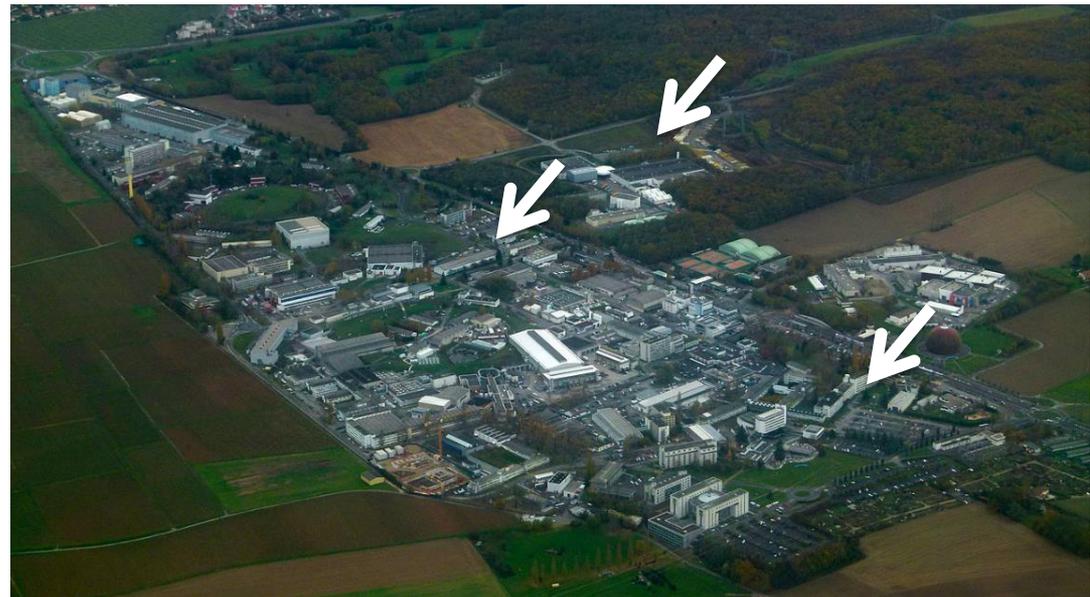


Où vous-êtes

Où vous irez



	Austria		Romania
	Belgium		Serbia
	Bulgaria		Slovakia
	Czech Republic		Spain
	Denmark		Sweden
	Finland		Switzerland
	France		United Kingdom
	Germany	Associate members:	
	Greece		Croatia
	Hungary		Cyprus
	Israel		India
	Italy		Lithuania
	Netherlands		Pakistan
	Norway		Slovenia
	Poland		Turkey
	Portugal		Ukraine



23 pays membres

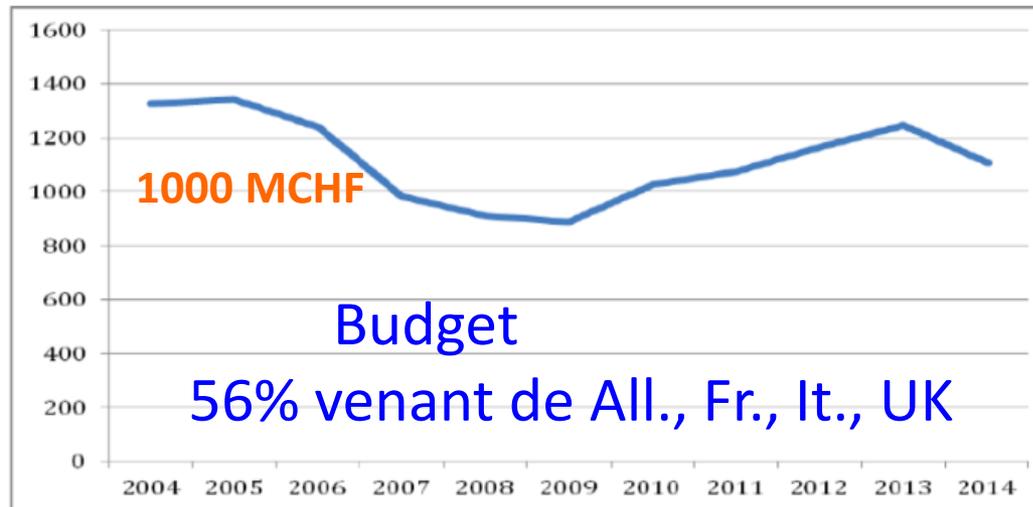
1954: 12 pays fondateurs
Israël (non européen) en 2014

Candidats: Chypre, Slovénie

Pays Associés: Turquie, Croatie
Pakistan, Inde, Ukraine, Lituanie

Observateurs: Japon, Russie,
USA, EU, JINR, UNESCO

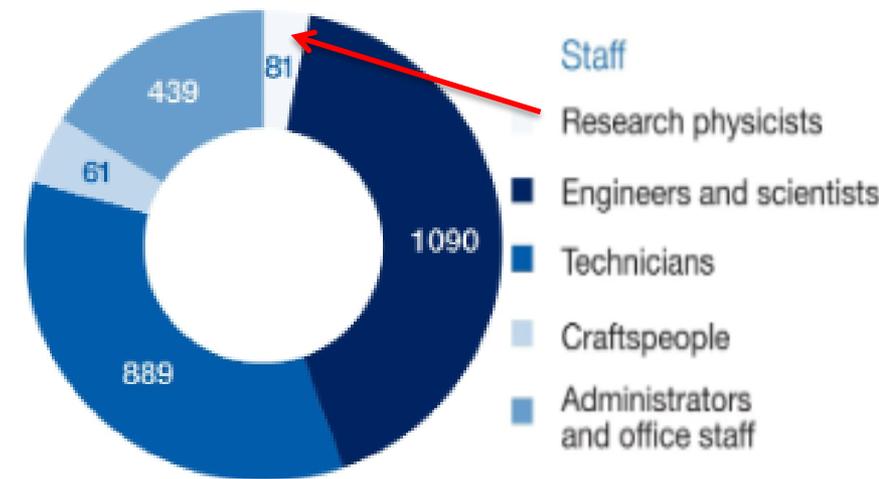
*nouvelle politique
d'élargissement*



CERN Budget, million CHF

Suisse 1 CHF → 6.5 CHF en retour

profil des 2600 employés du CERN

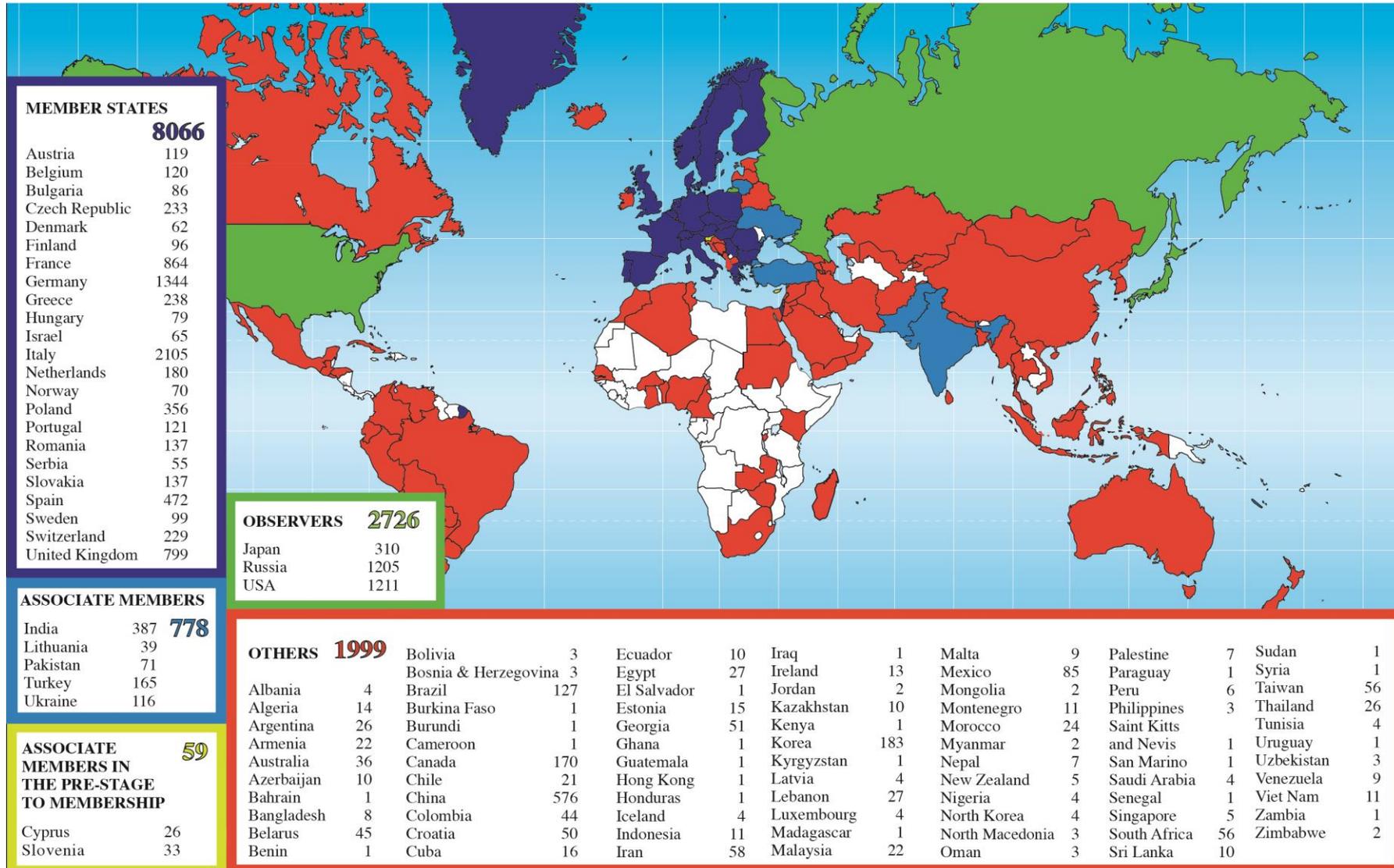


14000 utilisateurs

En fait
Labo mondial

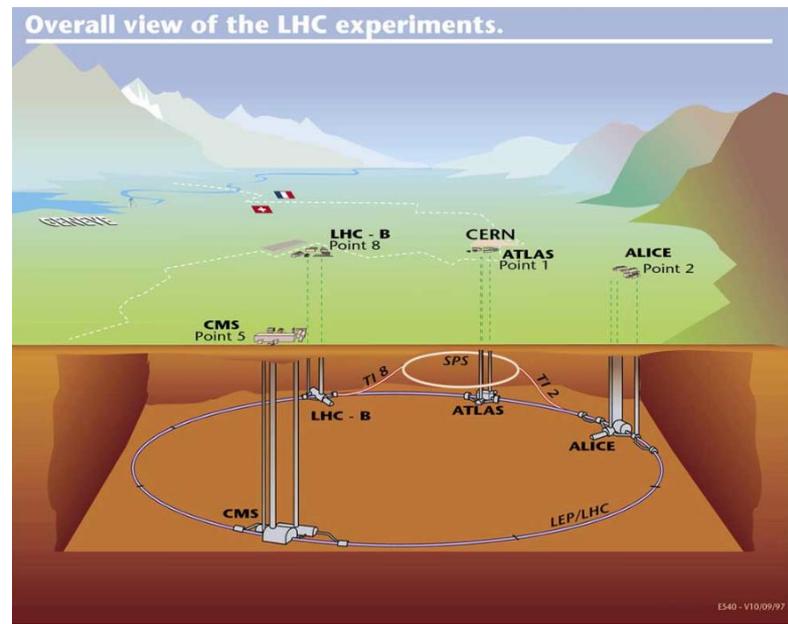
Programmes du CERN
pour les enseignants
pour les étudiants

Distribution of All CERN Users by Nationality as of mid-April 2019



L'expérience du CERN: le rêve, moteur de l'invention

- organisation européenne intergouvernementale dédiée à la recherche fondamentale en Physique des Particules (PP)*
- 23 pays membres européens. Mais déjà labo mondial.*
- budget annuel ~ 1200 millions de francs suisses
cf hôpital de Genève ou ETH Zurich, mais fait plus de la moitié de la PP mondiale*
- ~ 2600 employés: physiciens "applied", ingénieurs, techniciens.*
- ~14000 utilisateurs, de ~ 100 pays, ~ 1/3 de pays non membres*
- rôle important de formation des jeunes, de promotion de technologies de pointe.
3/4 du budget du CERN "revient" à l'industrie. France ! Suisse !*
- gouvernance : Conseil et Direction. Comités scientifiques: jugement des pairs.
Défi de la gestion des grands projets et expériences: le « modèle du CERN »*
- le CERN fait de la physique fondamentale: son "produit" est de la connaissance sur l'identité et les interactions des constituants de base de la matière. Cela nourrit d'autres domaines, comme la Cosmologie*

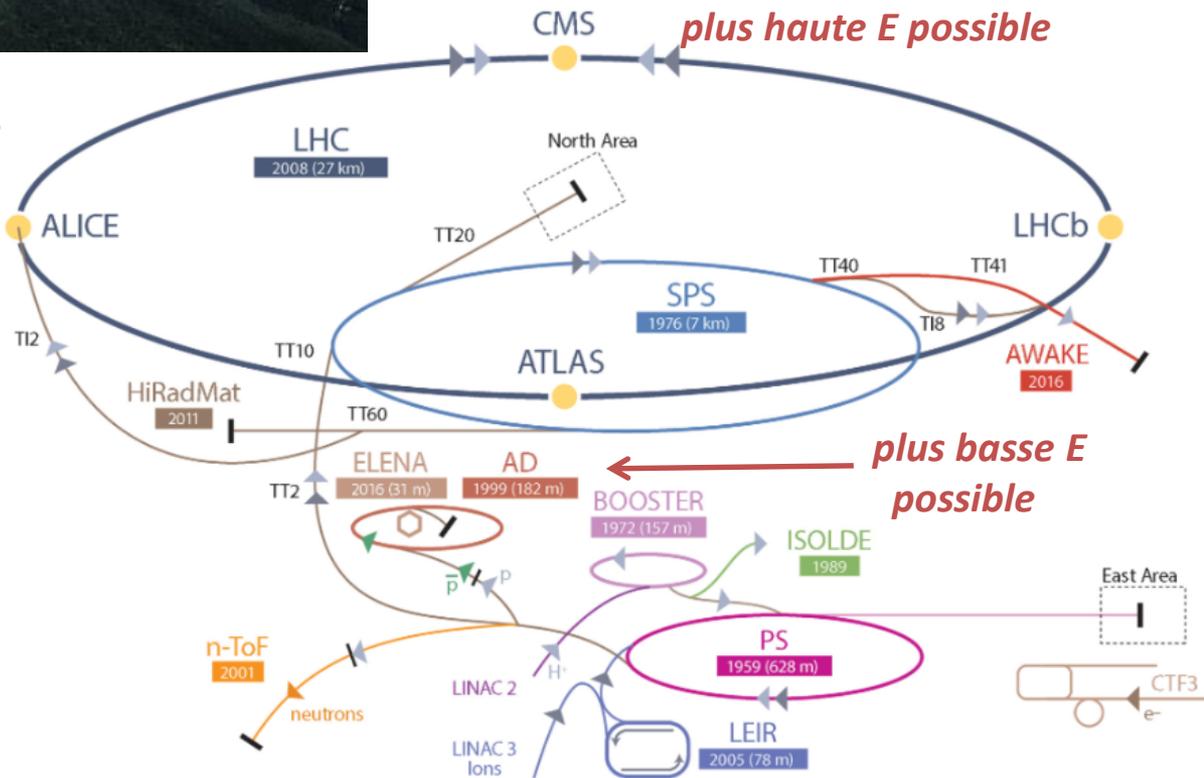


grandes machines souterraines

LHC \approx - 100 m

- posées sur rocher solide
- alignement: 0.3 mm sur 27 km
- problème de radiation évité
- paysage préservé

les "anciennes" machines sont les injecteurs des suivantes
 → réutilisation maximale des infrastructures et du savoir faire



Que fait le CERN?

→ “accélération” des particules
“projectiles”: e^\pm , p , \bar{p} , etc

→ collisions entre projectiles:
l'énergie cinétique devient masse
“ $E = mc^2$ ”

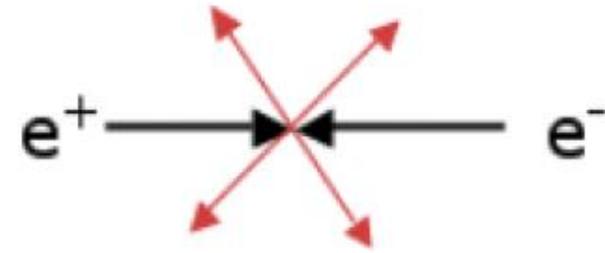
Des particules “nouves” sont créées

Au LHC l'intérêt est dans les collisions “dures” entre constituants des protons, quarks et gluons

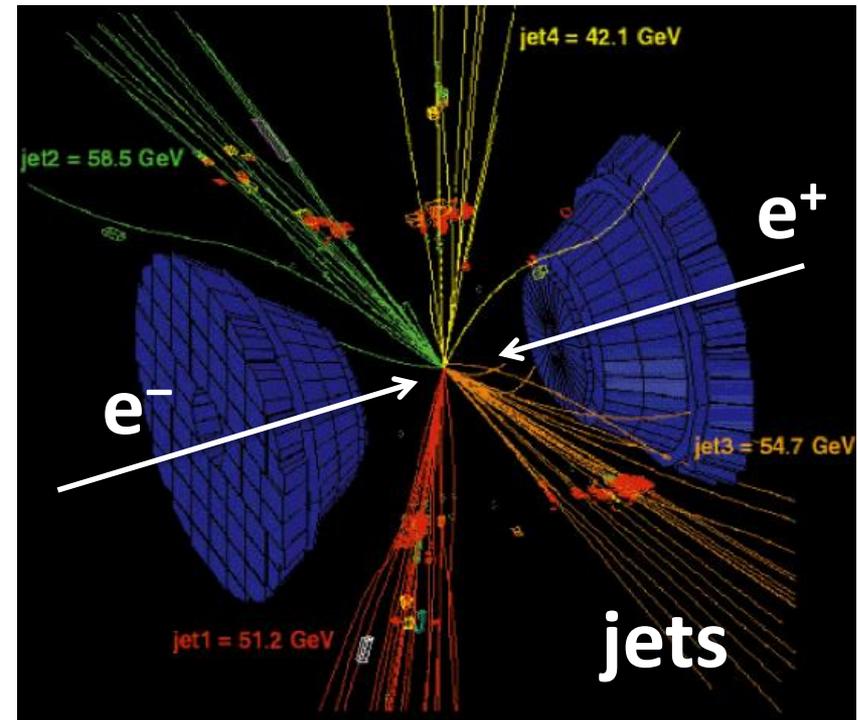
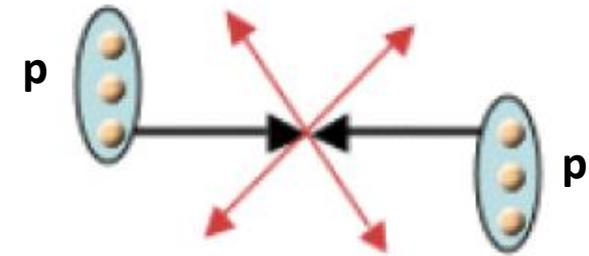
→ notre travail: détection, mesure et identification de ces particules

→ beaucoup de technologies de pointe nécessaires

LEP



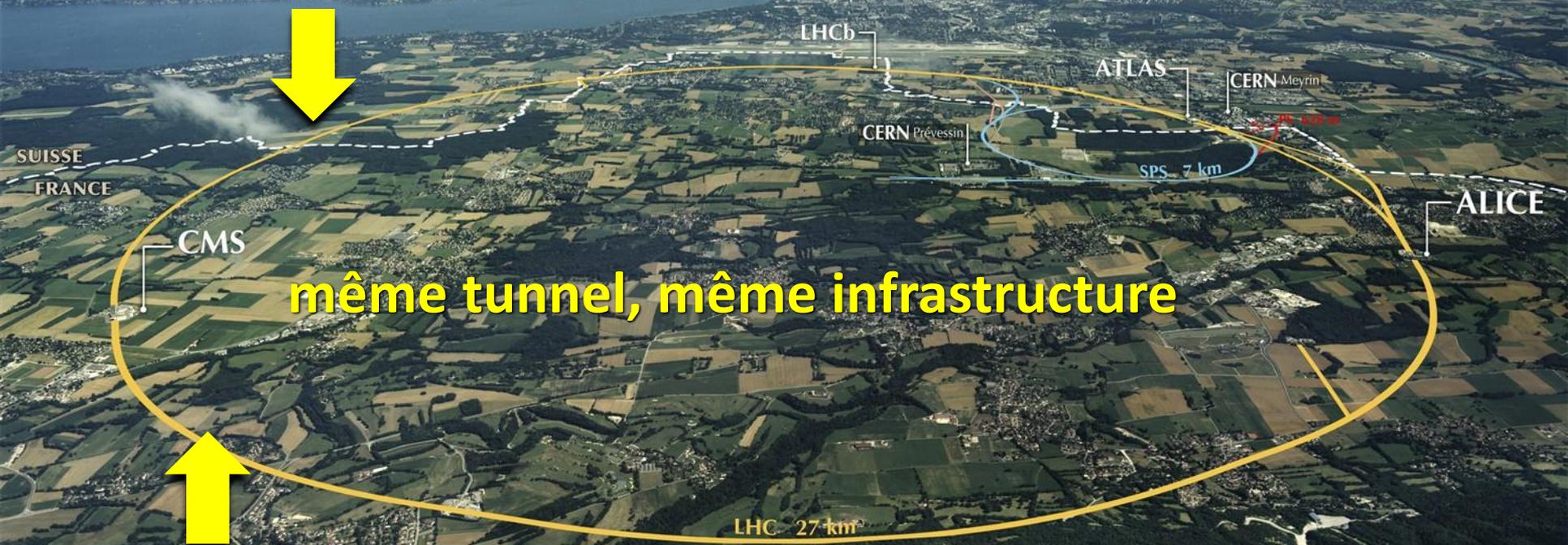
LHC



1989-2000 LEP (Large Electron Positron collider)

électrons contre positrons (anti-électrons)

énergie maximum par faisceau de 100 GeV (Giga = 10^9 eV)



même tunnel, même infrastructure



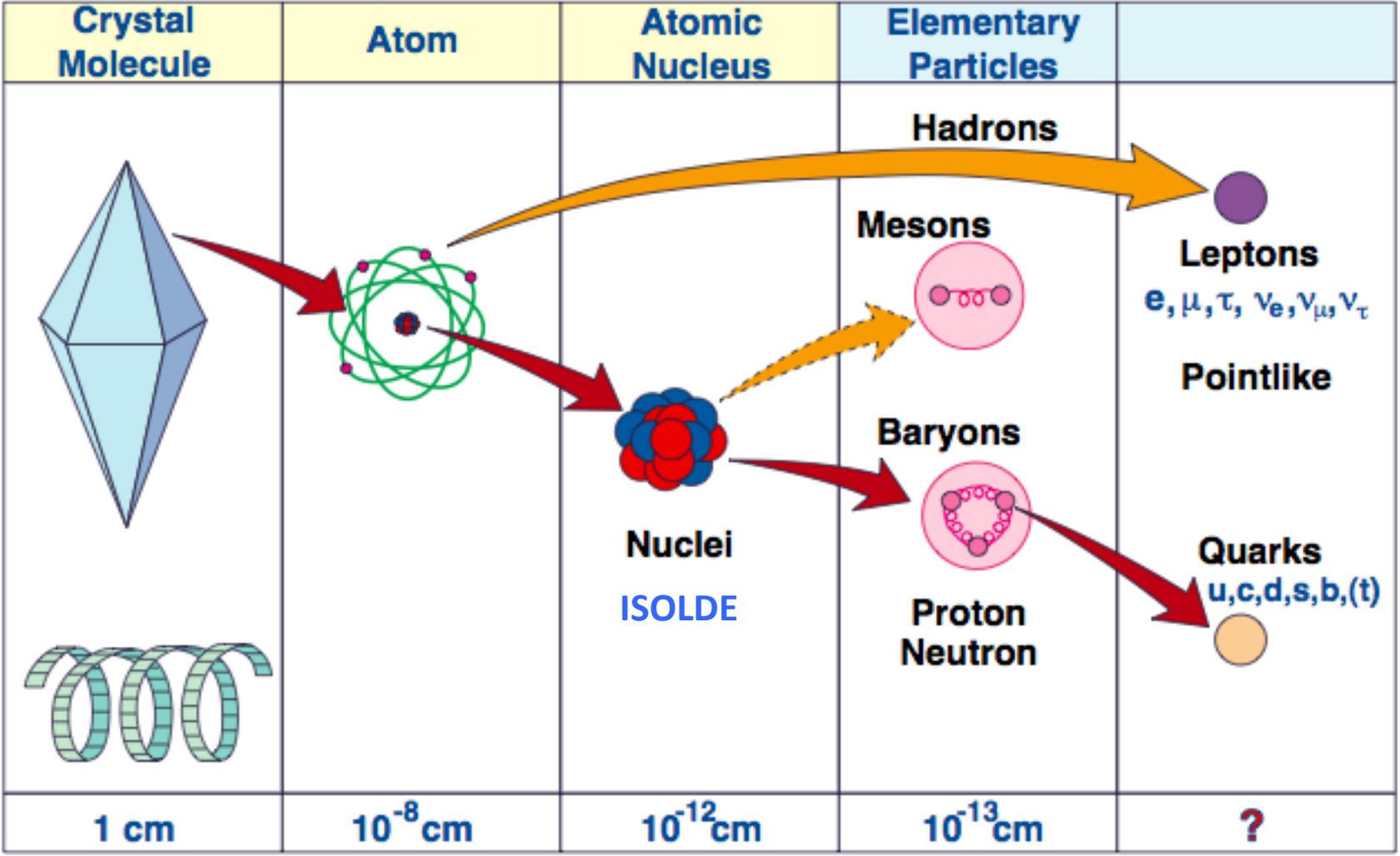
2007- ???

LHC (Large Hadron Collider): protons contre protons

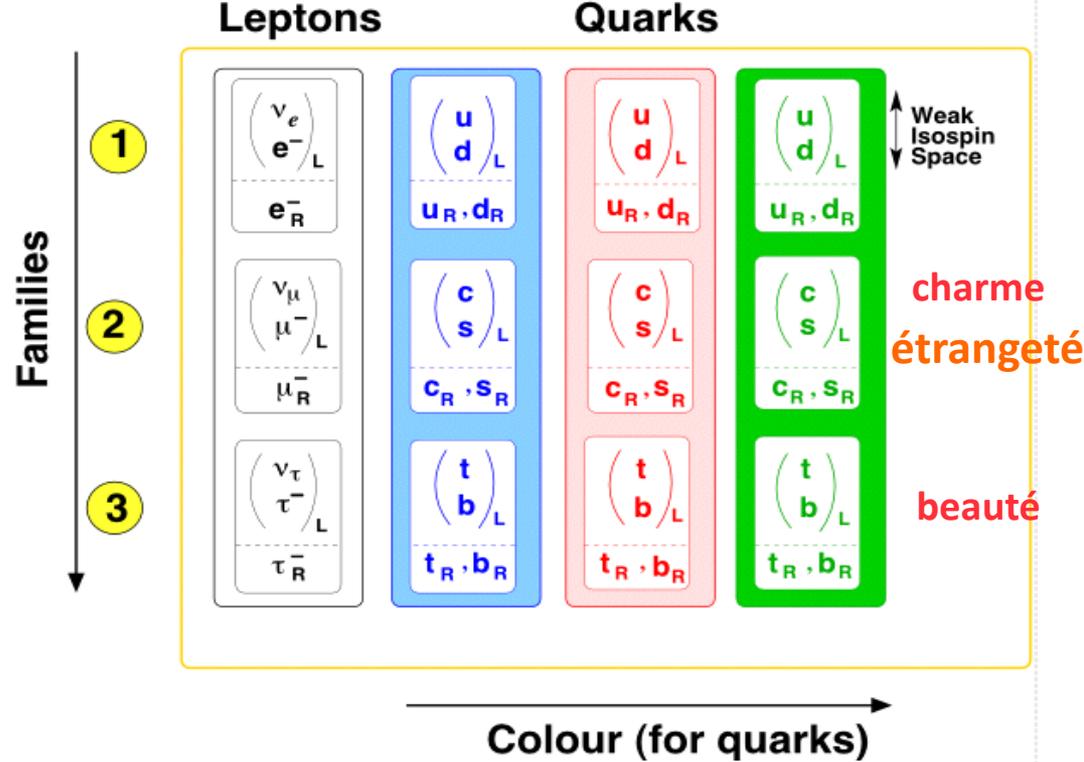
énergie maximum par faisceau de 7 TeV (Tera = 10^{12} eV)

gain réel en énergie d'environ 10

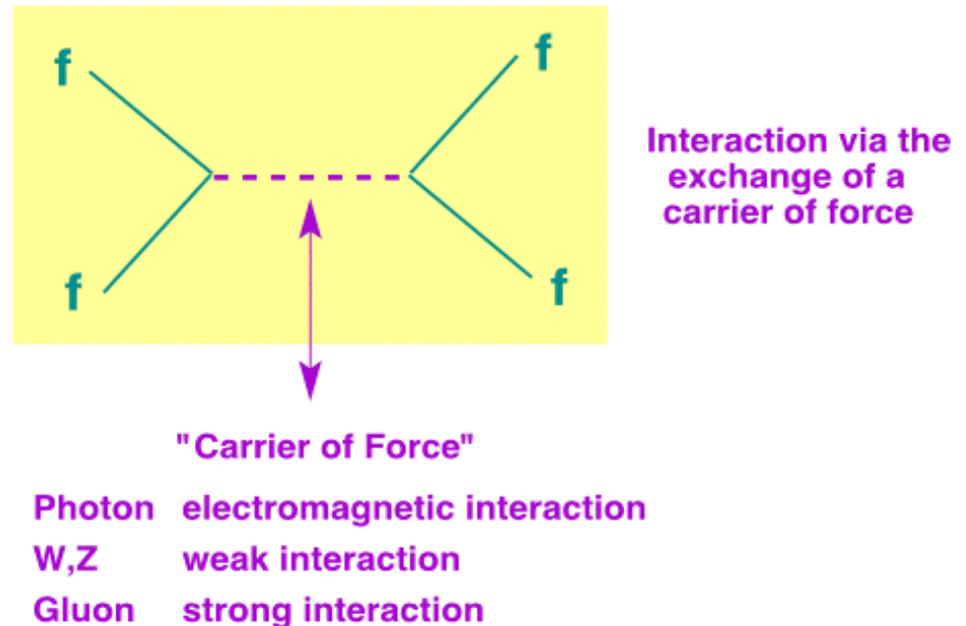
les objets d'intérêt sont les leptons, comme l'électron ou le muon, libres, et les quarks, confinés dans les hadrons, ainsi que les particules qui transmettent les forces entre eux.



quels sont les constituants:
 les quarks et les leptons,
 “répétés” en trois familles.
 Nous les considérons comme
 élémentaires parce que,
 jusqu’ à
 10^{-4} de la taille du proton
 (10^{-17} cm), ils sont ponctuels.



la manière dont ils interagissent:
 en échangeant des particules
 nommées bosons, comme le photon
 On a montré que les forces
 électromagnétique et faible ont la
 même structure et, d’un point de
 vue, sont “unifiées”
 (Courants Neutres en 73, découverte
 du W et du Z en 83, Nobel 84).



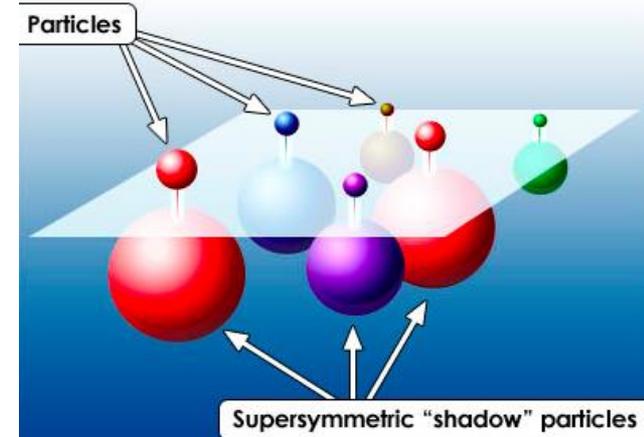
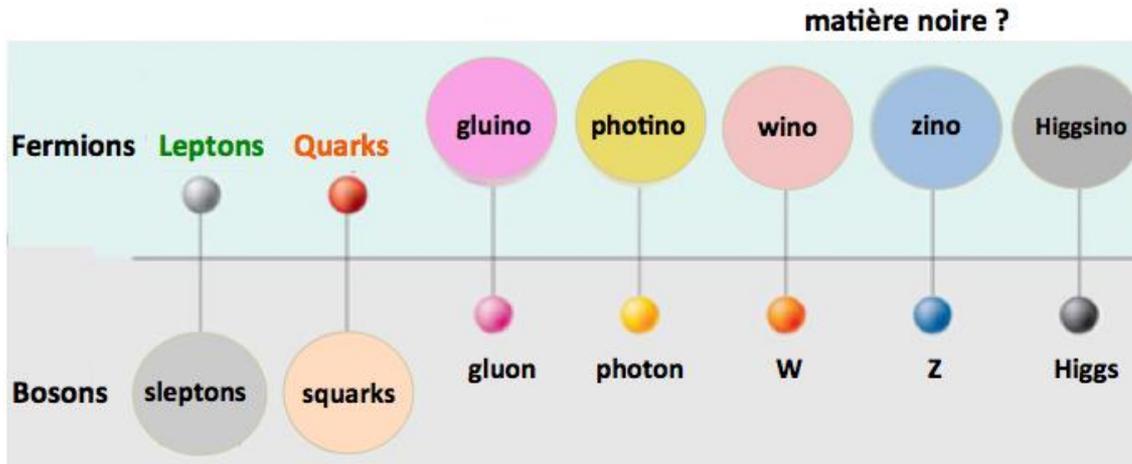
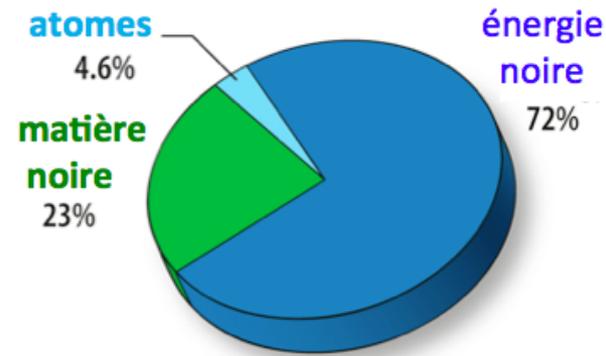
Et tout ce qu'on n'a pas compris...

Le Modèle Standard est un chef-d'oeuvre, mais ignore 95% de ce qui semble constituer l'univers selon la cosmologie

Est-ce une erreur d'interprétation des observations ?

Sinon comment compléter le Modèle Standard. Par exemple après le boson que cherche-t-on au LHC ?

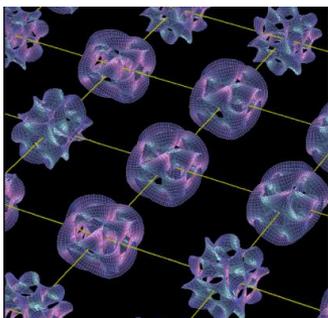
➔ *Manque-t-on une moitié des constituants de l'Univers ? La Supersymétrie*



Excellent candidat pour la matière noire, et d'autres vertus

jusqu'ici rien en vue

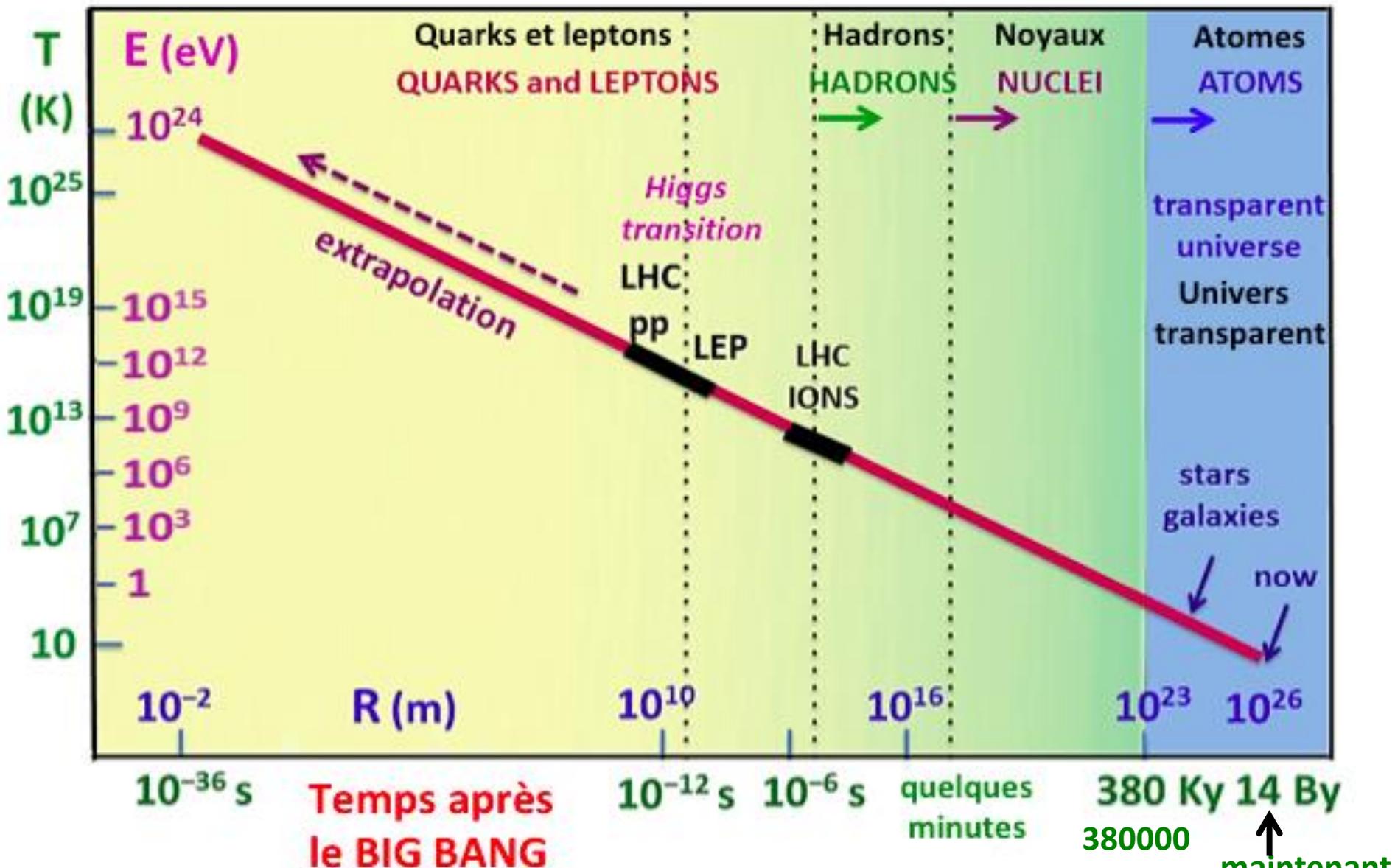
➔ *Manque-t-on des dimensions supplémentaires, non déployées, de l'Univers ?*



La théorie des Supercordes en veut 6, recroquevillées
En chaque point de notre espace-temps il faut imaginer un tel mini-univers qui peut offrir un nombre immense de topologies
Si cette taille est accessible au pouvoir de résolution du LHC on pourrait sentir leur présence. Rien en vue....

Lisa Randall

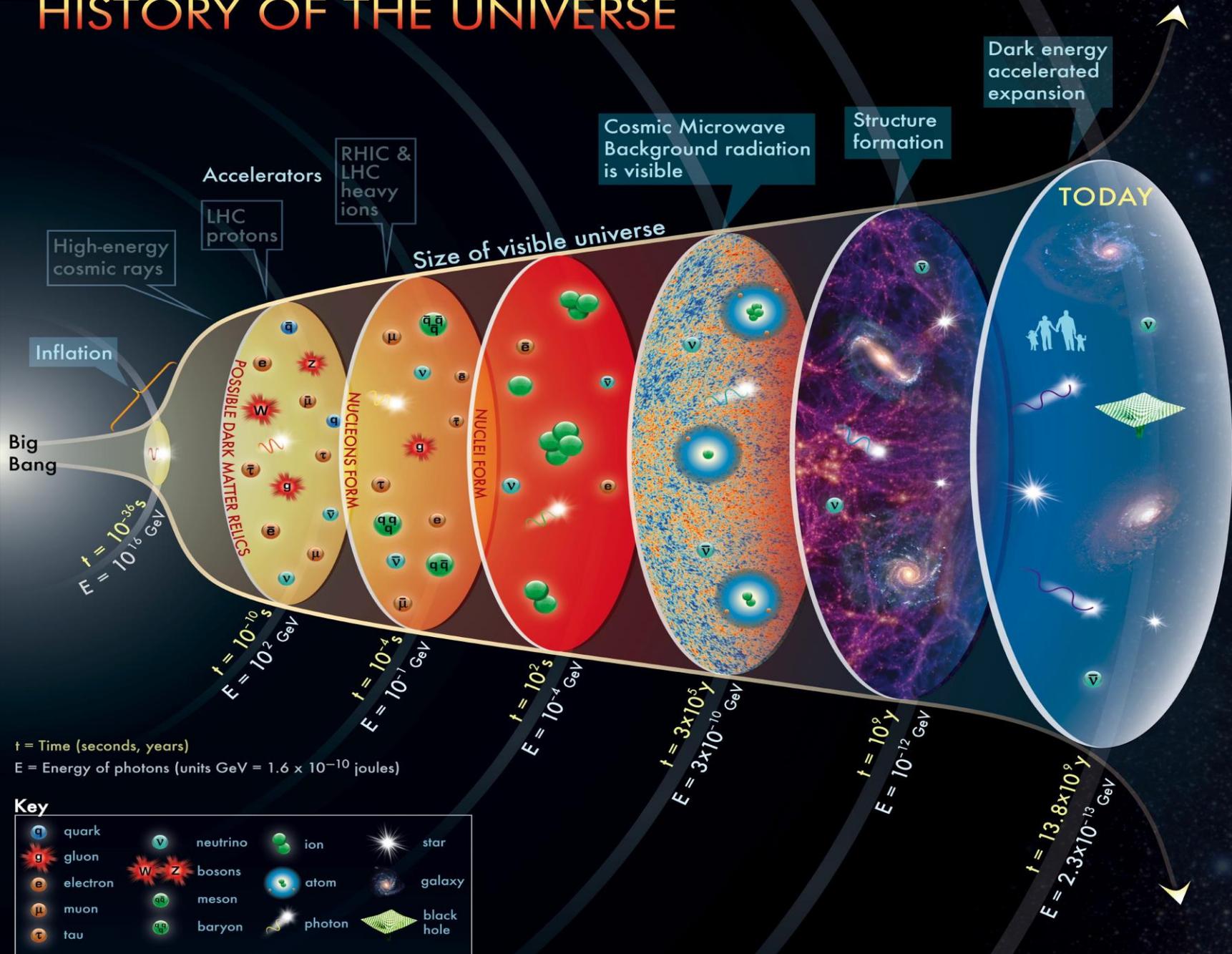




Histoire de l'Univers

nos expériences re-créeent à l'échelle microscopique la physique qui régnait aux premiers instants de l'Univers. Nous en étudions l' "archéologie".

HISTORY OF THE UNIVERSE



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.



ADA 1965



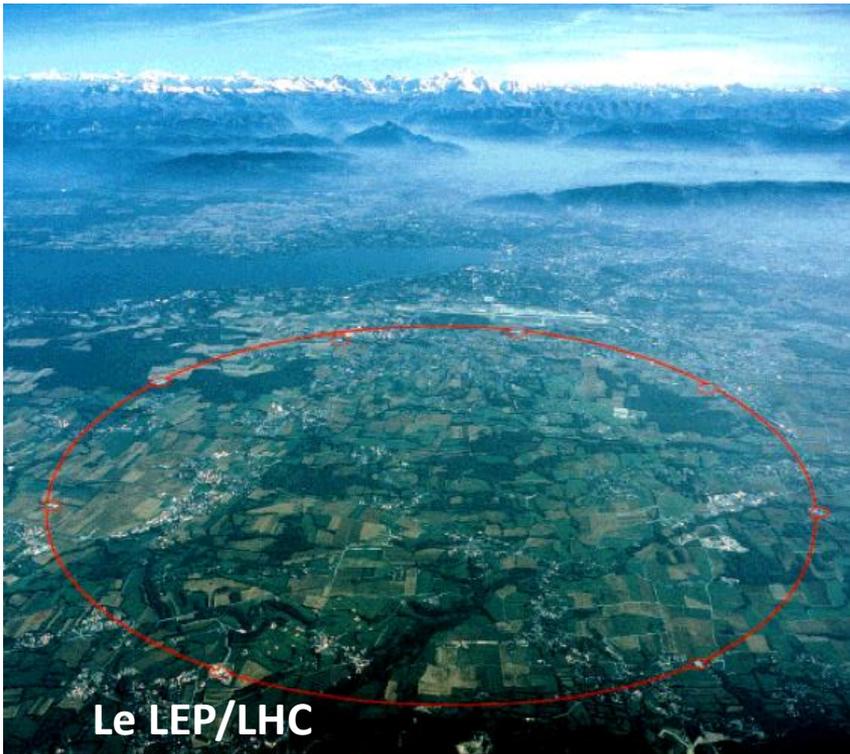
SC 1957



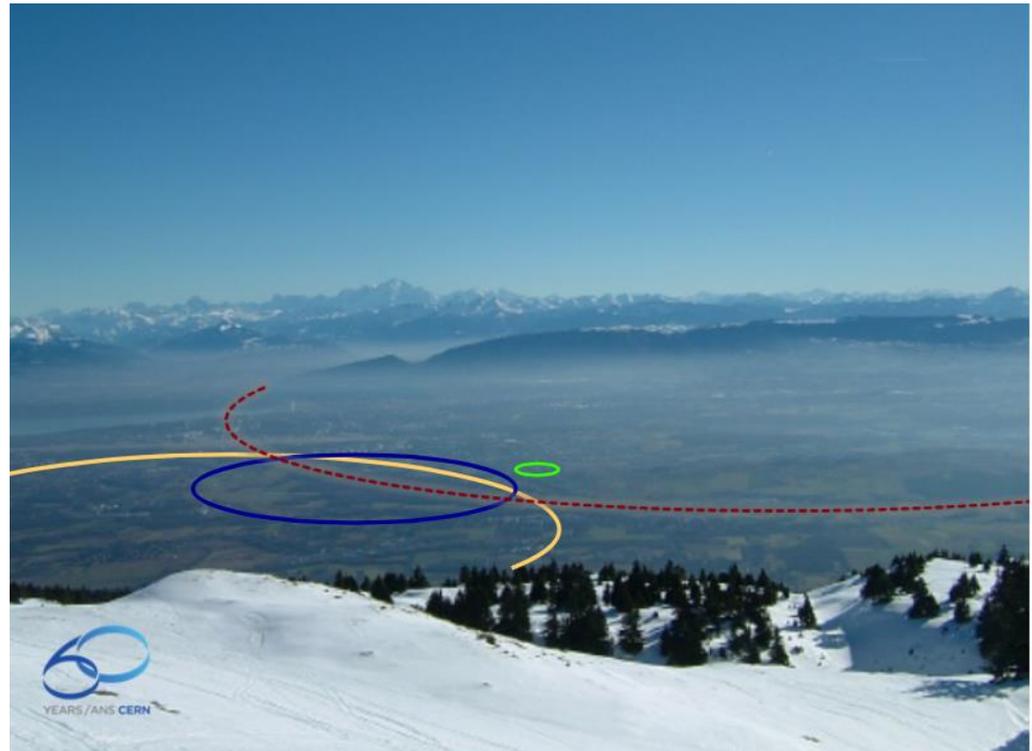
© Pascal Tournaire

dans l'anneau de l'AD

ce dont nous rêvons...



Le LEP/LHC



Les aimants du LHC, une aventure...

test string

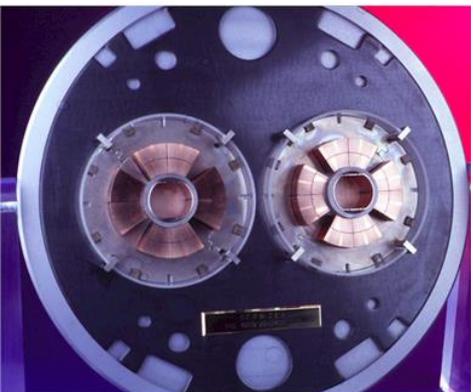


- 31000 tonnes de "masse froide"
- 1200 tonnes de supraconducteur
- 100 tonnes d'hélium

in situ



Un nouveau type d'aimant supraconducteur "deux-en-un", fonctionnant à la température de l'hélium superfluide (1.8 degré K). Il en faut ~1250.



two-in-one

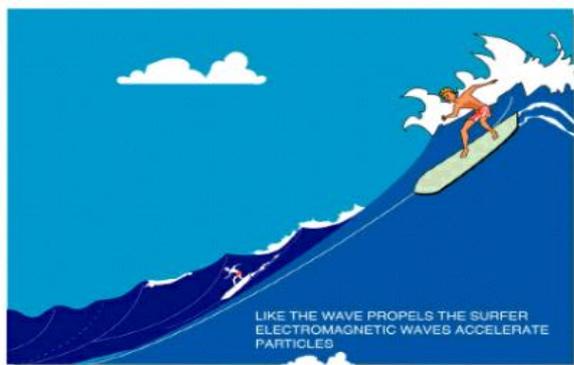
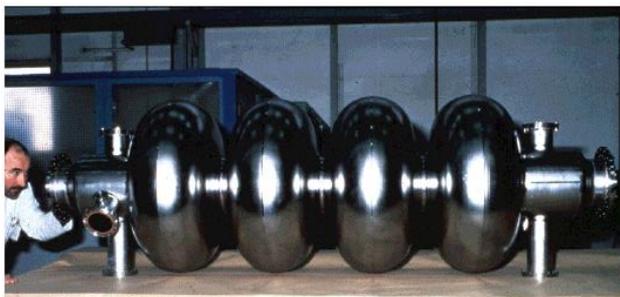


connectique

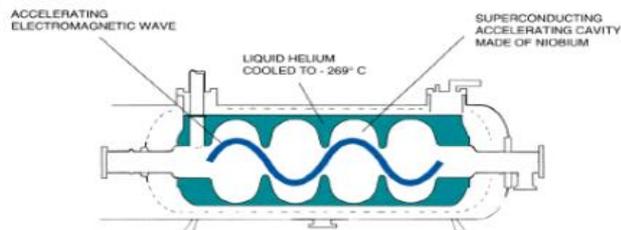


L'accélération

une fabrication délicate

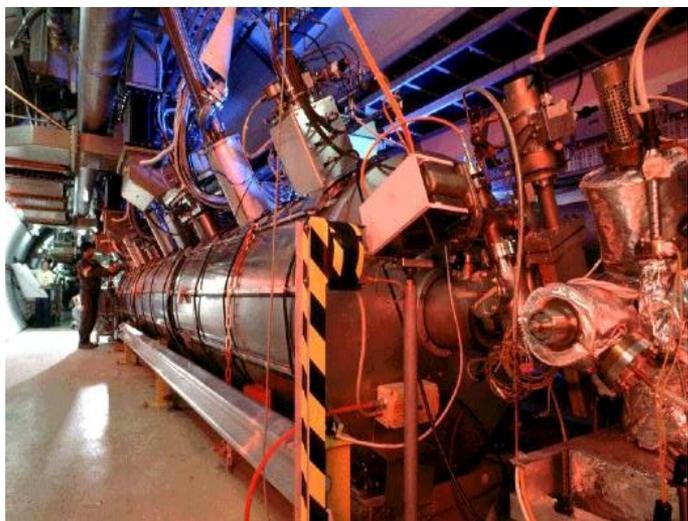


THE USE OF SUPRACONDUCTIVITY TO INCREASE PERFORMANCES AND CONSIDERABLY REDUCE ELECTRICITY CONSUMPTION



surf sur une vague de champ électrique de haute fréquence

un fonctionnement à moins 269°K



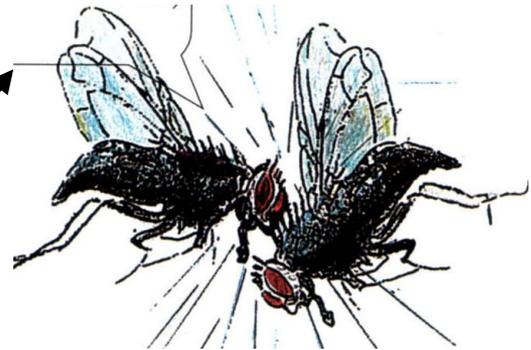
cavités accélératrices du LEP



cavités du LHC

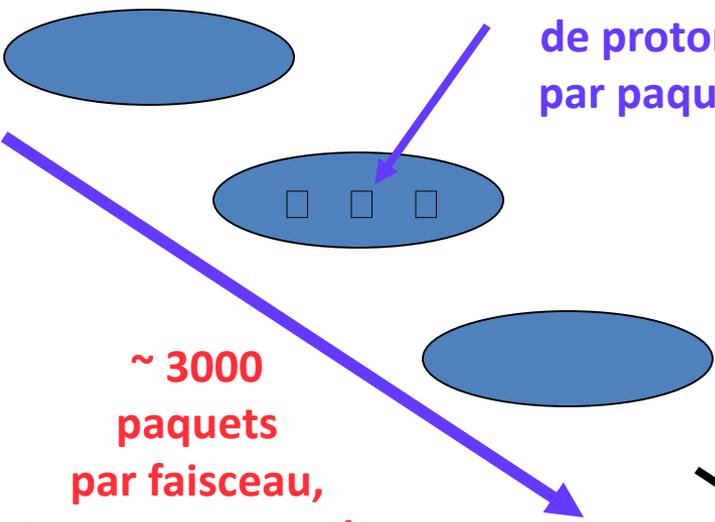
petit calcul

100
milliards
de protons
par paquet

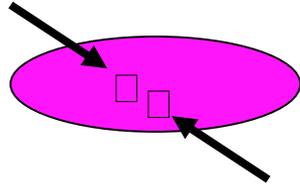


une collision: ~
deux moustiques
~ 10^{-6} joule

collisions:
~ 20 par croisement
~ 10^9 par seconde



~ 3000
paquets
par faisceau,
1 nanogramme de
protons stockés

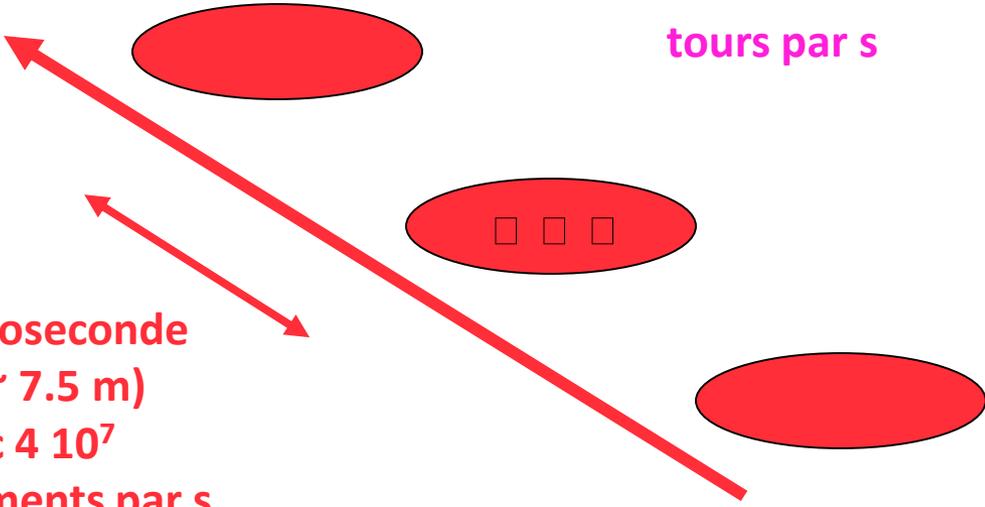


11000
tours par s

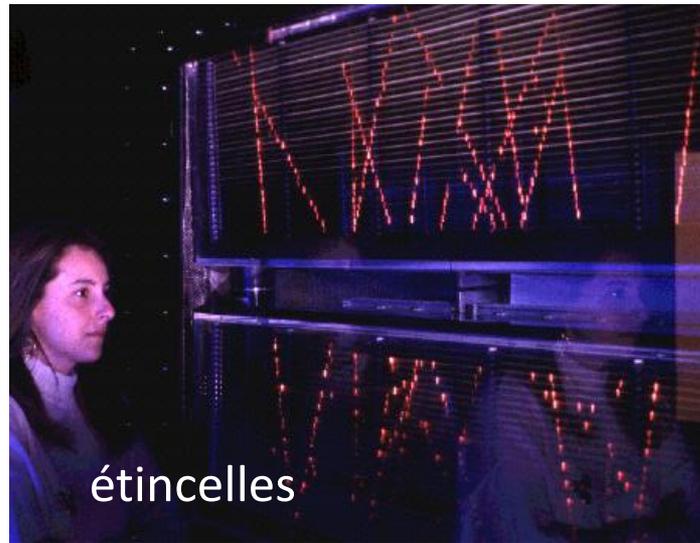
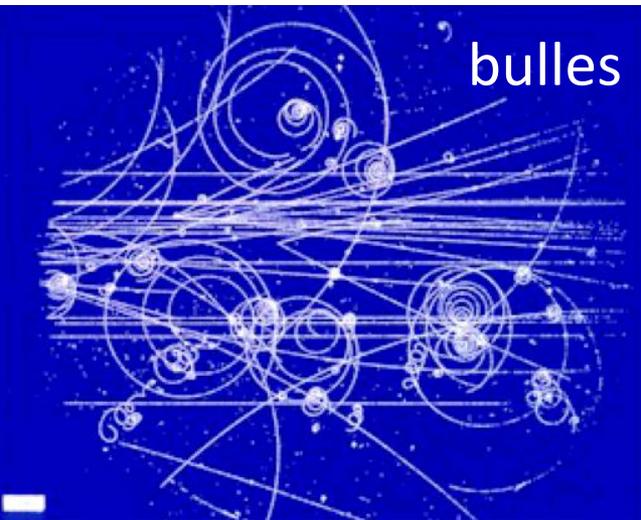
énergie stockée
dans les faisceaux
~ un train de 300t
à 150 km/h ($4 \cdot 10^8$ joule)



25 nanoseconde
(soit ~ 7.5 m)
donc $4 \cdot 10^7$
croisements par s



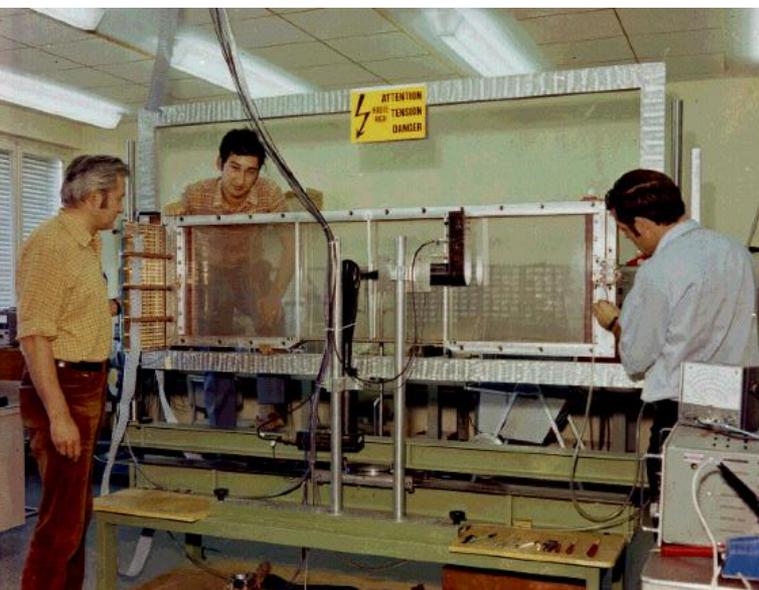
détecteurs



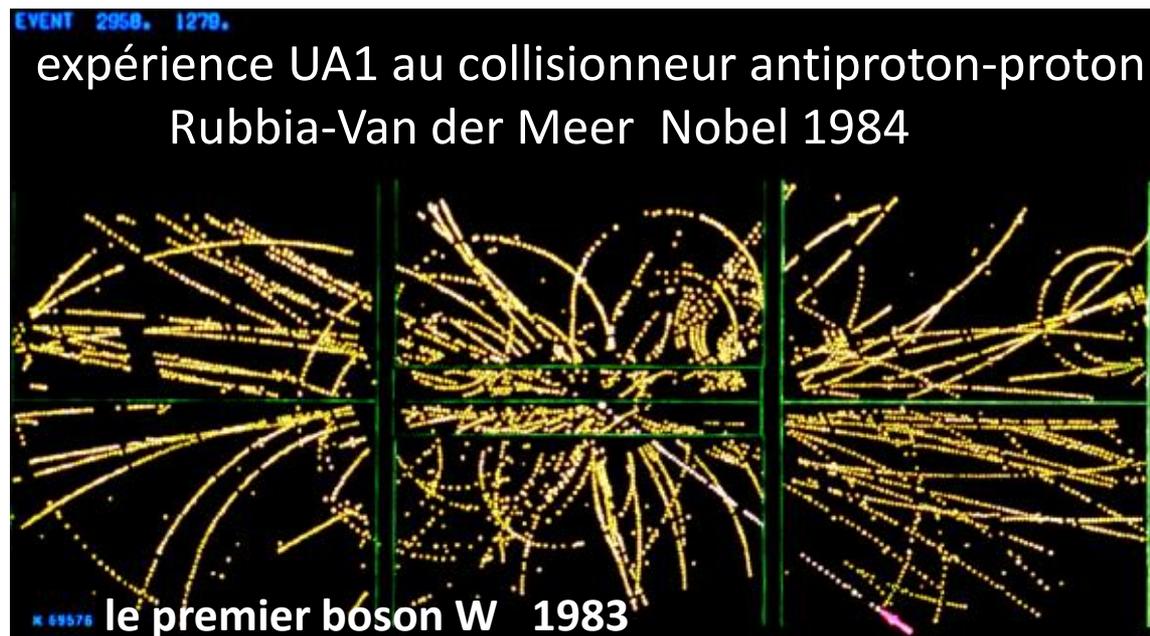
détecteurs au silicium



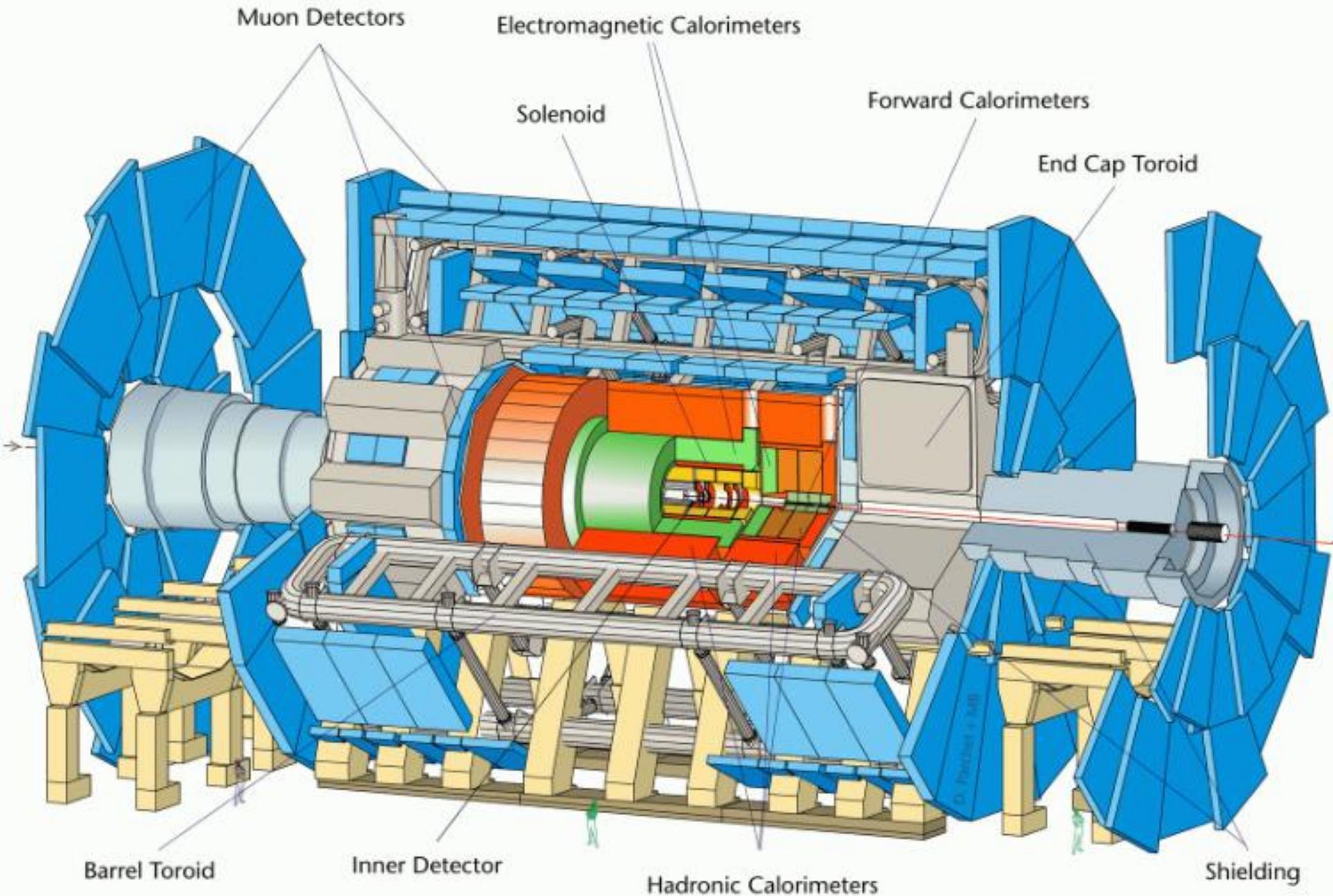
Charpak 1968 Nobel 1992

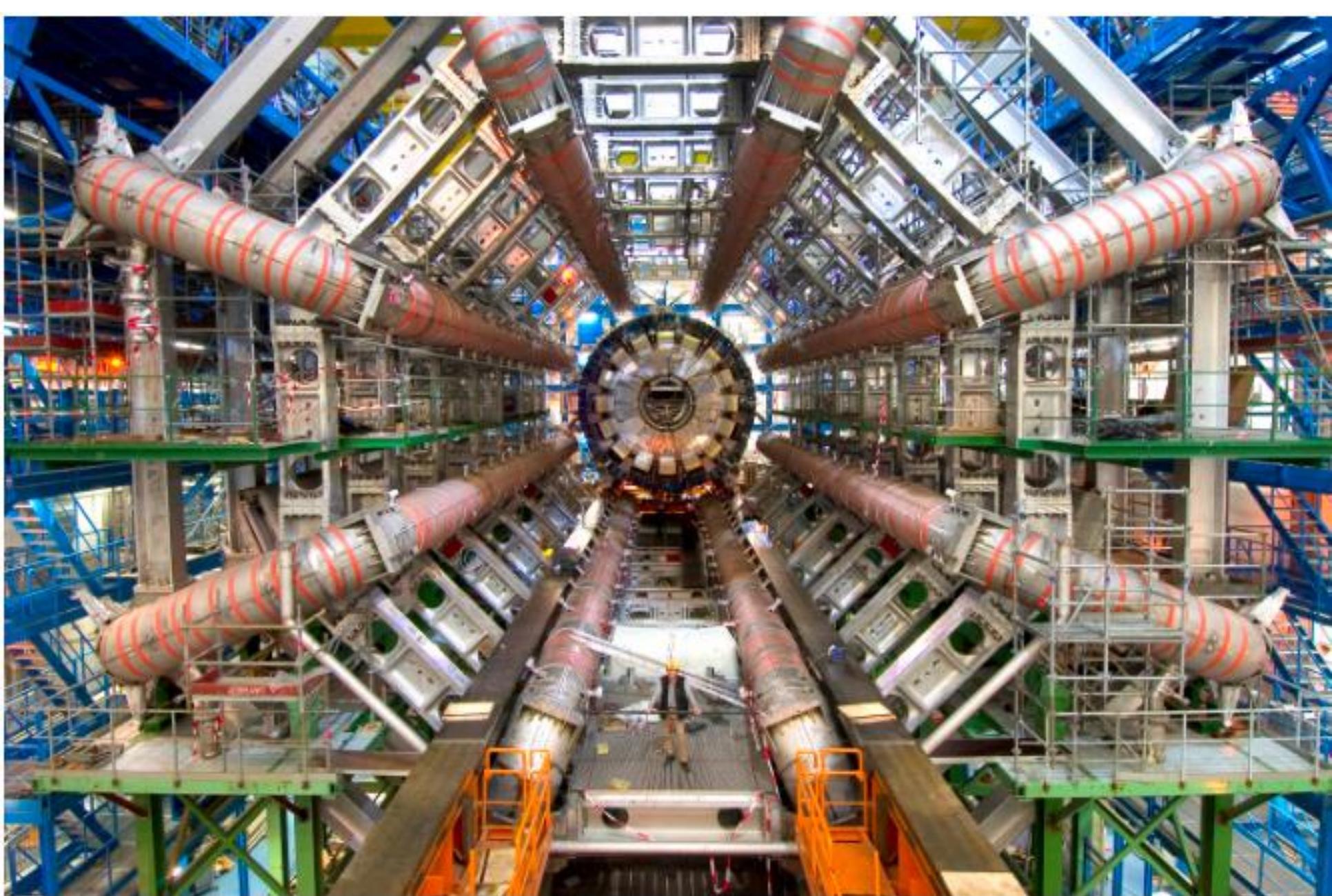


Chambres proportionnelles à fils



LE DETECTEUR ATLAS





Le détecteur ATLAS en construction

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS

Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER

Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER

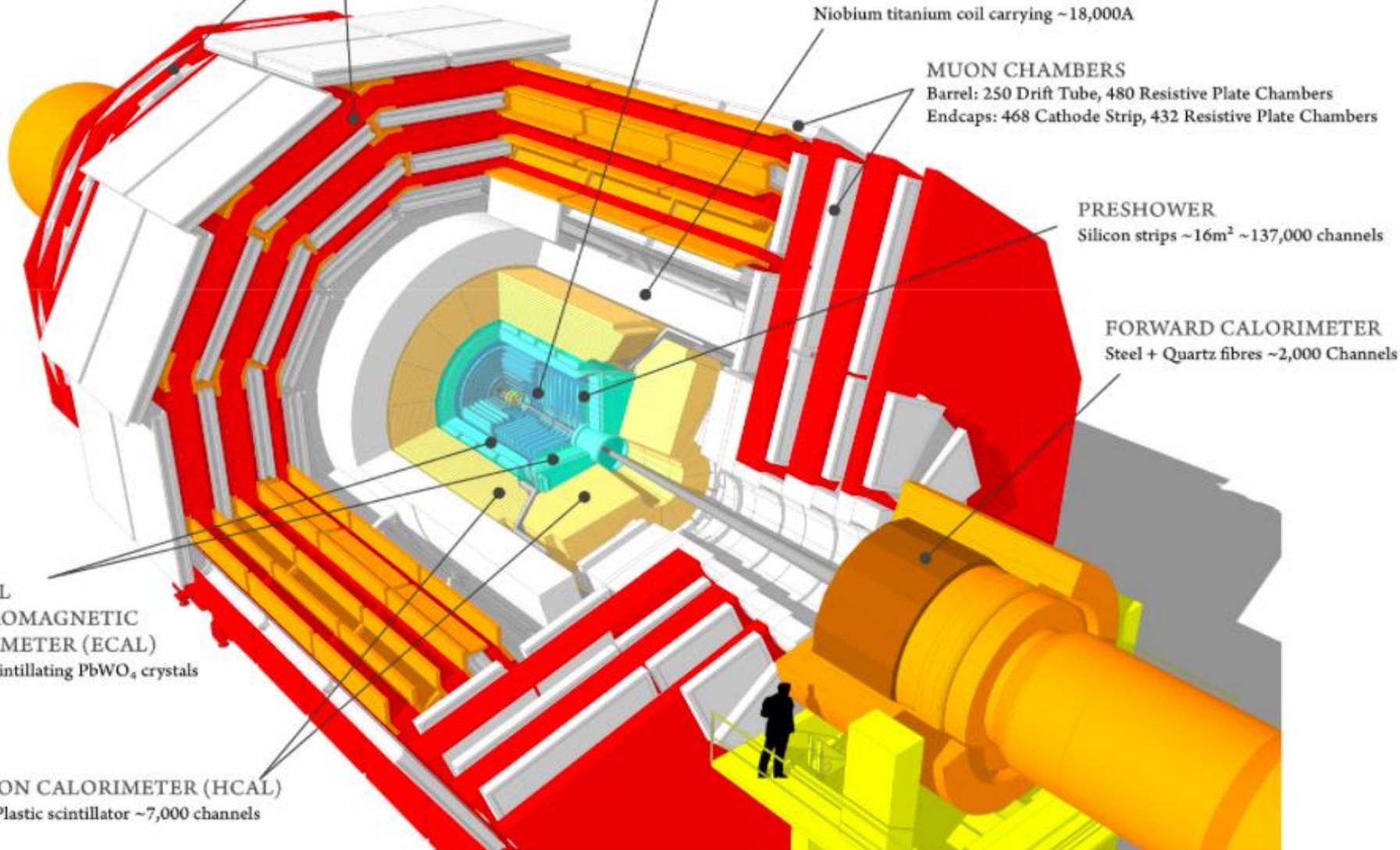
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

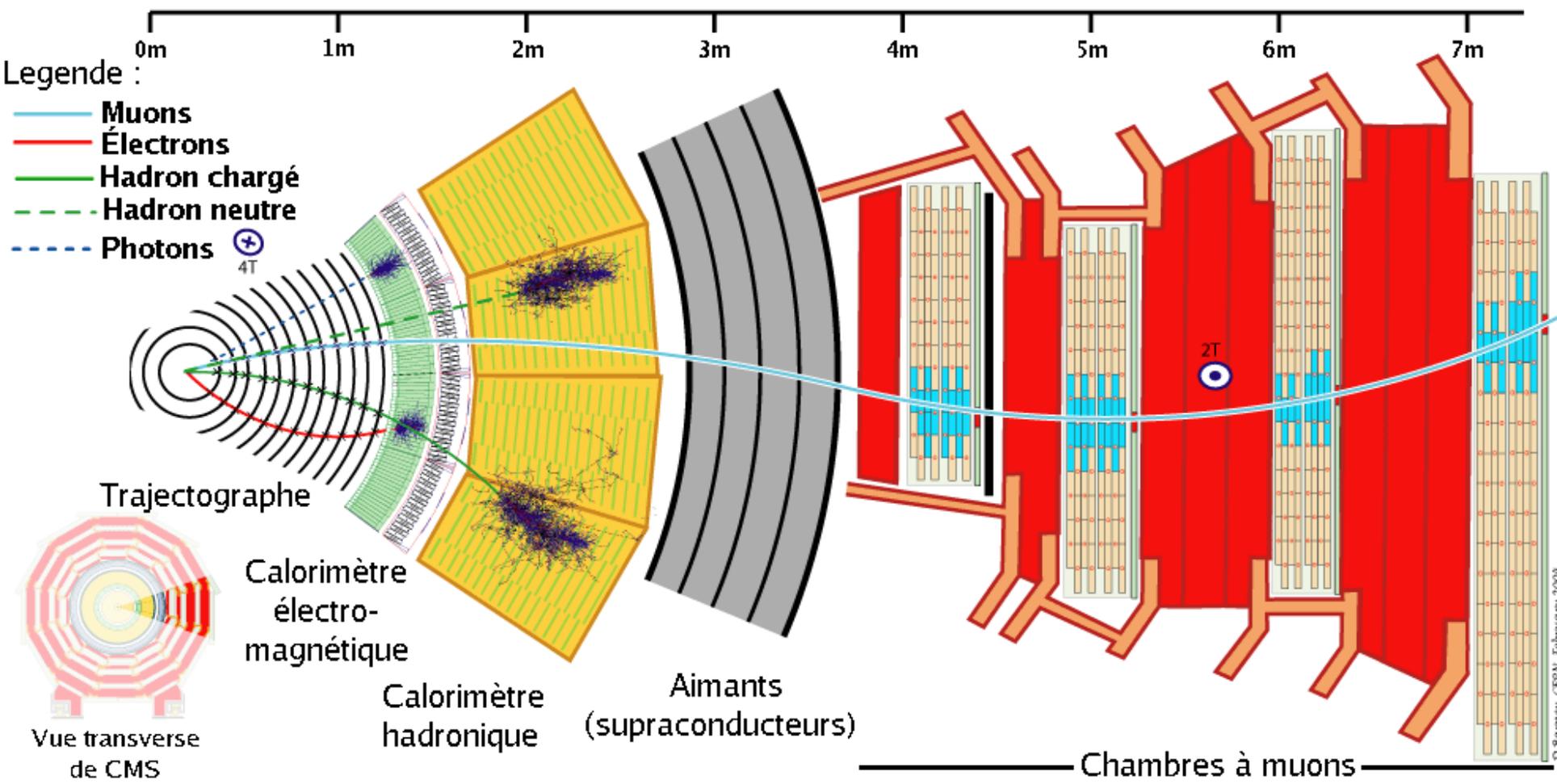
CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)

$\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)

Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels







CMS Collaboration



TRIGGER & DATA ACQUISITION

Austria, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

TRACKER

Austria, Belgium, Finland, France, Germany, Italy, Japan*, New Zealand, Switzerland, UK, USA

CRYSTAL ECAL

Belarus, China, Croatia, Cyprus, France, Italy, Japan*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER

Armenia, Belarus, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia
Endcap: Japan*, USA, Brazil

SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular: Finland, France, Italy, Japan*, Korea, Switzerland, USA

FEET

Pakistan, China

FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain*, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine
HO: India

MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, China, Germany, Hungary, Italy, Spain,
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

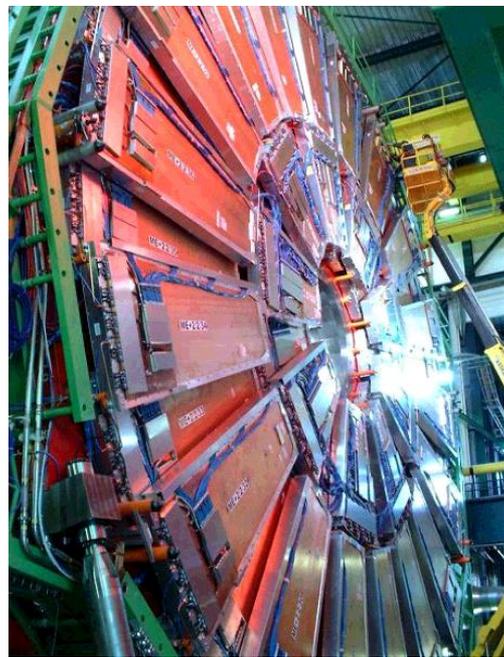
Total weight : 12500 T
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 21.5 m
Magnetic field : 4 Tesla

* Only through industrial contracts

Le détecteur CMS



**récupération des obus des
bateaux de guerre russes**



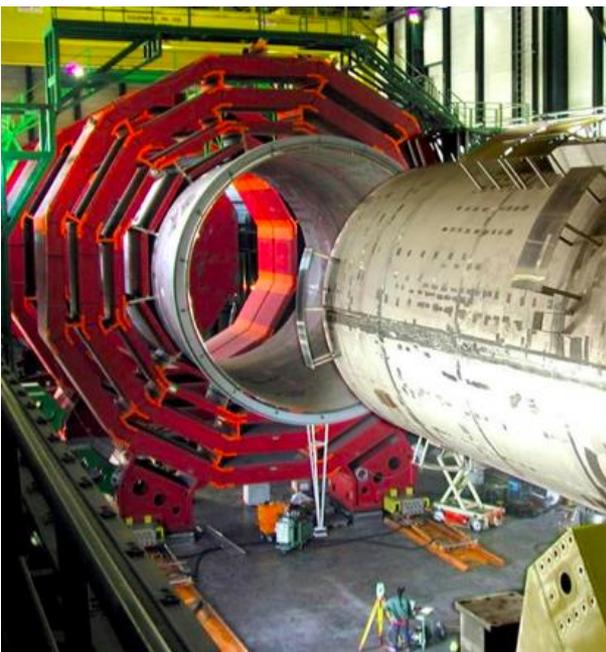
Un bouchon



**rôle majeur
de l'ETHZ**

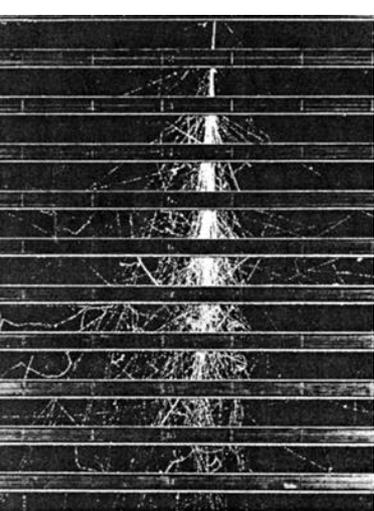
Le solénoïde (4 Tesla)

Introduction du détecteur à pixels

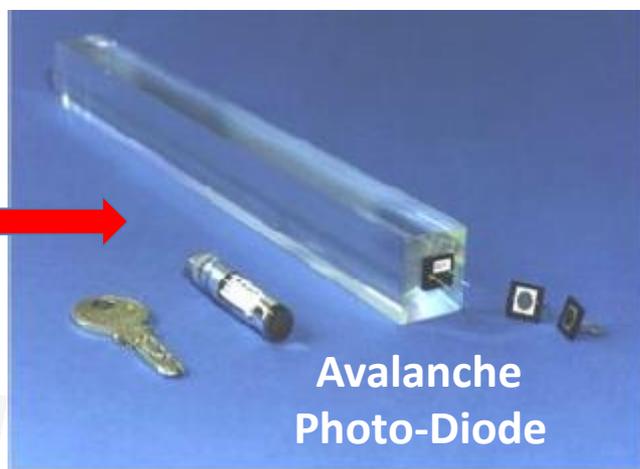
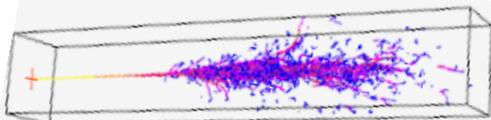


**Le trajectographe
au silicium (200m²)**

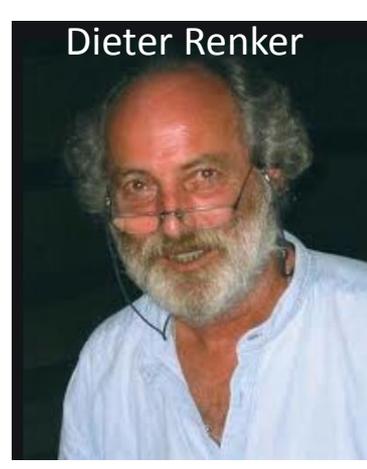




Chine, Russie



Avalanche Photo-Diode

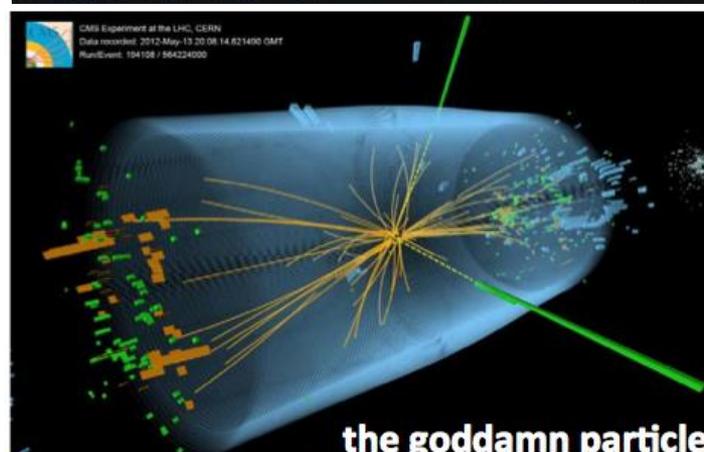
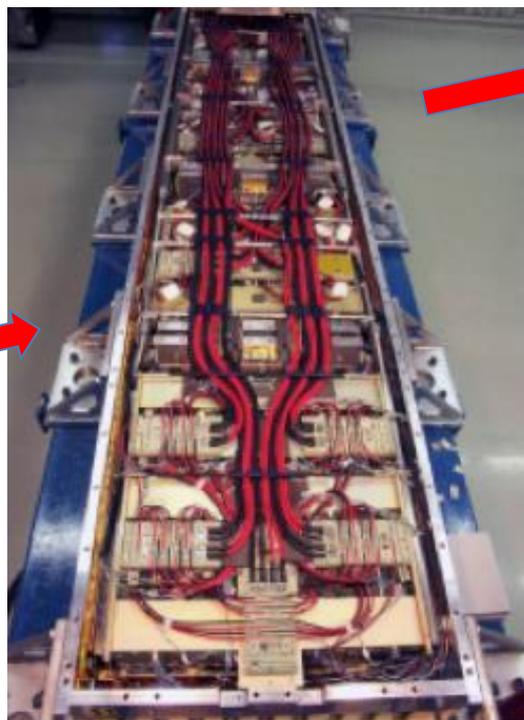
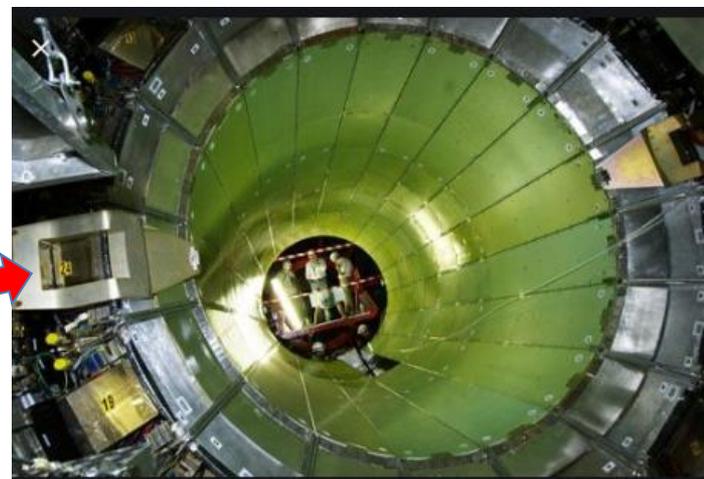


Dieter Renker

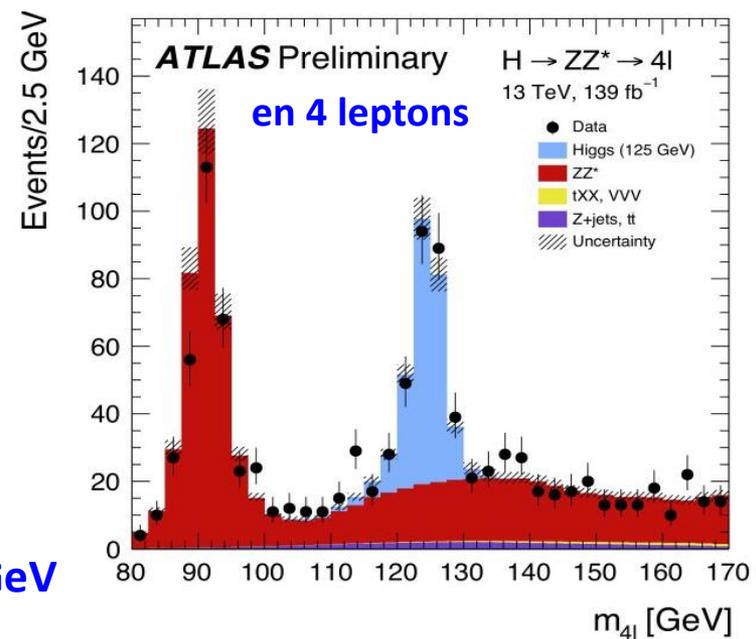
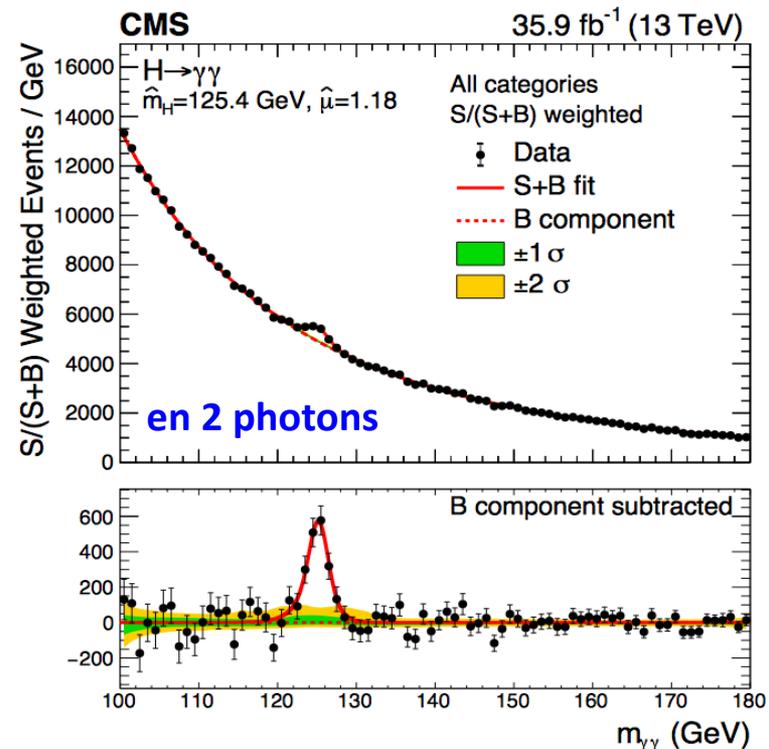
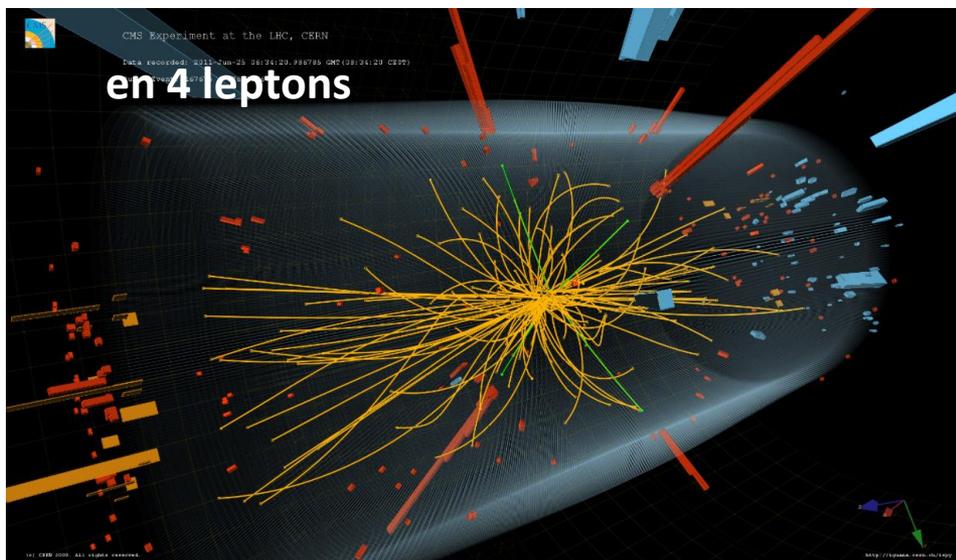
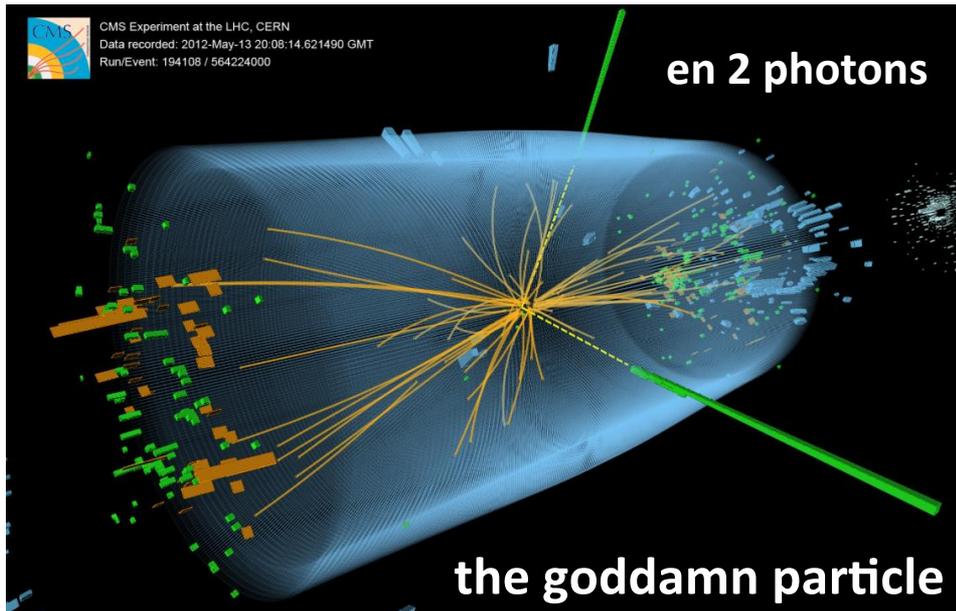


Lead tungstate ($PbWO_4$) crystals nearly as dense as lead!

Du tungstate de plomb au Boson de Higgs



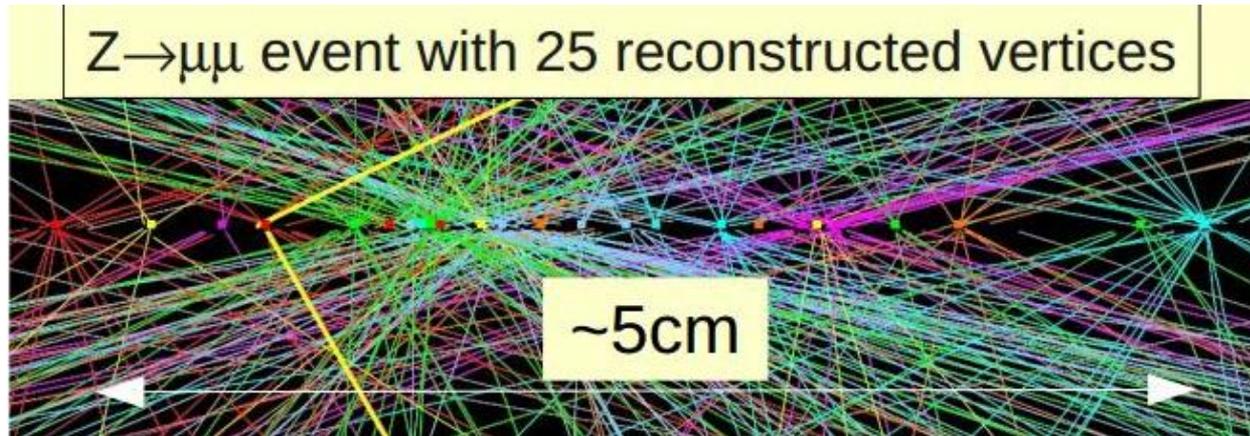
the goddamn particle



Le Boson de Higgs

Les pics à 125 GeV

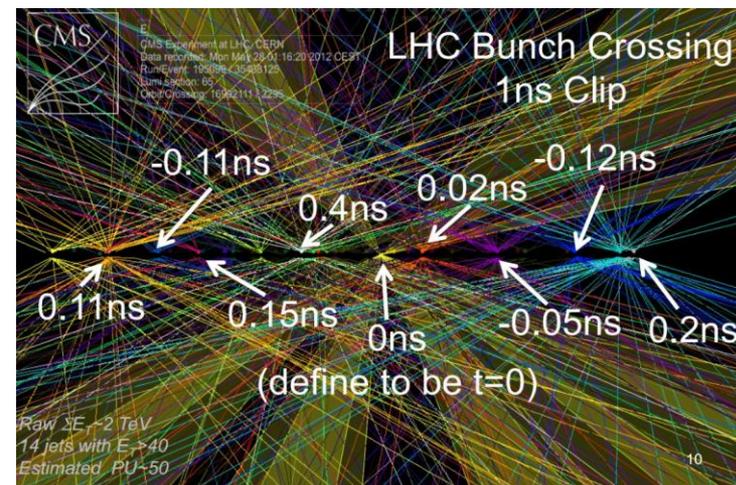
toutes les 25 nanoseconde les paquets de protons se rencontrent
il en résulte ≈ 25 interactions dont chacune produit une centaine de particules
la plupart des 50 millions de “photos” sont sans intérêt
Il faut décider vite (quelques microsecondes) lesquelles on garde (≈ 200 par s)



Ce tri se fait en deux étapes, hardware puis software, sur la base de la présence de particules de grande énergie produites à grand angle, signalant ce qui nous intéresse, des collisions dures entre quarks et gluons à l’intérieur du proton

Vitesse de la lumière 300000 km/s
1 nanoseconde 30 cm
1 picoseconde 300 microns
(durée de vie de charme, beauté)

Un défi pour le futur
distinguer les interactions à l’échelle
de temps de 10 picoseconde



LA PHYSIQUE DES PARTICULES N'EST PAS UN ROMAN...

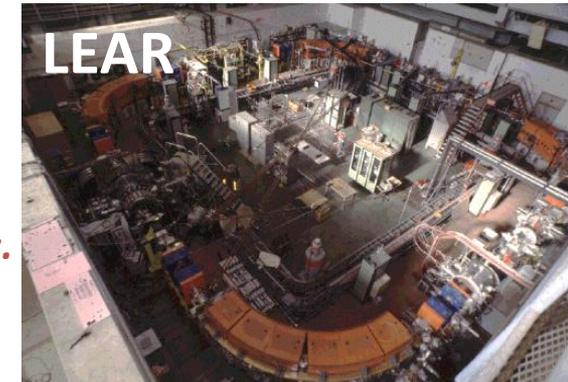
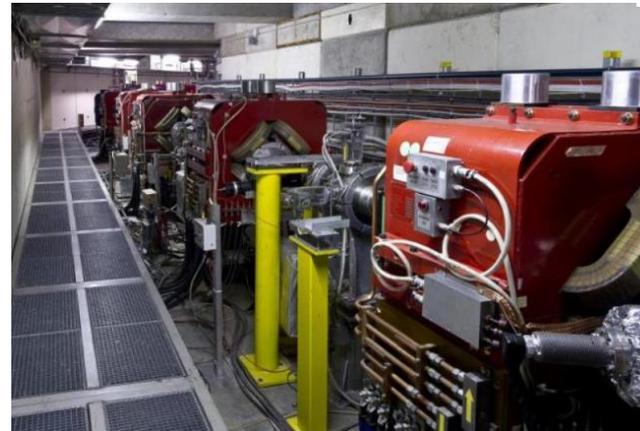
Excellentes relations avec le Vatican...

Oui, les antiparticules existent et on en produit autant que de particules. Mais les antiprotons sont rares. Concentrer, ralentir et stocker des \bar{p} dans une "bouteille électromagnétique" est bien compliqué et de rendement infinitésimal.

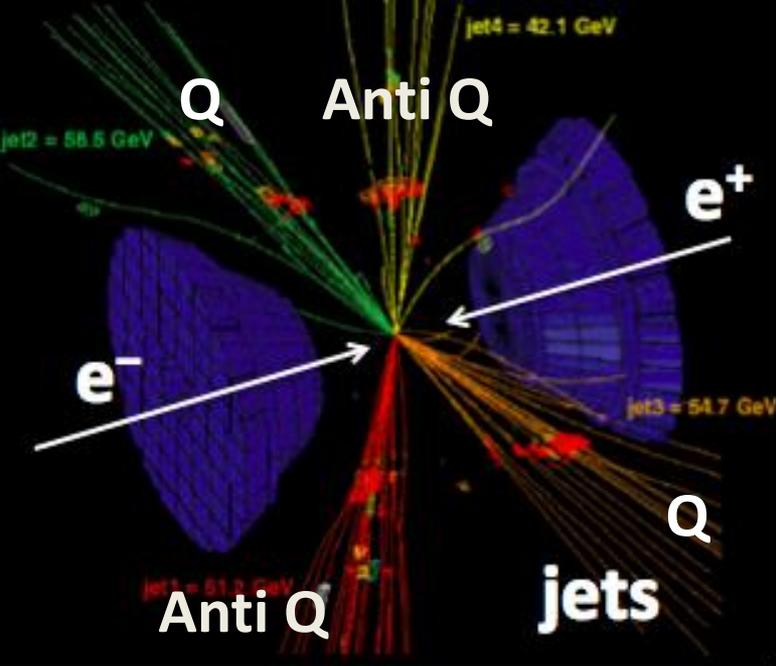


En 1996 sur l'anneau LEAR, quelques atomes d'antihydrogène furent créés. En 2002, sur l'AD (Anneau de Décélération) on en a fait quelques 10^4 . A ce rythme il faudrait $25 \cdot 10^{15}$ années pour remplir un ballon d'enfant d'antihydrogène.

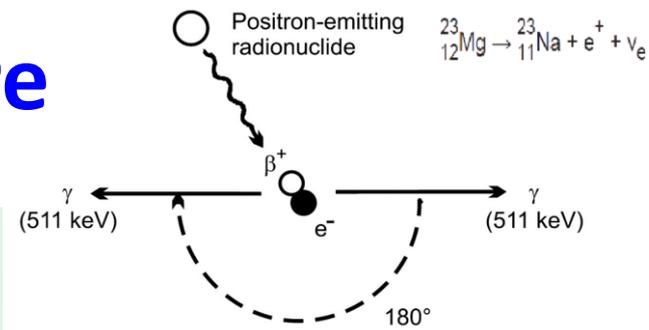
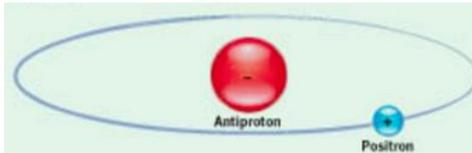
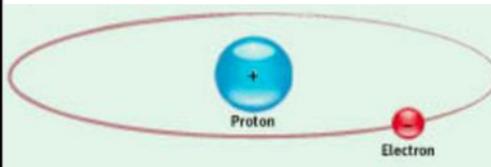
Si même on savait stocker toute l'antimatière jamais produite au CERN et l'annihiler cela ne tiendrait allumée une ampoule électrique que quelques minutes. Pour faire la bombe du roman il faudrait $\sim 2 \cdot 10^9$ années.



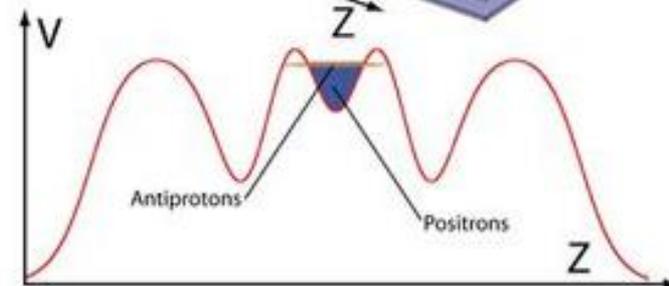
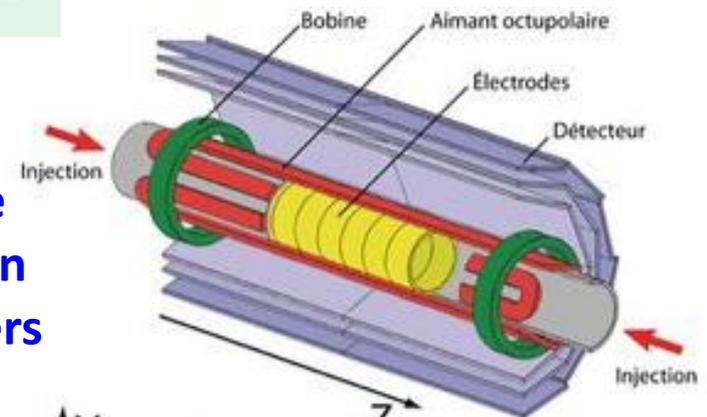
**Vues de
l'AD**



L'antimatière



Potassium: 4000 positrons naturels par jour dans votre corps



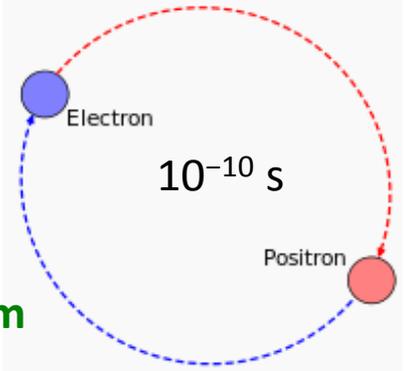
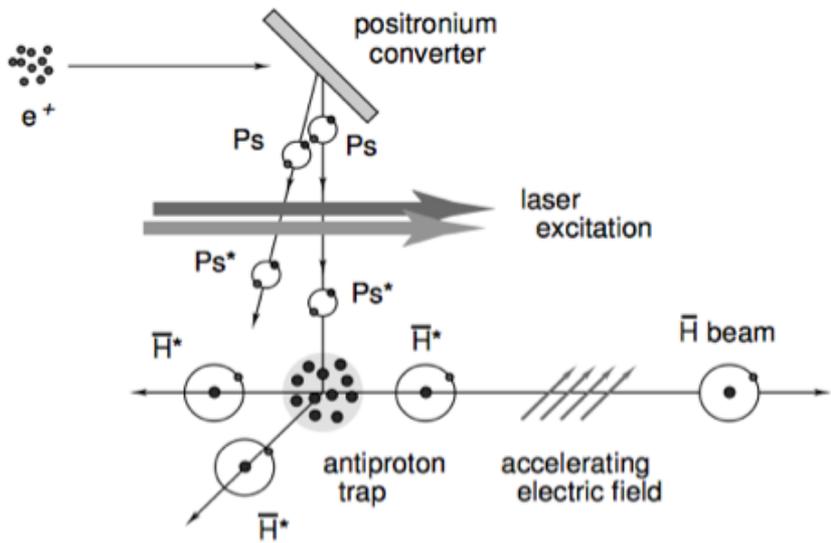
Particules et antiparticules *s'annihilent* en donnant de l'énergie, par exemple des photons. Vu leur production en nombres identiques, comment se fait-il que l'univers matériel et donc nous mêmes soyons là, tandis qu'on constate l'absence d'antimatière en quantité notable ?

Il faut donc qu'entre antiparticules et particules existe dans leurs propriétés, ou ait existé dans leurs interactions à certaines époques de l'univers, une petite différence, en plus des signes opposés.

Le but est non plus d'accélérer, mais de capturer et décélérer les antiprotons et antiélectrons produits, et les ralentir au maximum, jusqu'à ce que, piégés ensemble assez longtemps, ils se combinent en anti-atomes d'hydrogène, un antiélectron orbitant autour d'un antiproton.

AEGIS

mesure directe de l'accélération gravitationnelle locale g de la Terre sur l'anti-hydrogène

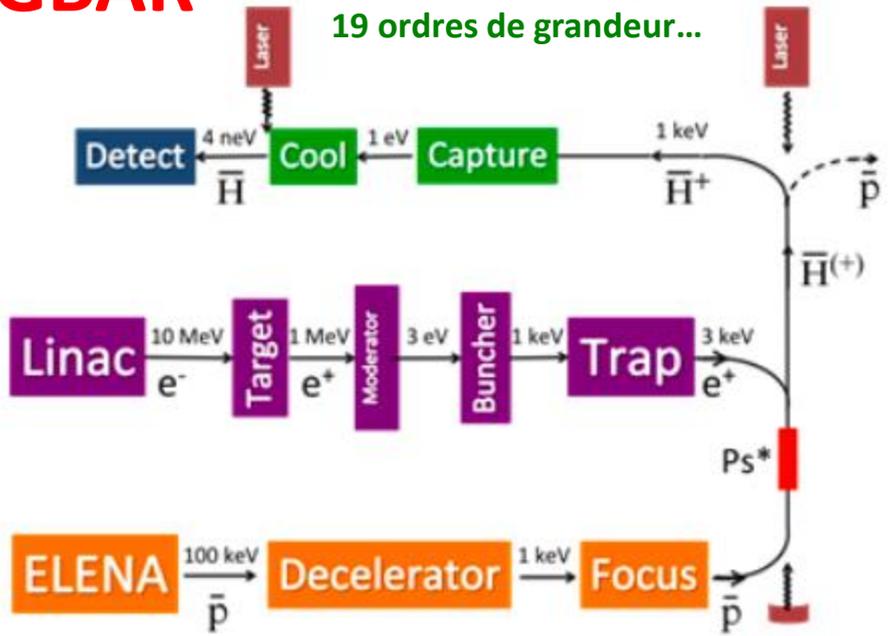


positronium

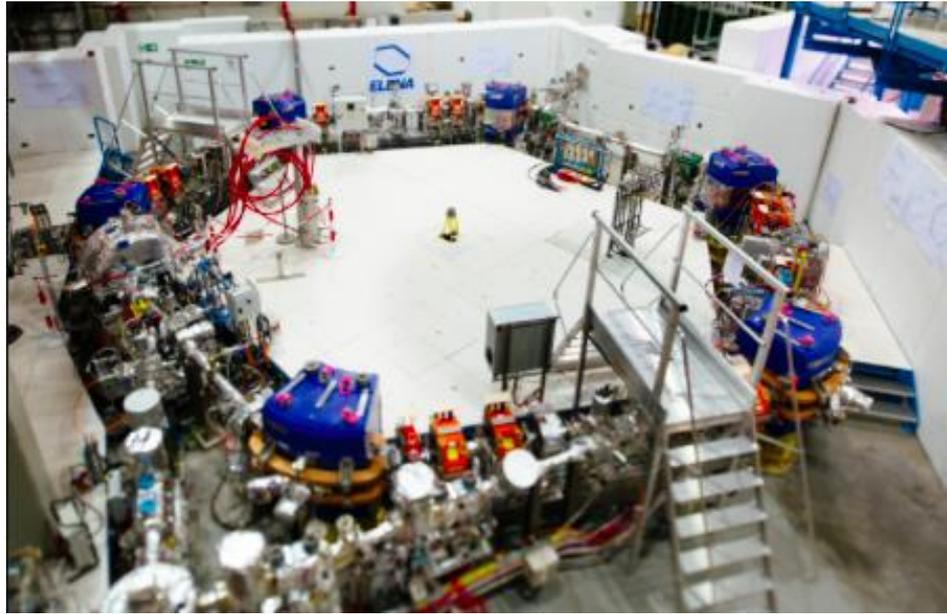
10^{-7} s
spin
parallèles

GBAR

réduction de l'énergie de 19 ordres de grandeur...



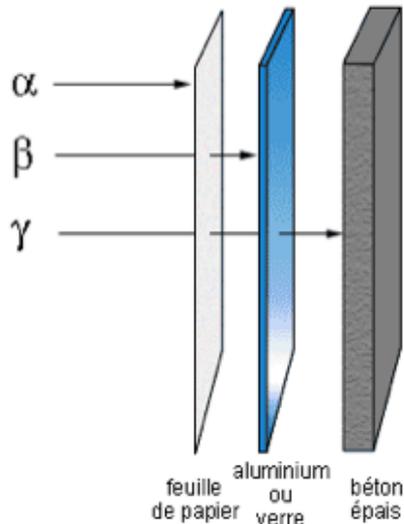
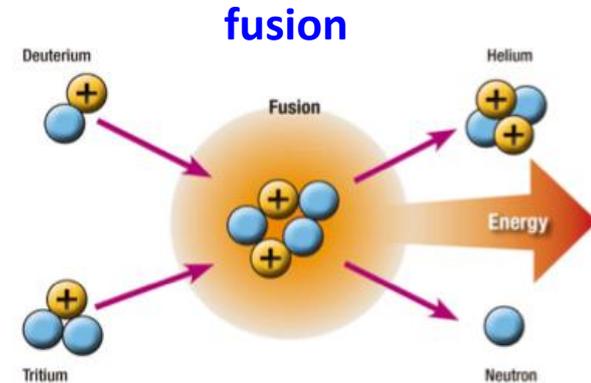
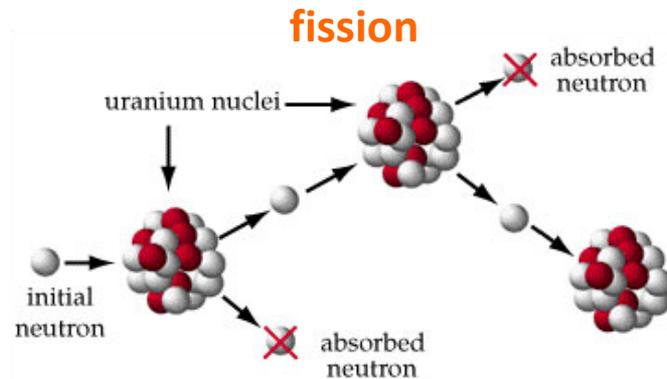
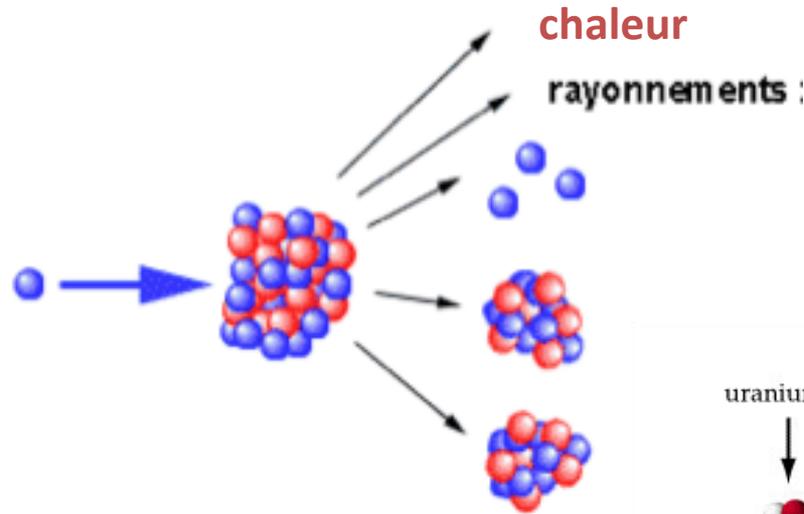
ELENA



Un peu de physique nucléaire....

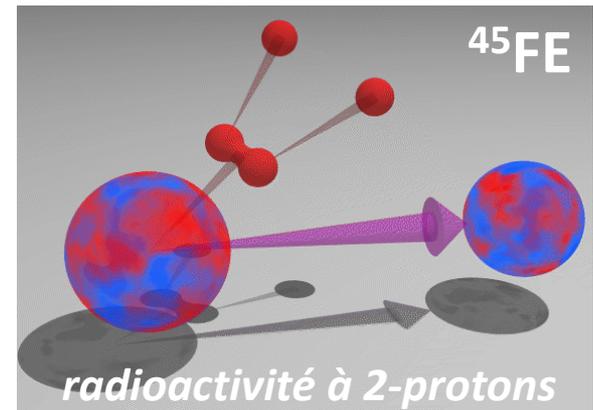
La physique nucléaire décrit et étudie le noyau de l'atome. Comme sujets on peut distinguer :

- la structure nucléaire, comment les nucléons (protons et neutrons) interagissent pour former le noyau.
- les mécanismes de réaction: les différentes façons qu'ont les noyaux d'interagir : fission, fusion, etc
- les aspects inter-disciplinaires: interactions entre physique nucléaire et les autres sciences telles que astrophysique (nucléo-synthèse), phys. des particules, physique atomique
- les applications de la physique nucléaire: médecine, production d'énergie, etc.

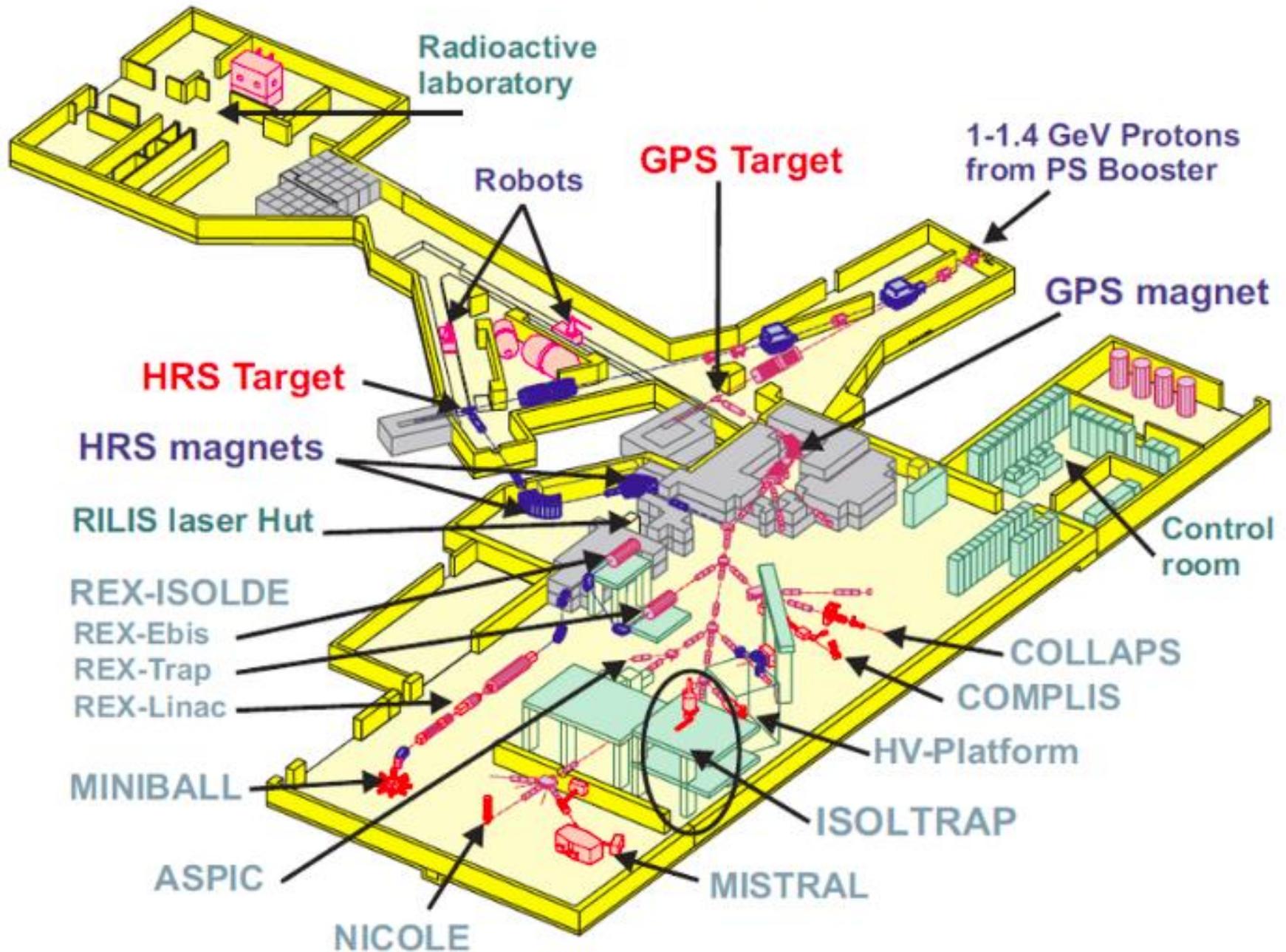


nombre "magiques"
2 8 20 28 50 82 126
noyaux doublement magiques
particulièrement stables

ex. ^{48}Ni



ISOLDE / CERN experimental hall



CERN Computing Center Data Storage

Internet Exchange Point

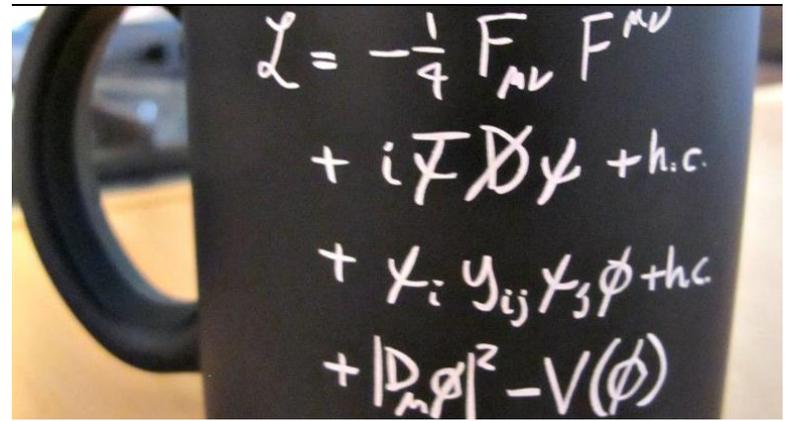


Computing Power	http://sls.cern.ch/sls/service.php?id=dcbynum <ul style="list-style-type: none">- Processors: 17.000- Cores: 85.000
Storage	http://castorold.web.cern.ch/castorold/global_statistics.png http://sls.cern.ch/sls/service.php?id=dcbynum <ul style="list-style-type: none">- Tape: 90 PB- Disk: 120 PB
WLCG grid	http://wlcg.web.cern.ch/ <ul style="list-style-type: none">- 157 sites: CERN + 11 Tier 1 sites + 145 Tier 2 sites- Sites from two main grid infrastructures : European EGI + US OSG- 6000 LHC experiment users worldwide: 40M jobs a month average- 20 PB of data in 2011 + 30 PB of data in 2012- Full copy of data at CERN + replication in 11 Tier 1 sites- CERN grid users consume 99% of CERN resources.- CERN provides 33% of the total resources used by EGI grid users.



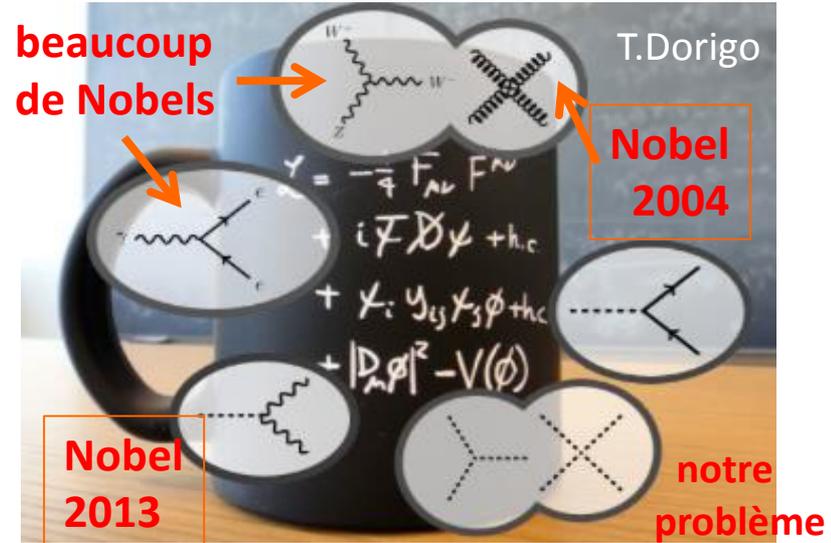
Le calcul au CERN

Le Modèle Standard des particules



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\mu g_\nu^\alpha \partial_\mu g_\nu^\alpha - g_\nu^\alpha f^{\mu\nu} \partial_\mu g_\nu^\alpha g_\nu^\alpha - \frac{1}{2}g_\nu^\alpha f^{\mu\nu} f^{\mu\nu} g_\nu^\alpha g_\nu^\alpha - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\nu^+ W_\nu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\nu^0 \partial_\mu Z_\nu^0 - \frac{1}{2}M^2 Z_\nu^0 Z_\nu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{\nu\alpha} (\partial_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+)) - \\
 & ig_{\nu\alpha} (\partial_\mu A_\nu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\mu^- W_\nu^+) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 Z_\nu^0 Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 Z_\nu^0 Z_\mu^0 (A_\mu W_\nu^+ A_\mu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - 2A_\nu Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \lambda \left(\frac{2M^2}{\mu} + \frac{2\mu}{\mu} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2\mu^2}{\mu} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \alpha_h (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) - \\
 & gM W_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g \frac{\mu}{\mu} Z_\nu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}ig \frac{1}{\mu} (Z_\nu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{\mu} Z_\nu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{1}{\mu} M Z_\nu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\nu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2s_w^2}{2s_w} Z_\nu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\nu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{\mu} Z_\nu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{\mu} Z_\nu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{1}{\mu} Z_\nu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\nu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\nu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{2s_w}{\mu} (2s_w^2 - 1) Z_\nu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\nu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^k (\bar{\psi}_i^a \gamma^a \psi_j^b) g_s^2 - e^2 (\gamma \partial + m_e^2) e^2 - e^2 (\gamma \partial + m_e^2) \nu^2 - u_e^2 (\gamma \partial + \\
 & m_e^2) u_e^2 - d_e^2 (\gamma \partial + m_e^2) d_e^2 + ig s_w A_\nu (-(\bar{e}^a \gamma^a e^a) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^a \gamma^a u_j^a) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^a \gamma^a d_j^a)) + \\
 & \frac{2e}{3} Z_\nu^0 ((\bar{e}^a \gamma^a (1 + \gamma^5) \nu^a) + (\bar{e}^a \gamma^a (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^a) + (\bar{d}_j^a \gamma^a (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^a) + \\
 & (\bar{u}_j^a \gamma^a (1 - \frac{2}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^a)) + \frac{2e}{3} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^a \gamma^a (1 + \gamma^5) U^{b\mu} \nu^a e^a) + (\bar{e}_j^a \gamma^a (1 + \gamma^5) C_{\mu}^a d_j^a)) + \\
 & \frac{2e}{3} W_\mu^- ((\bar{e}^a U^{b\mu} \nu^a (1 + \gamma^5) \nu^a) + (\bar{d}_j^a C_{\mu}^a \gamma^a (1 + \gamma^5) u_j^a)) + \\
 & \frac{2e}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^2 (\bar{\nu}^a U^{b\mu} \nu^a (1 - \gamma^5) e^a) + m_e^2 (\bar{e}^a U^{b\mu} \nu^a (1 + \gamma^5) e^a) + \\
 & \frac{2e}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^2 (\bar{e}^a U^{b\mu} \nu^a (1 + \gamma^5) \nu^a) - m_e^2 (\bar{\nu}^a U^{b\mu} \nu^a (1 - \gamma^5) e^a) - \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} H (\bar{\nu}^a \nu^a) - \\
 & \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} H (\bar{e}^a e^a) + \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} \phi^0 (\bar{\nu}^a \gamma^5 \nu^a) - \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} \phi^0 (\bar{e}^a \gamma^5 e^a) - \frac{1}{4} \nu_\lambda M_\lambda^2 (1 - \gamma_5) \nu_\lambda - \\
 & \frac{1}{4} \nu_\lambda M_\lambda^2 (1 - \gamma_5) \nu_\lambda + \frac{2e}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^2 (\bar{u}_j^a C_{\mu}^a (1 - \gamma^5) d_j^a) + m_e^2 (\bar{d}_j^a C_{\mu}^a (1 + \gamma^5) d_j^a) + \\
 & \frac{2e}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^2 (\bar{d}_j^a C_{\mu}^a (1 + \gamma^5) u_j^a) - m_e^2 (\bar{u}_j^a C_{\mu}^a (1 - \gamma^5) u_j^a) - \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} H (\bar{u}_j^a u_j^a) - \\
 & \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} H (\bar{d}_j^a d_j^a) + \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} \phi^0 (\bar{u}_j^a \gamma^5 u_j^a) - \frac{2}{3} \frac{M^2}{\mu} \phi^0 (\bar{d}_j^a \gamma^5 d_j^a) + G^a \partial^\mu G^a + g_s f^{\mu\nu\alpha} \partial_\mu G^a G^a g_s^2 + \\
 & \bar{X}^a (\not{\partial} - M^2) X^a + \bar{X}^b (\not{\partial} - M^2) X^b + \bar{X}^c (\not{\partial} - \frac{M^2}{\mu}) X^c + ig_{\nu\alpha} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^a X^b - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^b X^a) + ig_{\nu\alpha} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^c X^d - \partial_\mu \bar{X}^d X^c) - ig_{\nu\alpha} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^a X^b - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^b X^a) + ig_{\nu\alpha} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^c X^d - \partial_\mu \bar{X}^d X^c) + ig_{\nu\alpha} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^a X^b - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^b X^a) - \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{2}\bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1}{2}igM s_w (\bar{X}^+ X^0 \phi^- - \bar{X}^- X^0 \phi^+) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^0 X^+ \phi^- - \bar{X}^0 X^- \phi^+) + igM s_w (\bar{X}^+ X^0 \phi^- - \bar{X}^- X^0 \phi^+) +
 \end{aligned}$$

A.Connes



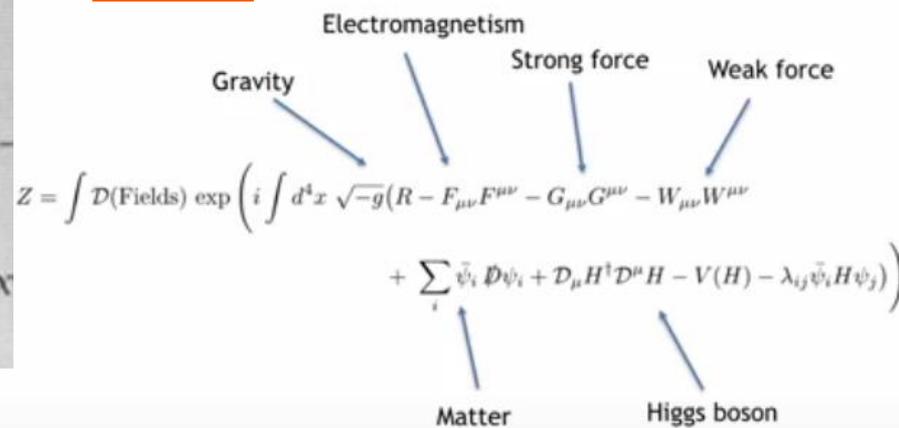
beaucoup de Nobels

T.Dorigo

Nobel 2004

Nobel 2013

notre problème



Les très grands



Planck'



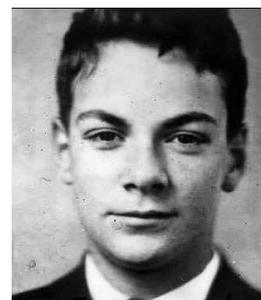
Pauli'



Dirac'



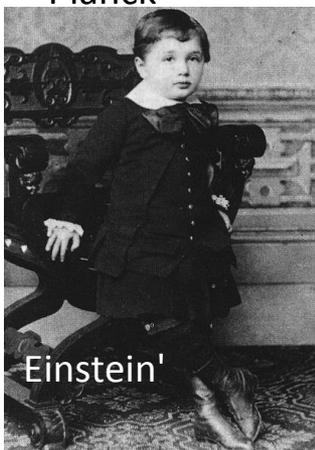
Dyson'



Feynman'



GellMann'



Einstein'



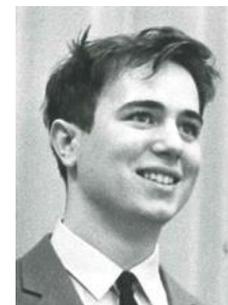
Pauli'



Feynman'



Weinberg'



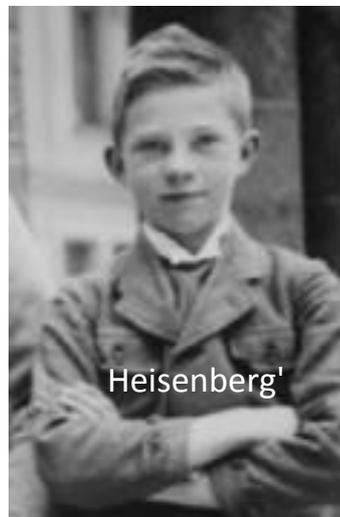
Wilczek'



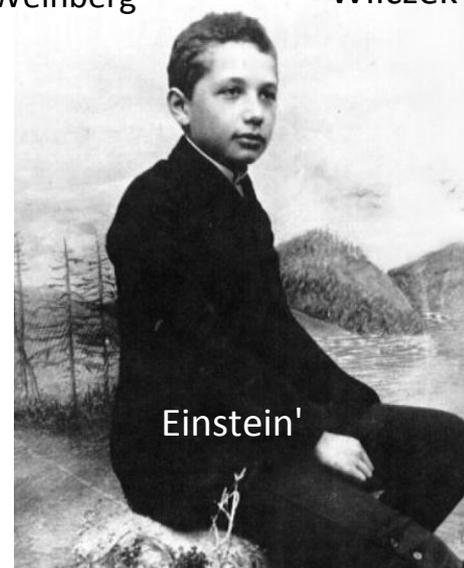
Schrodinger'



Pauli'



Heisenberg'



Einstein'

Sur le boson de Higgs: un peu plus dur....

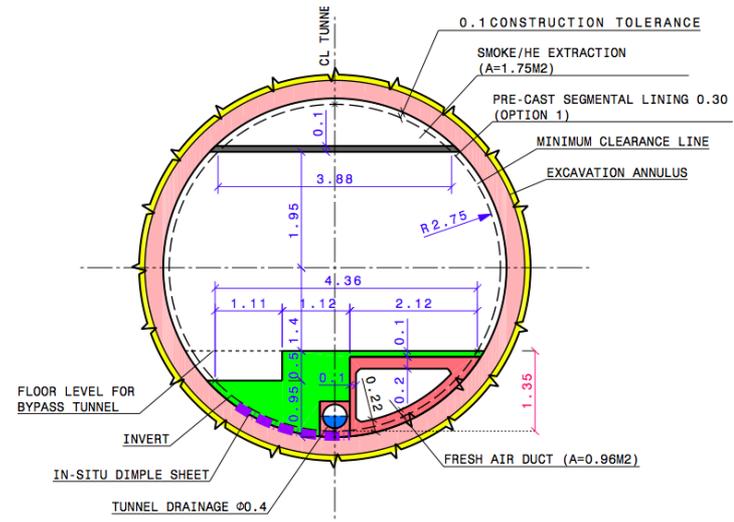
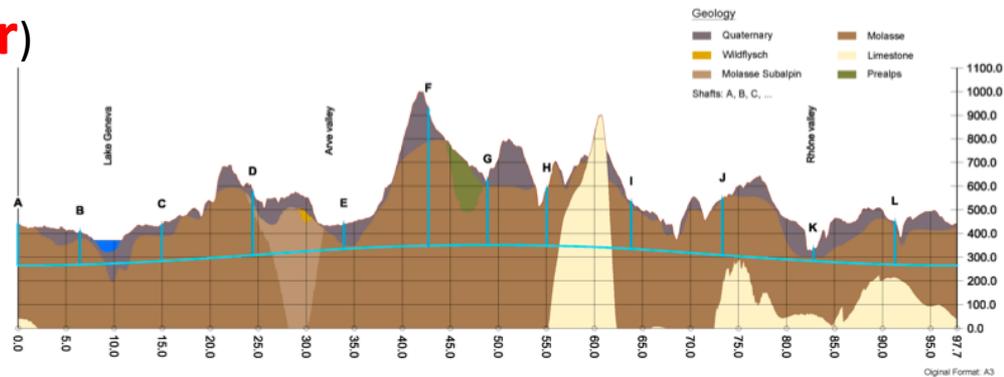
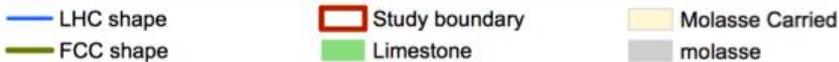
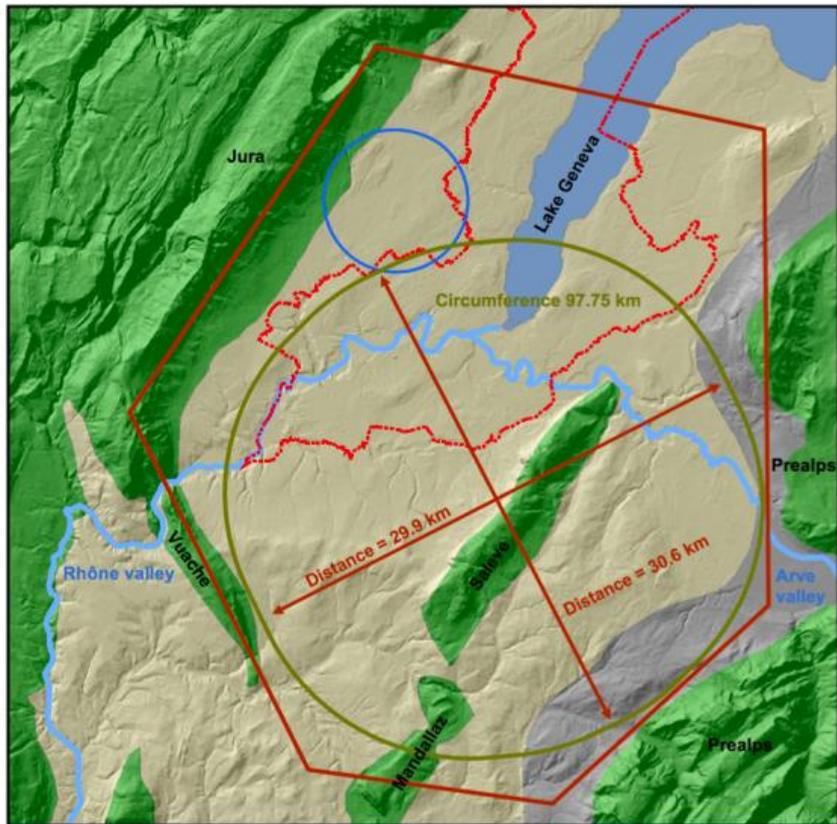
Admettre: 1/ que dans le monde quantique une particule de masse m a un rayon d'action $\approx 1/m$ car elle ne peut être échangée qu'en respectant les limites du principe d'incertitude temps-énergie
2/ dans un champ d'une certaine nature une particule ayant une "charge" de même nature peut acquérir une masse

Ex 1: dans un matériau supraconducteur existe un champ nouveau appelé champ des "paires de Cooper" (deux électrons qui s'associent pour donner un objet nouveau). On peut dire qu'un photon de masse nulle, pénétrant dans ce matériau et ce champ, devient une particule virtuelle qui acquiert une masse non nulle $m \approx \sqrt{\text{densité des paires de Cooper}}$, $\approx 10^{-36}$ kg (bien plus que la limite supérieure de la masse du photon réel). Son rayon d'action est alors limité: il ne peut pénétrer profond dans le supraconducteur (≈ 100 nm). Donc un champ magnétique ne pénètre pas un supraconducteur: c'est l'effet Meissner. Un supraconducteur repousse le champ magnétique, donc repousse un aimant, ce qui peut vaincre la gravité et le faire léviter.

Ex 2: le vide quantique est un supraconducteur pour l'interaction faible. Il y existe un champ nouveau, le champ de Higgs. Une particule de masse nulle sous l'action de ce champ acquiert une masse non nulle m proportionnelle à la "densité" du champ de Higgs. Les bosons transmettant la force faible, W et Z, deviennent très massifs, de l'ordre de 100 GeV, et leur rayon d'action devient très faible, $\approx 10^{-18}$ m

NB: -- le champ de Higgs est donc énormément plus efficace que celui des paires de Cooper
-- la force faible apparaît faible à nos énergies à cause de ce faible rayon d'action de ses vecteurs.
En fait intrinsèquement elle est plus forte que l'électromagnétique
-- le mécanisme de Higgs est relativiste, pas la supraconductivité
-- une paire de Cooper est un objet composite alors que le boson de Higgs, quantum du champ de Higgs, semble élémentaire. Mais nous vérifions...
-- les particules élémentaires interagissent aussi avec le champ de Higgs et acquièrent une masse $m \approx \text{"densité" du champ de Higgs} \times \text{un facteur propre à chaque particule (zéro pour le photon)}$
-- on peut dire qu'une particule se butant sur le champ de Higgs, un scalaire, et rebondissant garde la même orientation de son spin, donc change d'hélicité. Pouvoir changer d'hélicité implique d'aller moins vite que la lumière, pour pouvoir être doublé, donc d'avoir une masse.

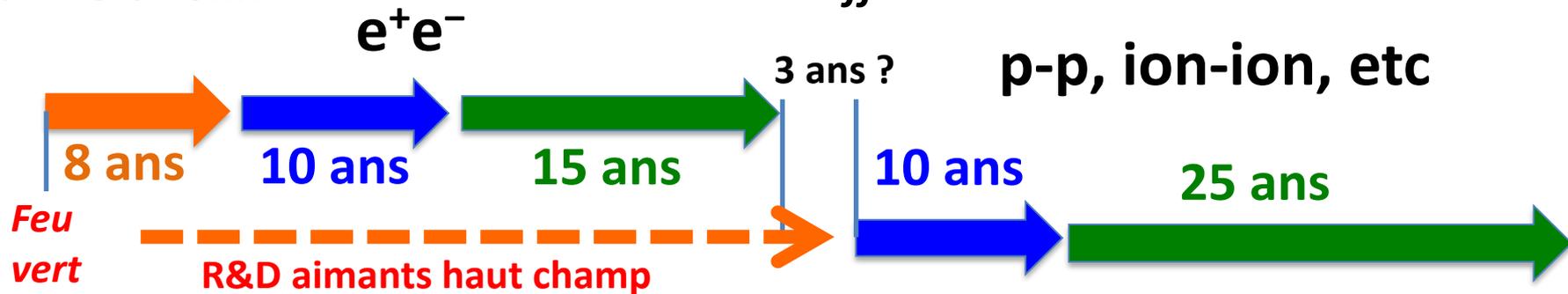
Le FCC (Future Circular Collider)



pour 70 ans....

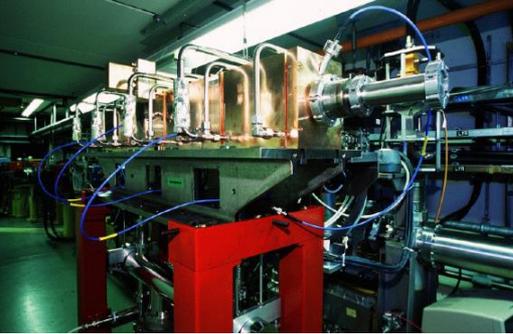
Pas officiel...

p-p, ion-ion, etc



**René Vernadet
filmant**

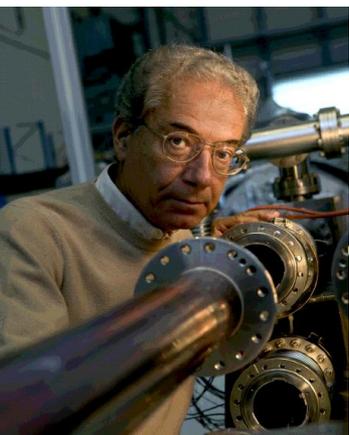




LIBO, pour la hadronthérapie



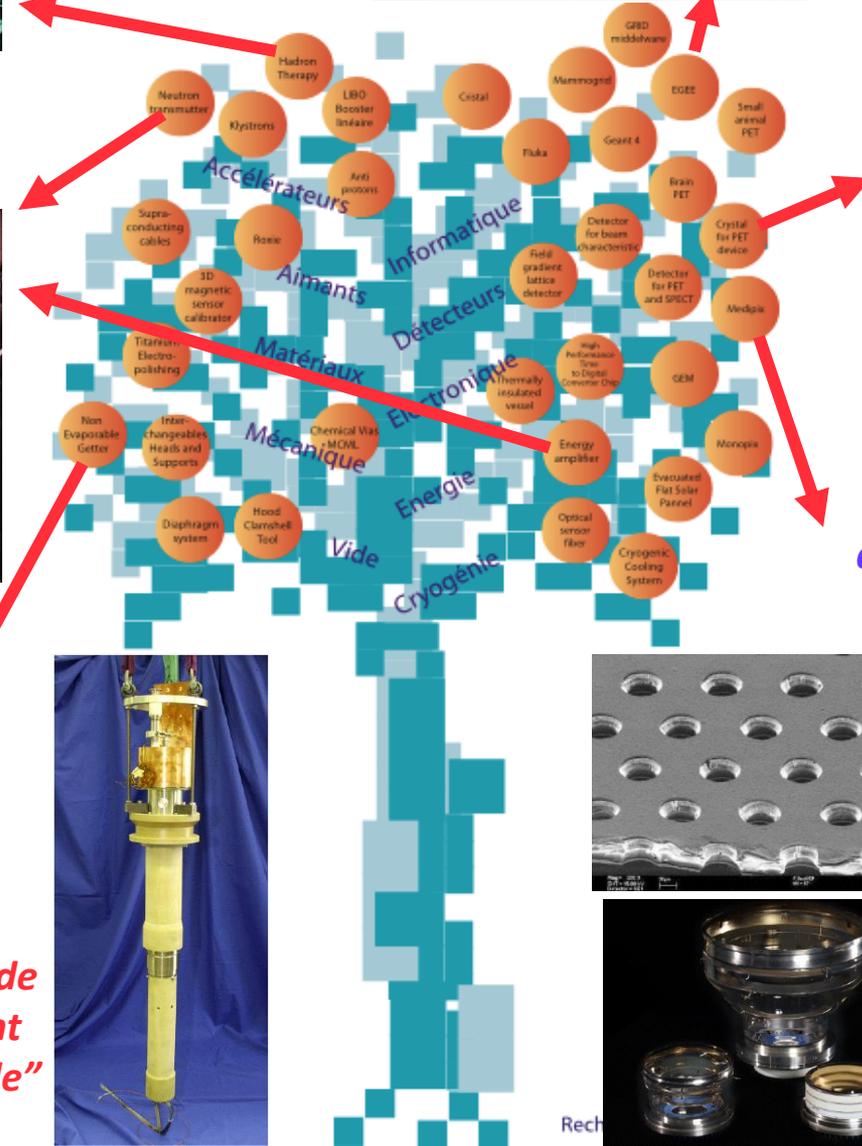
amplificateur d'énergie ultravide



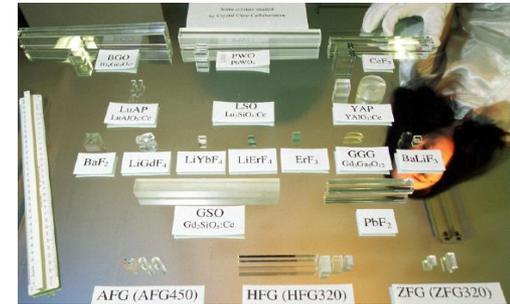
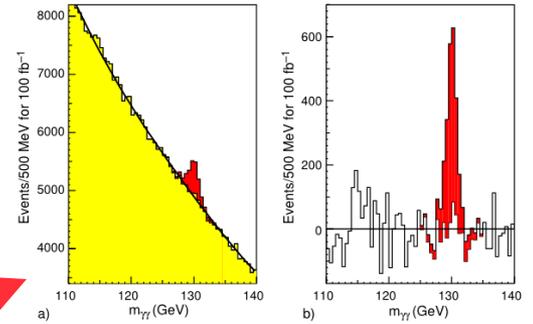
entrée de courant "chaude"



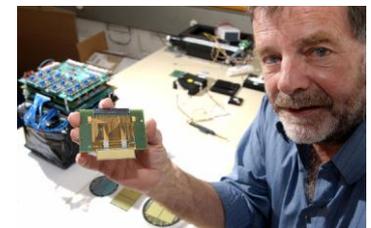
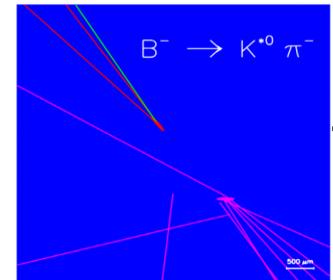
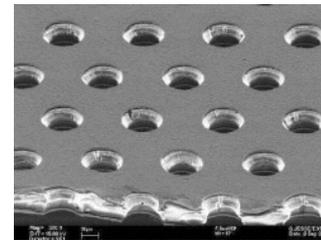
Le WEB, puis la GRILLE (LHCG, EGEE, OpenLab)



de la détection de photons pour le boson de Higgs à la tomographie



du marquage de la beauté à l'imagerie médicale



Proton → **Hadronthérapie** France (protons) Suisse PSI Japon
Antiproton → **protons, ions carbone** Caen, Orsay, Nice Allemagne US
 Linac, cyclotron, synchr. → **ENLIGHT** *Cyclhad* Italie (Pavie), Autriche
Positron → **PET scan**

ISOLDE, MEDICIS (alchimie moderne) → **PET scan**
Cryogénie 1.9K (helium superfluide) → **PET scan**
Radiofréquence (e.g. 400 MHz) → **PET scan**
Ultravide (pompage getter) → **PET scan**
Spin Solénoïde supra → **PET scan**
Détecteurs silicium (pixels, micropistes, CCD) → **PET scan**
Électronique associée → **PET scan**
Cristaux scintillants (BGO, LYSO, PbWO4) → **PET scan**
Photodétecteurs (Avalanche PD, SiPM) → **PET scan**
Résolution temporelle (nanoseconde, → picosec.) → **PET scan**
Acquisition de données → **PET scan**
Reconstruction d'événements → **PET scan**

Hadronthérapie → **thérapie e α , β , γ**
PIMMS
isotopes

IRM Neurospin Iseult 11.7 T diam 90cm 500 MHz

Tomographie Computérisée (scanner) *Medipix, Timepix chips*

isolation thermique
solaire thermique

WEB
 → **Boson de Higgs, Modèle Standard**