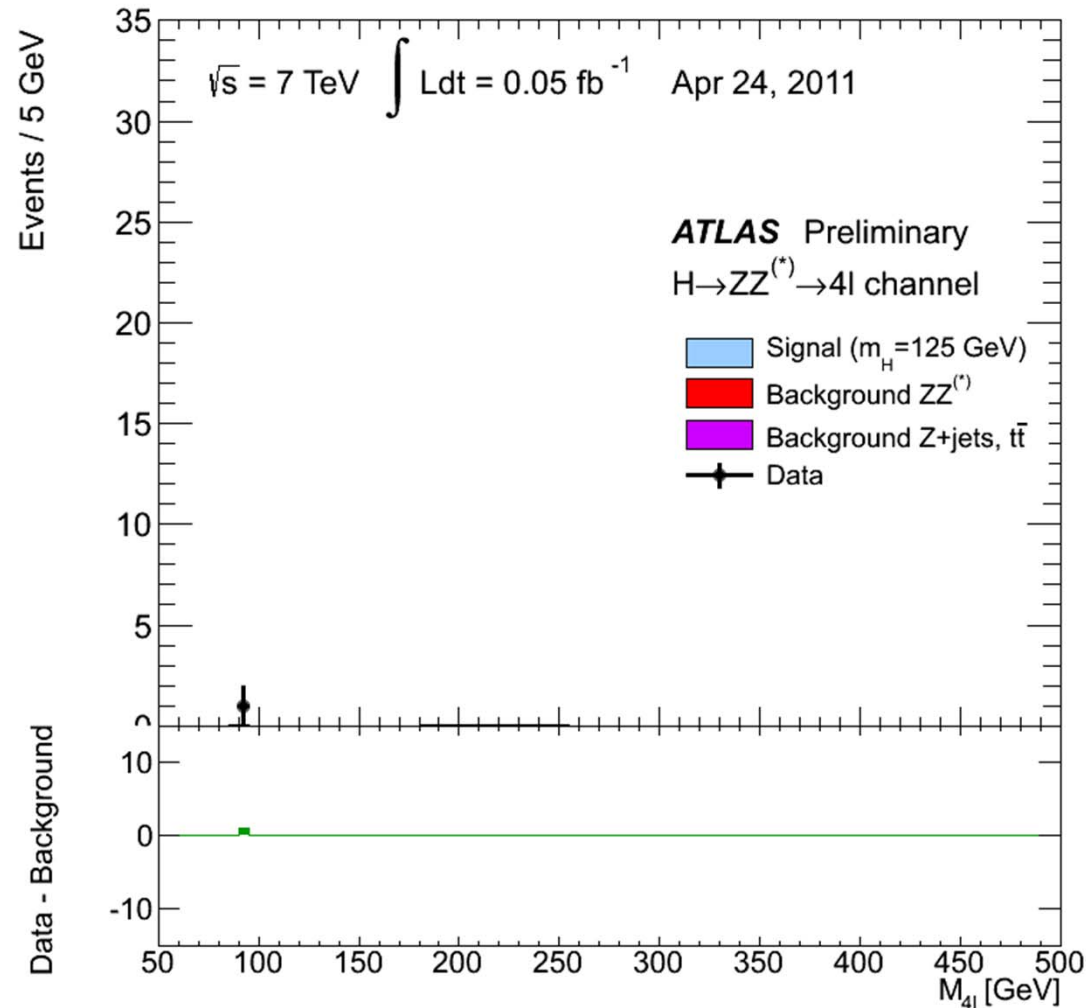
- Le **signal** laissé par « un » **boson de Higgs** sort peu à peu du **bruit de fond** ...



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

La puissance de la statistique à l'œuvre !

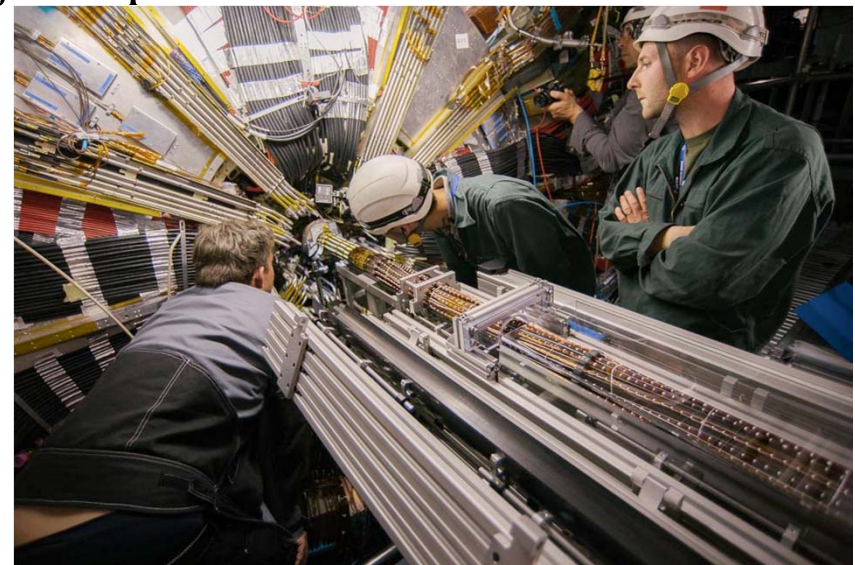
- Le **signal** laissé par « un » **boson de Higgs** sort peu à peu du **bruit de fond** ...



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

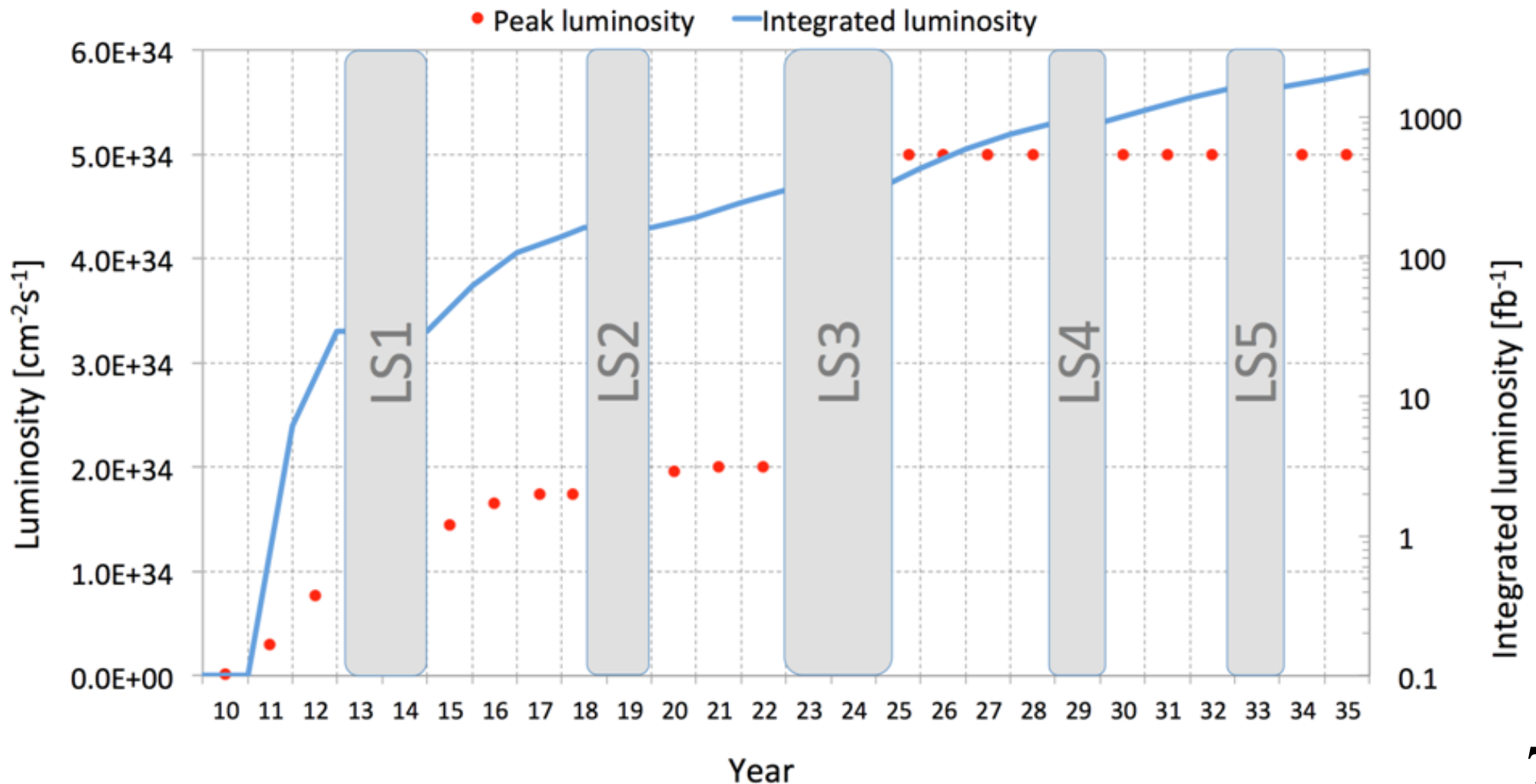
2013-2015 : 1^{er} arrêt longue durée

- **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)



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>

Manifestations et ressources autour du CERN

Exposition au Palais de la Découverte

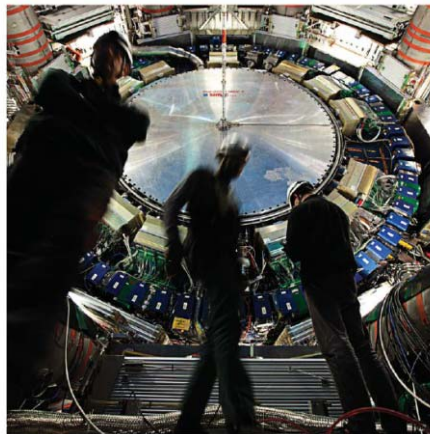
- A Paris, du 17 octobre 2014 au 19 juillet 2015



- <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

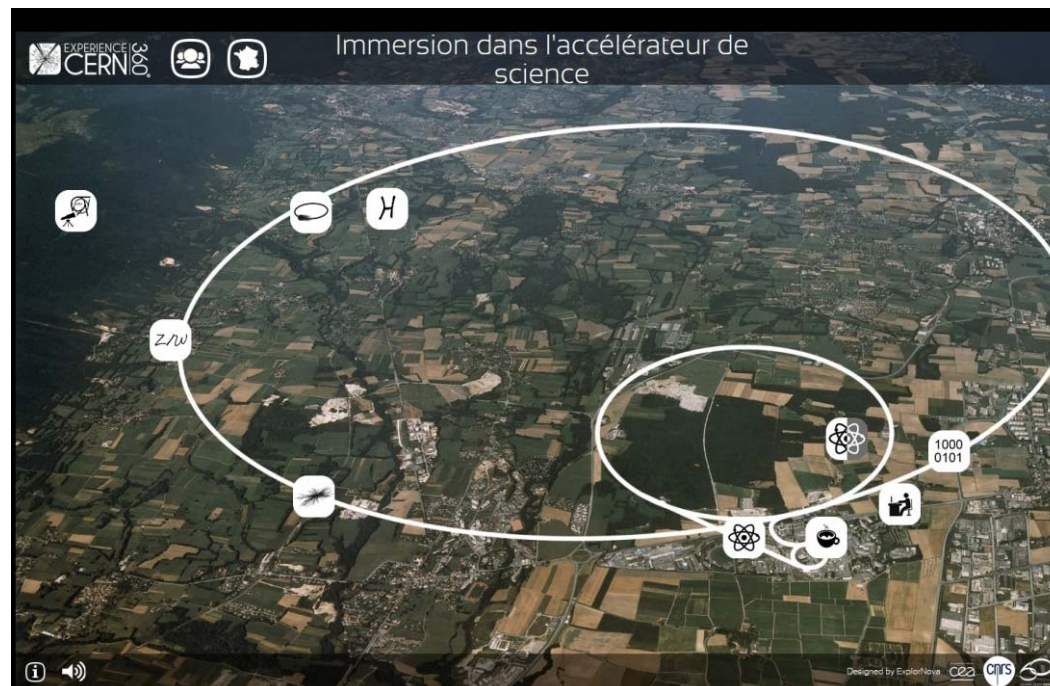


- Plus d'informations :

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 dernier
 - Projections en salles de cinéma et dans les établissements scolaires
- Distributeur en France : Jupiter Communications
 - <http://www.jupiter-films.com/film-actualites.php?id=46>



Pour en savoir plus

Education et vulgarisation à l'IN2P3 et au LAL

- Des pages web de l'IN2P3-CNRS : l'Ecole des deux infinis
http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulyce/introduction.htm
http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulyce/media/ecole2infinis.pdf
- L'affiche des composants élémentaires de la matière
- La revue de vulgarisation «Élémentaire»
<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr>
→ Nouveau projet : le « Quark poker »
- Le « Passeport pour les 2 Infinis »
<http://www.passeport2i.fr>
- Le site LHC-France
<http://www.lhc-france.fr>
- Etc.



L'Ecole des Deux Infinis de l'IN2P3



**Conférences dans les lycées:
la science en partage**

Les conférences dans les lycées (Nepal*) constituent avant tout une rencontre privilégiée entre les jeunes et les physiciens de l'IN2P3 et du CEA. L'occasion pour les lycéens:

- d'explorer la physique nucléaire, la physique des particules ou la cosmologie;
- de discuter ouvertement avec les chercheurs ou ingénieurs de la recherche et ses métiers.

Elles peuvent être éventuellement complétées par une visite dans un laboratoire de l'Institut.

Les conférences Nepal ont reçu l'aval de la Direction des lycées et collèges et du doyen de physique-chimie de l'inspection générale, ainsi que le soutien de l'Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC), anciennement Union des physiciens (UDP).



pluie de rayons cosmiques sur les lycées!
Cosmos à l'école :

À tout instant la Terre est bombardée par des particules en provenance de l'Univers. Étudier ces particules au lycée, c'est possible!

Fruit d'un partenariat entre le dispositif ministériel *Sciences à l'école* et l'IN2P3, l'opération *Cosmos à l'école* permet l'étude des rayons cosmiques grâce à des détecteurs mis à disposition dans les lycées.

Chaque lycée participant reçoit par ailleurs le parrainage d'un chercheur de l'IN2P3 et un accompagnement pédagogique par le réseau de *Sciences à l'école*.

Des cahiers pédagogiques et de ressources sont disponibles sur le site de *Sciences à l'école*: www.sciencesalecole.org

**Masterclasses:
chercheurs d'un jour**

En quoi consiste le quotidien d'un physicien travaillant sur une expérience du LHC, l'accélérateur de particules le plus puissant au monde?

Faire partager à des lycéens pendant une journée la vie de chercheur en physique des particules et les initier aux méthodes de travail des grandes collaborations internationales, tel est l'objectif des *Masterclasses*.

Les sessions se déroulent au sein d'un laboratoire de l'IN2P3. Au programme : un cours d'introduction à la physique des particules, l'analyse de données réelles produites au Cern* à Genève puis la mise en commun des résultats des élèves avec ceux des classes d'autres pays grâce à une vidéoconférence animée depuis le Cern. Les résultats finaux sont confrontés à ceux des physiciens.

Les *Masterclasses* sont pilotées au niveau européen par le Cern et le réseau Eppog. Elles sont coordonnées en France par l'IN2P3. Actuellement, 90 instituts de 15 pays participent à ce projet. www.physicsmasterclasses.org



Labos ouverts : au cœur de la science

C'est ici l'occasion de découvrir les lieux où se « fait » la science. Les élèves pourront rencontrer les chercheurs, les ingénieurs ou les techniciens de l'IN2P3 qui travaillent auprès des accélérateurs, sur des projets spatiaux, des expériences sous-marines, dans des laboratoires souterrains...

Dernière ces expériences et instruments hors-norme, les recherches portent aussi bien sur les particules les plus élémentaires que sur la matière noire, les neutrinos, les rayons cosmiques, l'énergie noire, la première lumière de l'Univers, les rayons cosmiques, les trous noirs...

* « Noyaux et particules au lycée »

**Formations d'enseignants:
dépasser les frontières**

Depuis plusieurs années, le Cern organise chaque année, en partenariat avec l'IN2P3 et le dispositif *Sciences à l'école*, un stage de formation national destiné aux enseignants souhaitant développer des projets autour de la physique des particules. D'autres stages d'un à trois jours sont également mis en place par les laboratoires de l'IN2P3 sur tout le territoire et couvrent de nombreux thèmes: les particules élémentaires, le nucléaire et ses applications, les mystères de l'Univers...

Passeport pour les deux infinis: un outil, un réseau



Construit autour d'un livre réversible qui dresse un panorama des sujets liés au monde des particules et de l'astrophysique, *Passeport pour les deux infinis* c'est:

- un outil pédagogique adapté aux programmes;
- un dispositif invitant les enseignants à développer avec leurs élèves des activités dans le domaine de la physique de l'infiniment petit ou de l'infiniment grand;
- l'opportunité pour les élèves de rencontrer des chercheurs, visiter de hauts lieux scientifiques et voyager dans l'univers des particules.

Au *Passeport pour les deux infinis* est associée une plate-forme d'échanges en ligne où les professeurs peuvent obtenir le livre gratuitement: www.passeport2i.fr

*Cern : Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Conférences dans les lycées

Visites de laboratoires

Masterclasses

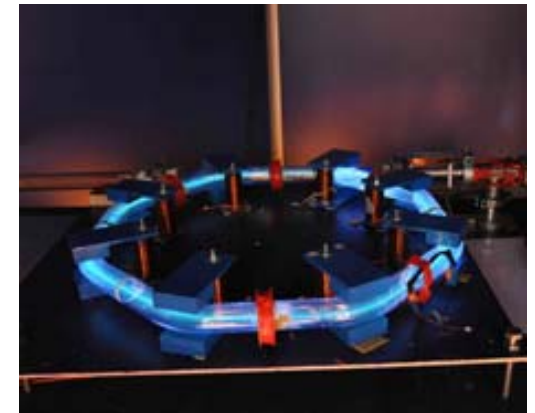
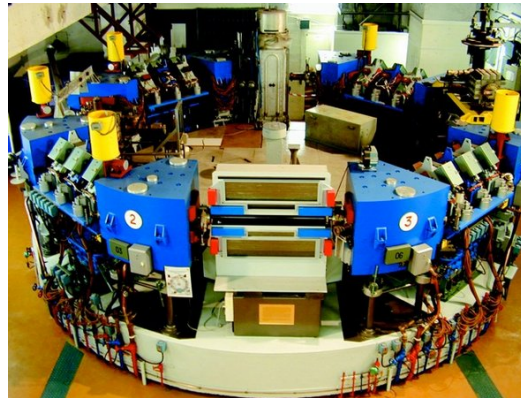
Cosmos à l'Ecole

Passeport pour les deux infinis

Formations d'enseignants

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 « **Quark Poker** »
→ **NOUVEAU !!!**
- Le « **Passeport pour les 2 Infinis** »
<http://www.passeport2i.fr>
- **Sciences-ACO**
<http://www.sciencesaco.fr>
- L'**affiche des composants élémentaires** de la matière



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



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 Quark poker



- Où comment découvrir les particules élémentaires et leurs interactions de manière ludique : en jouant aux cartes et en s'amusant
- Le quark poker
 - 64 cartes représentant chacune une particule élémentaire
 - Des règles basées sur les lois de la physique
 - Plusieurs jeux possibles : 7 familles, poker, collisions
- Livre d'accompagnement
 - Passerelle entre les cartes et la physique
 - Complément au jeu
 - Peut se lire indépendamment
- Projet en cours de développement
- Démonstration et test dans des classes de lycée
→ Contact : elementaire@lal.in2p3.fr

