

# Particules élémentaires et interactions fondamentales

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

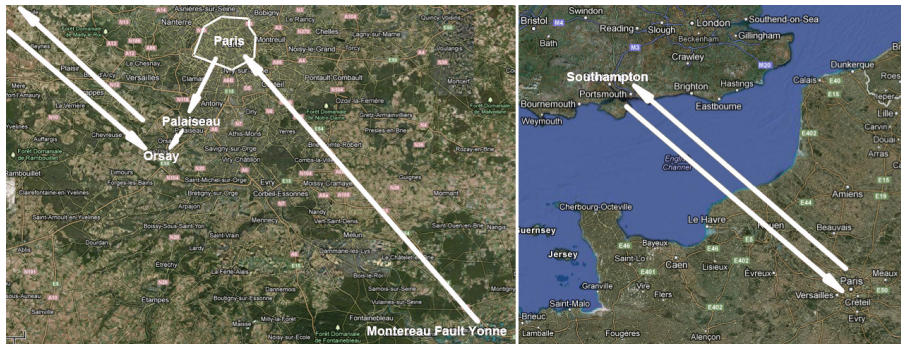
Laboratoire de Physique Théorique  
CNRS & Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

PAF Académie de Versailles, Orsay, 20 Février 2017



# Préambule

- 42 ans, directeur de recherche CNRS
- Thèse à Orsay (Institut de Physique Nucléaire)
- 2 ans de post-doctorat à Southampton (Grande-Bretagne)
- Actuellement, directeur du Lab. de Physique Théorique (Orsay)



Mots-clés: Physique des particules, Physique théorique,  
Physique des saveurs, Asymétrie particule/antiparticule, Vulgarisation

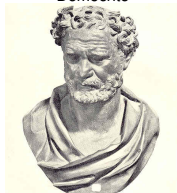
# Entrée en matière

# Physique des particules

Au fond, de quoi la matière est-elle constituée ?

- Antiquité (philosophe grec)  
air, eau, terre, feu ou atomes ?
- 18-19ième siècle (chimiste)  
molécules faites d'atomes
- 19-20ième siècle  
(physicien(ne) atomique & nucléaire)  
électrons et noyaux atomiques
- 21ième siècle  
(physicien(ne) des particules)  
particules élémentaires

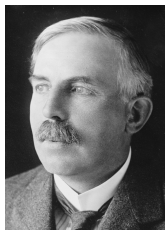
Démocrite



Lavoisier



Rutherford

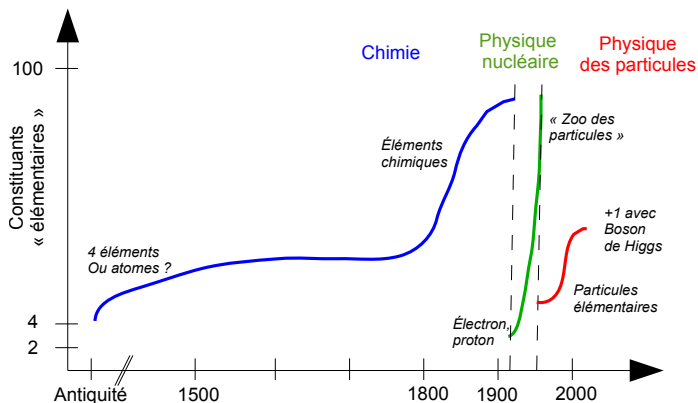


Weinberg





# A la bourse des particules élémentaires



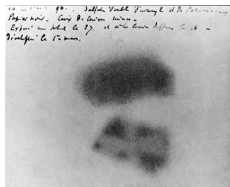
- les "krachs" ne sont pas rares. . .
- . . . du fait de changements de paradigmes  
(évolution de la notion de constituants élémentaires)

# La classification périodique des éléments

A hand-drawn periodic table of elements. The elements are arranged in rows and columns, with their atomic numbers and chemical symbols written in each cell. The table is color-coded with blue, yellow, and red borders. The elements are: H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lw.

- proposée par Mendeleïev en 1869
- basée sur les résultats expérimentaux de l'époque
- avec de nombreux emplacements vides (remplis depuis !)
- heuristique, sans connaître la structure électronique des atomes

# Au tournant du 20ème siècle

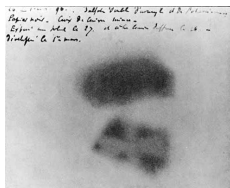


1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement

⇒ découverte de la **radioactivité**

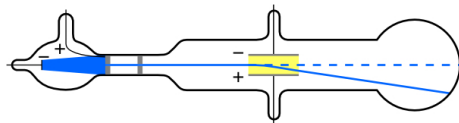
(H. Becquerel, P. et M. Curie)

# Au tournant du 20ème siècle



1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement  
⇒ découverte de la **radioactivité**  
(H. Becquerel, P. et M. Curie)

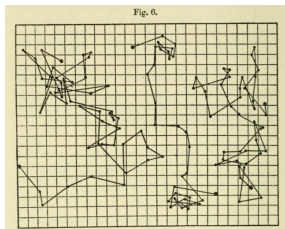
1897: rayonnement cathodique infléchi par  $\vec{E}$   
(J.J. Thomson)



- charge négative
- rapport charge/masse très élevé (corpuscules très légers ou très chargés)
- indépendant du matériau utilisé

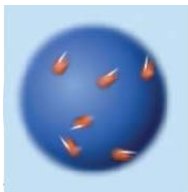
⇒ **l'électron**, constituant de l'atome

# L'hypothèse atomique



- mouvement aléatoire de pollen dans l'eau (R. Brown 1827)
- due aux collisions du pollen avec les molécules d'eau (A. Einstein, 1905, vérifié par J. Perrin, 1908)

avec des diverses visions sur le rôle de l'électron  
(à présent, une probabilité de présence autour du noyau)

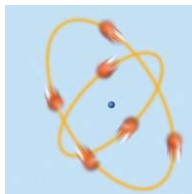


(1903)

Thomson



Rutherford (1911)

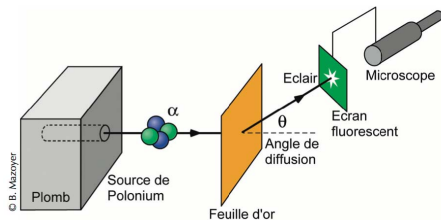


Bohr (1913)



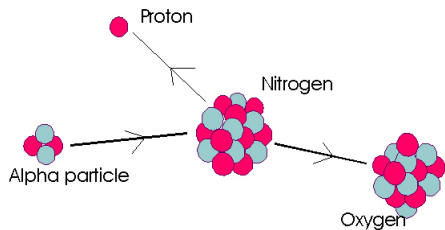
Vision moderne

# Du plein avec du vide



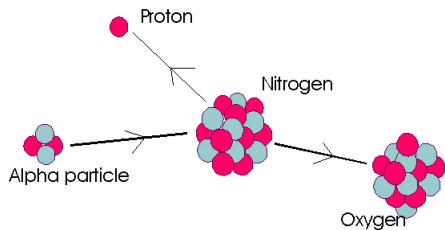
- en 1909, Geiger, Marsden, Rutherford frappe une feuille d'or avec des noyaux d'hélium (particules  $\alpha$ )
  - la plupart traverse la feuille sans problème
  - une petite fraction “rebondit” sur un obstacle de petite taille
- ⇒ le noyau atomique (10000 fois plus petit que l'atome)

# Le proton et le neutron



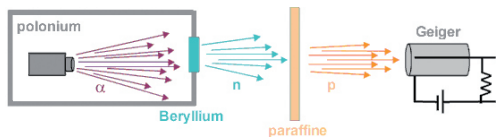
1917-1919: première  
réaction nucléaire  
 $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + p$   
 $\Rightarrow$  noyau d'*H* ou **proton**  
constituant de tous les  
noyaux (E. Rutherford)

# Le proton et le neutron



1917-1919: première réaction nucléaire  
 $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + p$   
 $\Rightarrow$  noyau d'*H* ou **proton**  
constituant de tous les noyaux (E. Rutherford)

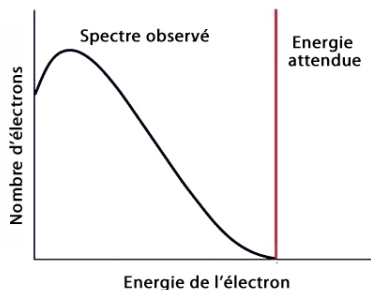
1932: nouveau rayonnement inconnu, fait de particules de masse quasi-identique au proton, mais neutres



$\Rightarrow$  **neutron** (J. Chadwick, prédit par Rutherford en 1920)



# Le neutrino

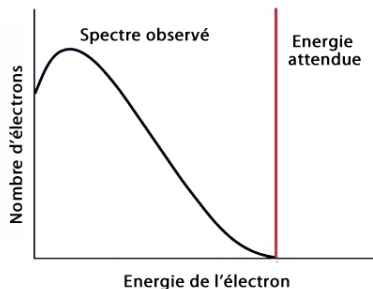


1930: si les désintégrations  $\beta$  conservent l'énergie,  $X \rightarrow Y + e^-$  aboutirait à  $E_e$  fixe

En fait  $X \rightarrow Y + e + \nu$ , ce qui explique que les  $e^-$  émis n'ont pas tous la même  $E$  !

$\Rightarrow$  **neutrino** imaginé par W. Pauli, décrit par E. Fermi

# Le neutrino



1930: si les désintégrations  $\beta$  conservent l'énergie,  $X \rightarrow Y + e^-$  aboutirait à  $E_e$  fixe

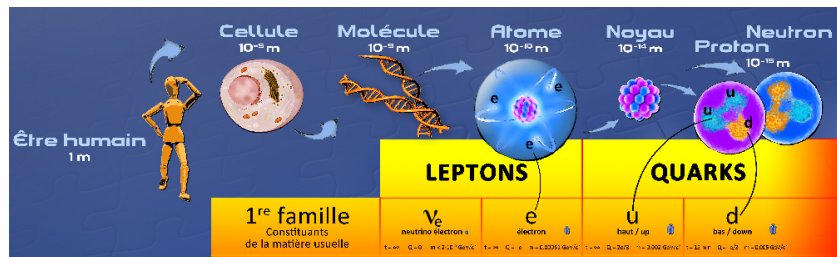
En fait  $X \rightarrow Y + e + \nu$ , ce qui explique que les  $e^-$  émis n'ont pas tous la même  $E$  !

⇒ **neutrino** imaginé par W. Pauli, décrit par E. Fermi

1956 : détection du neutrino électronique par Reines et Cowan auprès d'une centrale nucléaire, selon la réaction  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



# La matière ordinaire



Au tournant des années 1930, 4 constituants

- Protons et neutrons : constituants des noyaux atomiques
- Électrons: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives:  $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$  (15 min)

⇒ la physique nucléaire a poursuivi l'approche de Mendeleïev  
en simplifiant beaucoup le problème !

# Dépasser le reductionnisme

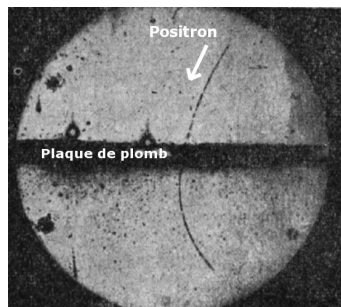
# Des nouvelles de l'espace



Anderson (1932)

- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre

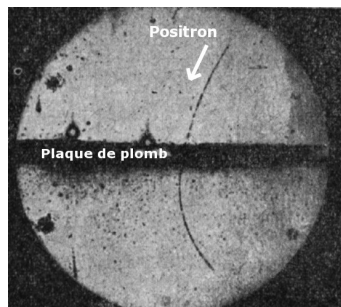
# Des nouvelles de l'espace



## Anderson (1932)

- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- Cliché de chambre à brouillard, pour visualiser particules chargées +  $\vec{B}$
- Même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée : **positron**

# Des nouvelles de l'espace



## Anderson (1932)

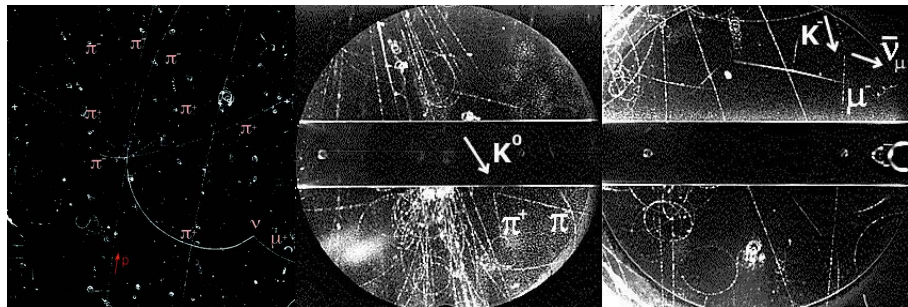
- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- Cliché de chambre à brouillard, pour visualiser particules chargées +  $\vec{B}$
- Même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée : **positron**

## Dirac (1928)

- Equation pour décrire l'électron: Mécanique Quantique + Relativité restreinte
- Solutions supplémentaires, inattendues, vues comme **anti-particule de l'électron**



# Qui a commandé ça ?



Clichés de rayons cosmiques dans des chambres à brouillard

- 1937: muon  $\mu^-$  (sorte d'électron massif et instable)
- 1947: pions  $\pi$ , particules étranges  $K$ ,  $\Lambda^0$

I. Rabi à propos du muon : “Who ordered that ?”



# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...

$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Theta$ ...

$\pi$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ...

$a_0$ ,  $f_0$ ,  $\pi'$ ,  $N^*$ ...

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...

$\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...

$a_0, f_0, \pi', N^*$ ...

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...

$\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...

$a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)



Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...  
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...  
 $a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, je serais devenu botaniste !*



# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)



Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...  
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...  
 $a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, je serais devenu botaniste !*

Gell-Mann et Zweig (1964): les **quarks**, constituants de toutes ces particules pas si élémentaires que cela:  $p = uud$ ,  $n = udd$ ,  $\Lambda^0 = uds$

# Les quarks

Années 1950: trop de part. "élémentaires" ( $p$ ,  $n$ , pion, kaon,  $\Lambda^0$ ...)



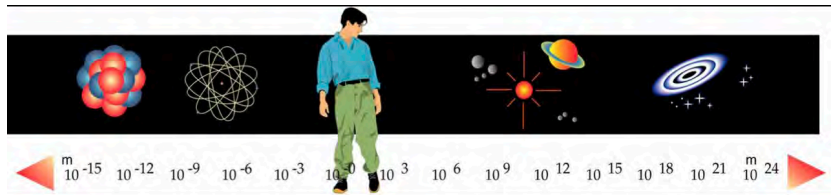
Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...  
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...  
 $a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, je serais devenu botaniste !*

Gell-Mann et Zweig (1964): les **quarks**, constituants de toutes ces particules pas si élémentaires que cela:  $p = uud$ ,  $n = udd$ ,  $\Lambda^0 = uds$

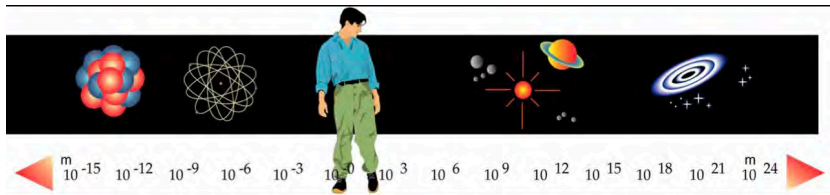
- prédit de nouvelles combinaisons, et leurs masses et propriétés
- sous-structure du proton confirmée en 1968 ( $e^-$  sur  $p$  déviés)
- mais d'où vient ce quark étrange ? et le muon ?

# Monter en énergie, diminuer en taille

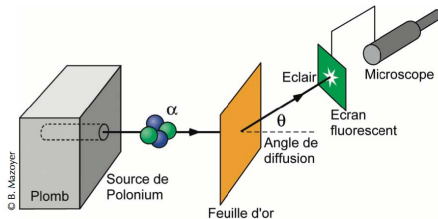


- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' $E$  de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )

# Monter en énergie, diminuer en taille



- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' $E$  de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )
- ou d'autres projectiles déviés par constituants [cf. Geiger, Marsden, Rutherford qui "voient" le noyau avec  $\alpha$  sur atome d'or]



# Quelques ordres de grandeur

$E$ : accélération d'un électron soumis à 1 volt de différence de potentiel

1 electron-volt:  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )	1-10 MeV
Energie de masse d'un proton	1 GeV
Énergie de collision au LHC	7-14 TeV
Rayons cosmiques	1 MeV à 1000 TeV

$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

Une montée en énergie avec des conséquences inattendues...

Casser ou créer ?

# Dessine-moi une particule

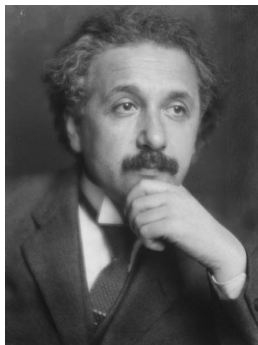


Pas vraiment du billard. . .

- Elles ont parfois les propriétés d'onde (étendue) plutôt que particule (ponctuelle)
- Capables d'atteindre des vitesses proches de celle de la lumière
- Peuvent disparaître en laissant apparaître d'autres particules à leur place (désintégration)

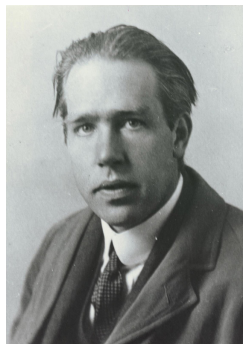
# Un champ de bataille théorique

Albert Einstein



Relativité restreinte  
(Poincaré, Lorentz...)  
 $c$  vitesse de la lumière ( $v$  max)  
objets rapides

Niels Bohr



Mécanique quantique  
(Schrödinger, Heisenberg...)  
 $h$  quantum d'action ( $E \cdot t$  min)  
temps courts

Une cohabitation qui fait des étincelles en physique des particules !



- Espace et temps liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
- dilatation des temps, contraction des longueurs
- notion de référentiel propre (au repos) de la particule

- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - dilatation des temps, contraction des longueurs
  - notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- **Energie, impulsion et vitesse**

$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

- masse: identique dans tout référentiel
- représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée

- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - dilatation des temps, contraction des longueurs
  - notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- **Energie, impulsion et vitesse**

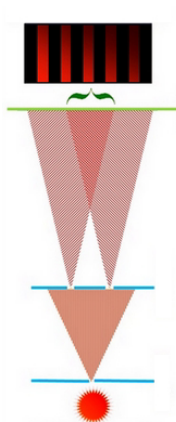
$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

- masse: identique dans tout référentiel
  - représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée
- **Equivalence entre masse et énergie**  $E = Mc^2$ 
    - Possible de convertir de la matière en énergie et vice-versa

# La mécanique quantique

- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique



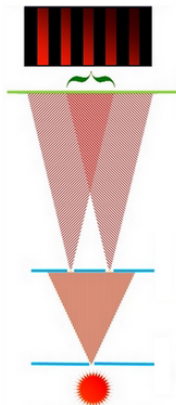
# La mécanique quantique

- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

- Probabilités

- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$



# La mécanique quantique

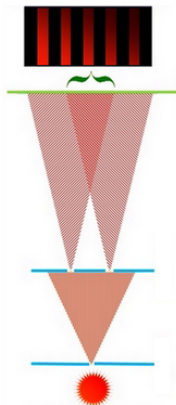
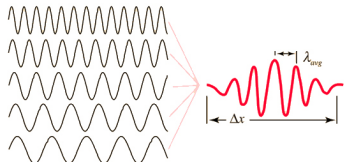
- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

- Probabilités

- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$

- Toute particule décrite par une **superposition** d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



# La mécanique quantique

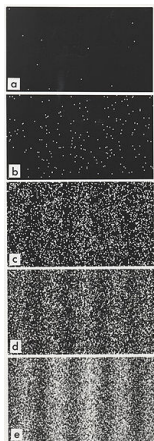
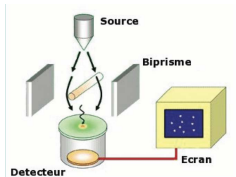
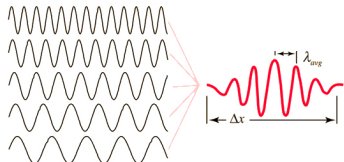
## ● Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

## ● Probabilités

- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$

- Toute particule décrite par une **superposition** d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



# Les adversaires réconciliés

- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant,  $E$  suffisamment élevée pour des effets
  - Relativiste:  $E = mc^2$ , équivalence entre énergie et masse
  - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques





# Les adversaires réconciliés

- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant,  $E$  suffisamment élevée pour des effets
  - Relativiste:  $E = mc^2$ , équivalence entre énergie et masse
  - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



- A chaque particule son antiparticule:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule

# Les adversaires réconciliés

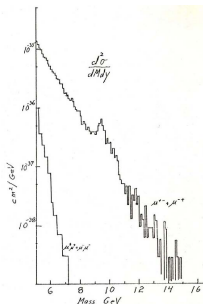
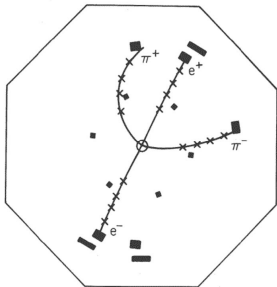
- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant,  $E$  suffisamment élevée pour des effets
  - Relativiste:  $E = mc^2$ , équivalence entre énergie et masse
  - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



- A chaque particule son antiparticule:  $E \leftrightarrow$  particule + antiparticule
- On ne casse plus la matière en sous-constituants. . .
- . . . on crée de **nouvelles particules** lors de collisions violentes

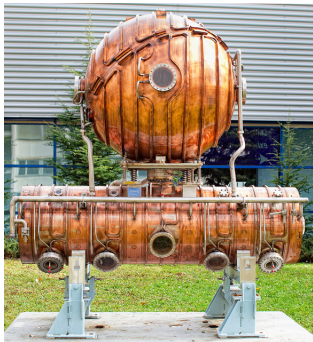
# La révolution de novembre

- Le 11 novembre 1974, SLAC et Brookhaven (sur les deux côtes des USA) annoncent ensemble une nouvelle particule, le  $J/\psi$
- produite dans des collisions  $e^+e^-$ , constituée d'un quark charmé et d'un antiquark charmé ( $c\bar{c}$ )
- suivi dès 1977 d'un cinquième quark  $b$  sous la forme d'un  $\Upsilon$  ( $b\bar{b}$ )
- et d'études sur la "colle" qui maintient ensemble les quarks



# Les trois générations

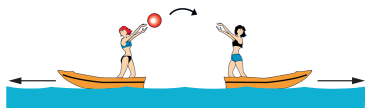
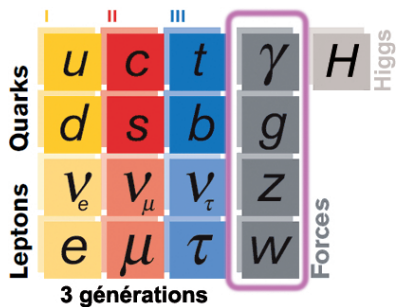
- Dans les rayons cosmiques, puis accélérateurs de particules, des collisions de haute énergie créant de nouvelles particules



	I	II	III		
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$	$H$
	$d$	$s$	$b$	$g$	
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$	
	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$	
	3 générations				Forces

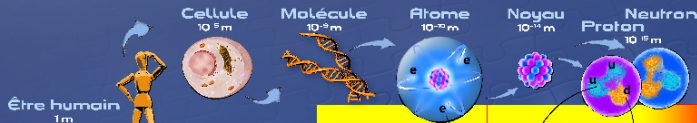
- Copies de la 1ere famille (charge électrique. . .) hormis la masse: top  $t$  60 000 fois plus lourd que up  $u$  (aussi massif qu'atome d'or)
- Instables:  $t$  se désintègre en quelques  $10^{-25}$  secondes

# Les forces fondamentales



- Gravitation  
étoiles, galaxies... [10<sup>-38</sup>]
  - Force faible (bosons W, Z)  
radioactivité  $\beta$  [10<sup>-5</sup>]
  - Electromagnétisme (photon  $\gamma$ )  
électricité, chimie... [10<sup>-3</sup>]
  - Force forte (gluons  $g$ )  
cohésion des noyaux [1]
- 
- 3 interactions sur 4 en termes d'échanges de particules (boson médiateurs)
  - gravitation négligeable [intensité relative subatomique]

# Composants élémentaires de la matière



Être humain  
1m

Terre  
10<sup>7</sup> m

Soleil  
10<sup>9</sup> m

Galaxie  
10<sup>21</sup> m



**1<sup>re</sup> famille**  
Constituants de la matière usuelle

**2<sup>e</sup> famille**  
Réplique plus massive de la 1<sup>re</sup> famille

**3<sup>e</sup> famille**  
Réplique plus massive des 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> familles

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b>	$\nu_e$ neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down	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 participe aussi la séparation entre interactions électrofaible et forte.
<b>2<sup>e</sup> famille</b>	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charm / charm	s strange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b>	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b bottom / bottom / bottom	

## INTERACTIONS FONDAMENTALES

portée

infinie  
10<sup>-15</sup> m  
infinie



Champ de Higgs	
<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Déjà mentionnés dans les parties 1 et 2. Certains ne sont pas stables.
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Force électro, magnétique, cohésion des atomes et des molécules, lumière.
<b>Gluons g</b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire.
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies.

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

Chaque des quatre interactions fondamentales pour se réaliser dans le monde nous est révélée par des études qui impliquent en général, et en particulier les Solés :  
 - la gravitation par exemple par la chute des objets dans le vide ;  
 - la force électromagnétique par exemple par les courants électriques et la lumière ;  
 - la force nucléaire forte par exemple par les interactions entre les nucléons ;  
 - la force nucléaire faible par exemple par les désintégrations radioactives.



Antiproton

## ANTIMATIÈRE

A chaque particule est associée une antiparticule. Les particules et les antiparticules sont toujours produites ensemble, mais dans des circonstances différentes.

Voir les constituants de la matière

# “Voir” les particules élémentaires



- Voir, en science, c'est utiliser un outil plus ou moins complexe. . .
- Dont nous devons interpréter les signaux



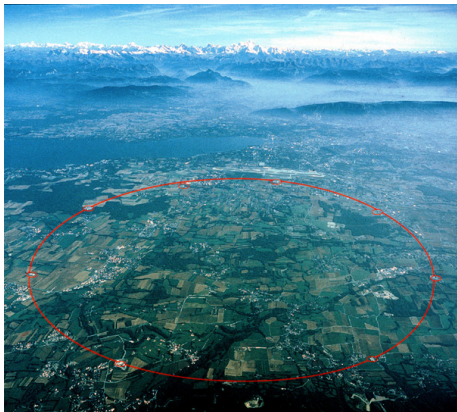


# “Voir” les particules élémentaires



- Voir, en science, c'est utiliser un outil plus ou moins complexe. . .
- Dont nous devons interpréter les signaux
  
- En physique des particules, il s'agit d'un détecteur
- Il peut identifier les particules et déterminer leurs propriétés (masse, charge, désintégrations. . .)
- Encore faut-il avoir des particules à observer !

# Mesurer les particules



*Le CERN près de Genève avec  
le LHC [Large Hadron Collider]*

# Mesurer les particules

- un vrai periph' pour particules

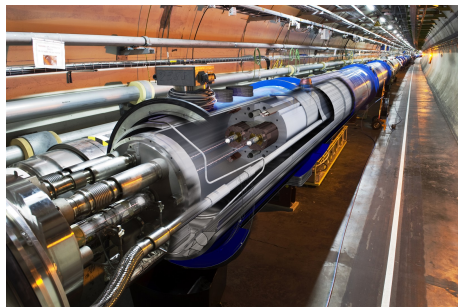


# Mesurer les particules



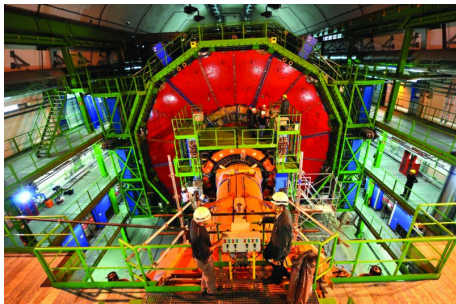
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels

# Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels

# Mesurer les particules



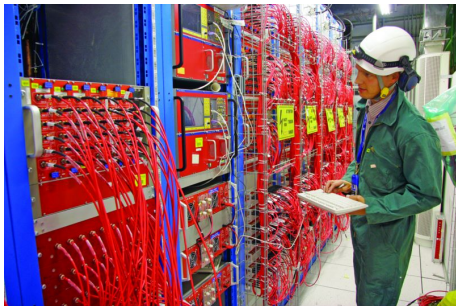
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux

# Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

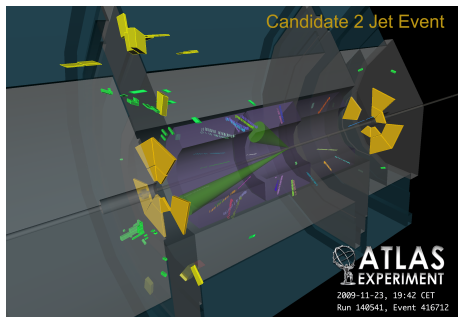
# Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur

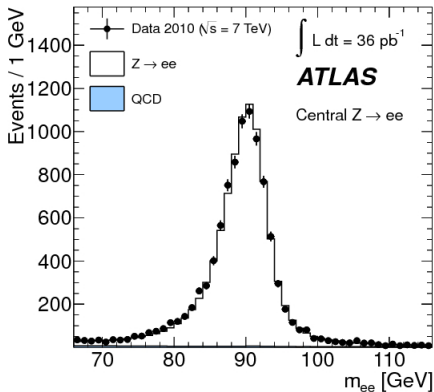


# Mesurer les particules



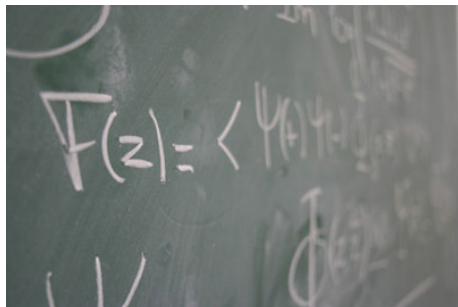
- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

# Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision

# Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision
- reste à interpréter ces données !

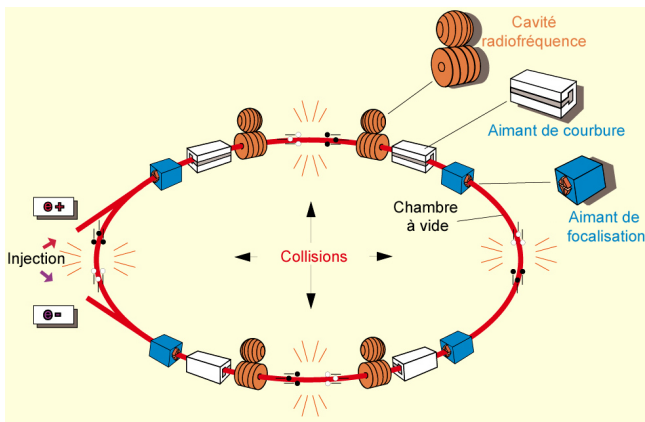
# Mesurer les particules



- un vrai periph' pour particules
- accélérées dans des tunnels
- en certains points, il y a collision des faisceaux
- où se trouve aussi un détecteur
- pour identifier les particules créées au cours de la collision
- reste à interpréter ces données !

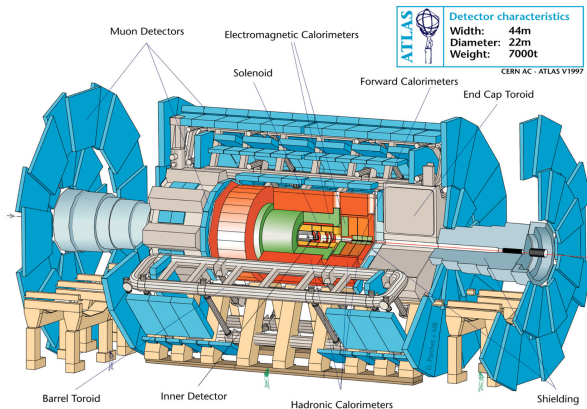
*Exemple: ATLAS au LHC*

# Accélérer



- projectiles chargés (électron, proton) gardés sur une trajectoire "circulaire" par  $\vec{B}$  (aimants dipolaires, quadrupolaires. . .)
- à chaque tour, gagnent de l'énergie par  $\vec{E}$  (cavités radiofréquence)
- mise en paquets séparés les uns des autres

# Détecter

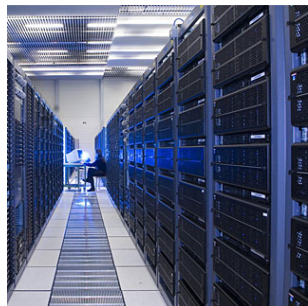
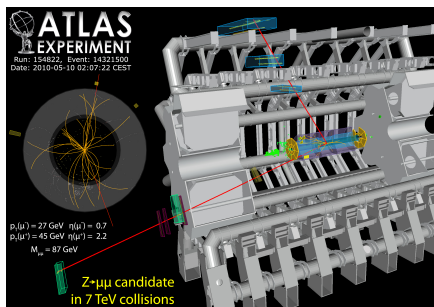


- Plusieurs couches, spécialisées selon le type de particules
- Liquide ou solide perturbé par le passage de particules

# Enregistrer

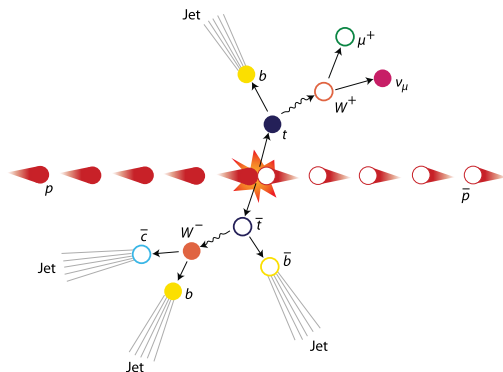
Près de **600 millions** de collisions par seconde dans les détecteurs

- Informations converties en signaux par cartes électroniques
- Évènements intéressants (100 /s) enregistrés et analysés plus tard (prenant 100 mégaoctets/s)
- Fonctionnement en réseau au niveau des équipes, mais aussi des ordinateurs (connectés par une grille de calcul)



# Analyser

- Des processus peu fréquents
- Particules créées étudiées via une cascade de désintégrations



- Théorie: seulement la probabilité pour chaque processus
- Expérience: signal en compétition avec des bruits de fond

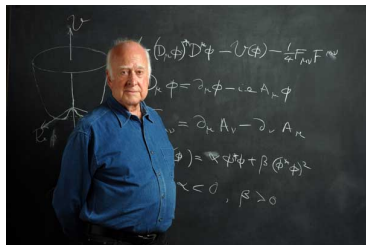
**Statistique** : Indispensable de répéter (très souvent) l'expérience



# Interpréter

Spécialisation importante entre théoriciens et expérimentateurs

- Exp: chacun maîtrise un aspect d'un détecteur (big science)
- Théo: concepts mathématiques et physiques avancés



Chez les théoriciens

- Surtout moyens humains (petites équipes)
- Mais pas seulement papier crayon (beaucoup de résolution numérique par réseaux de PC et superordinateurs)
- Pas seulement interpréter, mais aussi proposer de nouvelles idées

# Des questions ?



# Bonus track

# Anges et démons



## Produire de l'antimatière ?

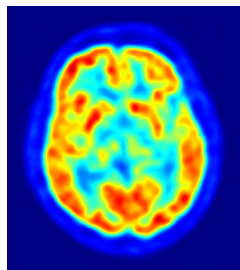
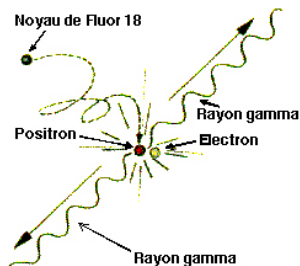
- En 2002, dizaines de milliers d'atomes d'anti-hydrogène au CERN
- soit 1/10 000 000 000 000 000 d'un ballon d'enfant !
- au rythme de production, plusieurs milliards d'années pour avoir de quoi faire une bombe !

## En terme d'énergie ?

- Pas une source : pas de mine d'antimatière – il faut la fabriquer !
- Ni un stockage efficace : rendement pour produire  $\bar{H} \simeq 1/10^{10}$
- Impossibilité théorique de contrôler parfaitement la "production"

Anges et démons est une oeuvre de "pure" fiction  
(pas de science-fiction, et encore moins de science...)

# La tomographie par émission de positrons



- Traceur, molécule contenant un noyau radioactif  $\beta^+$  ...
- ... absorbé par l'organisme vivant et fixé dans un organe
- Un positron émis, qui rencontre un électron environnant ...
- ... ce qui engendre 2 photons gamma dos-à-dos avec  $E_\gamma = m_e c^2$
- ... faciles à détecter en coïncidence pour faire une carte 3D

# Quelques nombres autour du LHC (1)

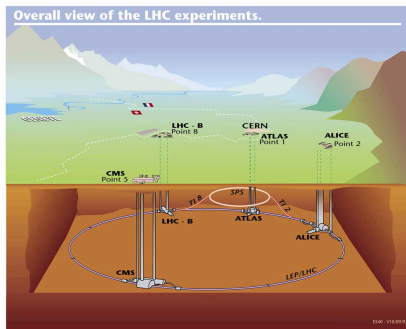
- Sur 27 km de circonférence, 2 faisceaux de protons
- déviés par plus de 1500 **aimants** (de 5 à 7m chacun)
- refroidis à  $-271^{\circ}\text{C}$  (plus froid que l'espace !): **supraconducteurs**



L'énergie emmagasinée dans les **aimants** correspond à

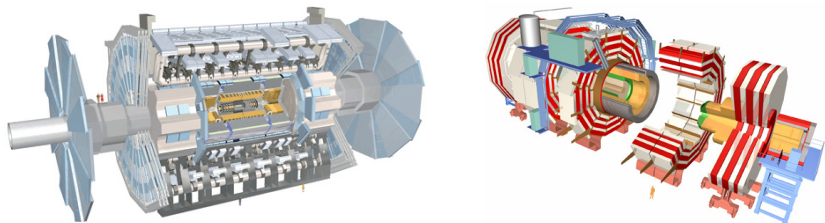
- L'énergie cinétique d'un Airbus A380 voyageant à 700 km/h
- Elle suffirait à faire fondre plusieurs tonnes de cuivre

## Quelques nombres autour du LHC (2)



- Environ 3000 paquets contenant chacun 100 milliards de protons
- Séparés de seulement 25 nanonescondes
- Chaque faisceau concentre l'énergie d'un TGV à 300 km/h
- 10 000 tours/s, un milliard de collisions/s, pendant 20h
- En faisceaux plus fins qu'un cheveu humain lors des collisions
- Les protons restants auront fait 4 fois la distance Terre-Neptune

## Quelques nombres autour du LHC (3)



### ATLAS et CMS (2 des 4 expériences principales)

- 46 m × 25 m × 25 m (ATLAS) et 21 m × 15 m × 15 m (CMS)
- 7000 tonnes (ATLAS) et 12500 tonnes (CMS) [ $\sim$  Tour Eiffel]
- Pour chacune, plusieurs milliers de scientifiques venant d'une quarantaine de pays [le CERN est une vraie ruche !]
- Mais aussi beaucoup d'ingénieurs et de techniciens (cryogénie, électronique, informatique, topographie...)