# L'accélérateur LHC et ses détecteurs au CERN : les enjeux

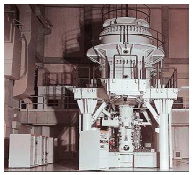
Jean Paul Martin, Journée académique « milieux extrêmes » à Lyon, 5 février 2009

# Challenges

- L'infiniment petit (d'aujourd 'hui) : les particules élémentaires et leurs interactions
- Le collisionneur et ses techniques (extrêmes)
- Les détecteurs de particules et leurs techniques ultimes (ex : CMS)
- La conquête de nouvelles frontières : les réponses aux grandes questions de physique…

# Question d'échelle

**Instruments**



Accelerators
**LHC, LEP**

(Particle beams)
Electron
Microscope
Microscope

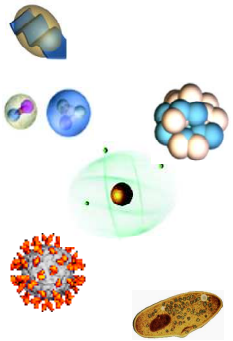
Telescope

Radio
Telescope

$10^{-34}$
$10^{-30}$
$10^{-26}$
$10^{-22}$
$10^{-18}$
$10^{-14}$
$10^{-10}$
$10^{-6}$
1m
$10^{6}$
$10^{10}$
$10^{14}$
$10^{18}$
$10^{22}$
$10^{26}$

**Observables**

SUSY particle?
Higgs? (range of nuclear force)
Z/W
Proton (range of weak force)
Nuclei
Atom



Virus
Cell

Earth radius
Earth to Sun

Galaxies
Radius of observable
Universe

# Constituants Élémentaires

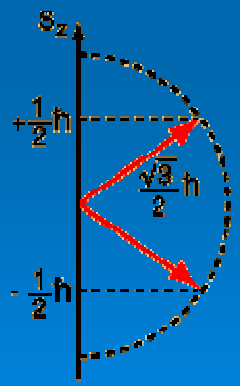
**Particule :** Objet de **masse, spin**, charge électrique, …déterminés et de taille inférieure à $10^{-15}$ mètre (1 fm)

**Particule élémentaire :** Particule qui n'est pas un état lié d'autres objets plus simples (notion qui peut être provisoire pour la particule considérée!)

# Spin

**Pauli** en **1925** explique l'effet Zeeman (dédoublement des raies en présence d'un champ magnétique) en proposant une propriété particulière de l'électron de valence décrite à l'aide de deux nombres.

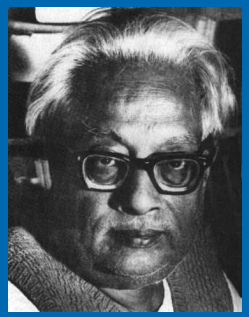
Quelques mois après, Ulhenbeck et Goudsmith interprètent le dédoublement de Pauli en introduisant la notion de **spin** (de l'anglais "to spin" , tourner)




**<u>spin</u>** : « moment cinétique intrinsèque », **nombre quantique**, qui mesuré en unités ħ peut prendre des valeurs soit entières soit demi-entières

( $\hbar = 1{,}054\ 571\ 596 \times 10^{-34}$ J s )

$$S_z = \pm \frac{1}{2}\hbar$$



# Bosons & Fermions

**Statistiques quantiques:**

**BOSONS**
**Spin entier**

**FERMIONS**
**Spin demi-entier**

**<u>Bose-Einstein:</u> En 1924**
**Bose (1894-1974) introduit l'indiscernabilité des photons. Einstein généralisa sa théorie quelques mois plus tard.**
**Comportement collectif: grégaire (« moutons de panurge »)**

**Ex.: laser, supraconductivité …**

**<u>Fermi-Dirac:</u> En 1926**
**Fermi (1901-1954) établit une statistique quantique valable pour les électrons.**

**Comportement collectif: individualiste (principe d'exclusion de Pauli)**

**Ex.: électrons dans un atome …**

# Particules Élémentaires

**Constituants fondamentaux**

de la matière :

particules de spin ½

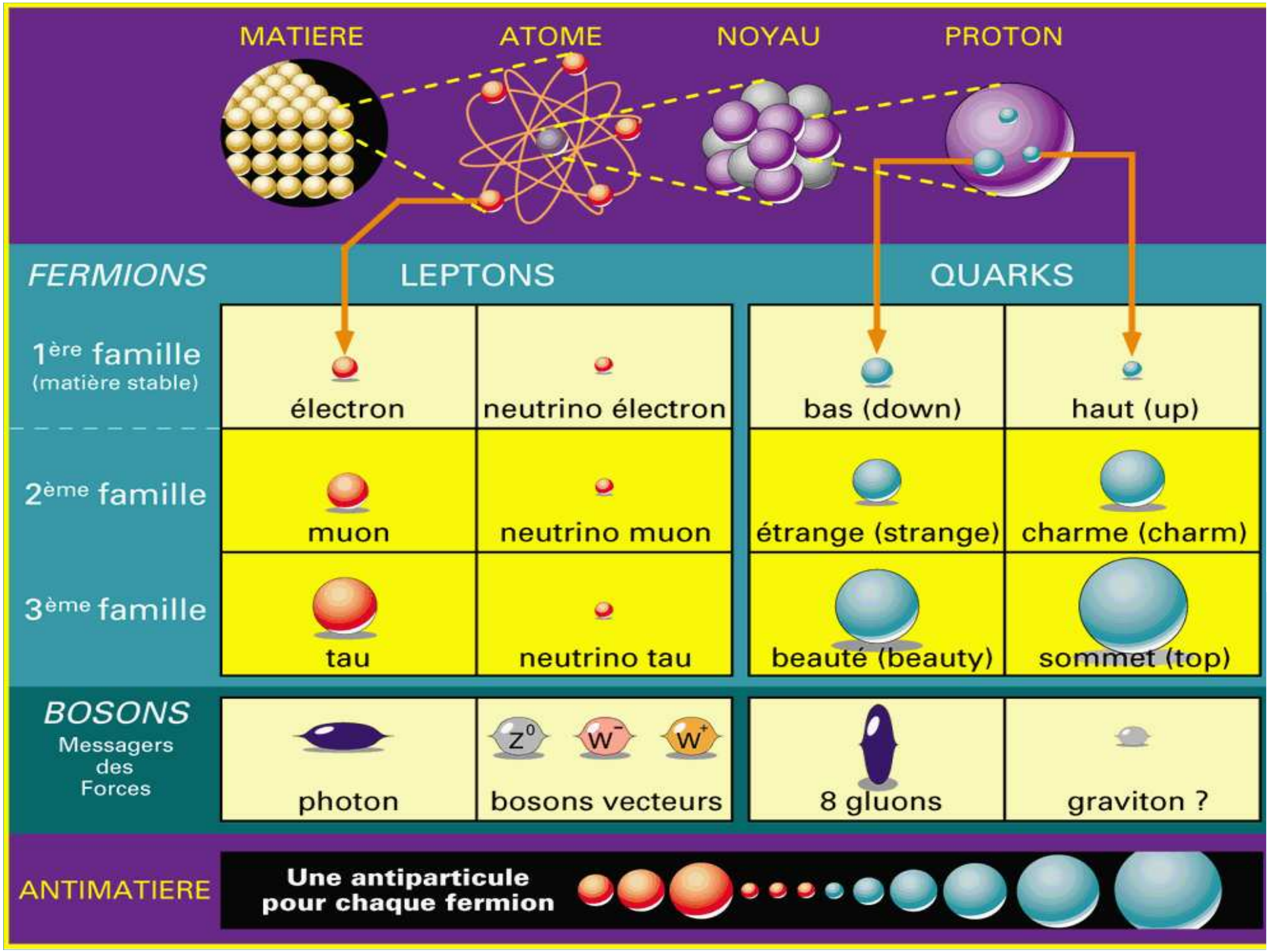
**Fermions**

**Quanta**

des champs d'interaction :

particules de spin entier

**Bosons**


MATIERE
ATOME
NOYAU
PROTON
FERMIONS
LEPTONS
QUARKS
1ère famille
(matière stable)
électron
neutrino électron
bas (down)
haut (up)
2ème famille
muon
neutrino muon
étrange (strange)
charme (charm)
3ème famille
tau
neutrino tau
beauté (beauty)
sommet (top)
BOSONS
Messagers
des
Forces
photon
Z0
W−
W+
bosons vecteurs
8 gluons
graviton ?
ANTIMATIERE
Une antiparticule
pour chaque fermion

# Masses des leptons

| | | |
|---|---|---|
| $<M\nu_e> \leq 3$ eV | $<M\nu_\mu> \leq 0{,}19$ MeV | $<M\nu_\tau> \leq 18{,}2$ MeV |
| $M_e \sim 0{,}511$ MeV | $M_\mu \sim 106$ MeV | $M_\tau \sim 1777$ MeV |

- $M_e = 0{,}510998902 \pm 0{,}000000021$ MeV
- $M_\mu = 105{,}658357 \pm 0{,}000005$ MeV
- $M_\tau = 1776{,}99\ ^{+0{,}29}_{-0{,}26}$ MeV
- fermions : spin 1/2
- l'électron est stable
- les $\mu$ et $\tau$ peuvent se désintégrer
- les neutrinos sont de charge nulle
- interaction faible pour les neutrinos
- interaction faible et électromagnétique pour les leptons chargés

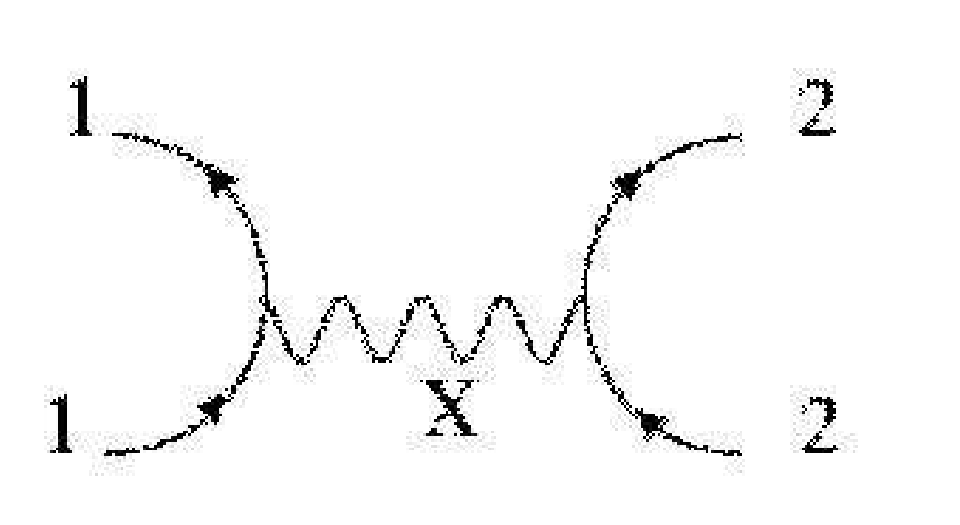
# Masse des quarks

| | | |
|---|---|---|
| $M_u \sim 1{,}5 - 4{,}5$ MeV | $M_c = 1 - 1{,}4$ GeV | $M_t = 174{,}3 \pm 5{,}1$ GeV |
| $M_d \sim 5 - 8{,}5$ MeV | $M_s = 80 - 155$ MeV | $M_b = 4 - 4{,}5$ GeV |

- portent une charge de couleur
- n'existent pas à l'état libre (confinement)
- charge électrique fractionnaire (+2/3 pour u,c,t et –1/3 pour d,s,b)
- interaction forte, électromagnétique et faible
- saveur = nature du quark : u, d, s, c, b, t
- les quarks lourds peuvent se désintégrer
- fermions : spin 1/2

# Masse des bosons médiateurs

Masse du boson $m_X$ et portée de l'interaction $\lambda_C$ :




$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Rightarrow \quad \Delta E \cdot \Delta t \approx h,$$

$$avec \quad \lambda_C = c \cdot \Delta t \quad \Rightarrow$$

$$m_X \cdot c^2 \cdot \frac{\lambda_C}{c} \approx h \quad \Rightarrow$$

$$\lambda_C = \frac{h}{m_X \cdot c}$$

Portée de l'interaction

Masse du boson échangé

# Interaction Gravitationnelle

- Essentielle à l'échelle macroscopique, mais négligeable aux échelles atomique, nucléaire et subnucléaire.

- S'exerce sur toutes les particules

- Quantum échangé : Graviton ?
  de spin 2 et de masse nulle

- Interaction à longue portée (quanta de masse nulle) dépendant des masses (énergies)

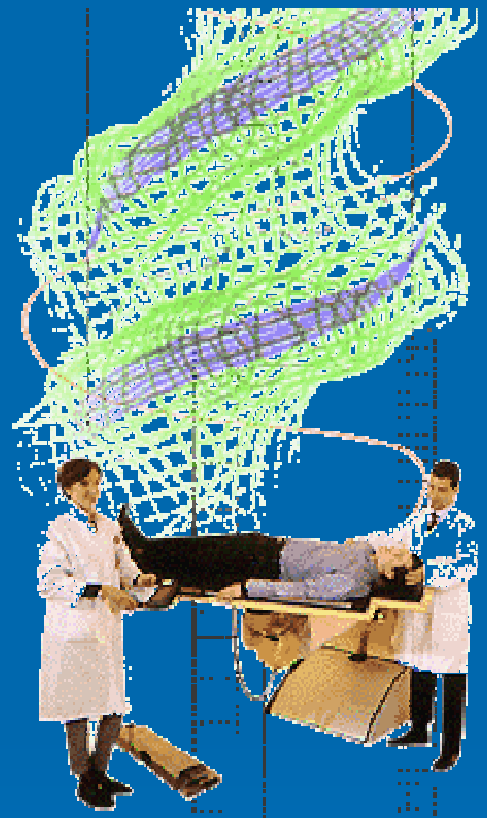
# Interaction Électromagnétique

- S'exerce sur toutes les particules possédant une charge électrique : e, $\mu$, $\tau$, q

- Quantum échangé : Photon de spin 1 et de masse nulle

- Interaction à longue portée dépendant de la charge électrique

# Interaction Faible



- Les phénomènes naturels qui font intervenir l'interaction faible sont des désintégrations (radioactivité β…)
- S'exerce sur toutes les particules
- Les quanta échangés :

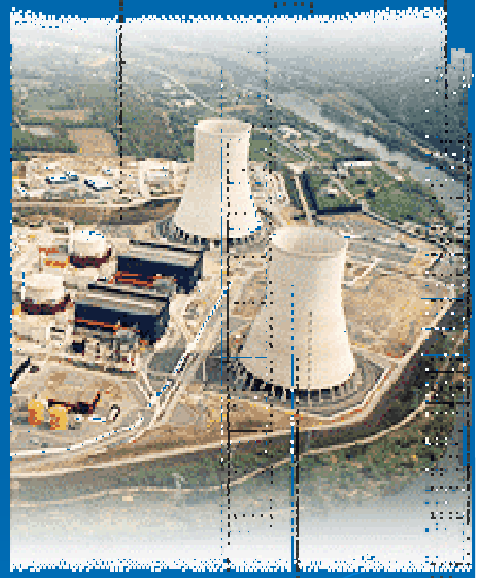
  les bosons $W^+$ et $W^-$ de spin 1
  et de masse ~ 80 GeV
  qui ne conservent pas la saveur.
  ($M_W$ = 80,450 ± 0,034 GeV)
  le boson $Z^0$ de spin 1
  et de masse ~ 91 GeV
  ($M_Z$ = 91,1876 ± 0,0021 GeV)
- Interaction de courte porté ($M_W$ et $M_Z$ élevées)

# Interaction Forte

- S'exerce uniquement sur les quarks et antiquarks

- 3 charges de couleur possibles pour les quarks :
  **R (red), G (green), B (blue)**

- les quanta échangés : 8 gluons
  de spin 1 et de masse nulle



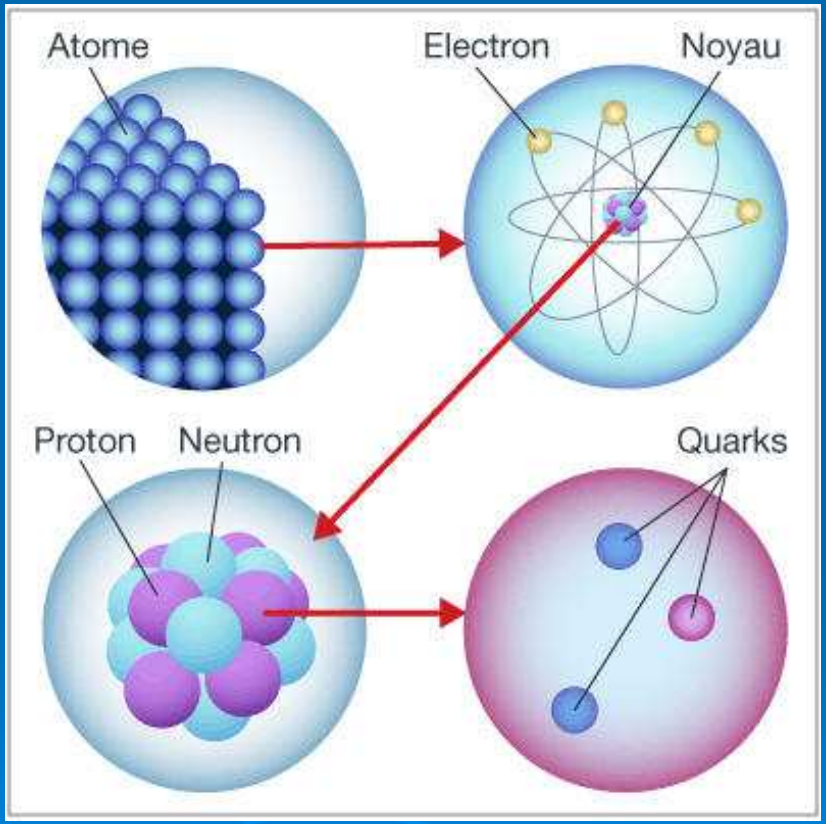
- les gluons interagissent entre eux car ils sont porteurs eux-mêmes de 2 charges de couleur!

- explique la cohésion des quarks dans le proton et le neutron, ainsi que la cohésion des protons et neutrons dans le noyau

# Interactions

| Nom | Intensité relative | Particules subissant | Portée (m) |
|---|---|---|---|
| Forte | 1 | Quarks<br>Hadrons | $10^{-15}$ |
| Electromagnétique | $10^{-2}$ | Particules électriquement chargées | Infinie |
| Faible | $10^{-5}$ | Electrons<br>Neutrinos<br>Quarks | $10^{-18}$ |
| Gravitationnelle | $10^{-39}$ | Tout | Infinie |

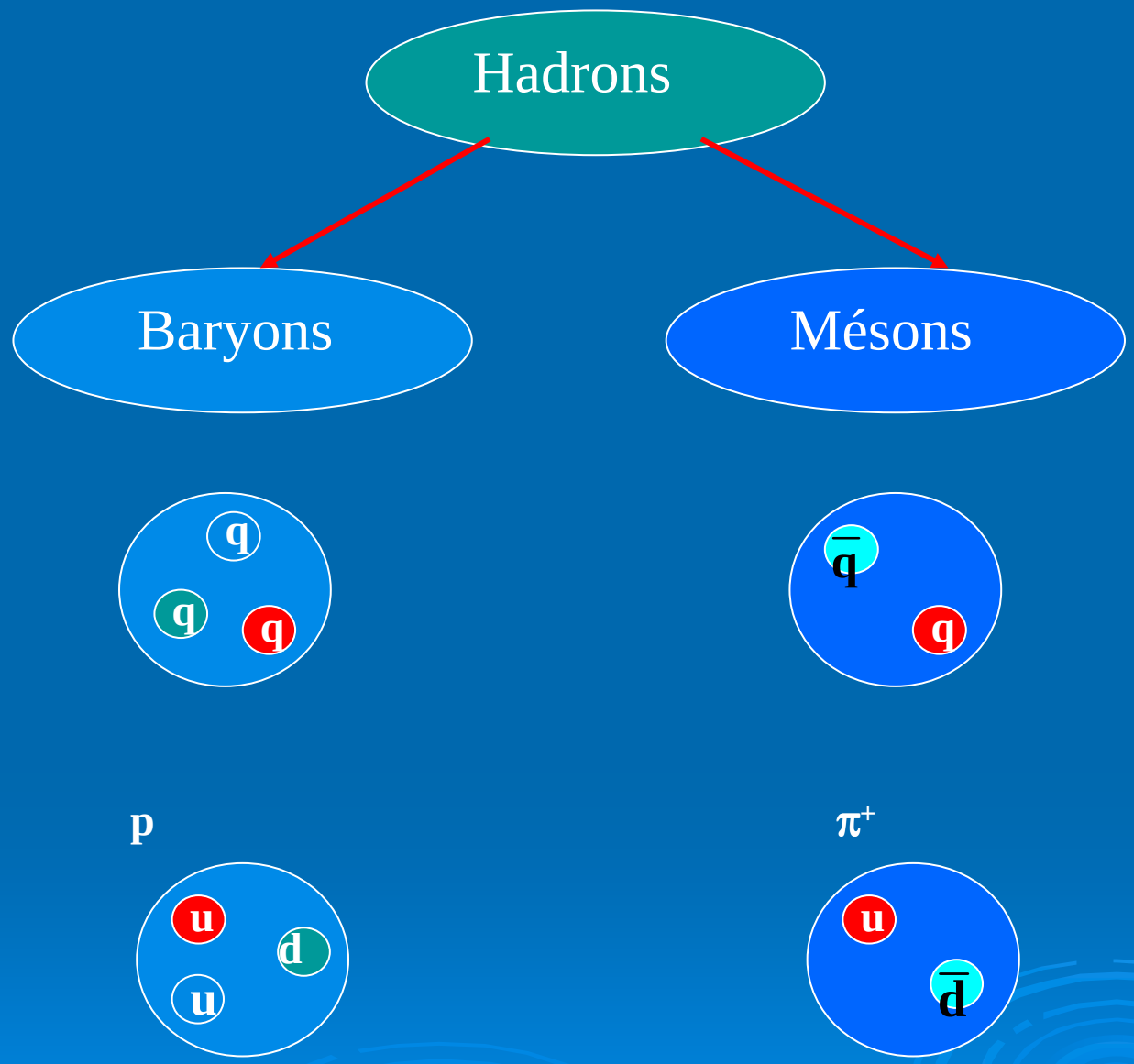
# Au cœur de la matière




Interaction électromagnétique

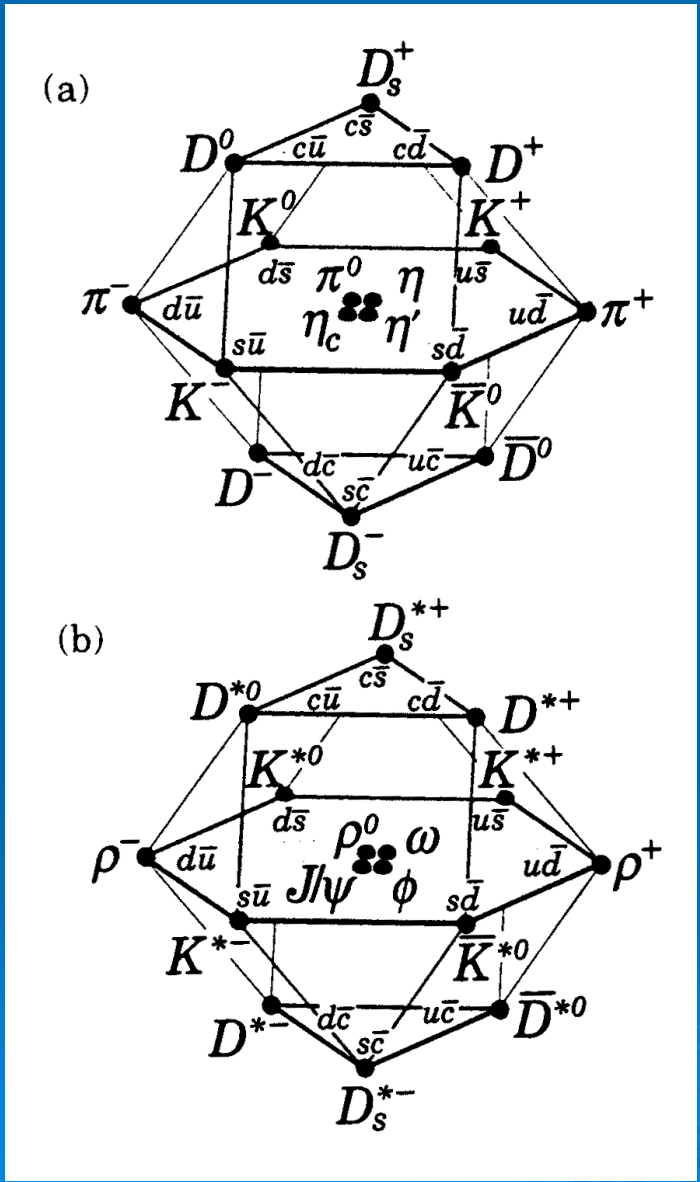
Interaction faible (cas des noyaux radioactifs)

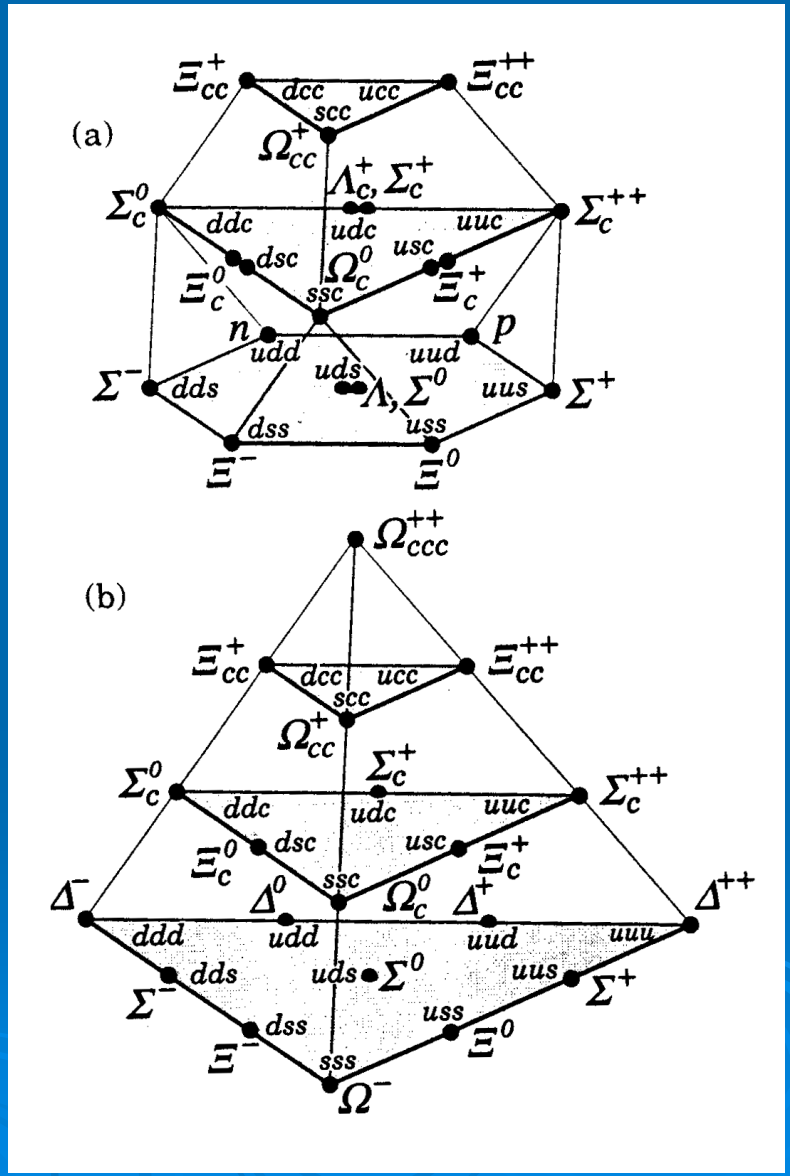
**Interaction forte**



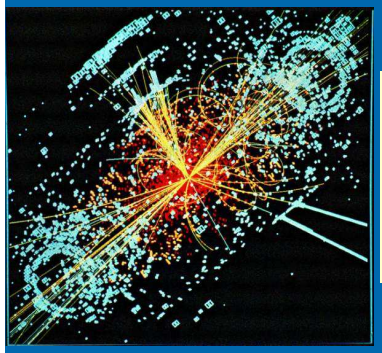

Un hadron est un composé de particules élémentaires régi par l'interaction forte.
Il est formé de quarks et/ou d'anti-quarks ainsi que de gluons.

# Mésons et baryons

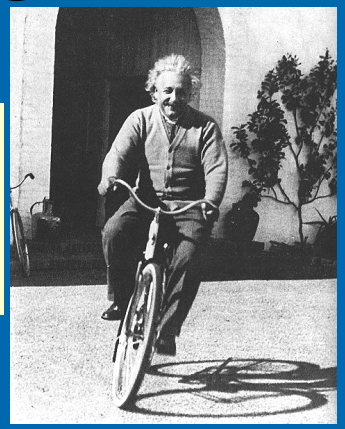


# Masse, Énergie, Impulsion



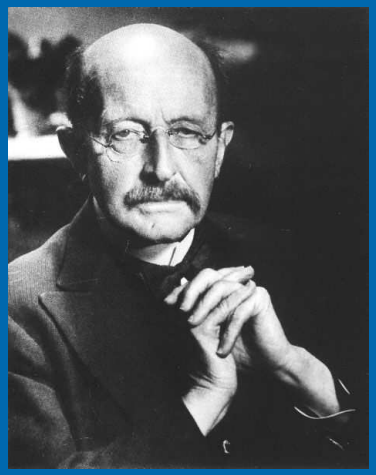
$$E^2 = p^2c^2 + m_0{}^2c^4$$



**E** = énergie (GeV) **p** = **impulsion** (GeV/c)
$\mathbf{m_0}$ = masse au repos (GeV/$c^2$)
c = vitesse de la lumière dans le vide

- si la particule n'a pas de masse $\Rightarrow$ $E = pc$
- si la particule est au repos $\Rightarrow$ $E = m_0c^2$

# Quantification



Solution du problème du corps noir: en 1900, Planck parvient a trouver la loi de rayonnement du corps noir. Pour cela, il a du supposer que les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement se font de manière discontinue, par « quanta » d'énergie:

$$E = n \cdot h \cdot \nu, \quad n \in \mathrm{N}$$

la quantité minimale échangeable étant le quantum d'énergie:

$$\boxed{E = h \cdot \nu}$$

son résultat, la quantification de l'énergie, introduit pour la première fois des grandeurs physiques discontinues.
C'est le premier acte de la révolution quantique.

# Principe d'incertitude d'Heisenberg

<u>Inégalités d'Heisenberg</u>: Heisenberg démontre qu'on ne peut mesurer avec une précision arbitraire des couples de variables « incompatibles » :

$$\Delta Q \cdot \Delta P \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

# Durée de vie des particules

Ces durées de vie sont une fonction inverse des « forces » de couplage des interactions : $\alpha$

$$\tau \sim A / \alpha$$

- Interaction faible $\sim 10^{-6} - 10^{-8}$ s ($10^{-12}$ ou supérieure)
  ex : $\mu^-, \pi^- \rightarrow \mu^- \nu$
- Interaction électromagnétique $\sim 10^{-20} - 10^{-16}$ s
  ex : $\Delta \rightarrow p\, \pi$
- Interaction forte $\sim 10^{-23}$ s
  ex : $\pi^0 \rightarrow \gamma\, \gamma$

# Masse d'un nucléon

- Masse du proton : 938 MeV

  Masse de 2 quarks u et d'un quark d ~ 10 ± 5 MeV

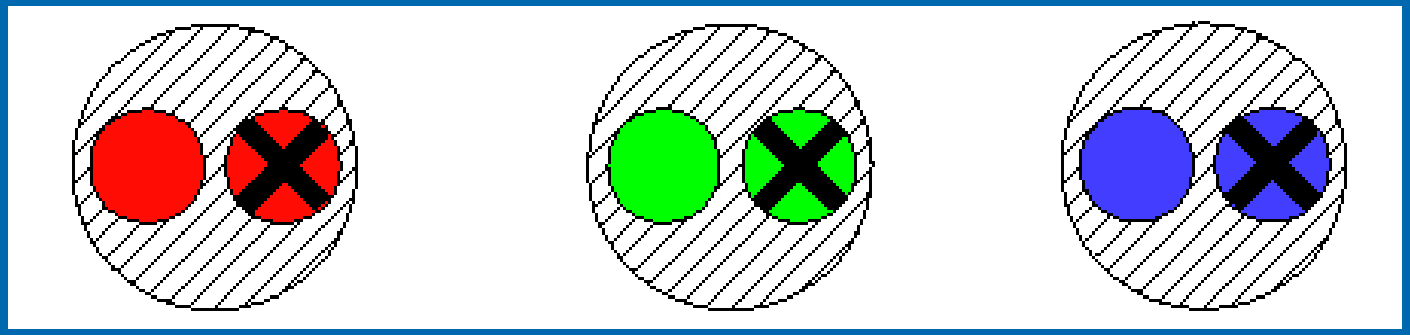
  **99% de la masse** du proton (et donc de l'atome d'hydrogène) est due à l'énergie de liaison!

  L'interaction concernée est l' interaction forte entre quarks décrite par la

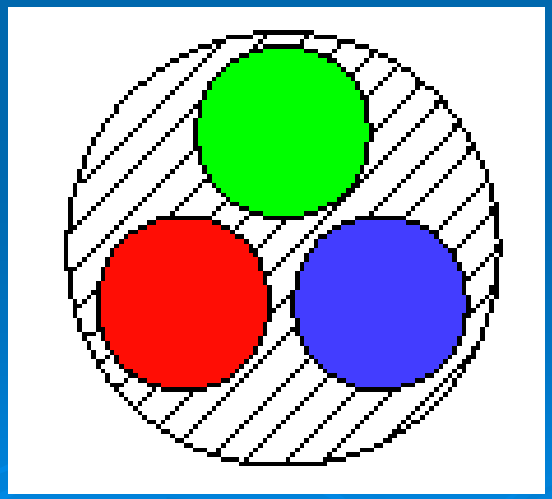
  Chromodynamique Quantique (QCD)

# La charge de Couleur

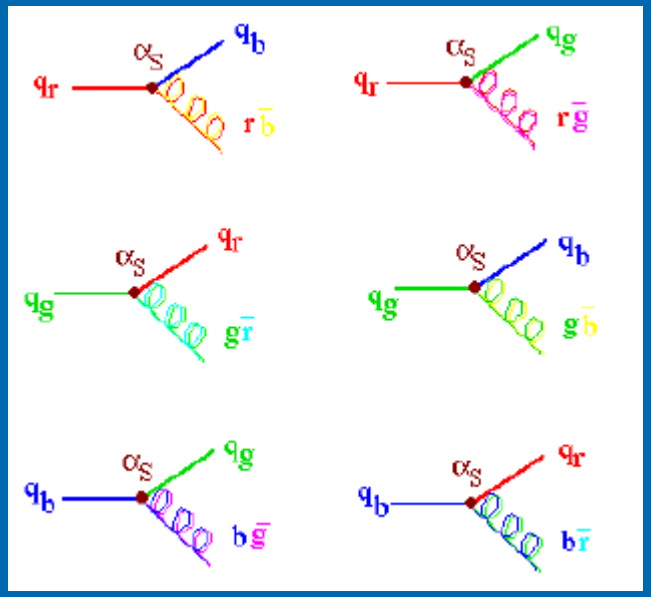
Mésons

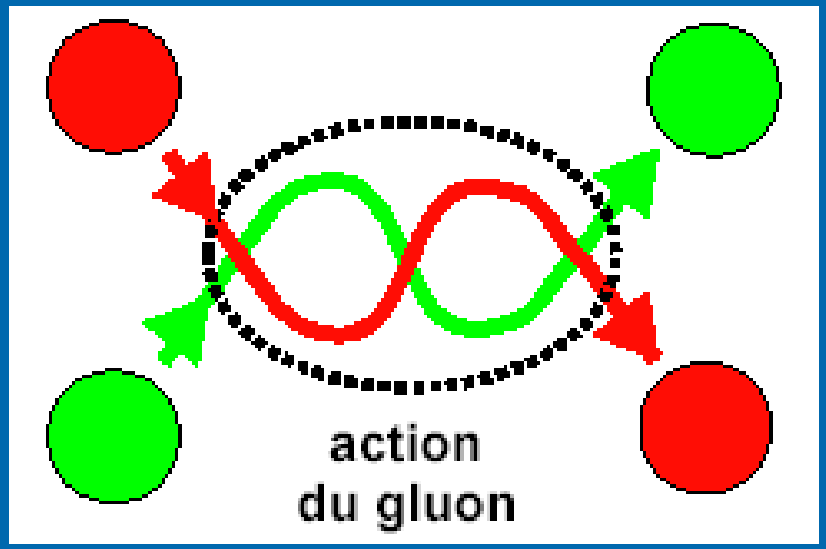


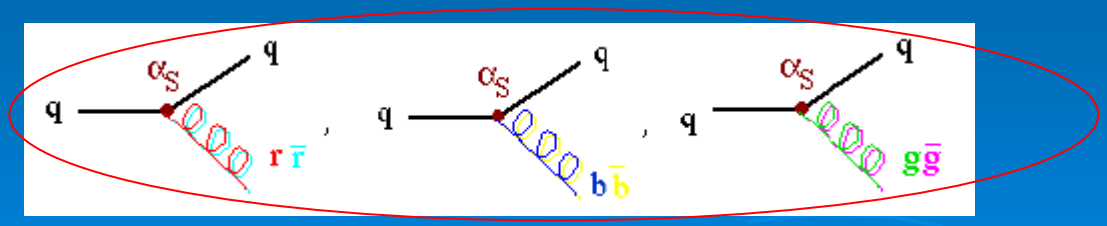
Baryons



# La charge de Couleur

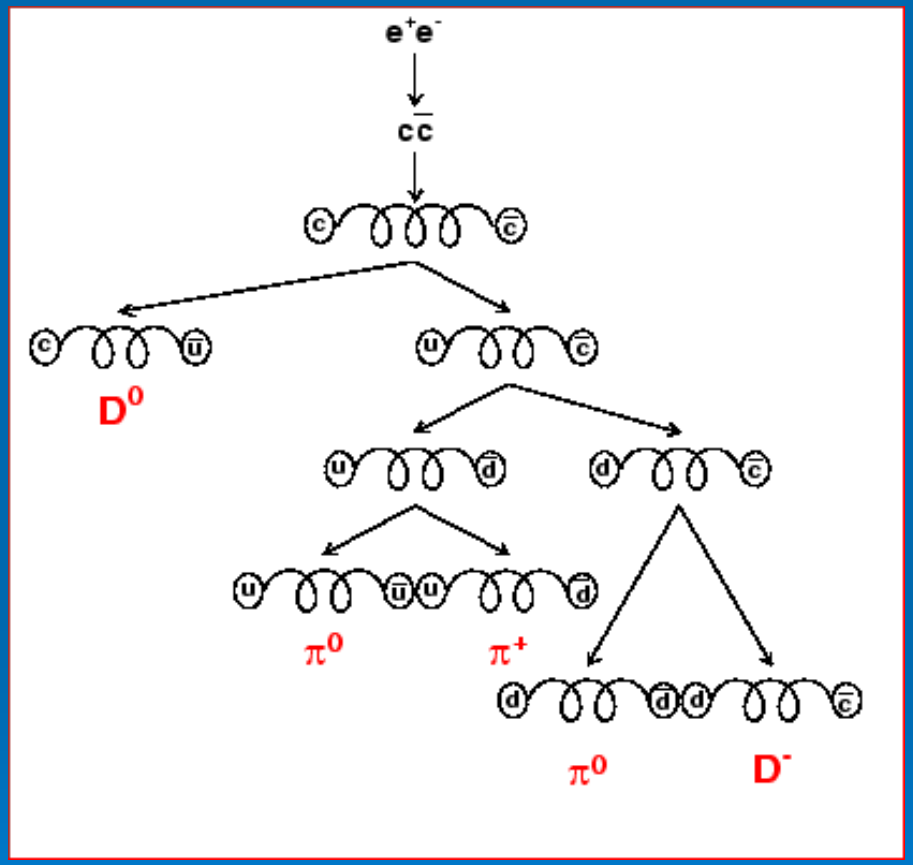


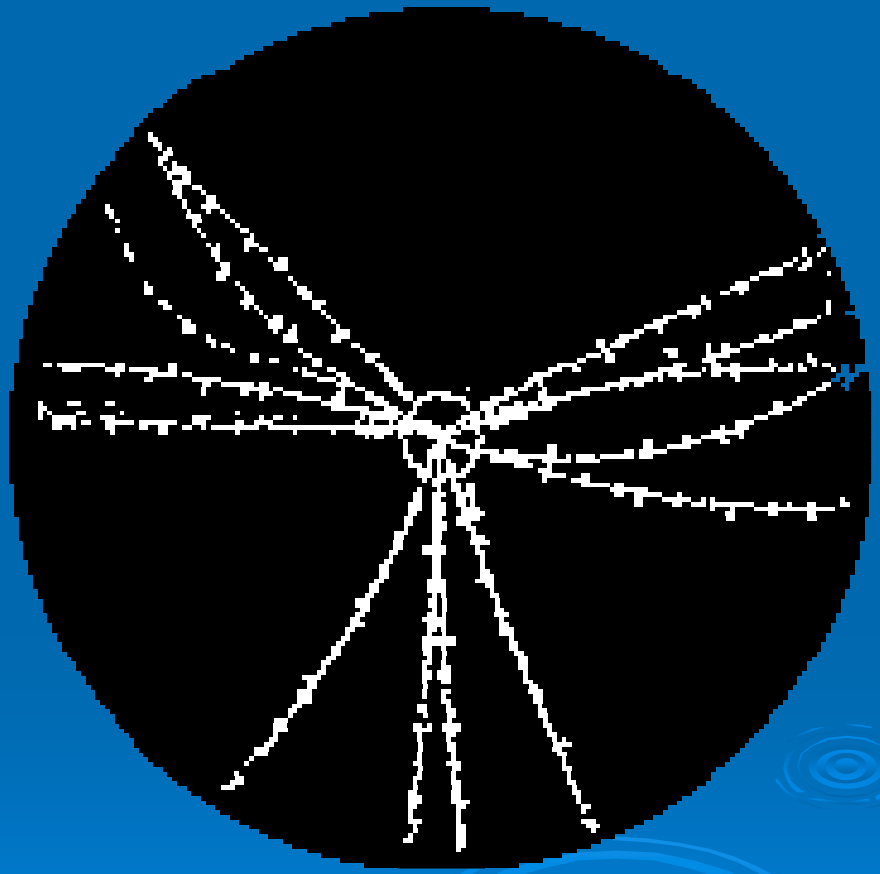



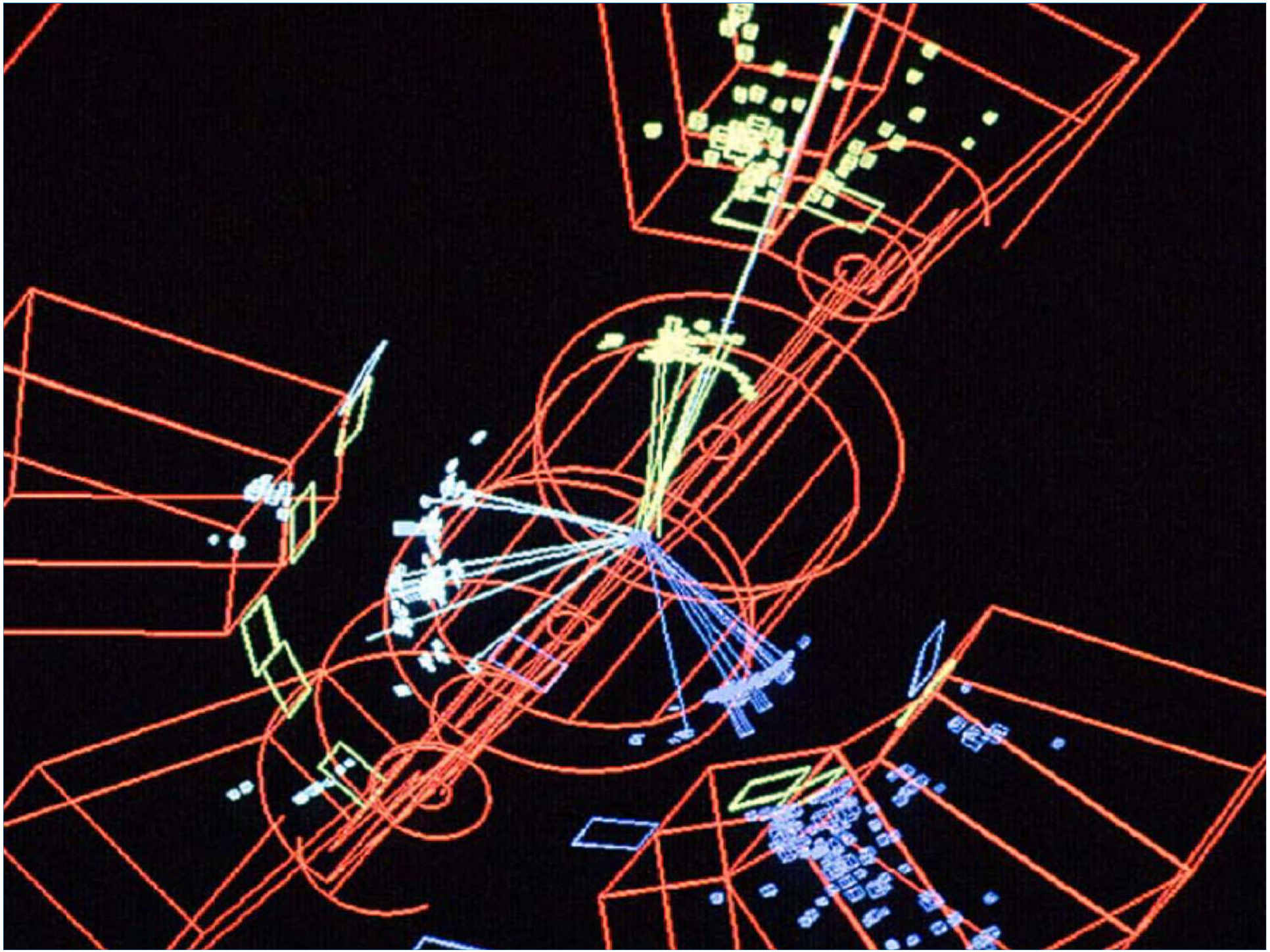




$\Rightarrow$ Seulement 2 combinaisons linéaires portant la couleur! (singlet rr + bb + gg ne contribue pas)

# Les jets de hadrons





Un très grand accélérateur :

LHC = Large Hadron Collider

Grand Collisionneur de Hadrons

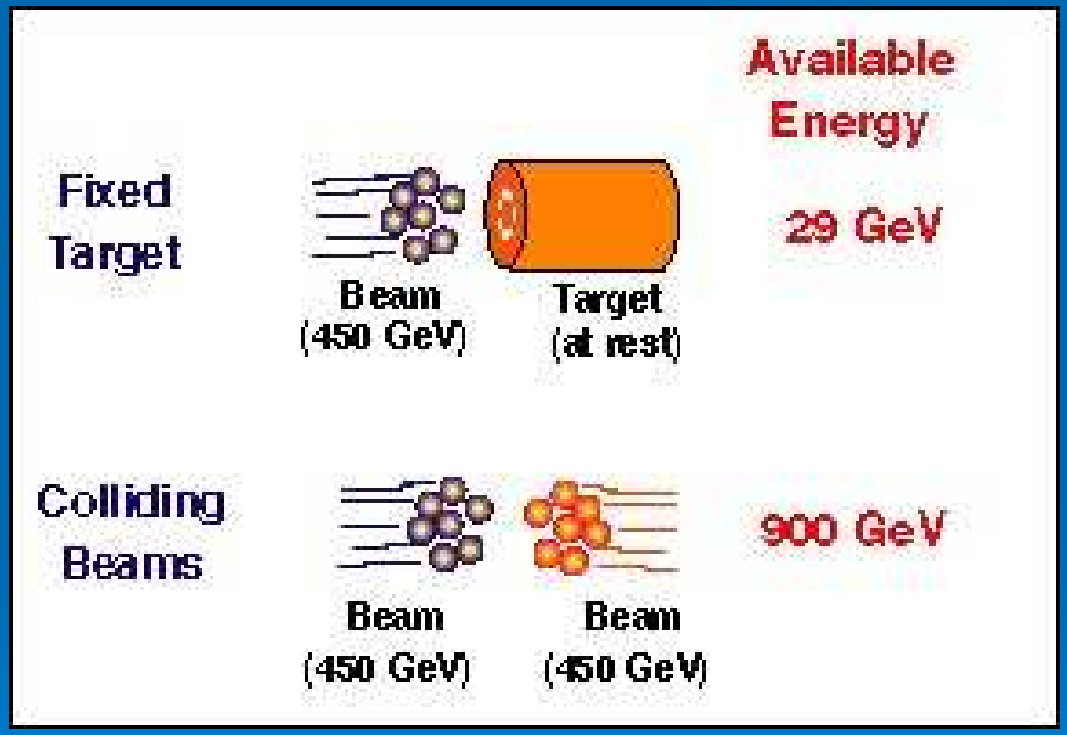
(les protons appartiennent à la catégorie des hadrons)

# Le premier accélérateur ~1932

A Berkeley, le cyclotron de Lawrence :

- de la taille d'une boîte de camembert
- permet d'atteindre l'énergie de 80 KeV

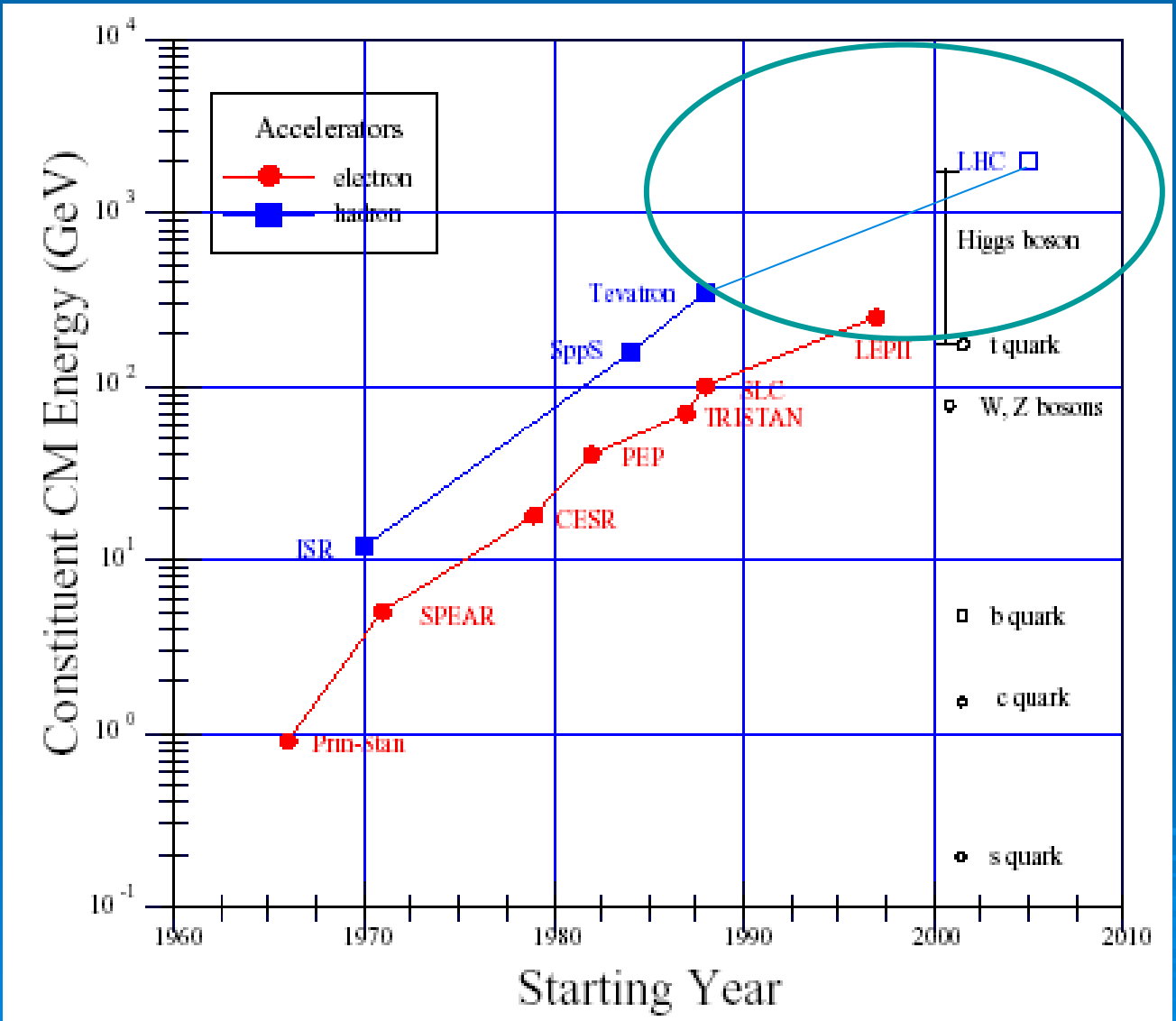
# Intérêt des collisionneurs




$$W \cong \sqrt{2ME}$$

$$W = 2E$$

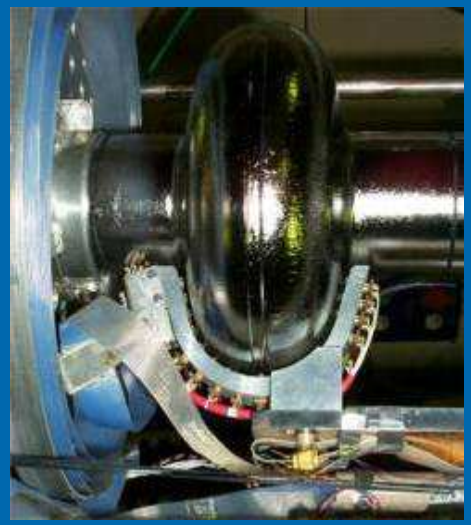
# Les collisionneurs de Haute Énergie



## Comment accélérer les particules?

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

(force électrique de Coulomb)



Cavités « radiofréquence » :
8 par faisceau pour le LHC

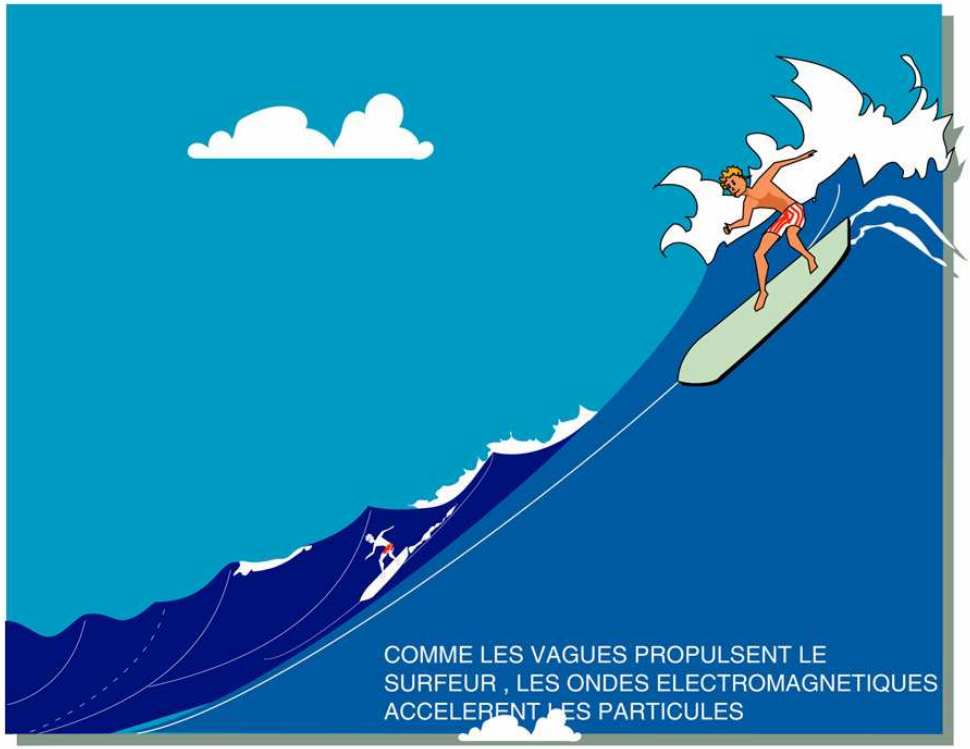
## Comment faire tourner les particules?

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

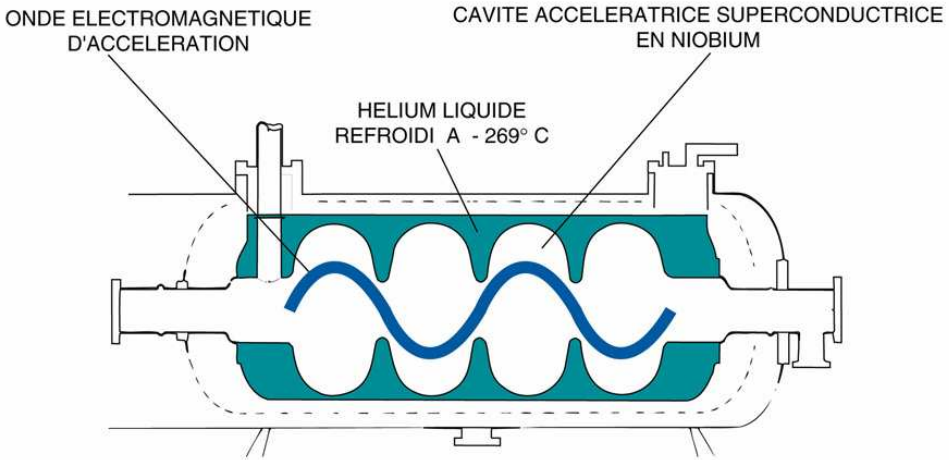
(force magnétique de Lorentz)

Grand nombre d'aimants (supraconducteurs) :

~ 9600, dont 1200 dipôles pour le LHC



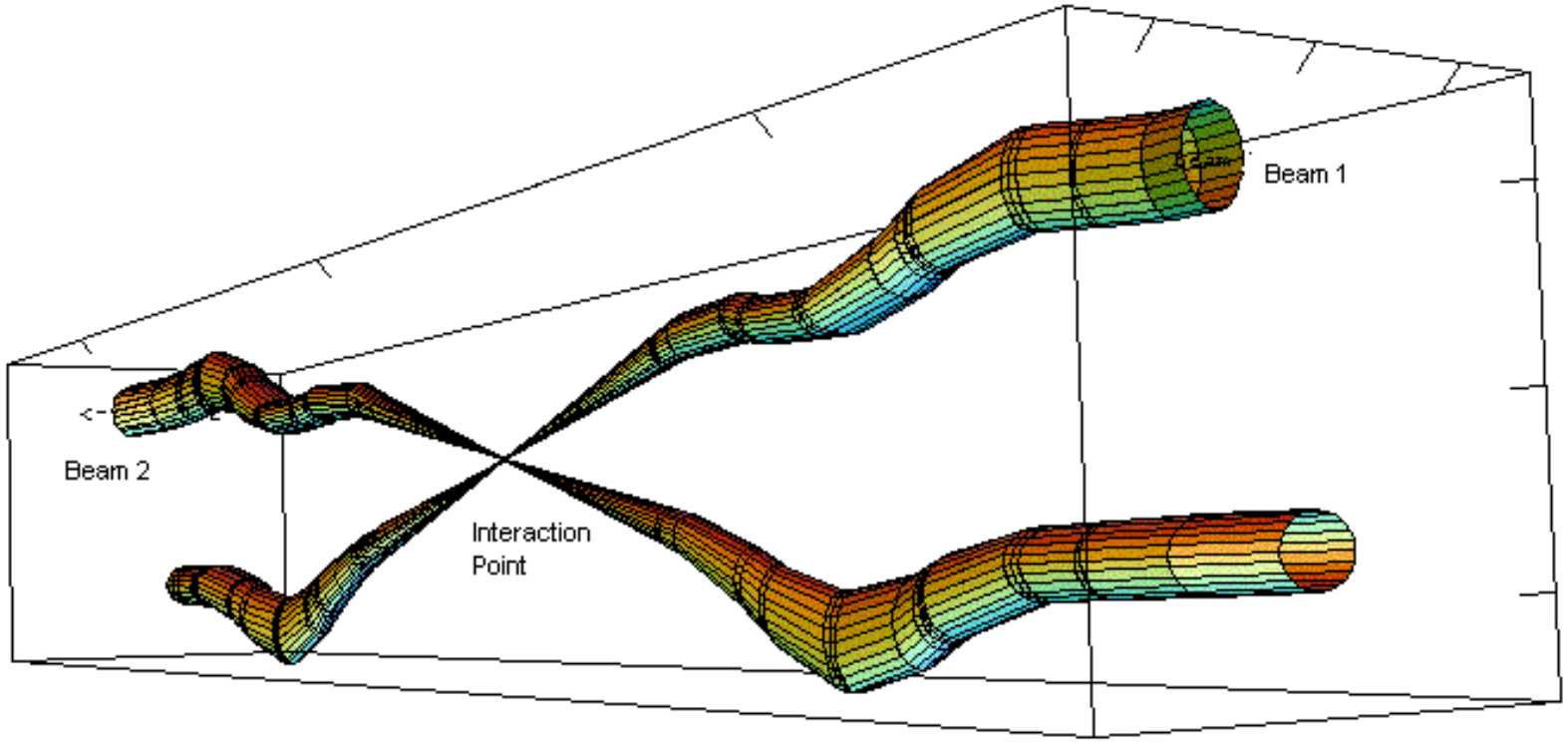

L'USAGE DE LA SUPRACONDUCTIVITE AUGMENTE LES PERFORMANCES ET REDUIT LA CONSOMMATION D'ELECTRICITE .



# Accélération de protons à 7 TeV (7* $10^{12}$ eV)

| Energie d'un proton | Fraction de la vitesse de la lumiere |
|---|---|
| 1 eV | 0.000 05 |
| 1 MeV ($10^6$ eV) | 0.046 |
| 1 GeV ($10^9$ eV) | 0.875 |
| 1 TeV ($10^{12}$ eV) | 0.999 999 56 |
| 7 TeV | 0.999 999 991 |

# Focalisation des faisceaux




Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

# Luminosité (LHC)

f.B = fréquence de révolution × nb de paquets de particules  11245Hz × 2808

$\sigma_x$, $\sigma_y$ = taille transversale au point d'interaction  16 μm

$n_1$, $n_2$ = nombres de particules par paquet  $10^{11}$

Energie totale stockée ~ 350 MJ à la luminosité nominale

$$L = (f.B)\,\frac{n_1\, n_2}{4\pi\,\sigma_x\,\sigma_y}$$

**$= 10^{34}\ cm^{-2}\ s^{-1}$**

# Notion de section eficace

- En physique des particules, la section efficace est une grandeur physique correspondant à la **probabilité d'interaction d'une particule pour une réaction donnée**.
- L'unité de section efficace est une unité de surface, et s'appelle traditionnellement le barn(b) : 1 b = $10^{-24}$ cm² = $100\times10^{-30}$ m² ,

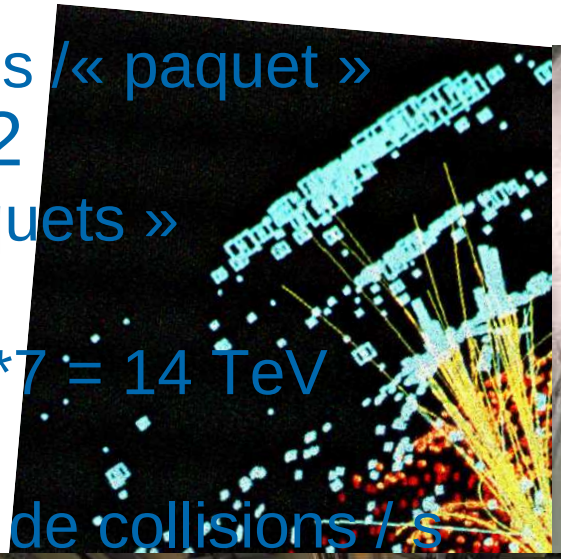
  soit la surface d'un carré de dix femtomètres de côté (c'est à dire l'ordre de grandeur du diamètre d'un noyau atomique).

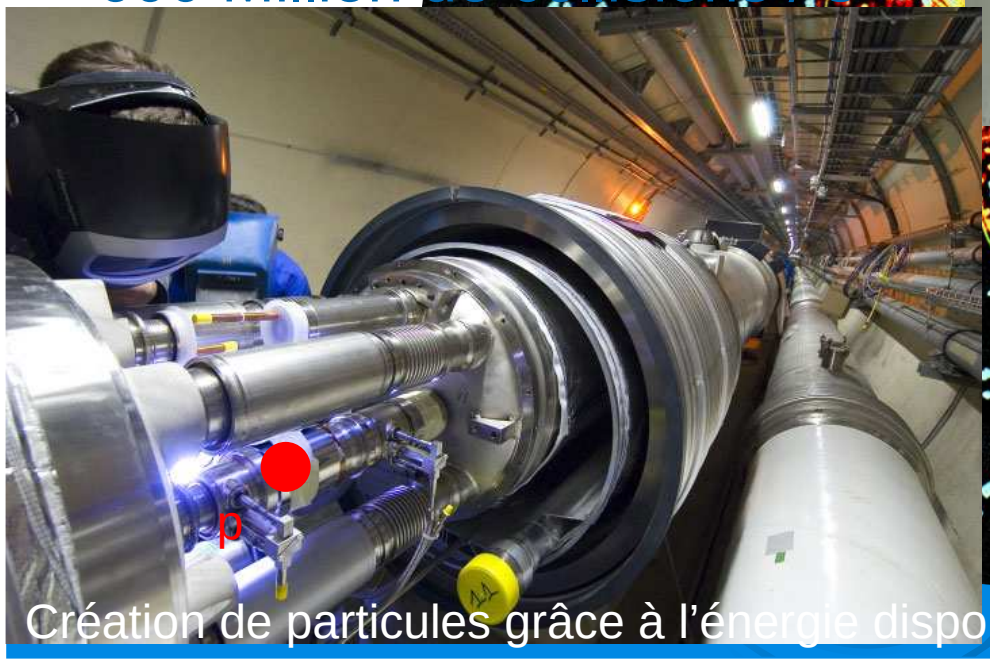
# Le LHC… C’est quoi ?

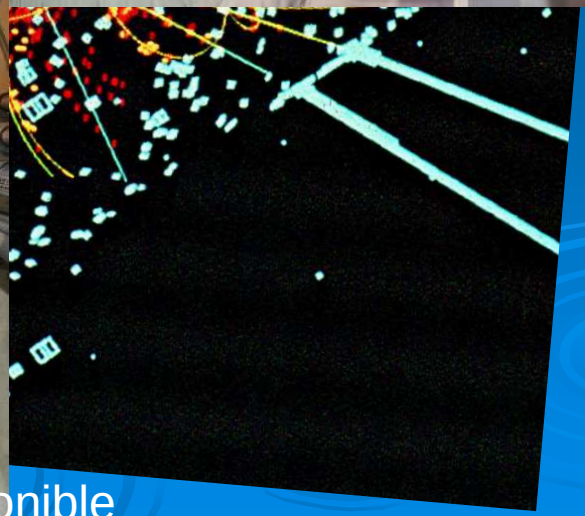
- $10^{11}$ protons /« paquet »

$$E = mc^2$$

- 2808 « paquets »
- E (p-p) = 2*7 = 14 TeV
- 600 Million de collisions / s





Création de particules grâce à l’énergie disponible

Système cryogénique pour abaisser la température à 1,9 K (-271,3℃)

Cavités accélératrices et aimants supraconducteurs

Champs magnétiques élevés : 8,3 T  Courant 11700 ampères

Ultravide dans l'enceinte des faisceaux : $10^{-13}$ atm

Les phases pour le refroidissement :

L'hélium est refroidi à 80 K dans les échangeurs de chaleur des réfrigérateurs, une opération nécessitant environ 10 000 tonnes d'azote liquide.

Ensuite, les turbines des réfrigérateurs abaissent la température de l'hélium à 4,5 K (-268,7°C), le préparant ainsi à l'injection dans les masses froides des aimants.

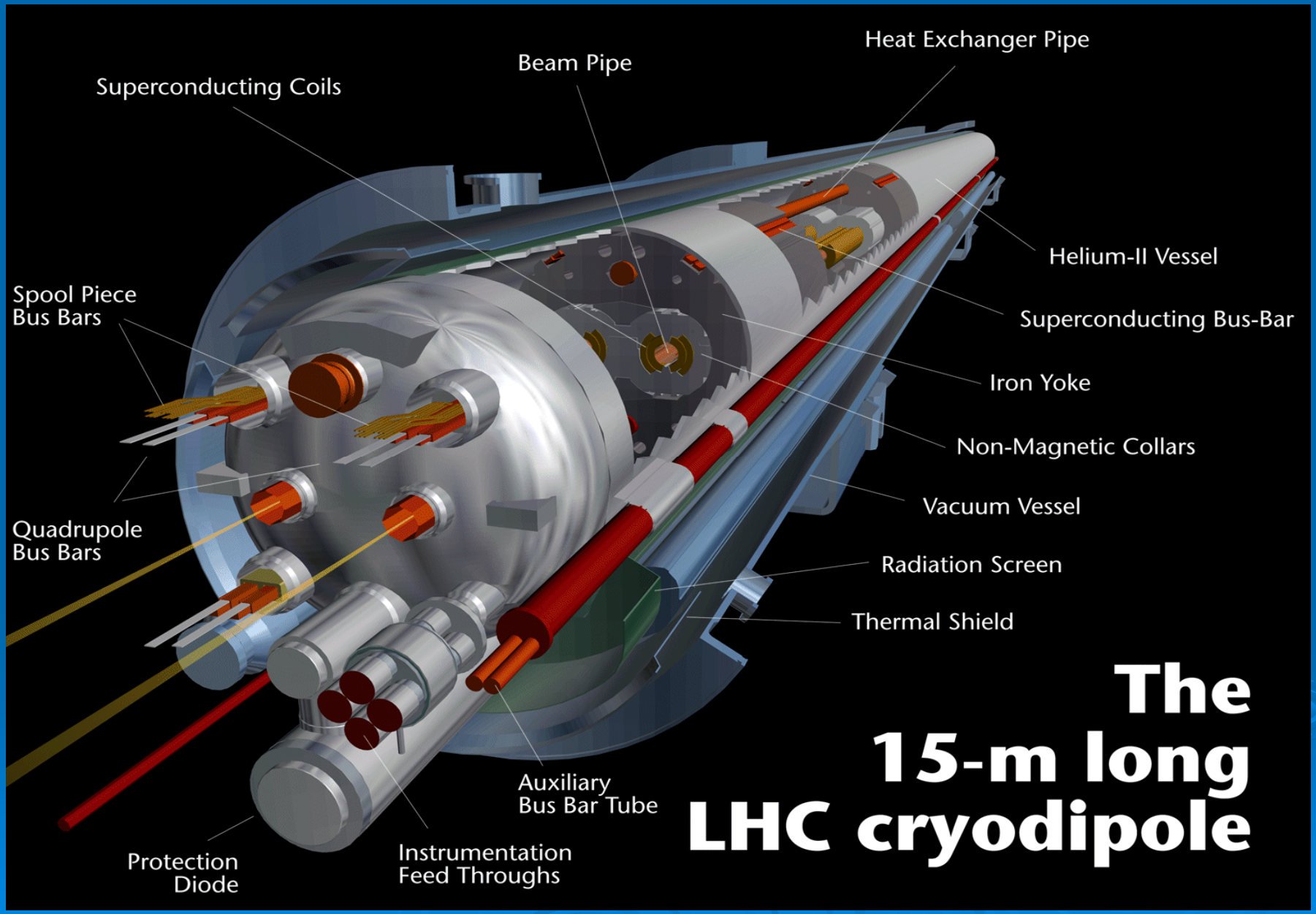
Une fois les aimants remplis, les unités de réfrigération à 1,8 K abaissent la température à 1,9 K (-271,3°C). Au total, ce sont à peu près 120 t d'hélium qui sont nécessaires, dont environ 90 employées dans les aimants et le reste dans les tuyaux et les unités de réfrigération.

Les dipôles du LHC utilisent des câbles en niobium-titane (NbTi), qui deviennent supraconducteurs à une température inférieure à 10 K (-263,2°C), ce qui signifie qu'ils n'offrent plus aucune résistance au passage du courant électrique.

En fait, le LHC fonctionne à une température encore plus basse, 1,9 K (-271,3°C), température inférieure à celle de l'espace intersidéral (2,7 K, -270,5°C).

Un courant de 11 700 ampères circulant dans les dipôles génère un champ magnétique élevé, 8,3 T, nécessaire pour incurver les faisceaux de 7 TeV dans l'anneau de 27 km du LHC.

Si les aimants étaient utilisés à une température de 4,5 K (-268,7ºC), ils ne produiraient qu'un champ magnétique de 6,8 T.




# The 15-m long LHC cryodipole

# Collisionneur p-p (LHC)

Grande multiplicité de particules :

• À haute luminosité, 1 collision intéressante + 20 collisions « parasites »

=> plus de 1000 traces toutes les 25 ns

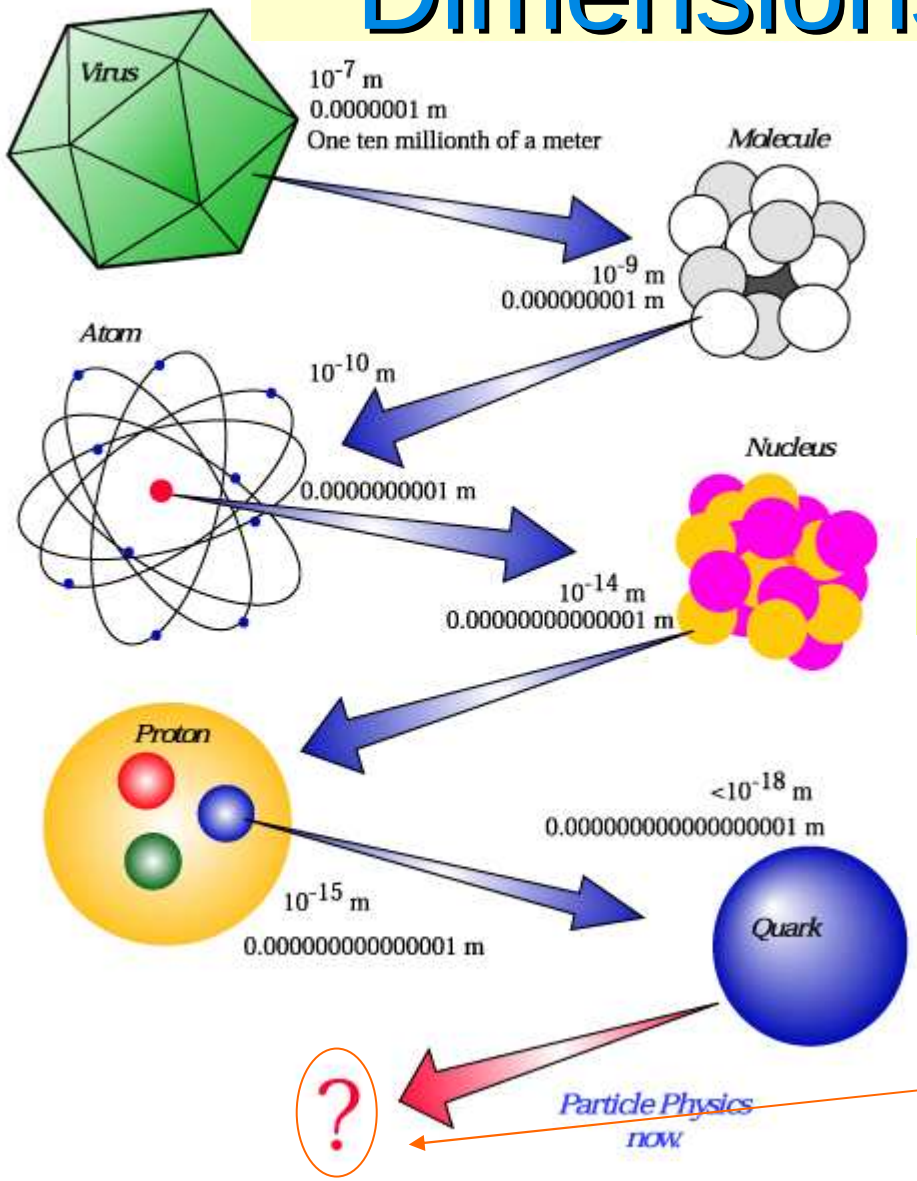
=> détecteurs très granulaires, nombreuses voies de lecture, rapidité de réponse et excellente résolution temporelle

Environnement radioactif :

• Activation de la zone expérimentale

• Détecteurs et électroniques frontales « durcis » aux radiations

# Dimensions et Énergie

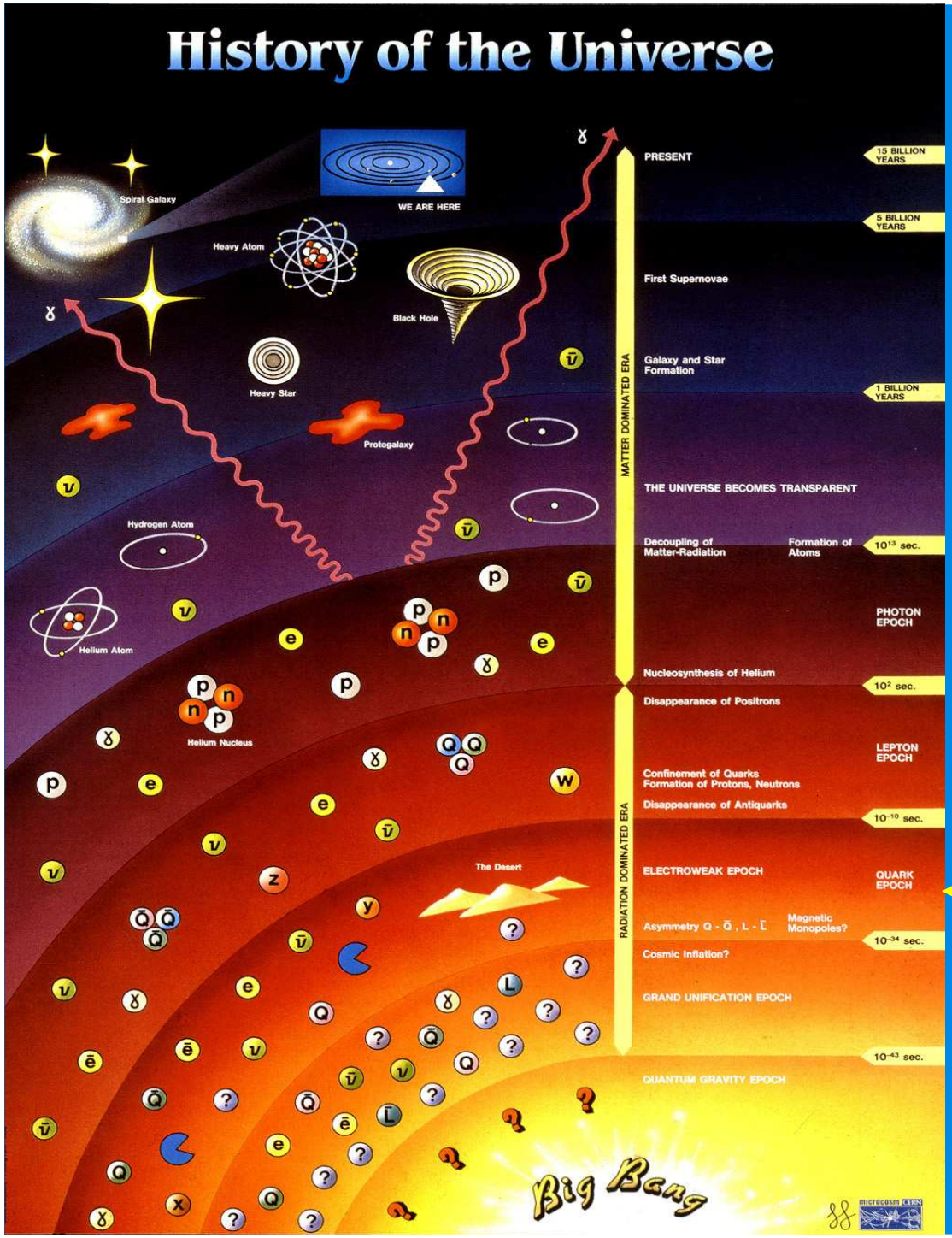



$$\lambda << \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

| Object | Size | Energy of Radiation |
|---|---|---|
| Atom | $10^{-10}$ m | 0.00001 GeV (electrons) |
| Nucleus | $10^{-14}$ m | 0.01 GeV (alphas) |
| Nucleon | $10^{-15}$m | 0.1 GeV (electrons) |

Quarks $<10^{-18}$ m >100 GeV

LHC 14 TeV




Aujourd'hui (13,7 milliards d'années)

Etoiles (1 milliard d'années)

Atomes (300 000 ans)

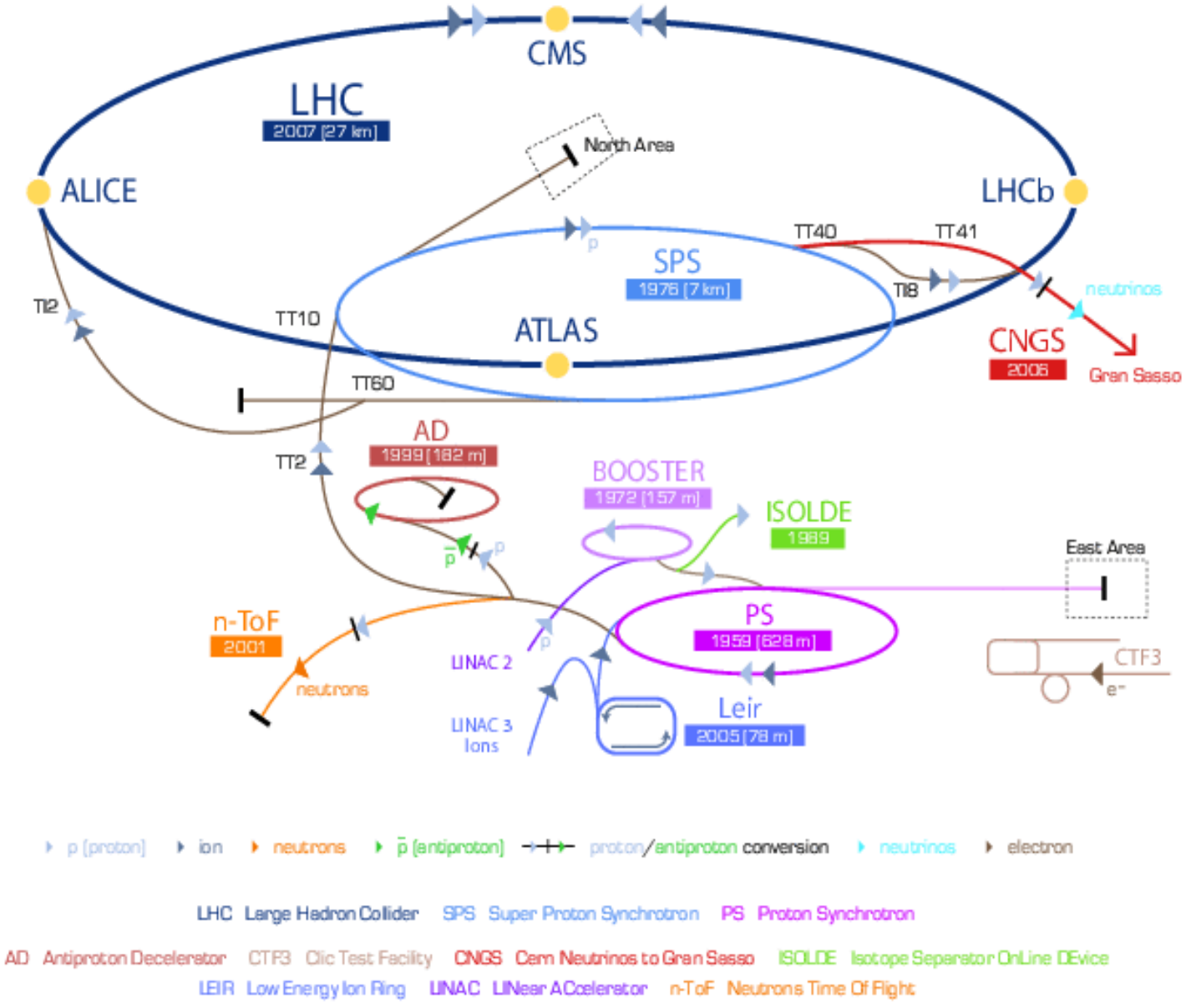
Noyaux (180 s)

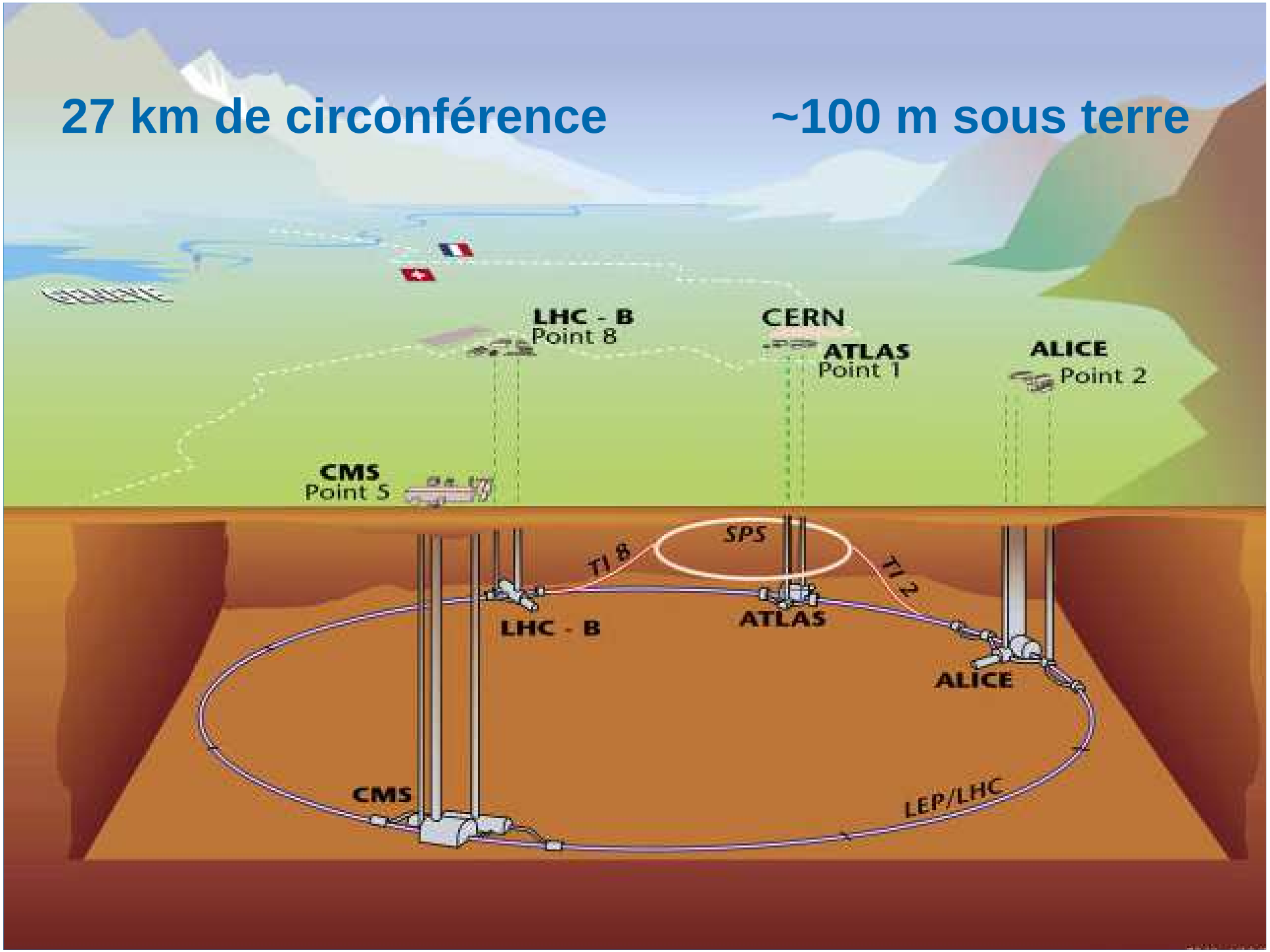
Protons et neutrons ($10^{-10}$ s)

Quarks ($10^{-34}$ s)

**LHC**
**$10^{-13}$ s**

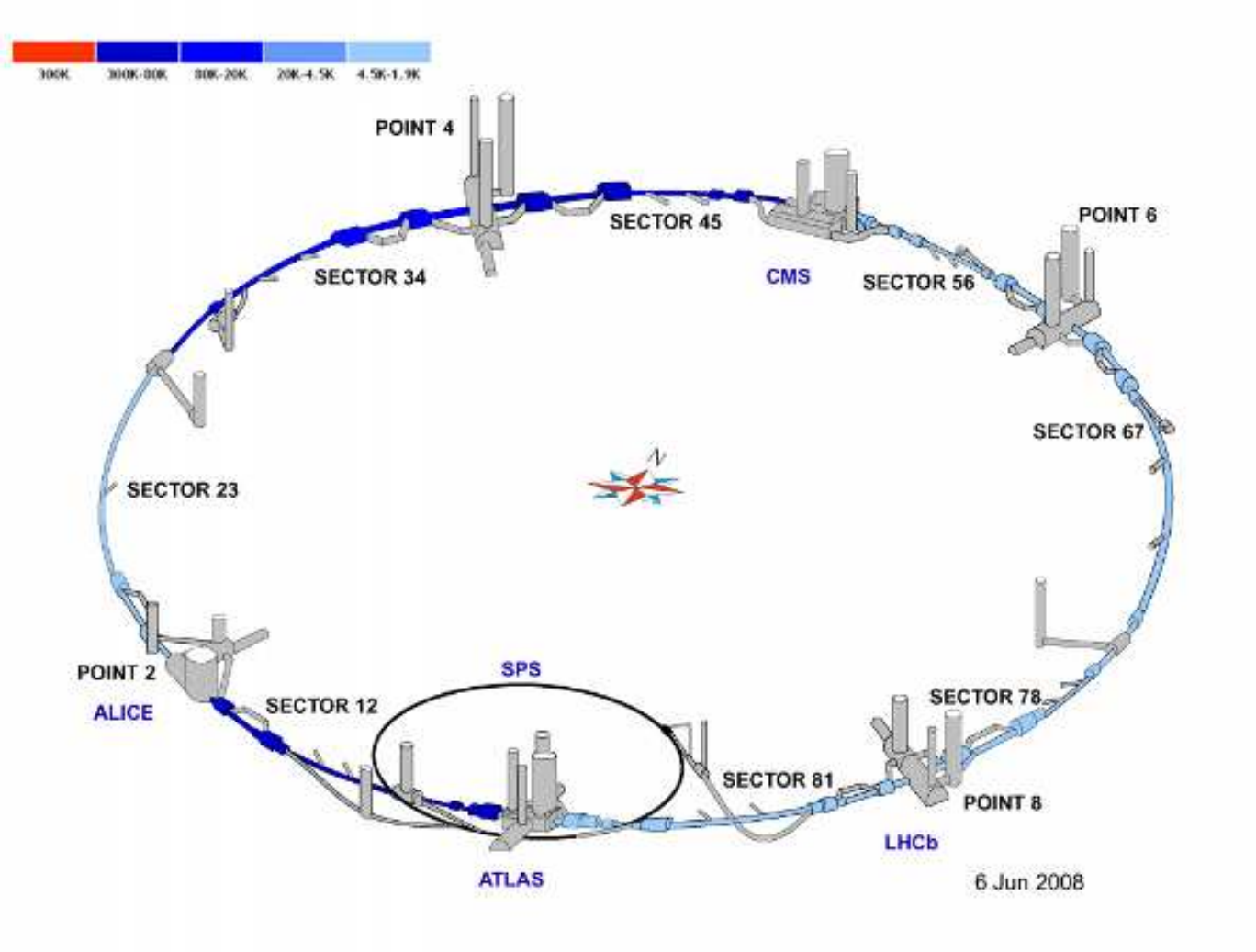
# CERN Accelerator Complex




27 km de circonférence
~100 m sous terre
LHC - B
Point 8
CERN
ATLAS
Point 1
ALICE
Point 2
CMS
Point 5
SPS
TI 8
TI 2
LHC - B
ATLAS
ALICE
CMS
LEP/LHC

# Le refroidissement du LHC…

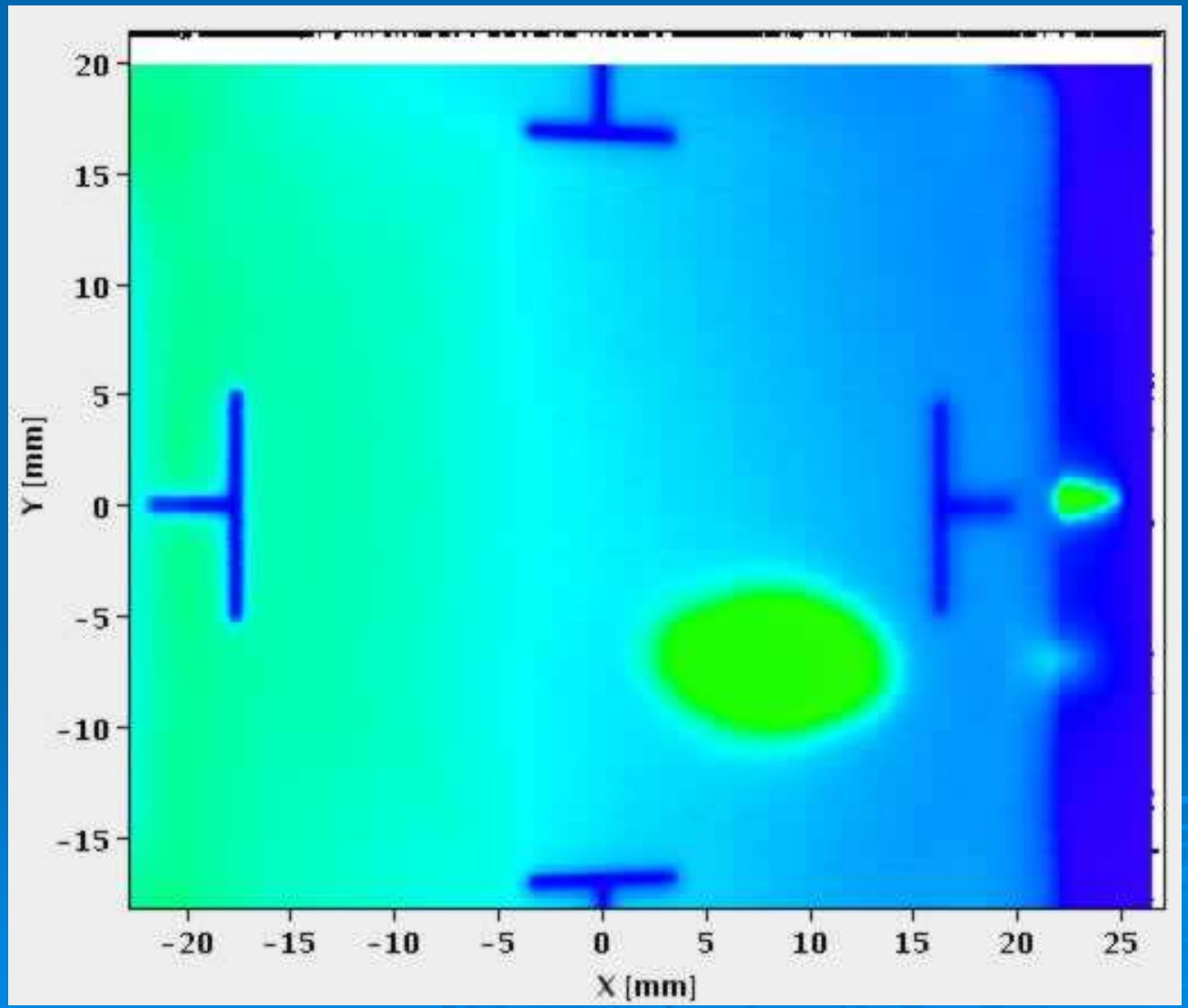
## juin 2008 : Refroidissement du dernier secteur




7 semaines → 1,9 K

# Premiers faisceaux (septembre 2008)

# Premiers faisceaux (10 septembre 2008)



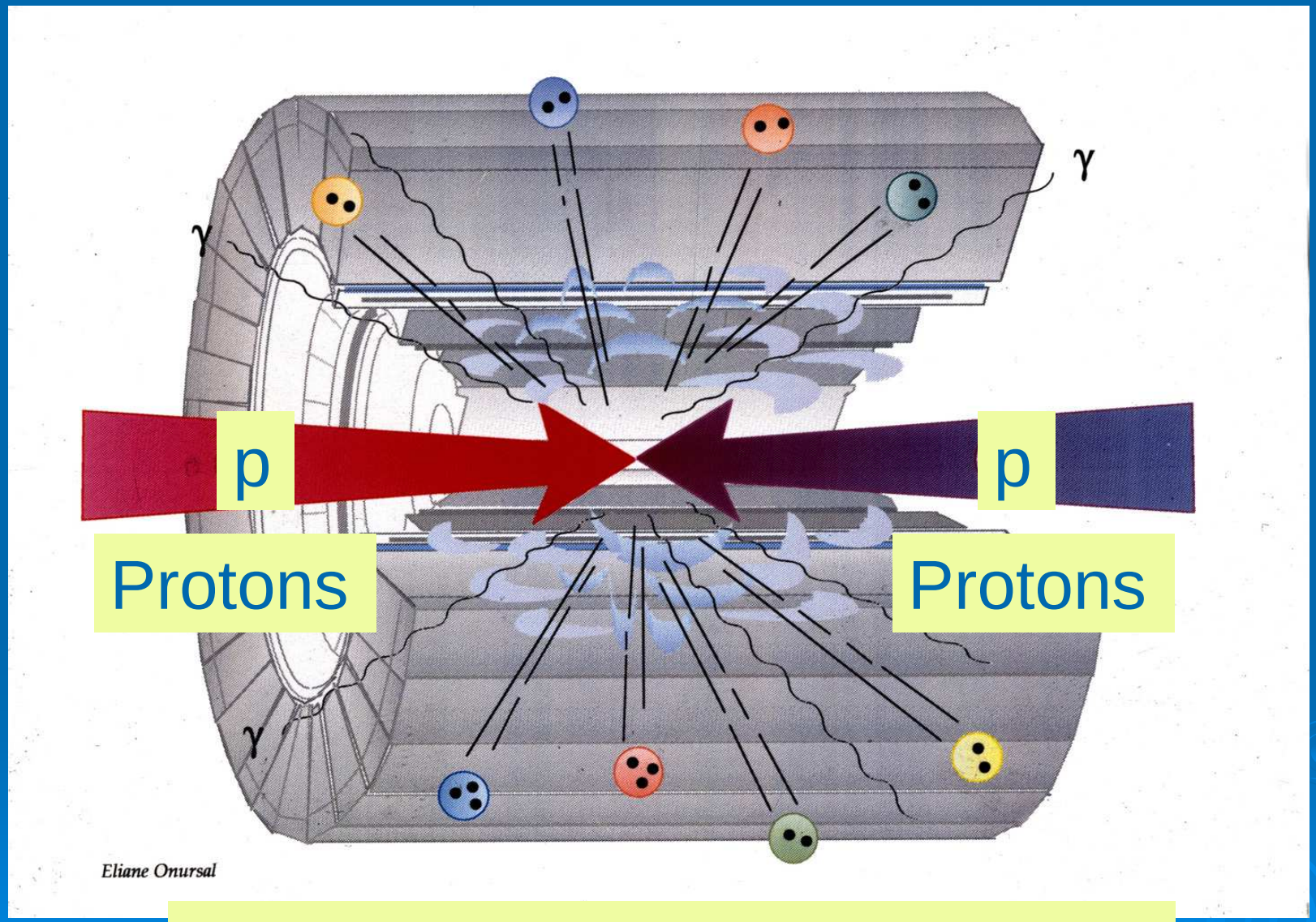
# Premiers problèmes et réparations

Fin mars 2009 : dernier aimant réinstallé

Fin juin 2009 : début des essais électriques

Septembre 2009 : circulation des faisceaux de particules

# Les zones de collisions




Très grande concentration d'énergie

# Les particules détectées

- Électrons
- Muons
- Photons
- Hadrons chargés (ex : protons, pions)
- Hadrons neutres (ex : neutrons)

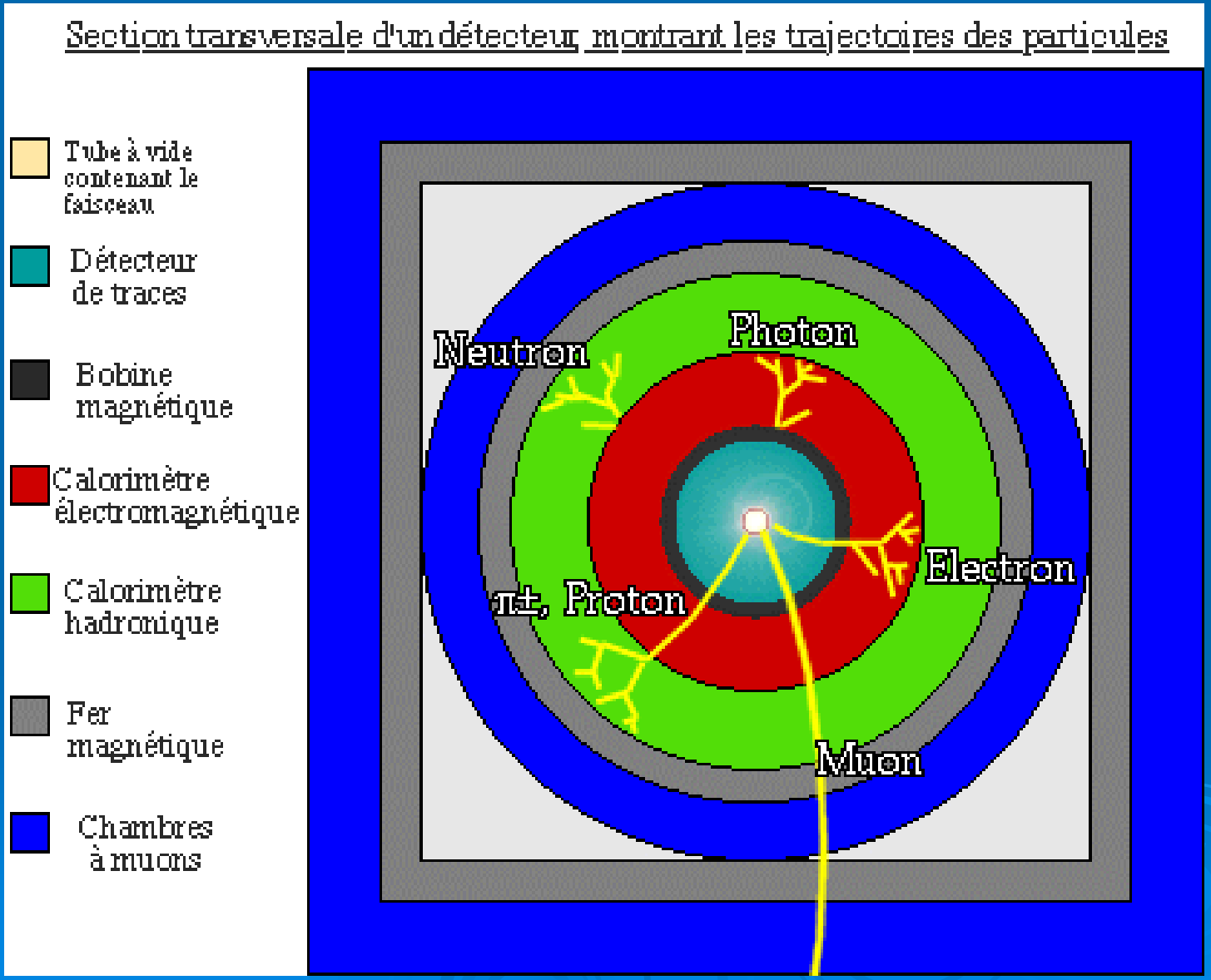
# Détection des particules

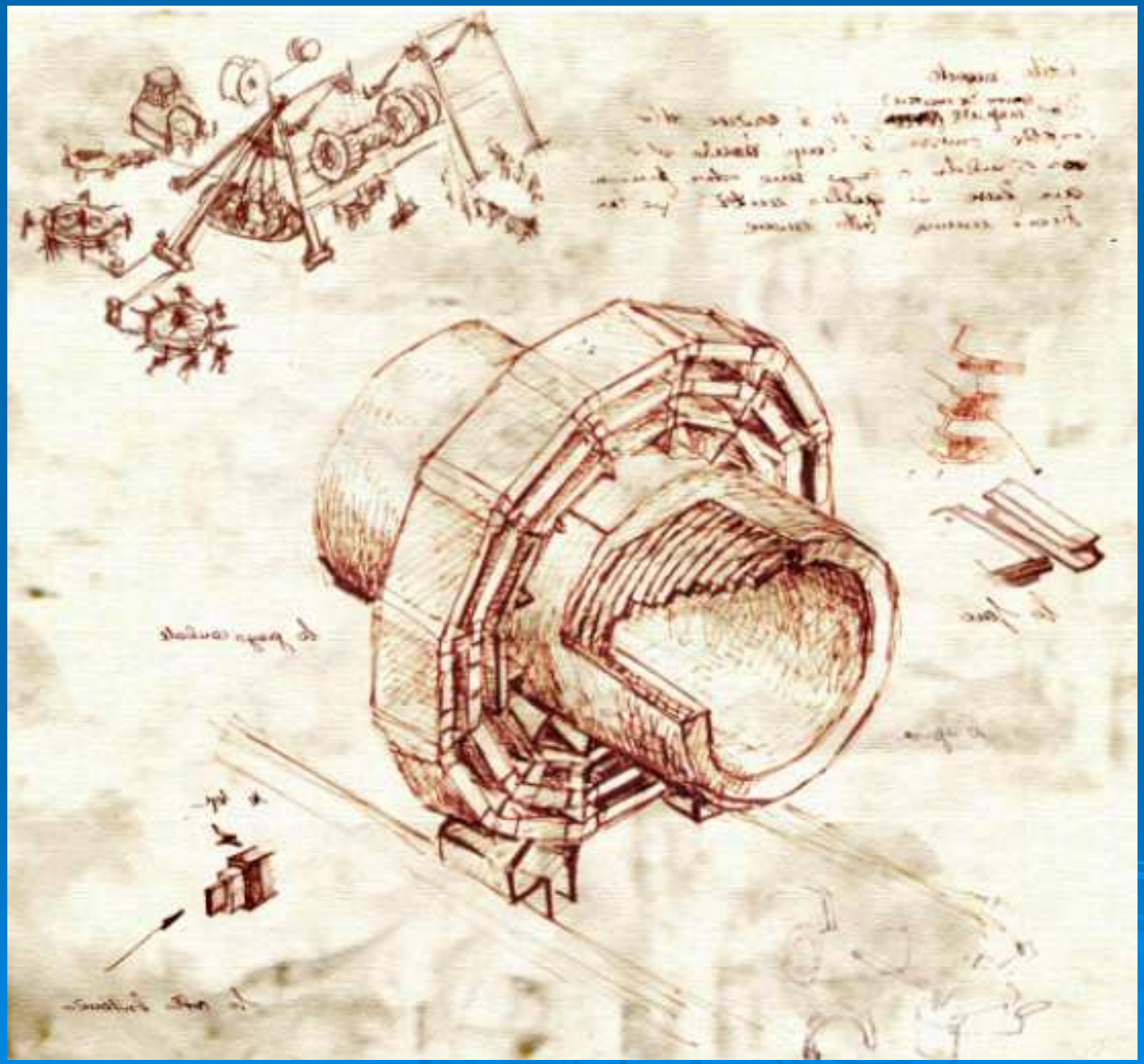
- Mesurer : E, p, x(t), y(t), z(t), q

- Reconstruire : trajectoires (particules chargées)

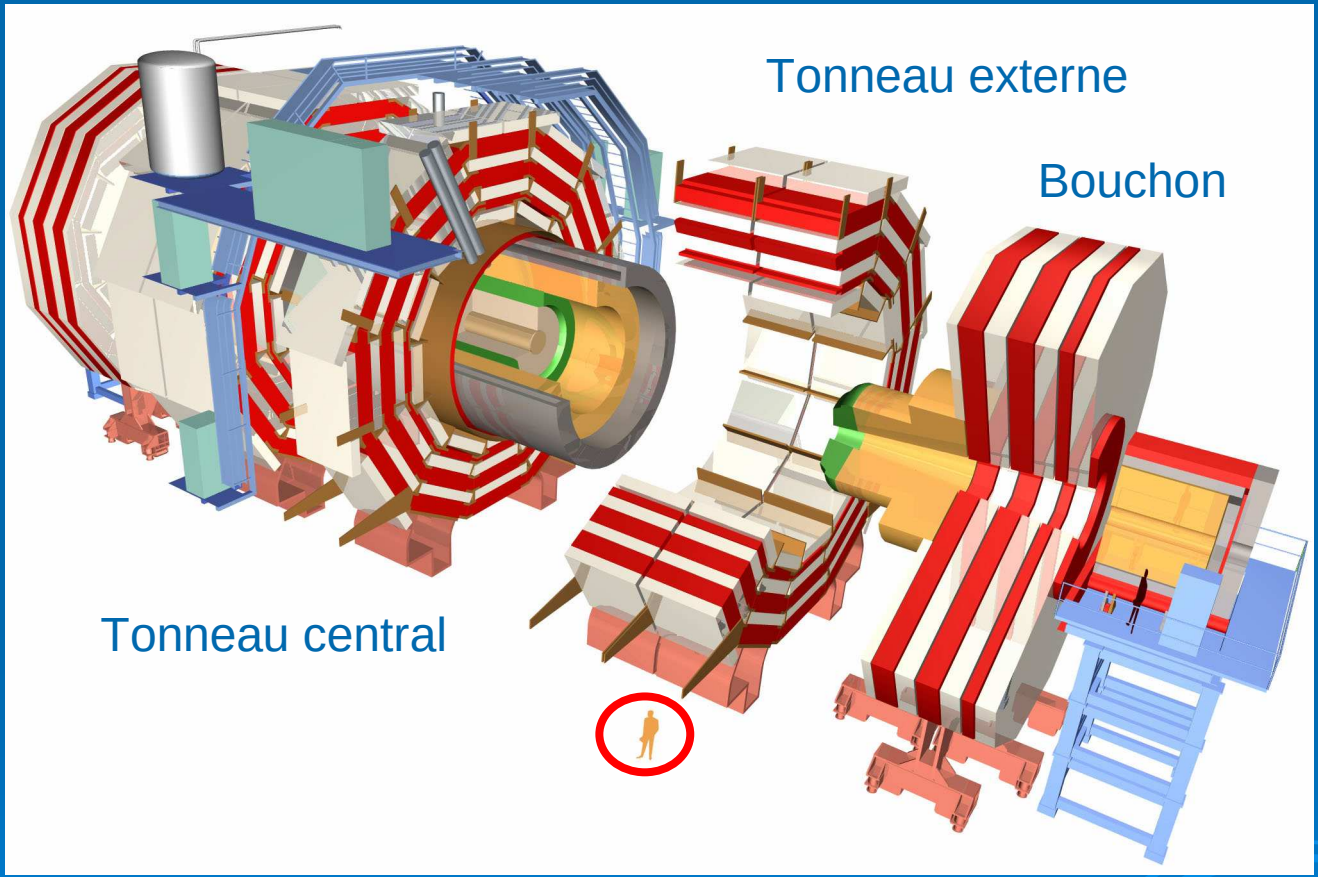
- Identifier les particules : électron, photon, muon, hadron chargé, hadron neutre, énergie manquante, cascades hadroniques

# Principe d'un détecteur



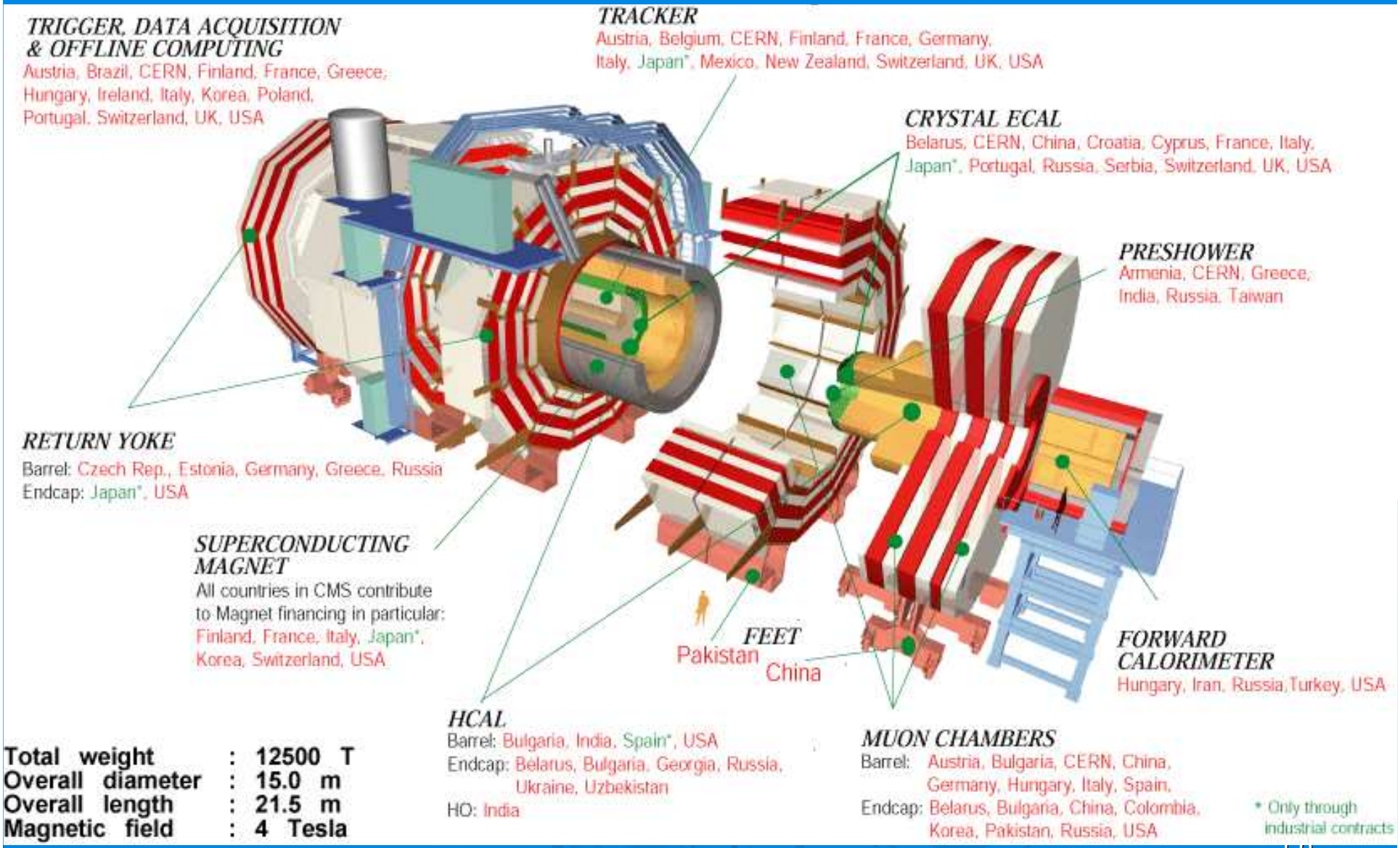


# Le détecteur CMS




Compact Muon Solenoïd

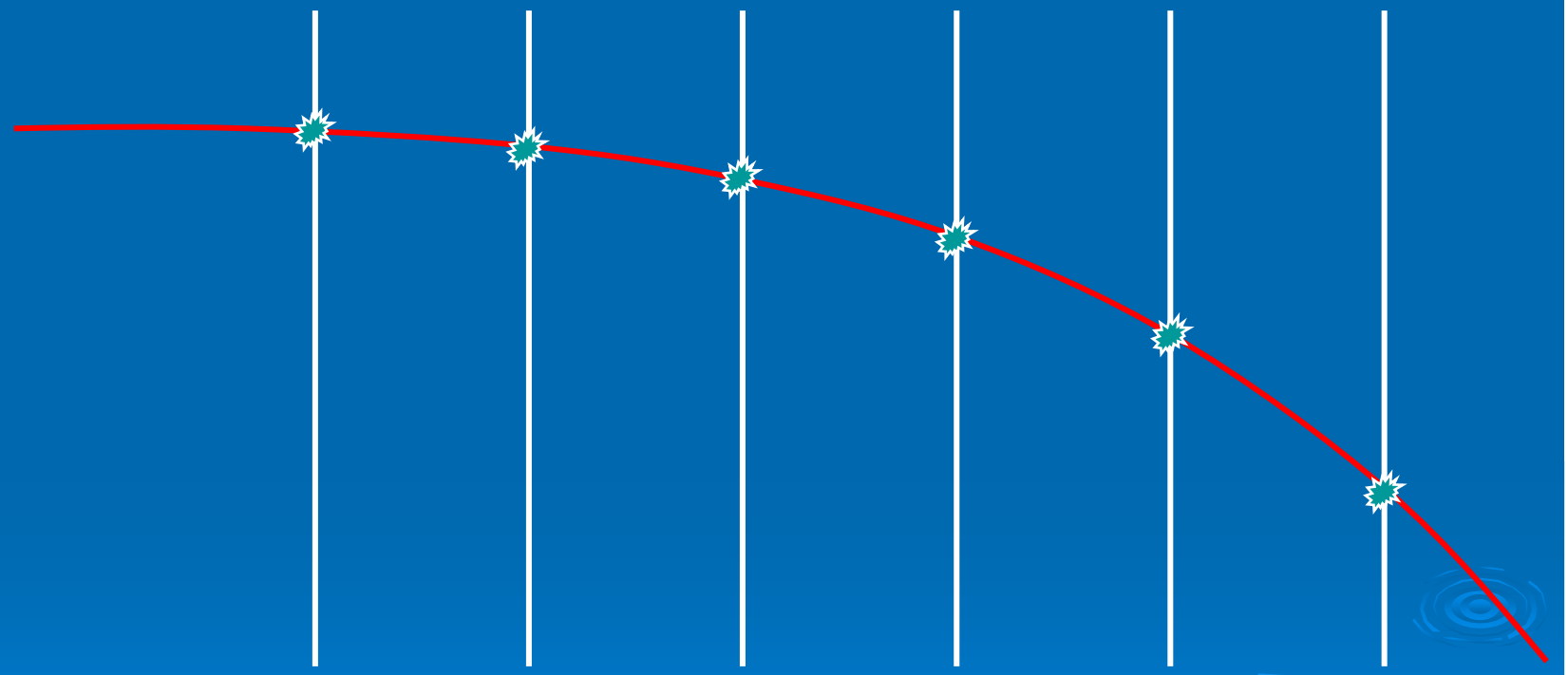
# Collaboration CMS : 3000 scientifiques, 183 instituts, 38 pays




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

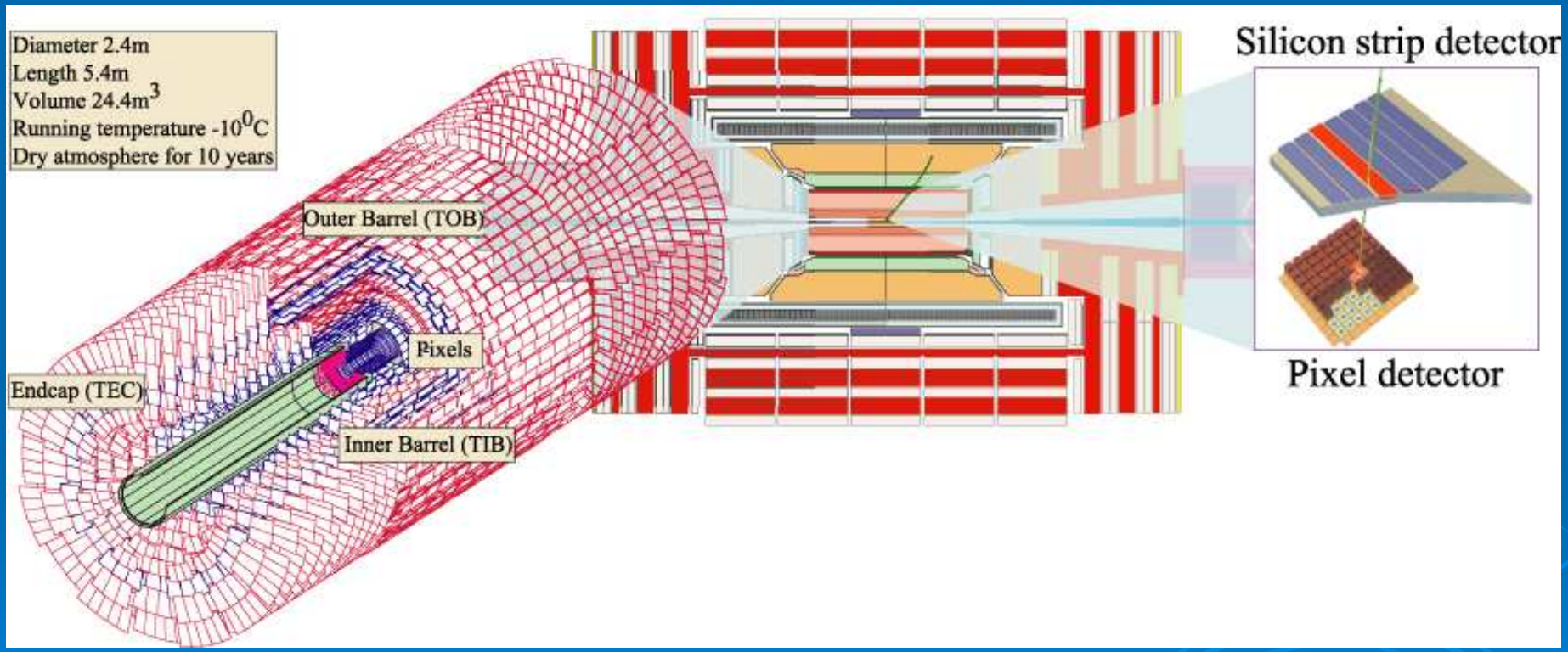
# Le Trajectographe

# Le Principe du Trajectographe



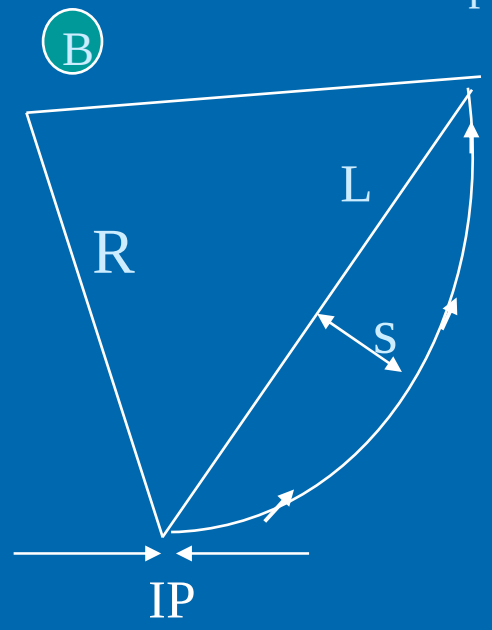
*Plusieurs couches d'un détecteur au silicium*

# Les trajectoires de particules



# Mesure de l'impulsion

p= impulsion transverse




$s = L^2/8R$

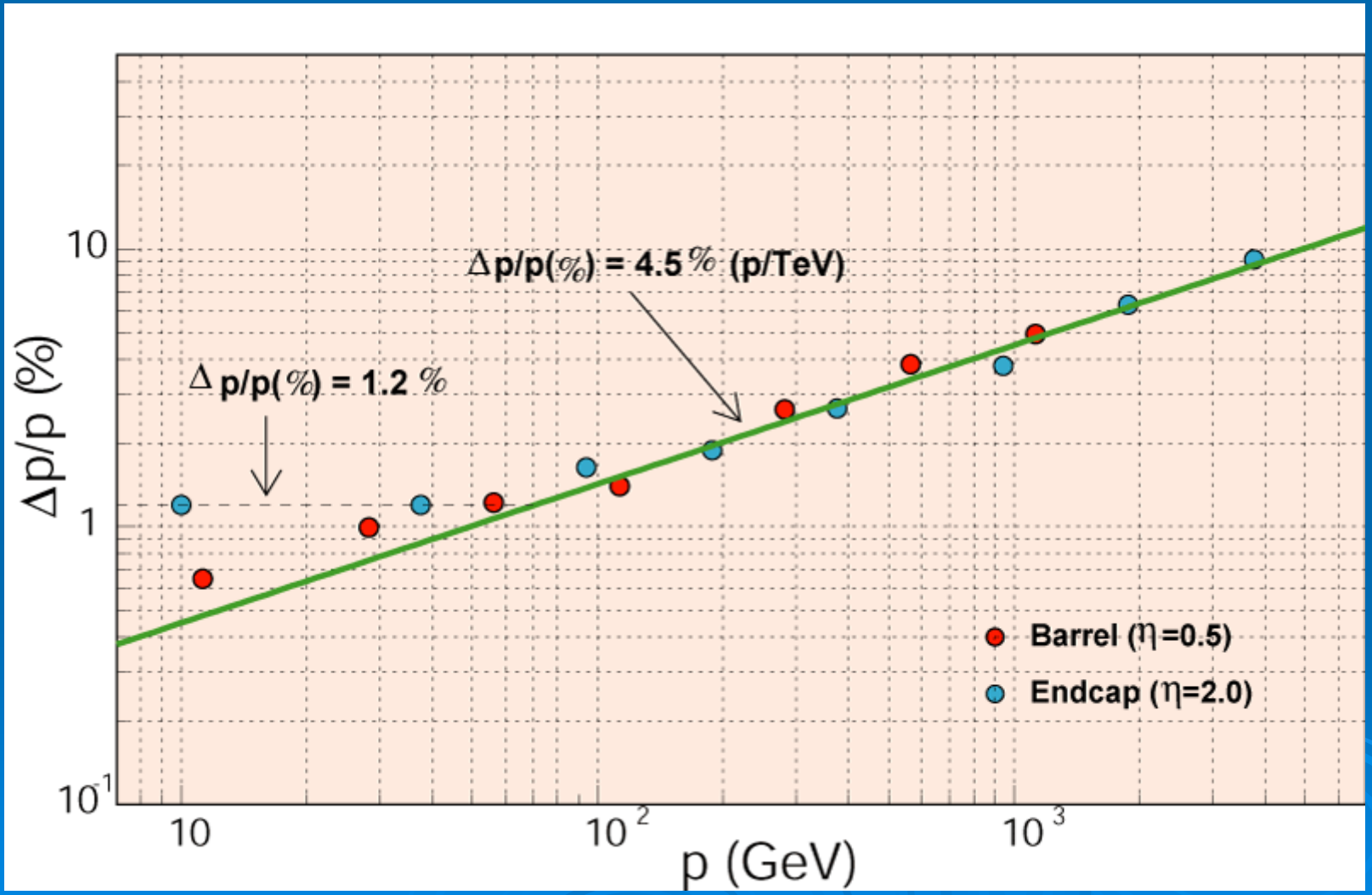
$$p(\mathrm{GeV}) = 0.3\, q\, B(\mathrm{T})\, R(\mathrm{m})$$

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 25 \frac{\Delta s}{L^2 B} p$$

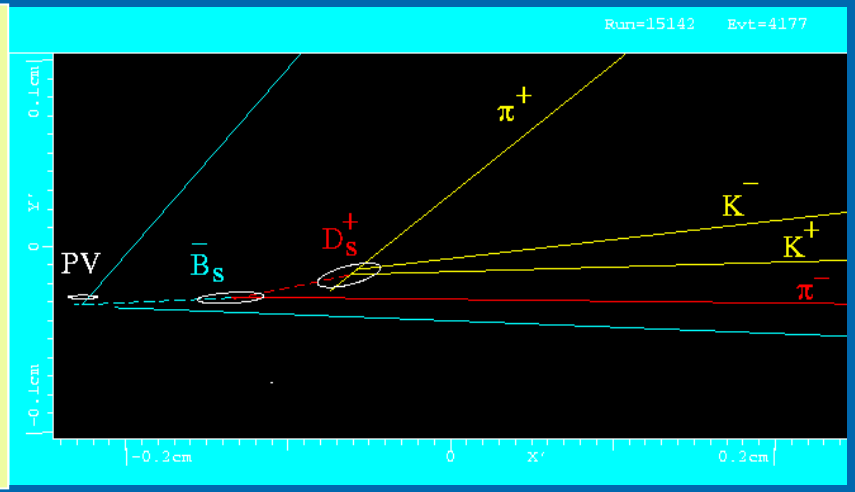
q=1

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 0.25 \left(\frac{\Delta s}{100\ \mu m}\right)^1 \left(\frac{1\ m}{L}\right)^2 \left(\frac{1\ T}{B}\right)^1 \left(\frac{p}{100\ GeV}\right)$$

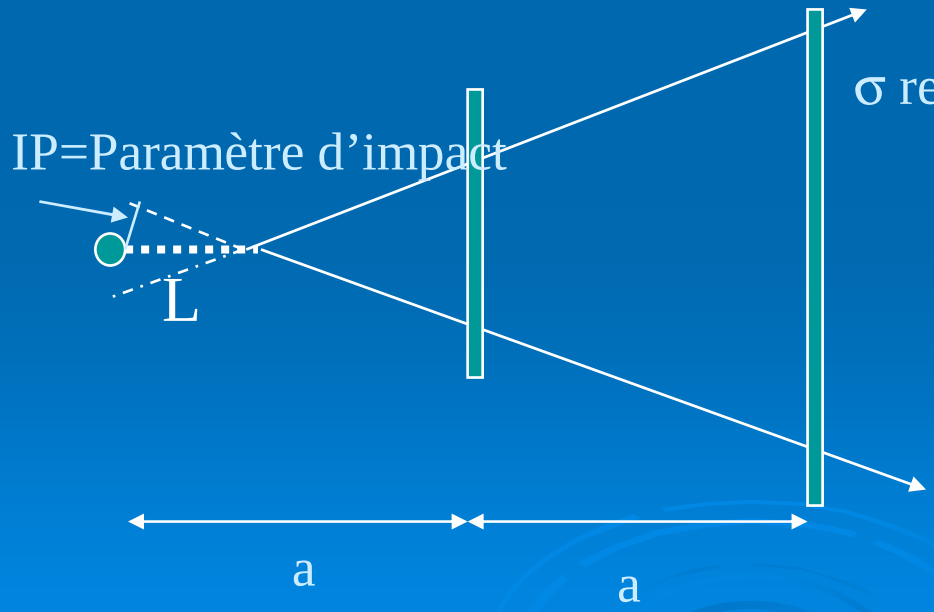
# L'impulsion des particules



# Résolution en paramètre d'impact




$$IP \approx L \cdot \frac{1}{\gamma} \approx c\tau\gamma \cdot \frac{1}{\gamma} = c\tau$$




σ resolution spatiale

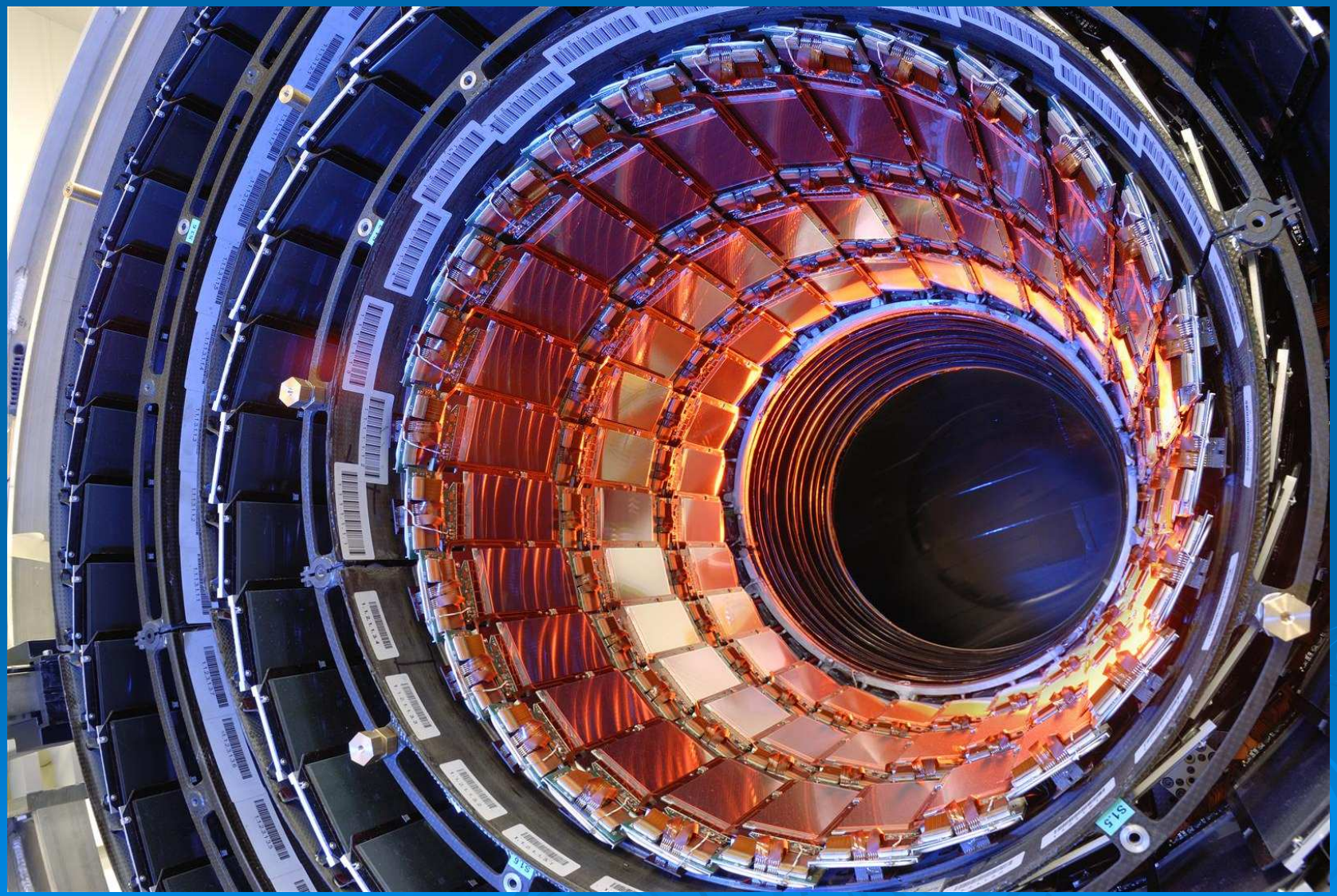
$$\Delta IP \approx \sqrt{5}\sigma$$

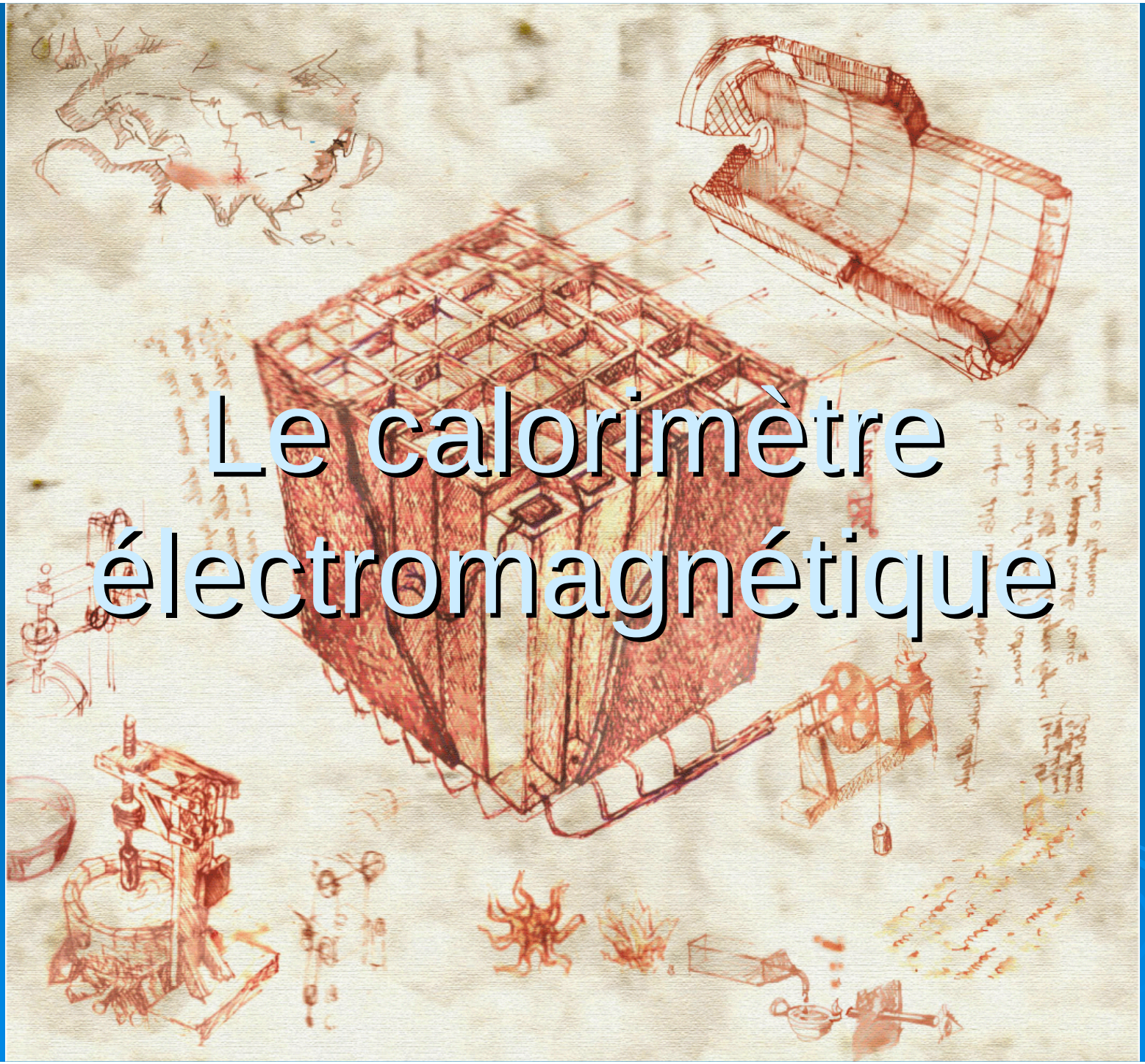
$$\Delta IP << IP \Rightarrow \sigma << c\tau / \sqrt{5}$$

cτ B ~ 500 μm

cτ τ ~ 100 μm

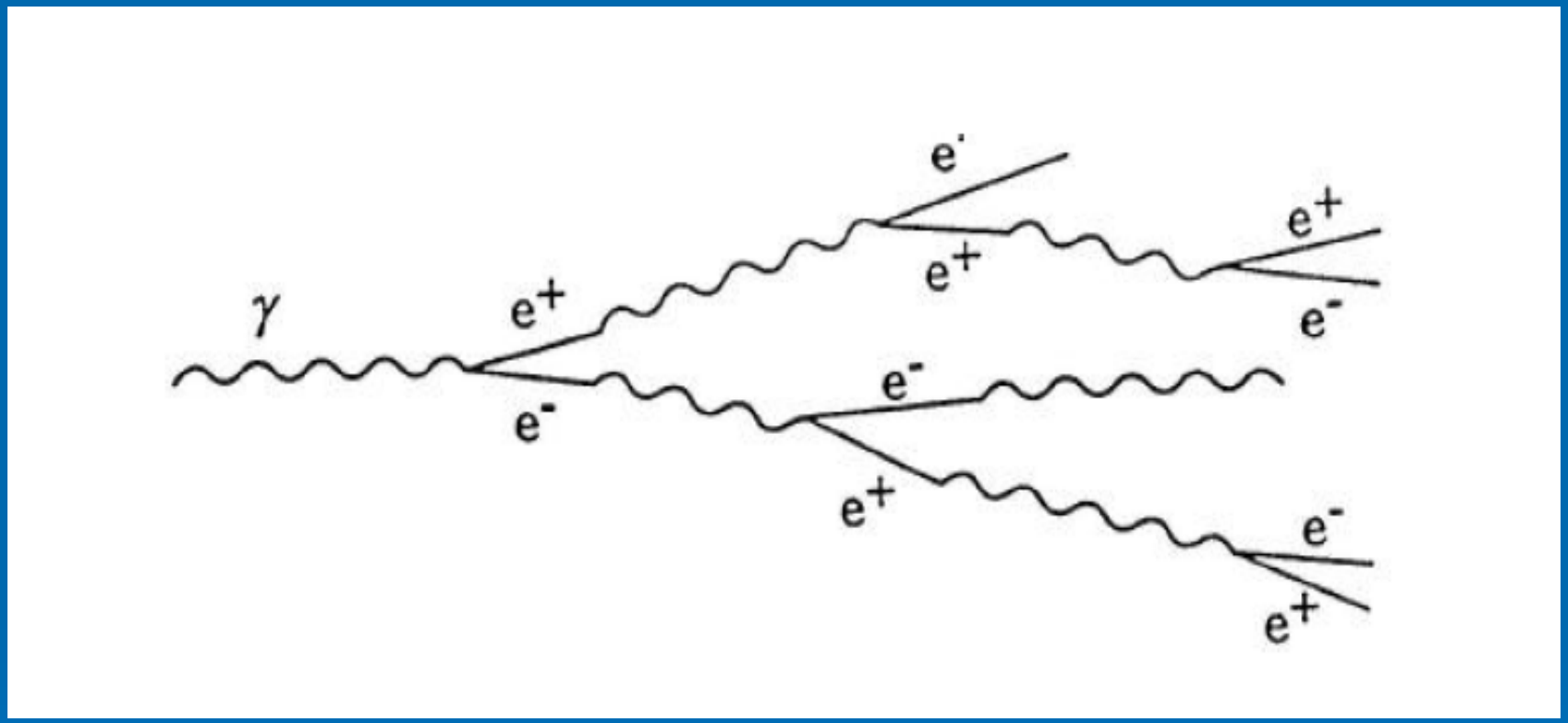
# Le trajectographe





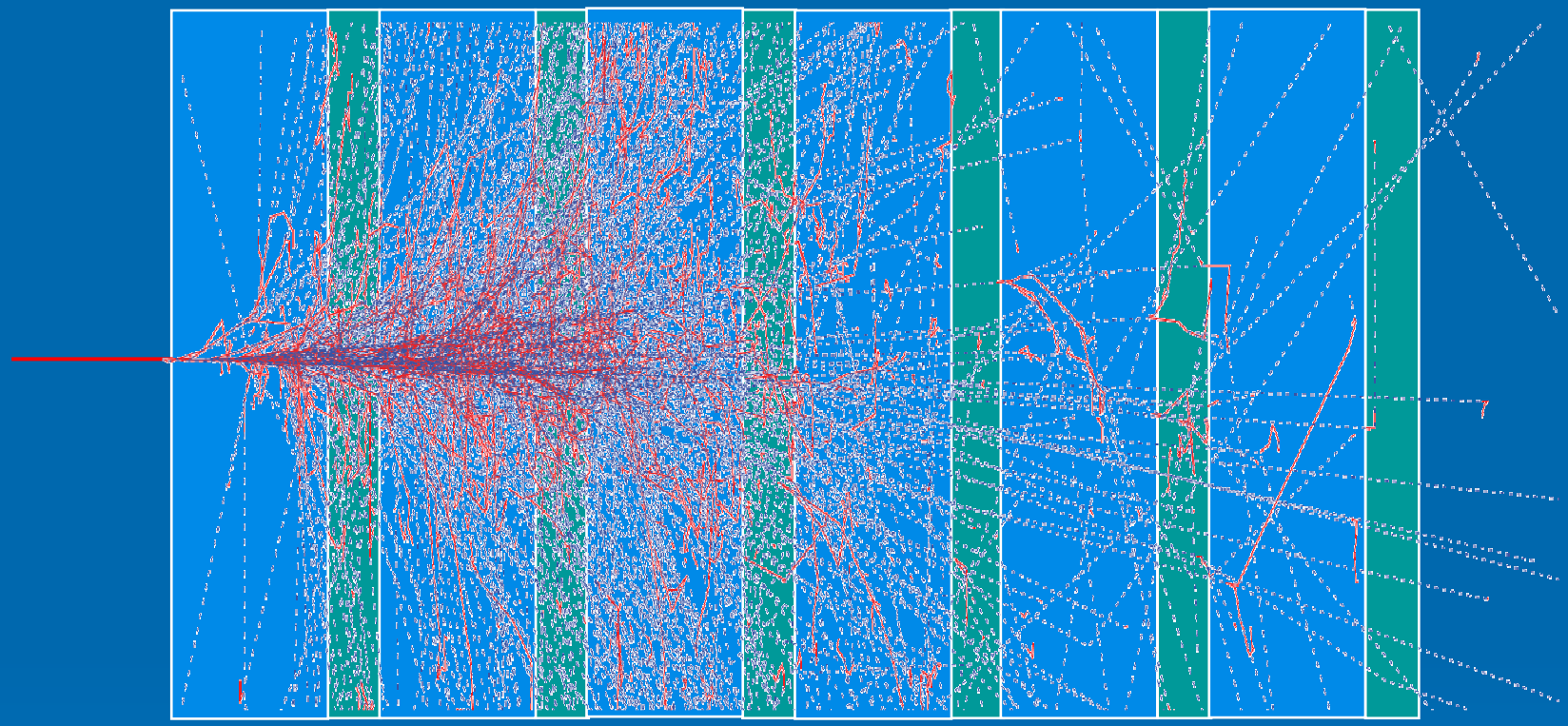
# Le calorimètre électromagnétique

# Gerbe électromagnétique




A haute énergie, les électrons perdent leur énergie presque uniquement par bremsstrahlung et les photons perdent la leur par production de paires. La combinaison de ces deux effets résulte en la formation d'une gerbe électromagnétique quand un électron ou un photon entre dans un milieu.

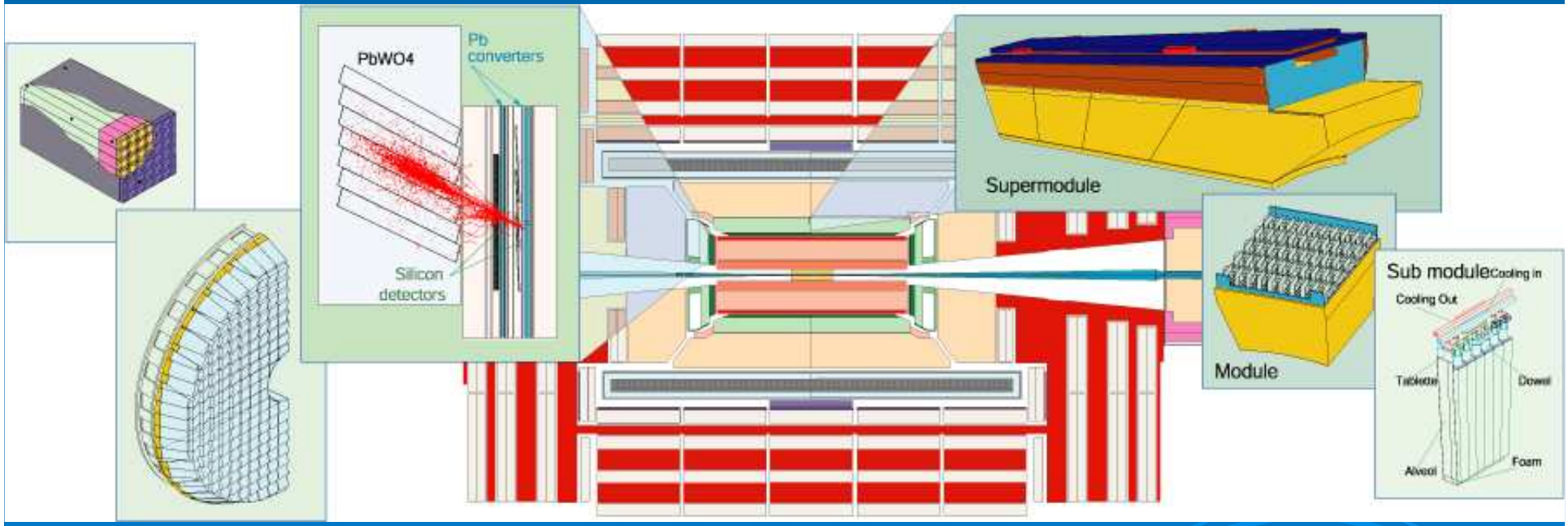
# Principe du calorimètre électromagnétique



Le nombre total de particules est proportionnel à l'énergie déposée

Un signal lumineux est produit, proportionnel au nombre de particules

# L’énergie des électrons et photons

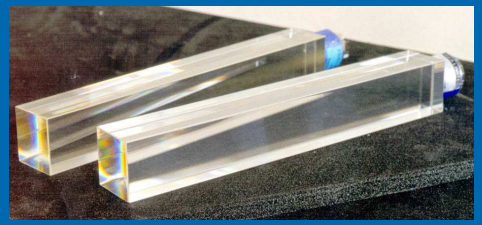


JOHANSSON

# Calorimètre électromagnétique (80 t)

cristaux de tungstate de plomb

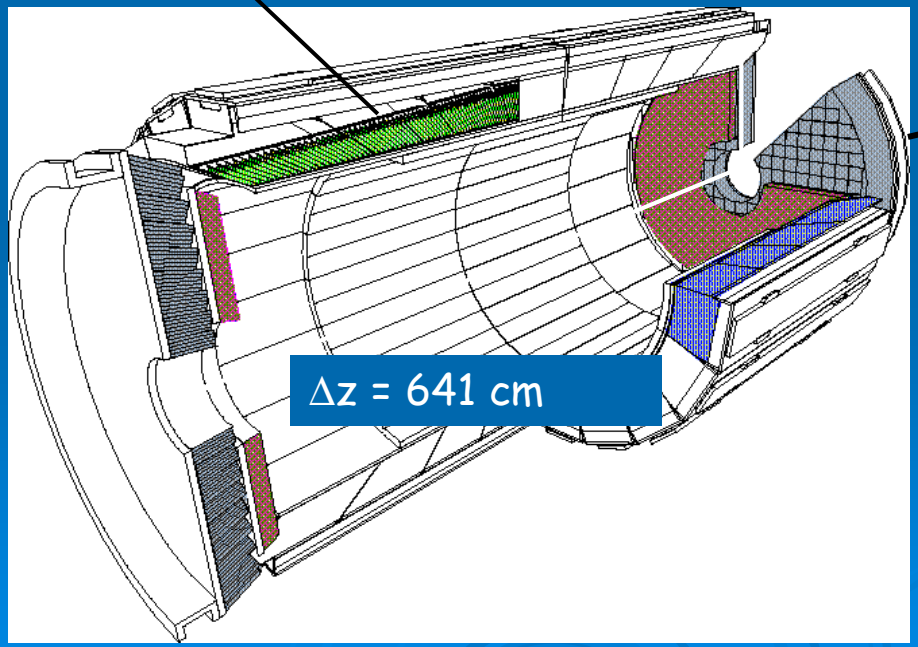
14648 cristaux :
3 x 3 x 22 $cm^3$

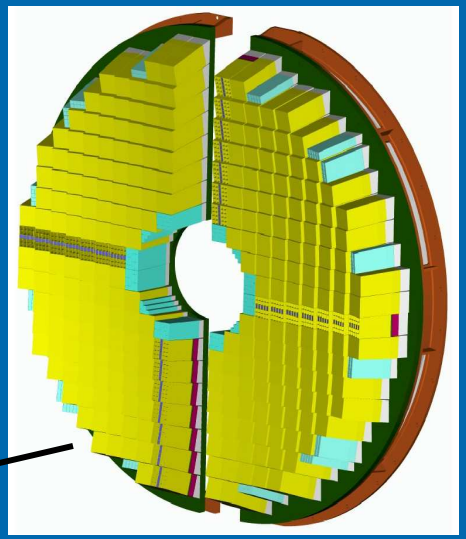


61200 cristaux : 2.2 x 2.2 x 22 $cm^3$

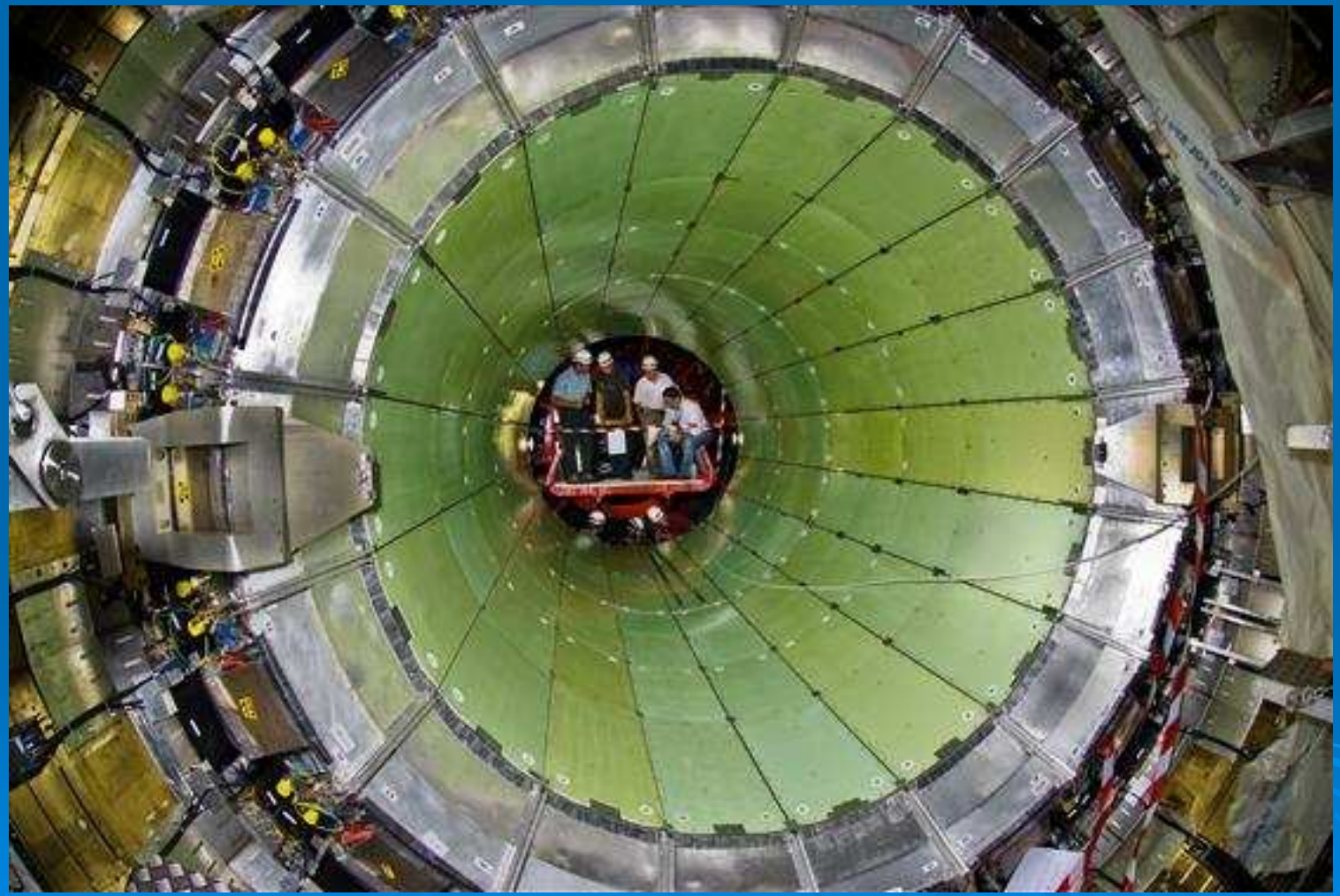
**Granularité : 1° x 1°**

R =129 cm



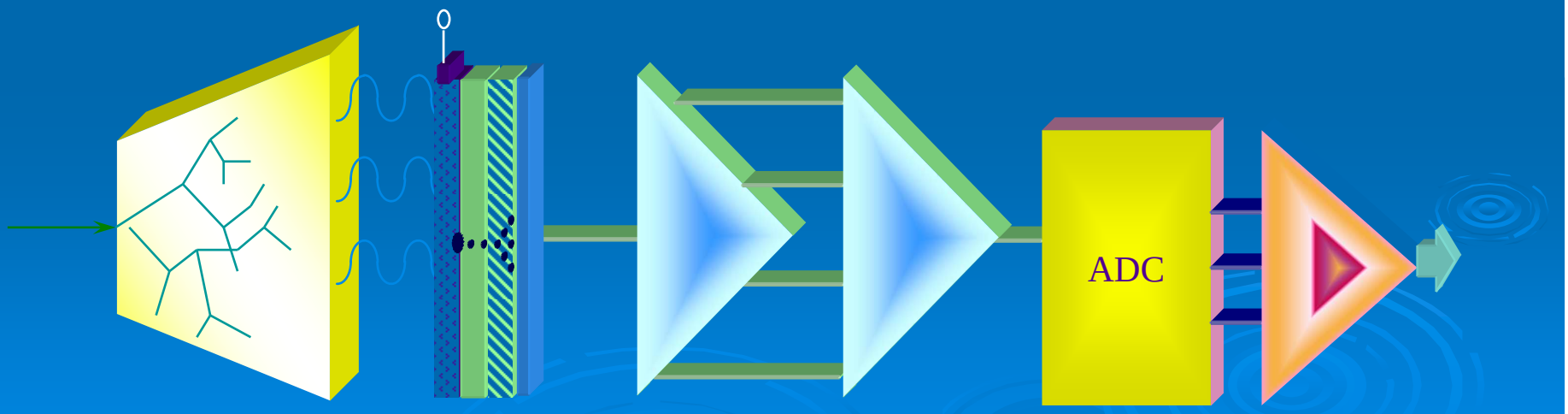



# Calorimètre électromagnétique



# Traitement du signal

| Énergie → Lumière | Lumière → Charges | Charges → Tension | Tension → Bits | Bits → Lumière |
|---|---|---|---|---|



# Précision de la mesure

Fluctuations de gerbe, photo-statistique, photodétecteur (bruit en excès : facteur F)

Bruit électronique :

photodétecteur (C, I inverse)

Préamplificateur

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{3(5.7)\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.55\% \oplus \frac{250(770)MeV}{E}$$

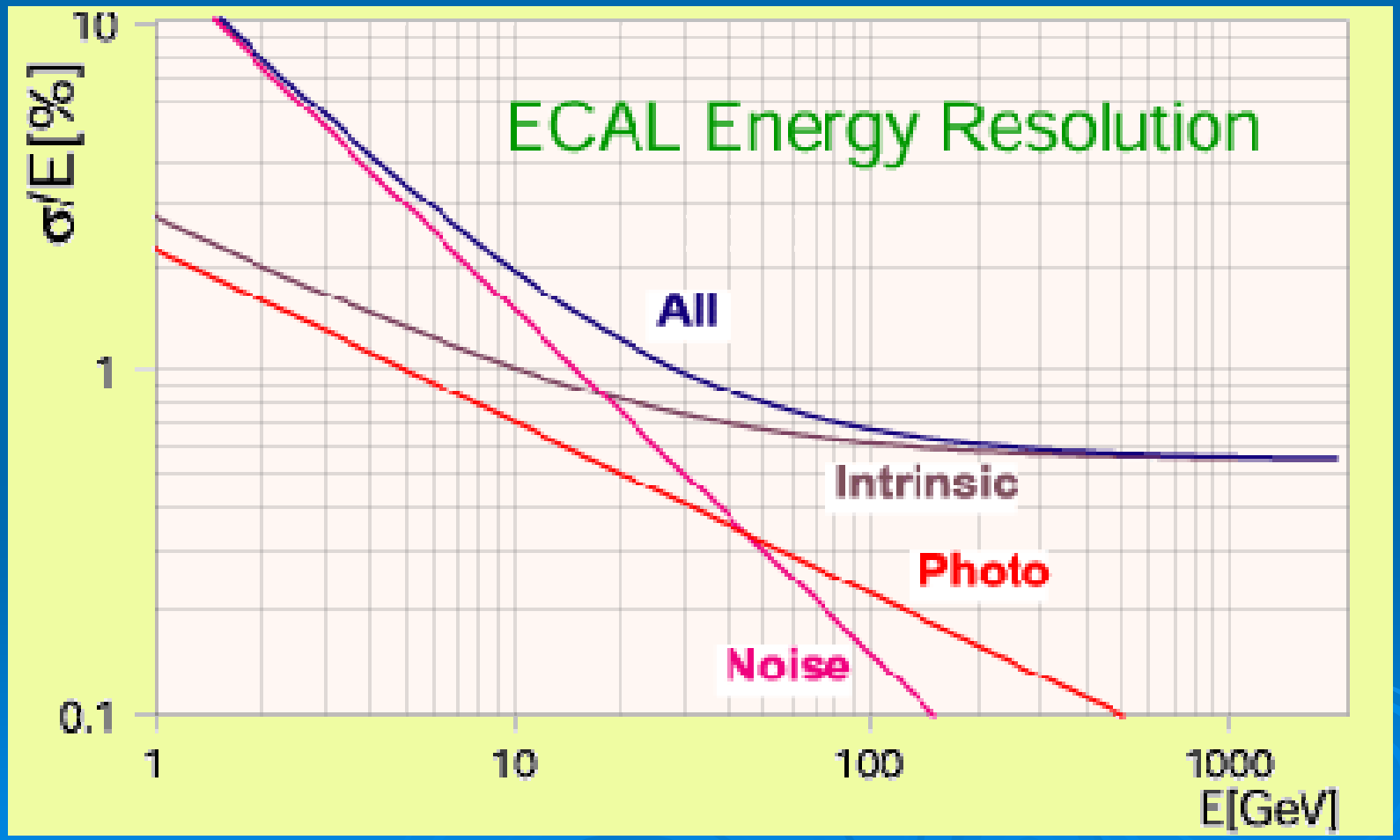
Calibration :

Evolution des cristaux

Evolution de l'électronique

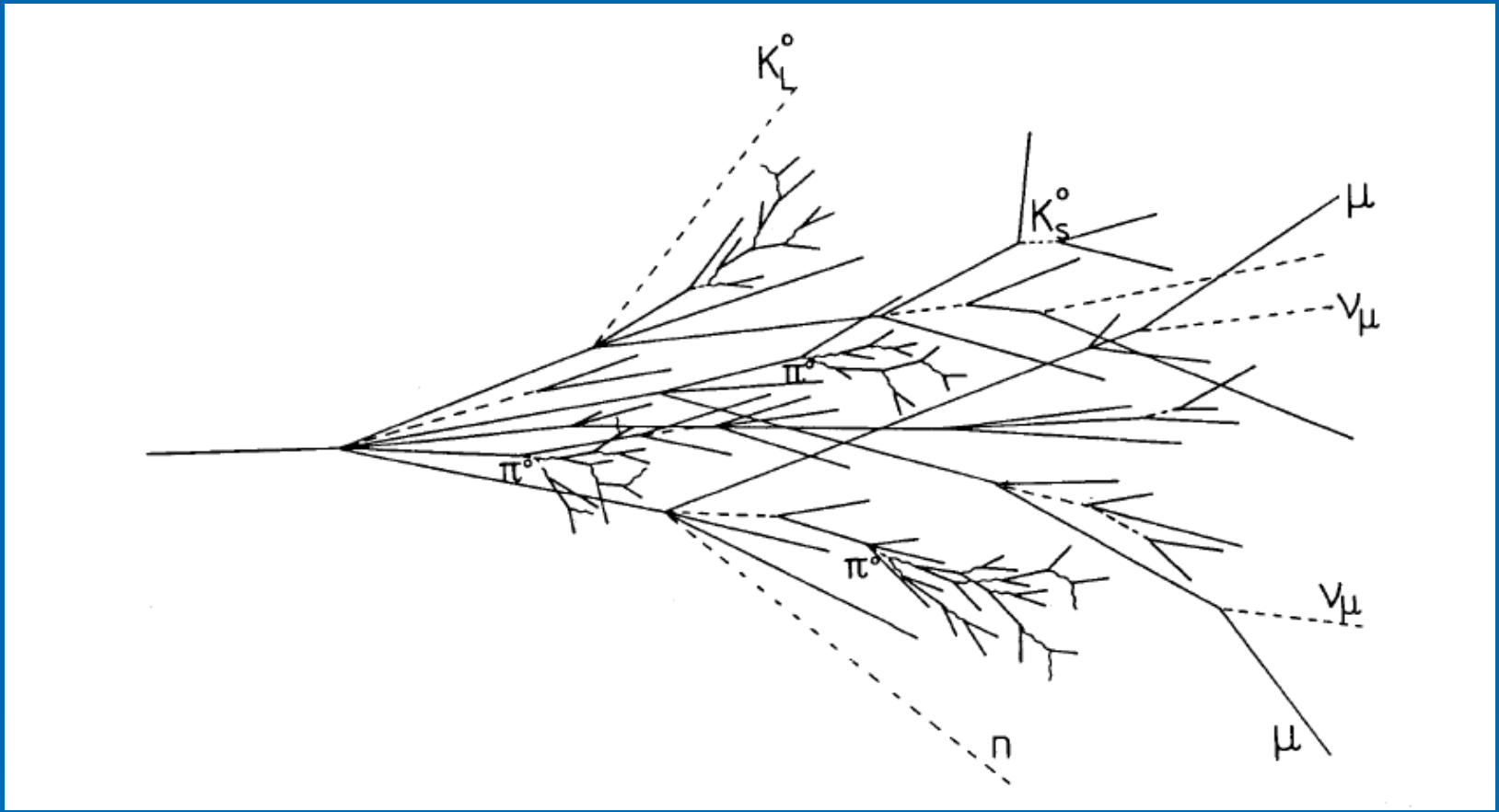
Sensibilités %T, %V (cristaux, APD)

# Précision de la mesure



# Le calorimètre hadronique

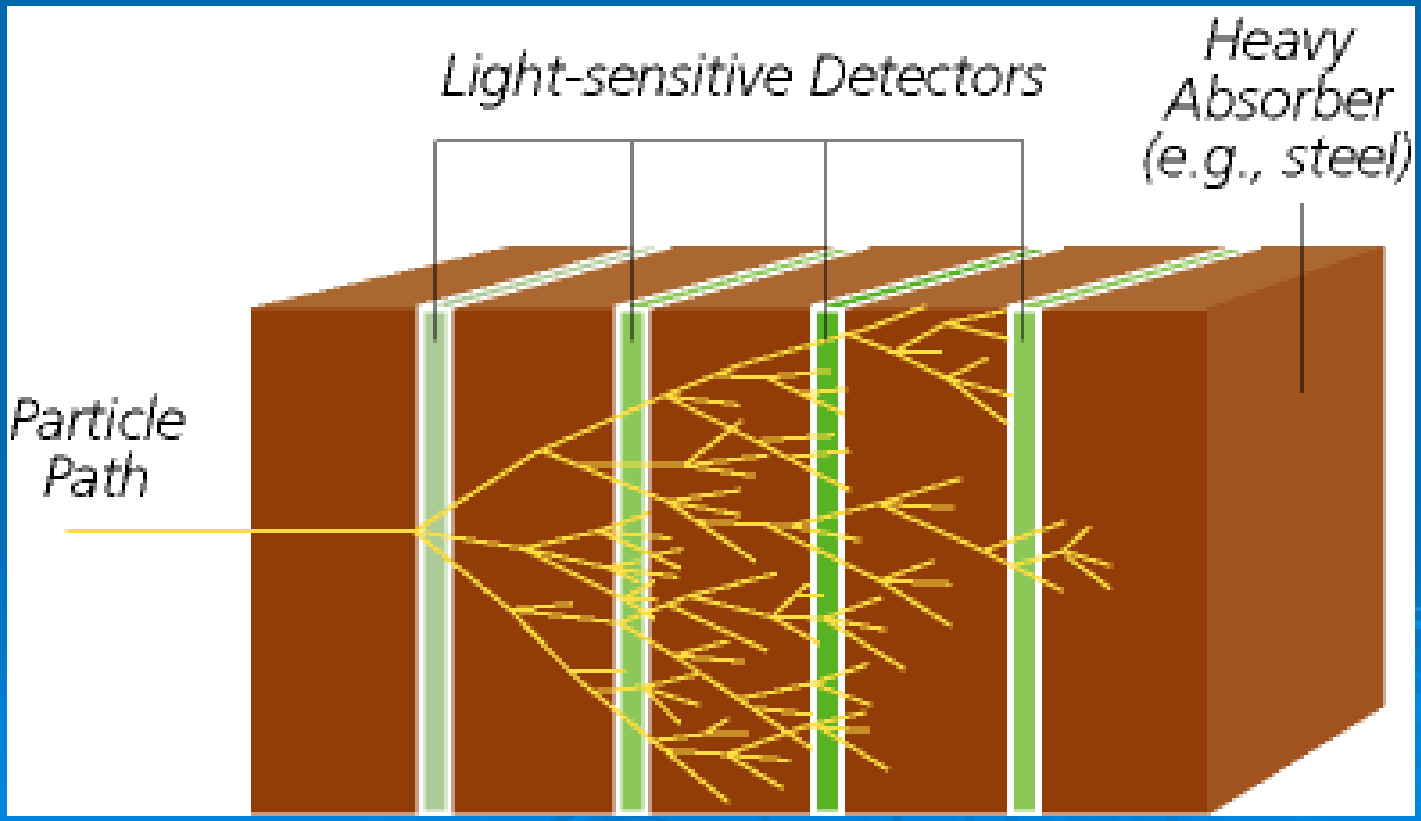
# Gerbe hadronique



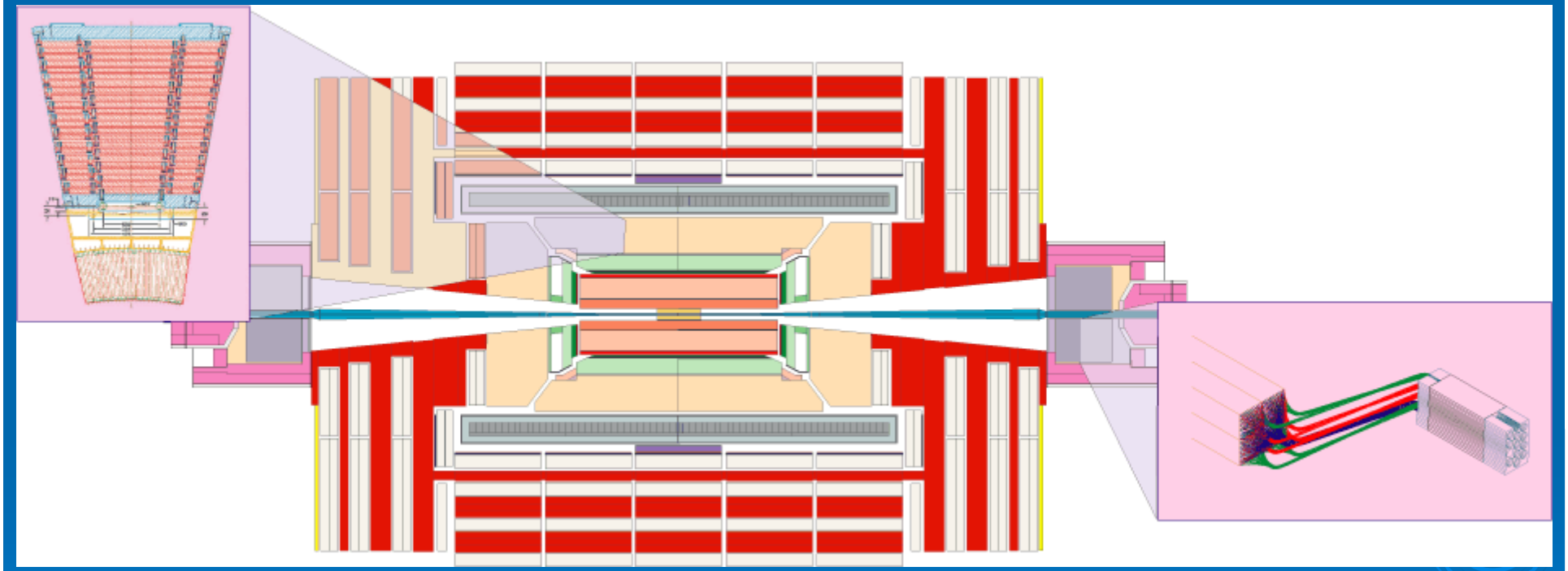

Une gerbe hadronique est initiée par les hadrons secondaires rapides créés dans l'interaction inélastique d'un hadron incident de haute énergie. En moyenne la moitié de l'énergie du hadron incident passe aux hadrons secondaires rapides, et le reste est partagé parmi les pions lents et d'autres processus.

# Calorimètre hadronique

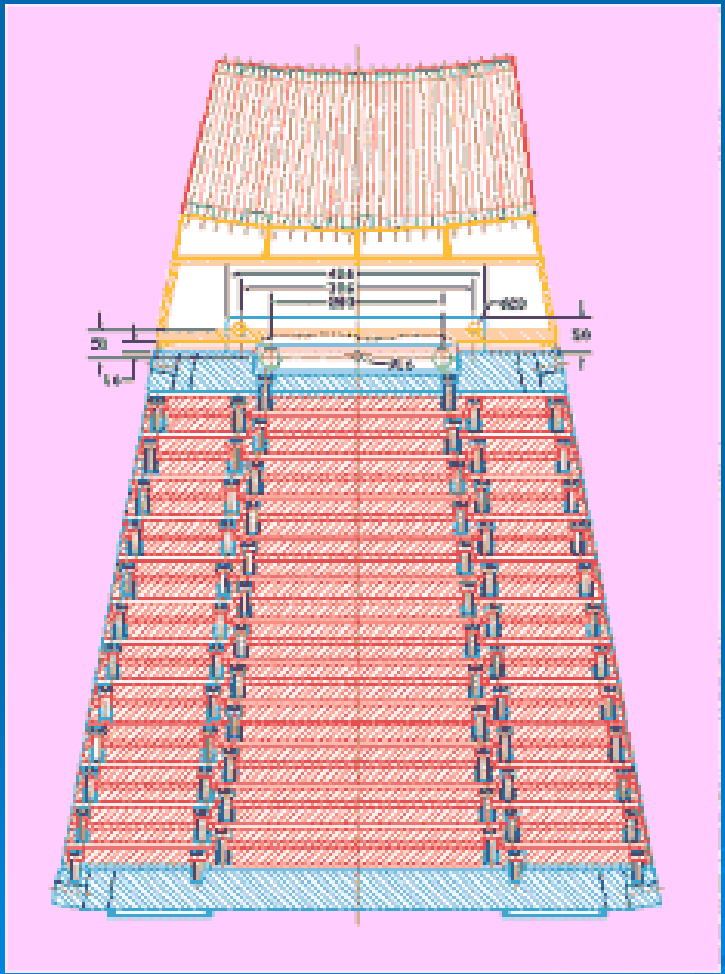
Une particule incidente, interagissant avec un matériau dense, crée une cascade d'autres particules ayant chacune moins d'énergie.

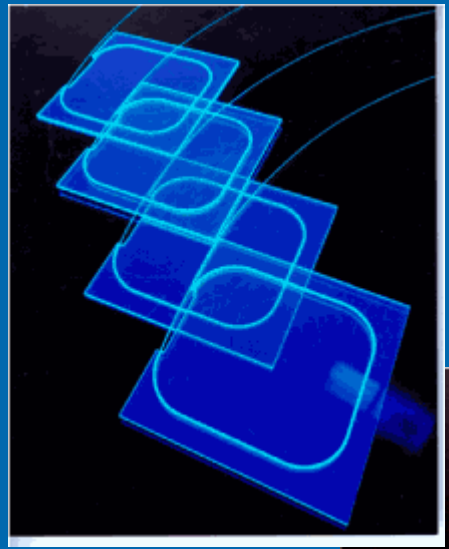


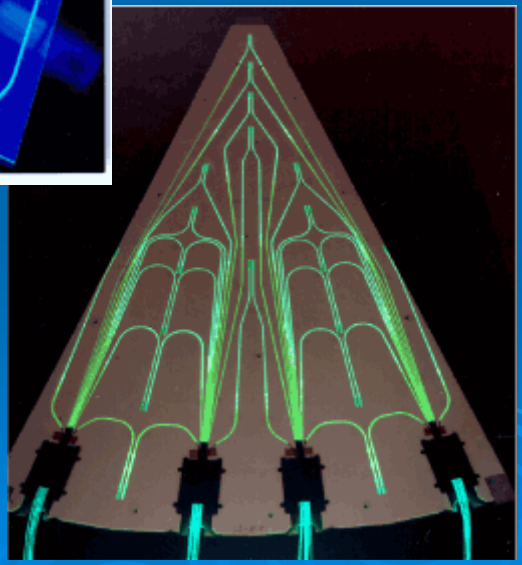
# L’énergie des hadrons



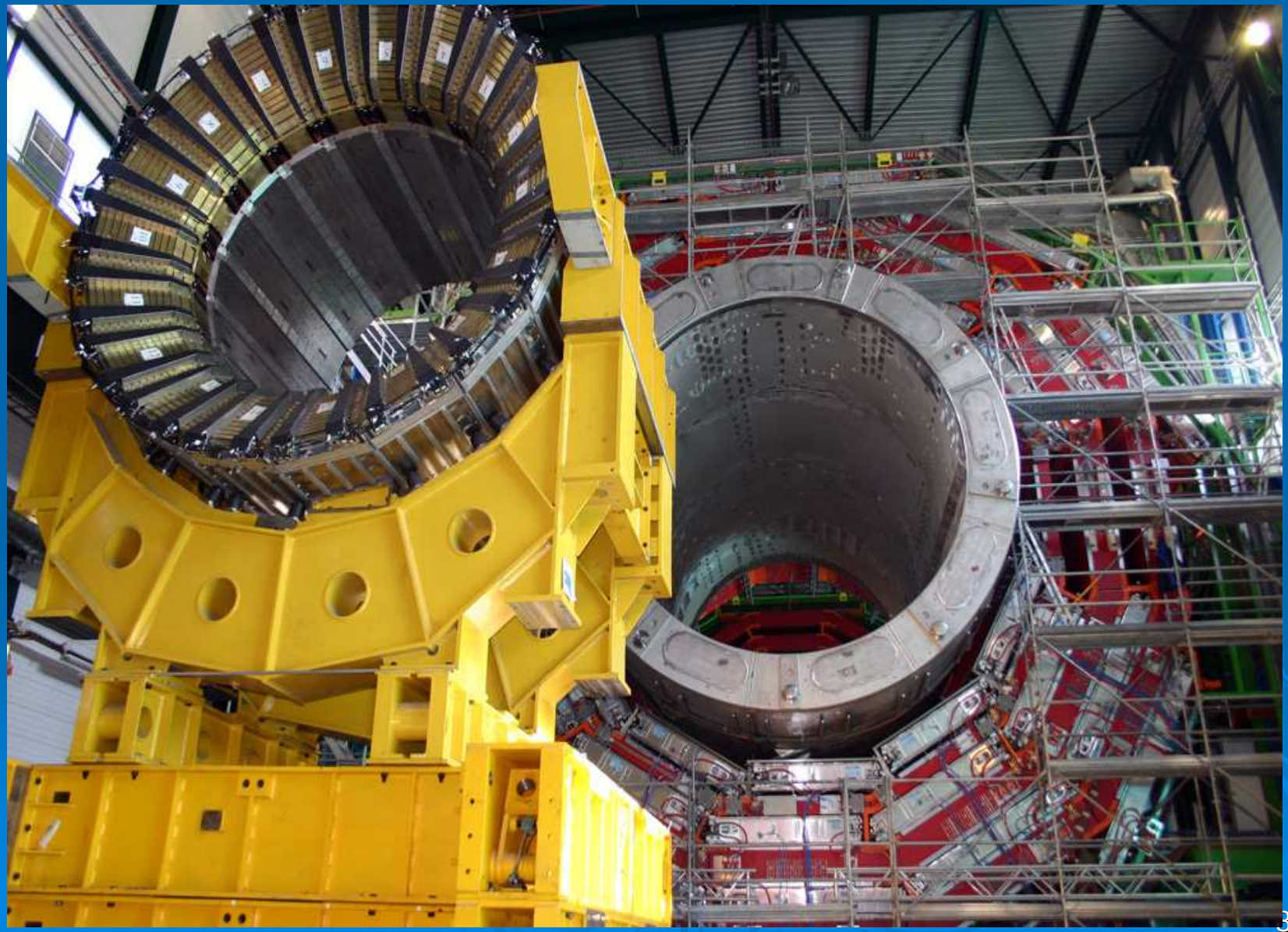
# L’énergie des hadrons



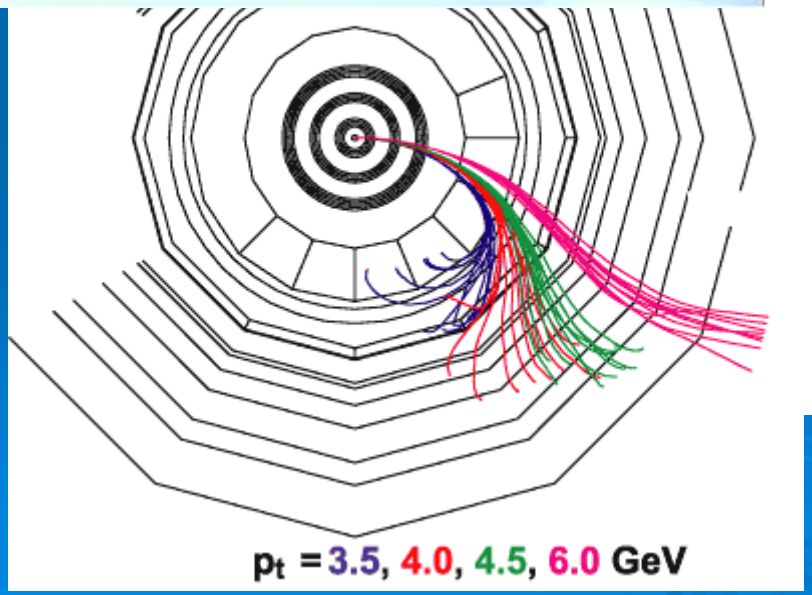


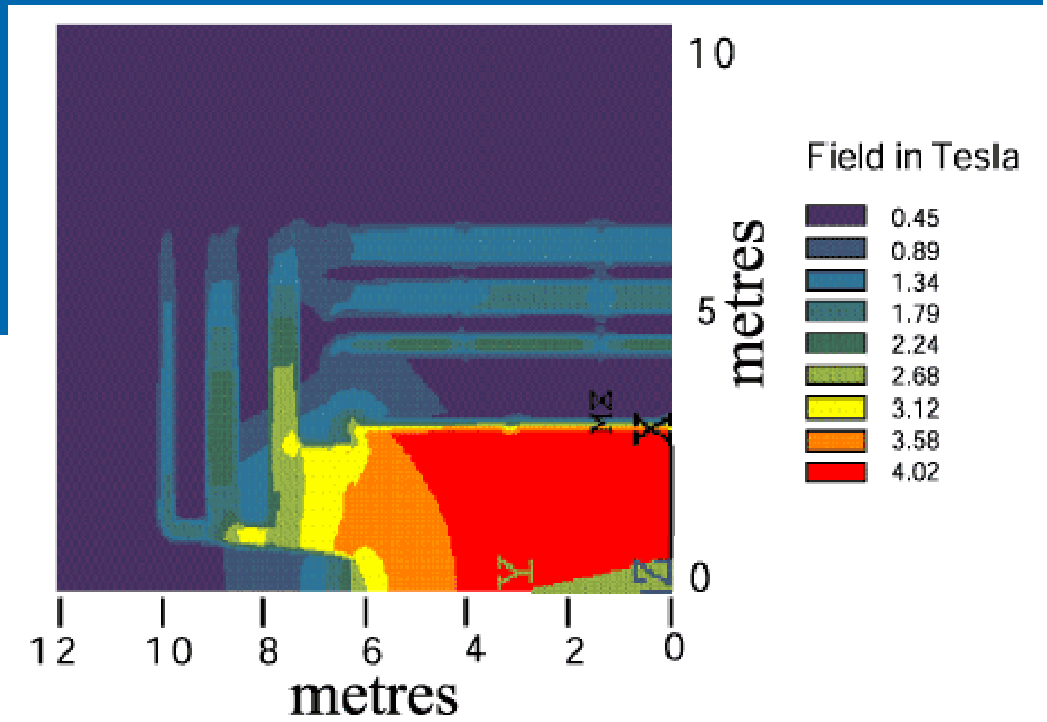


# Calorimètre hadronique (30 t)



# L'aimant supraconducteur de 4 Tesla

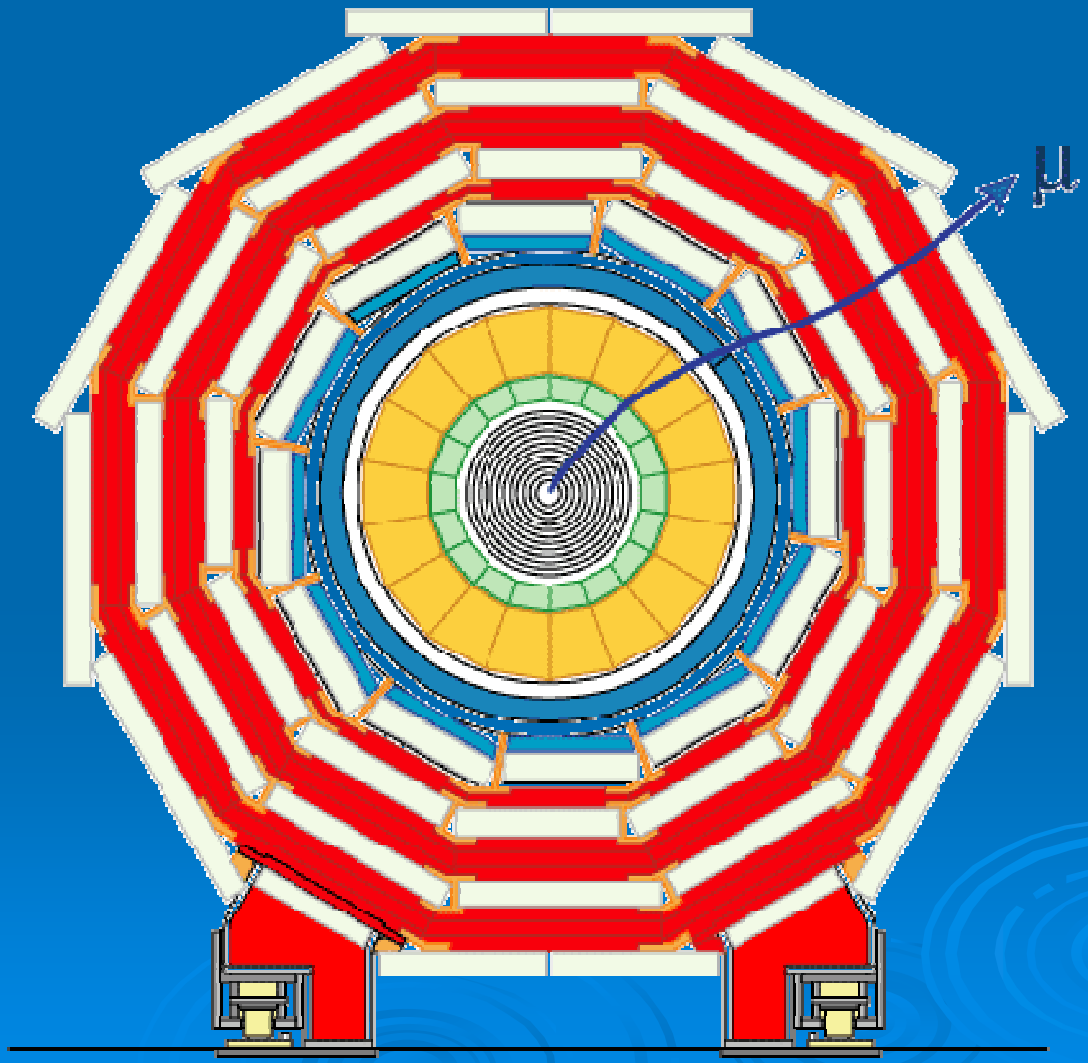


# L’aimant supraconducteur de CMS

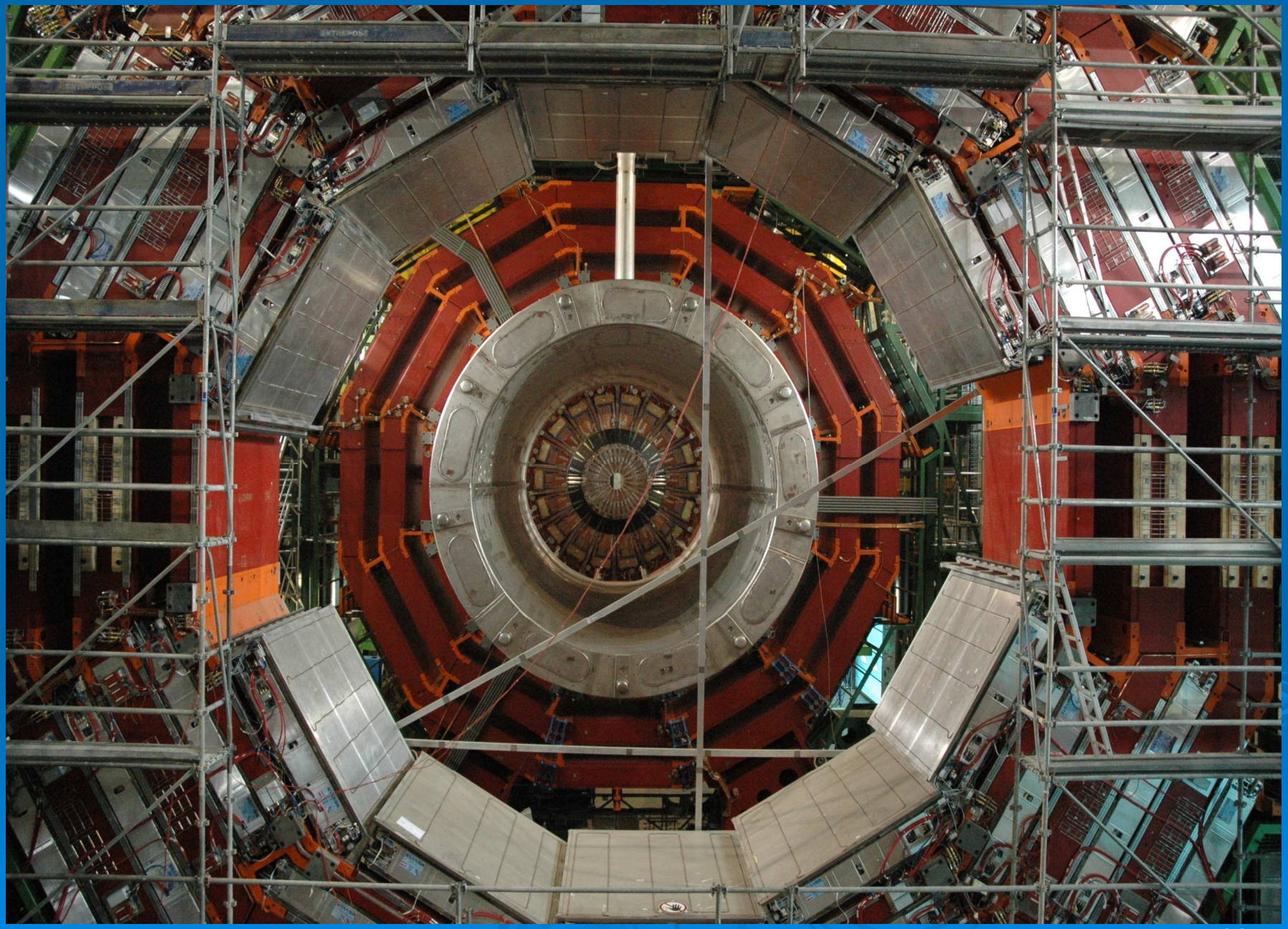
# Les chambres à muons

# Les trajectoires des muons

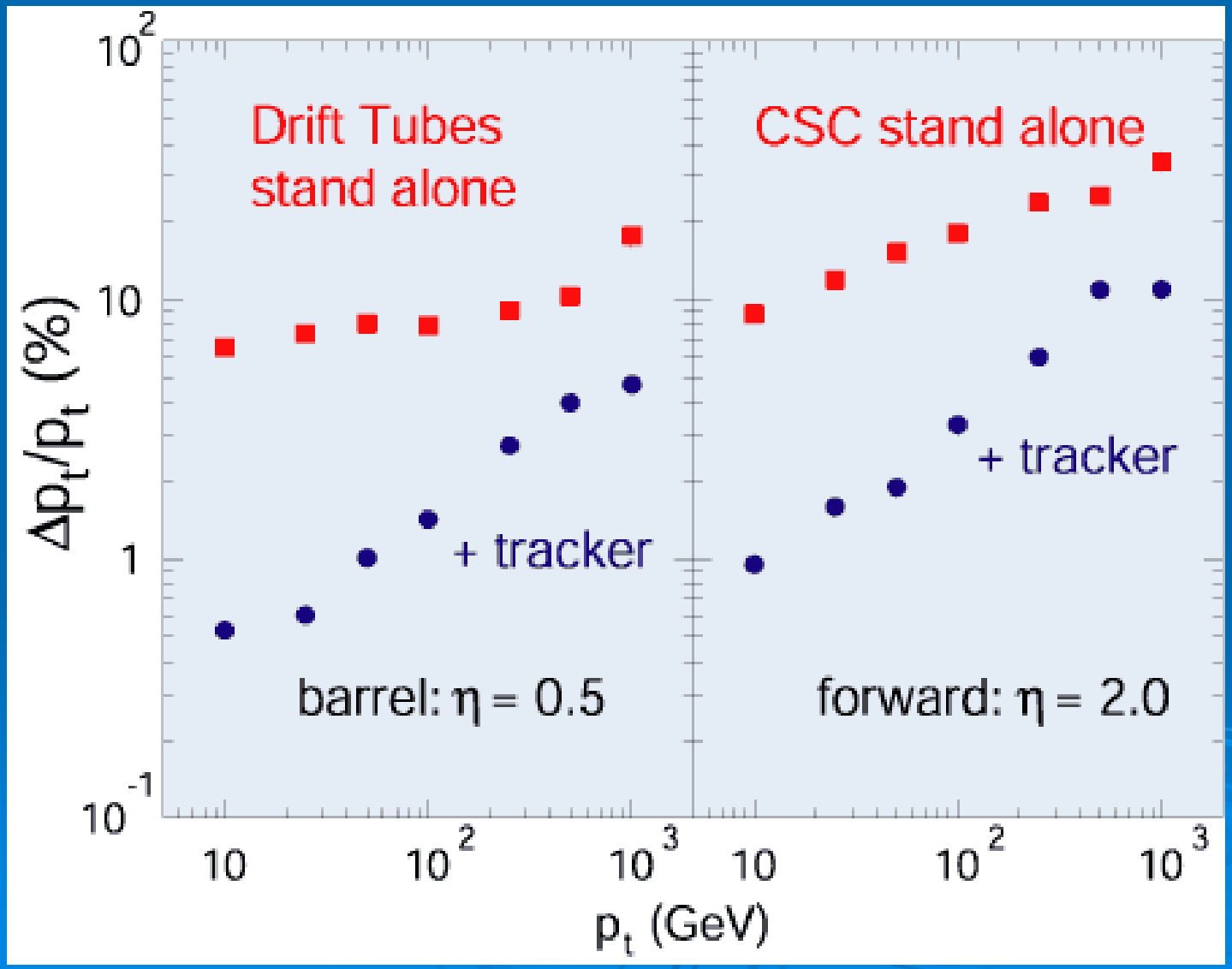


# Chambre à muons

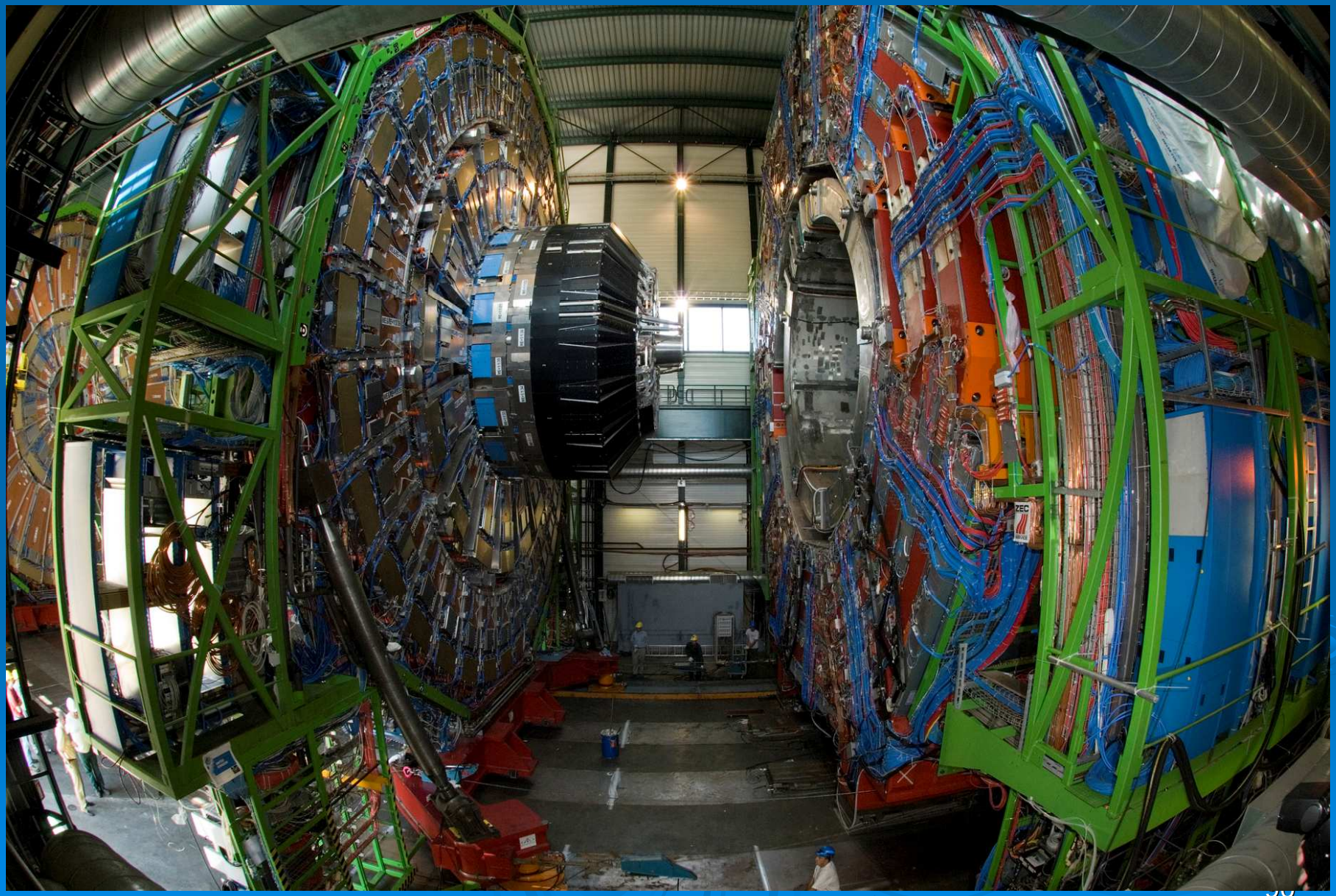
# Chambre à muons (insertion)



# Mesure de l'impulsion des muons

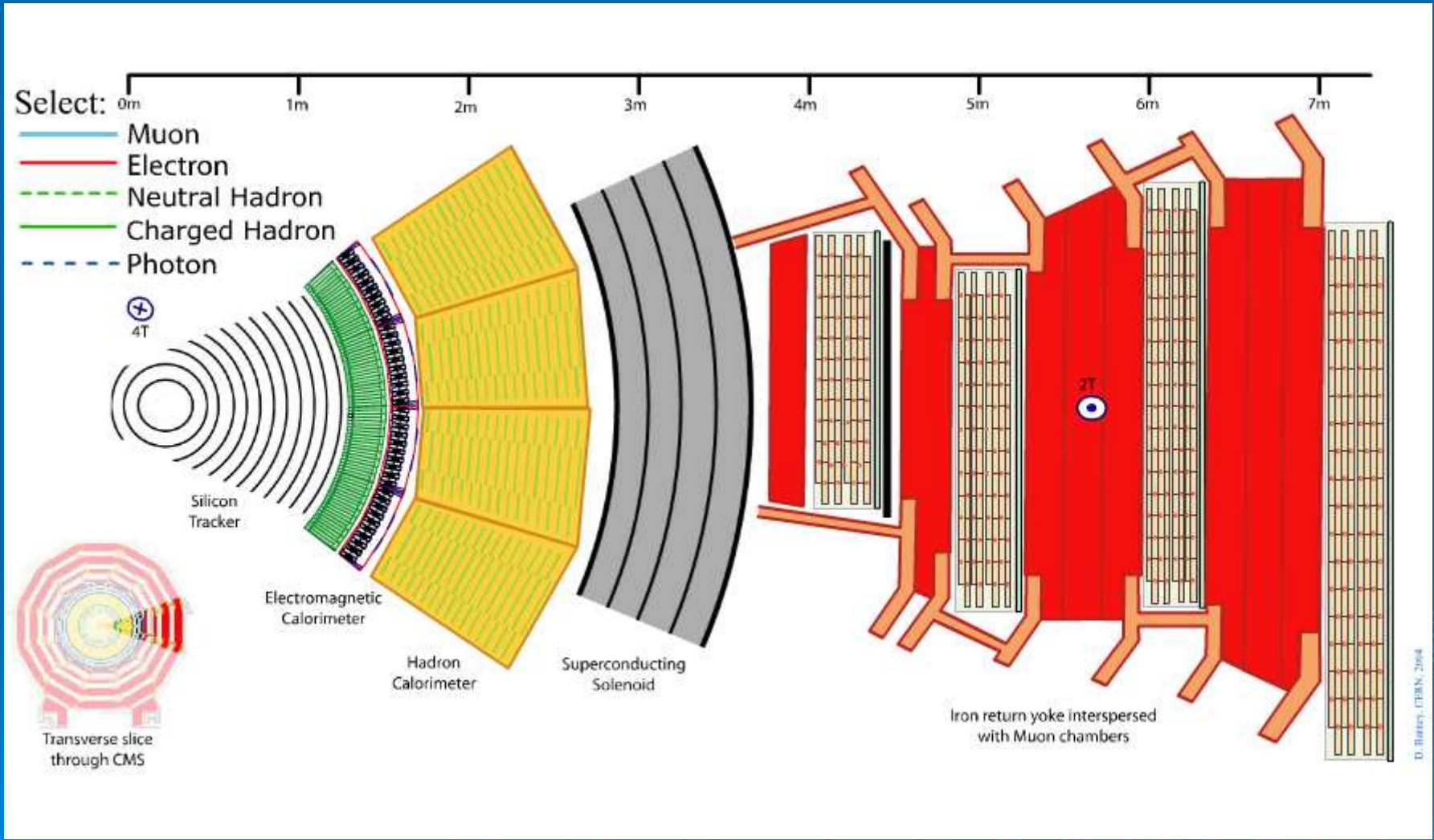


# CMS (assemblage)

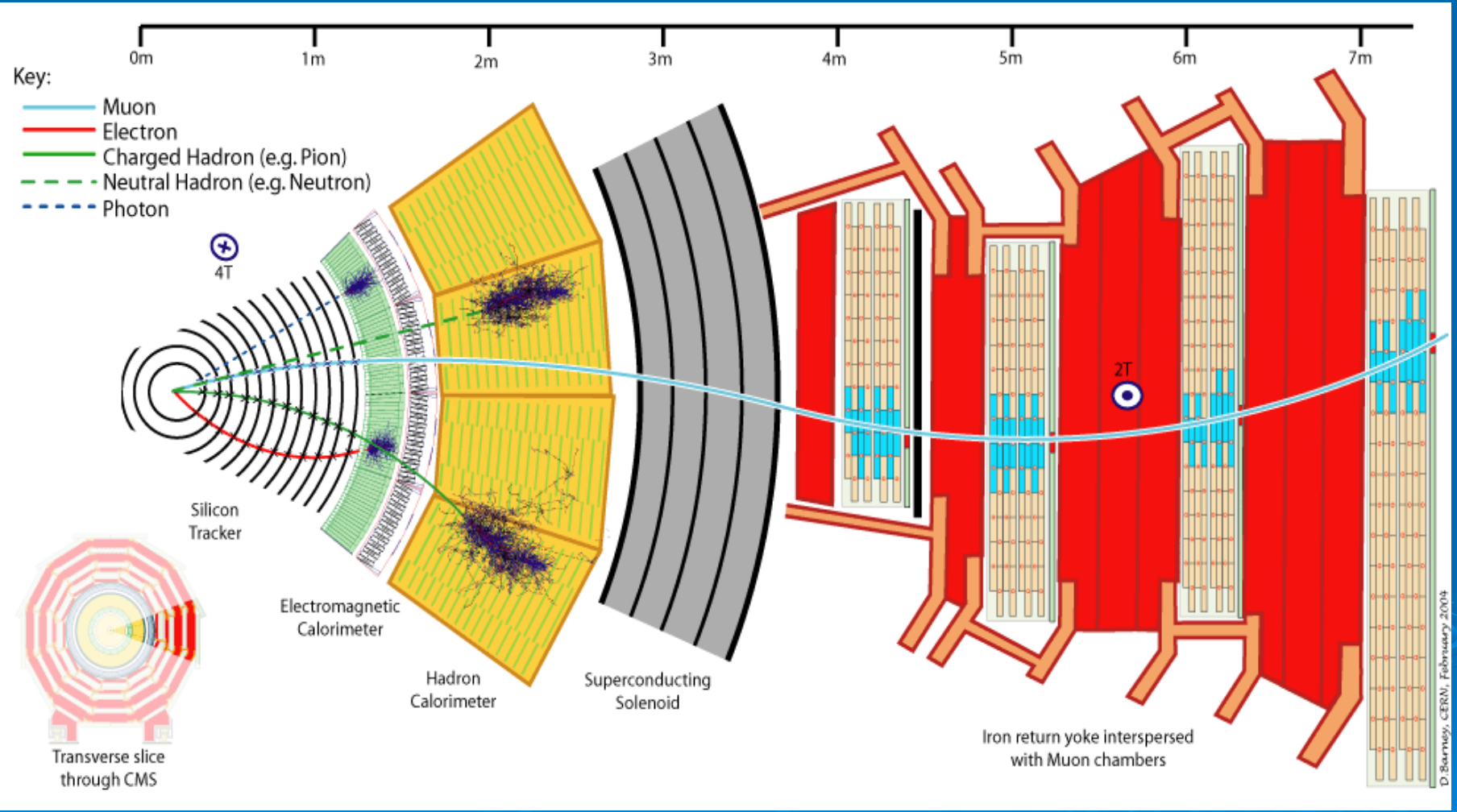


# Identifier les particules

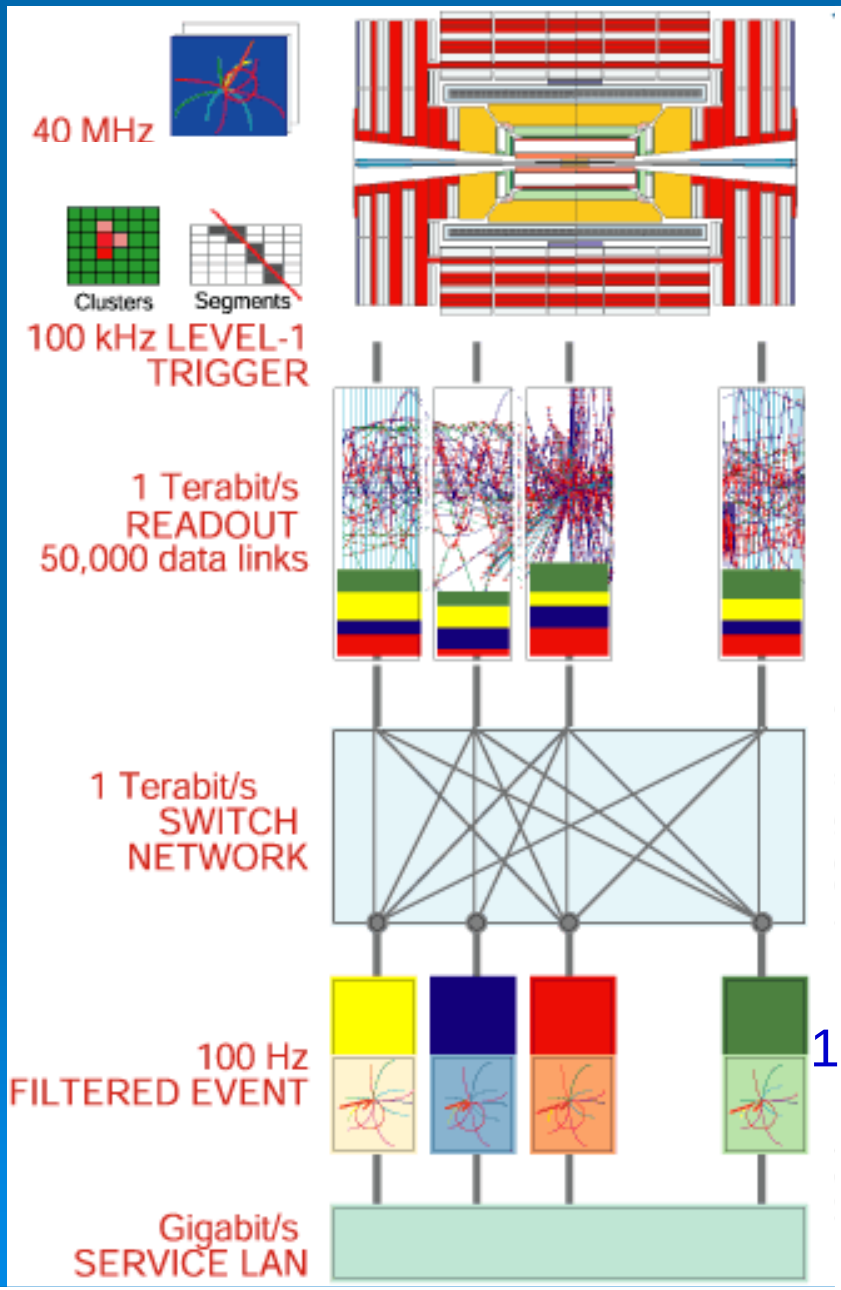
# Identification des particules



# Identification des particules



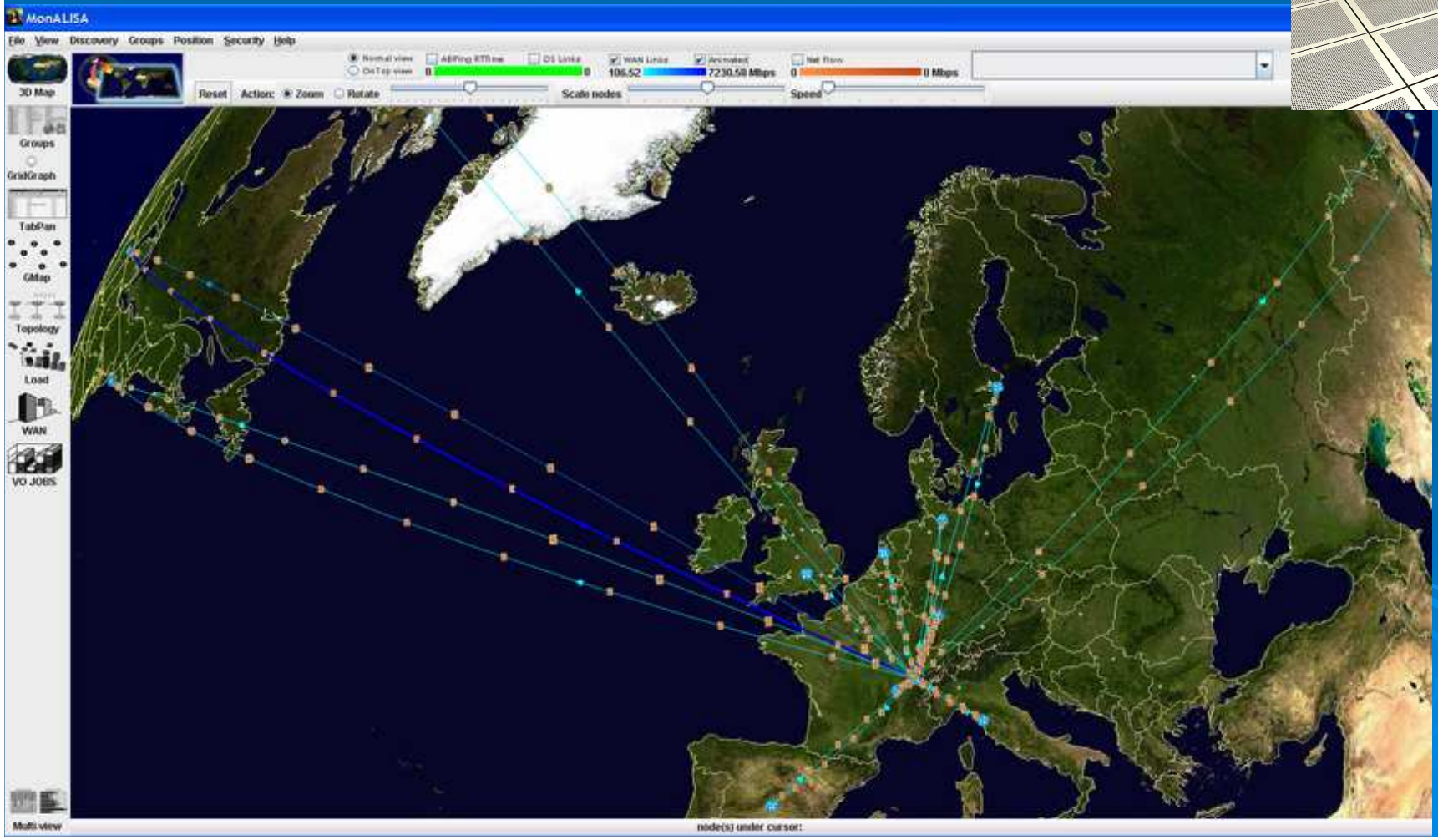
# Réduction des données



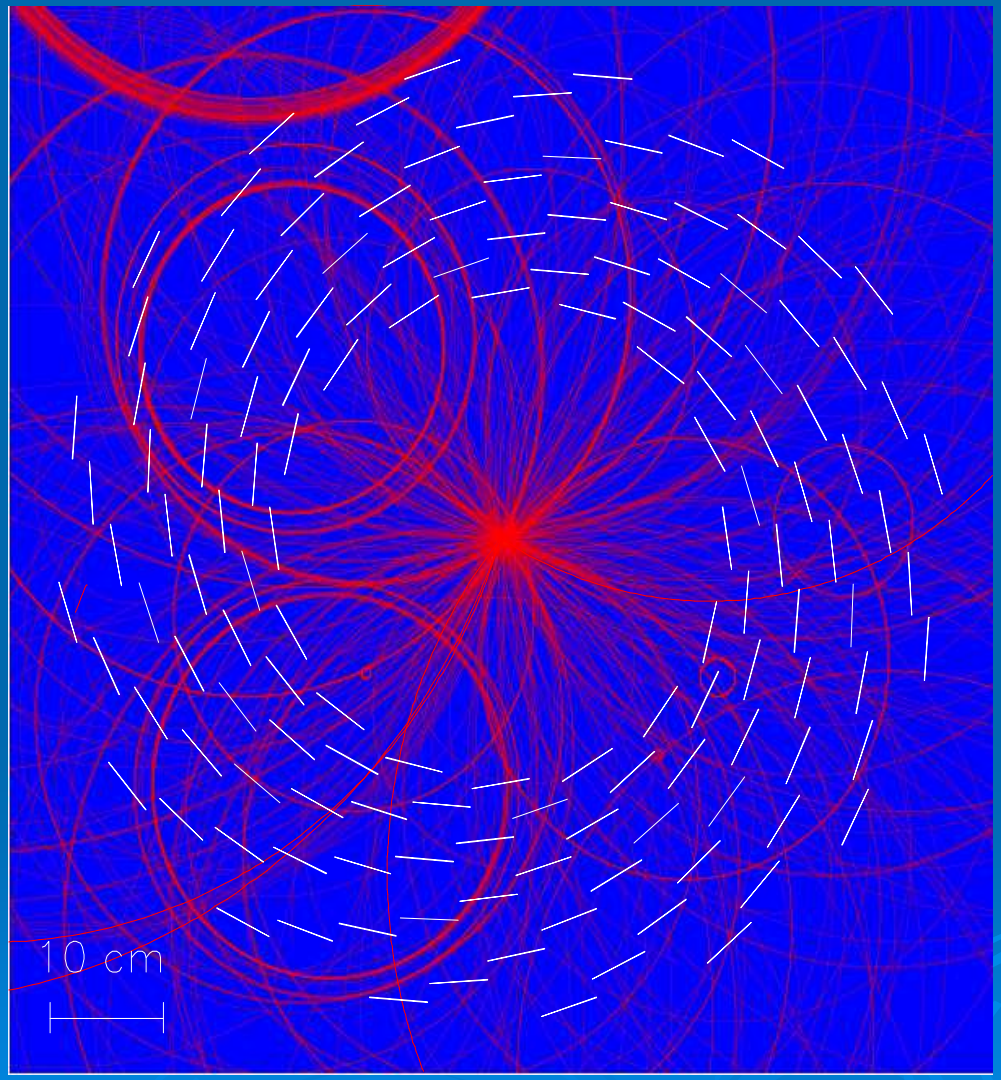

**600 millions de collisions par seconde**

100 évènements par seconde

# Les moyens de calcul : la grille LHC

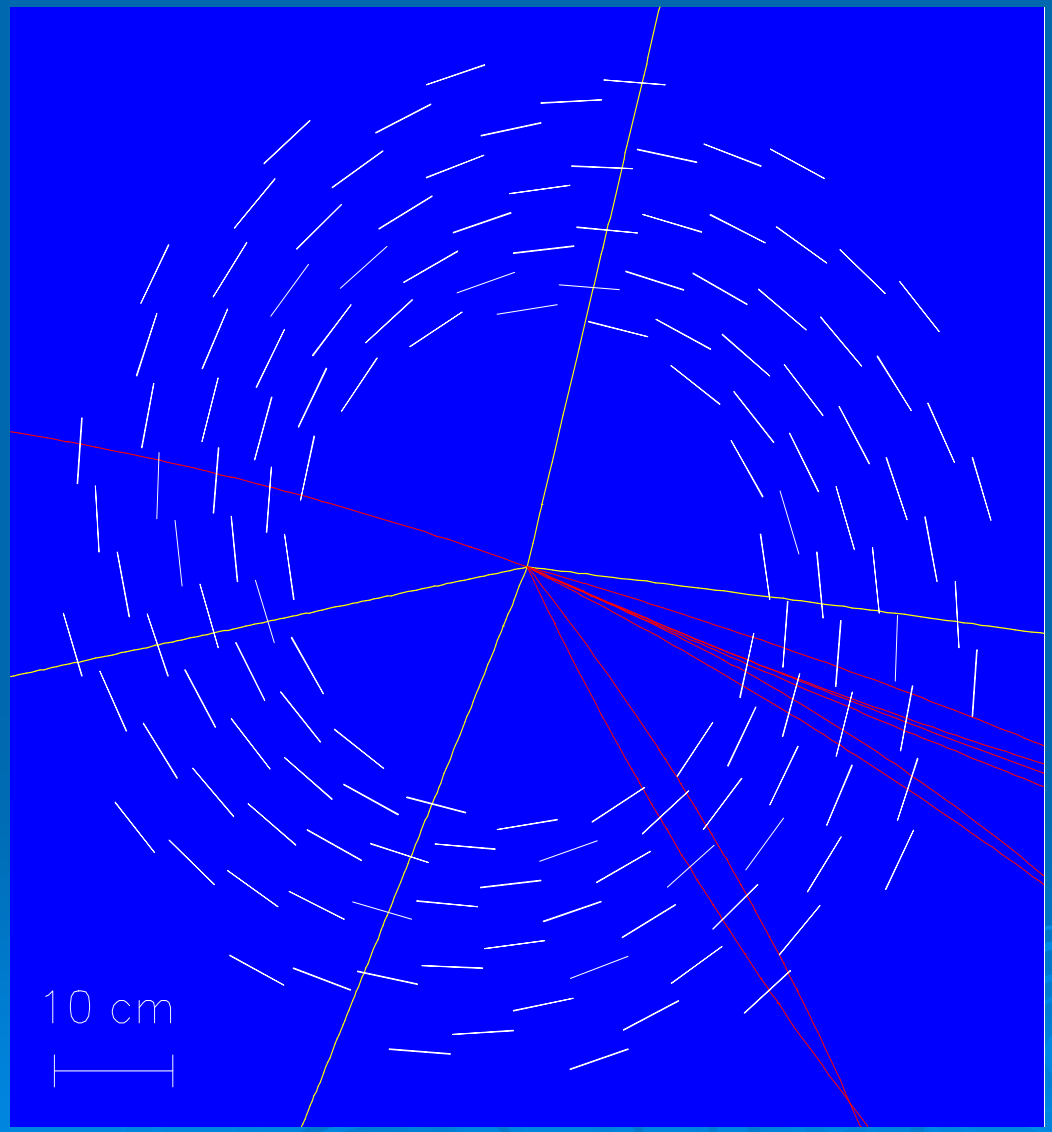


# Défi : trouver dans ce foisonnement…




[redacted]

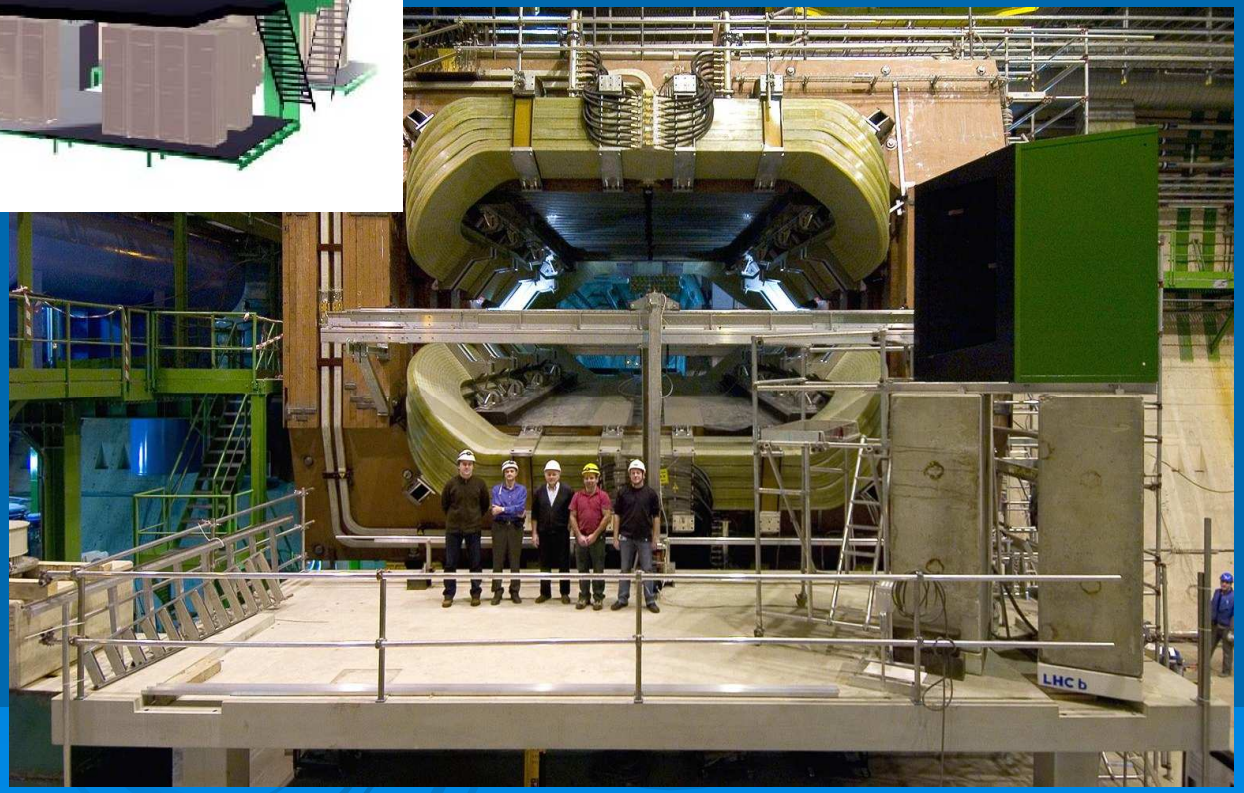
# …L’évènement ultime



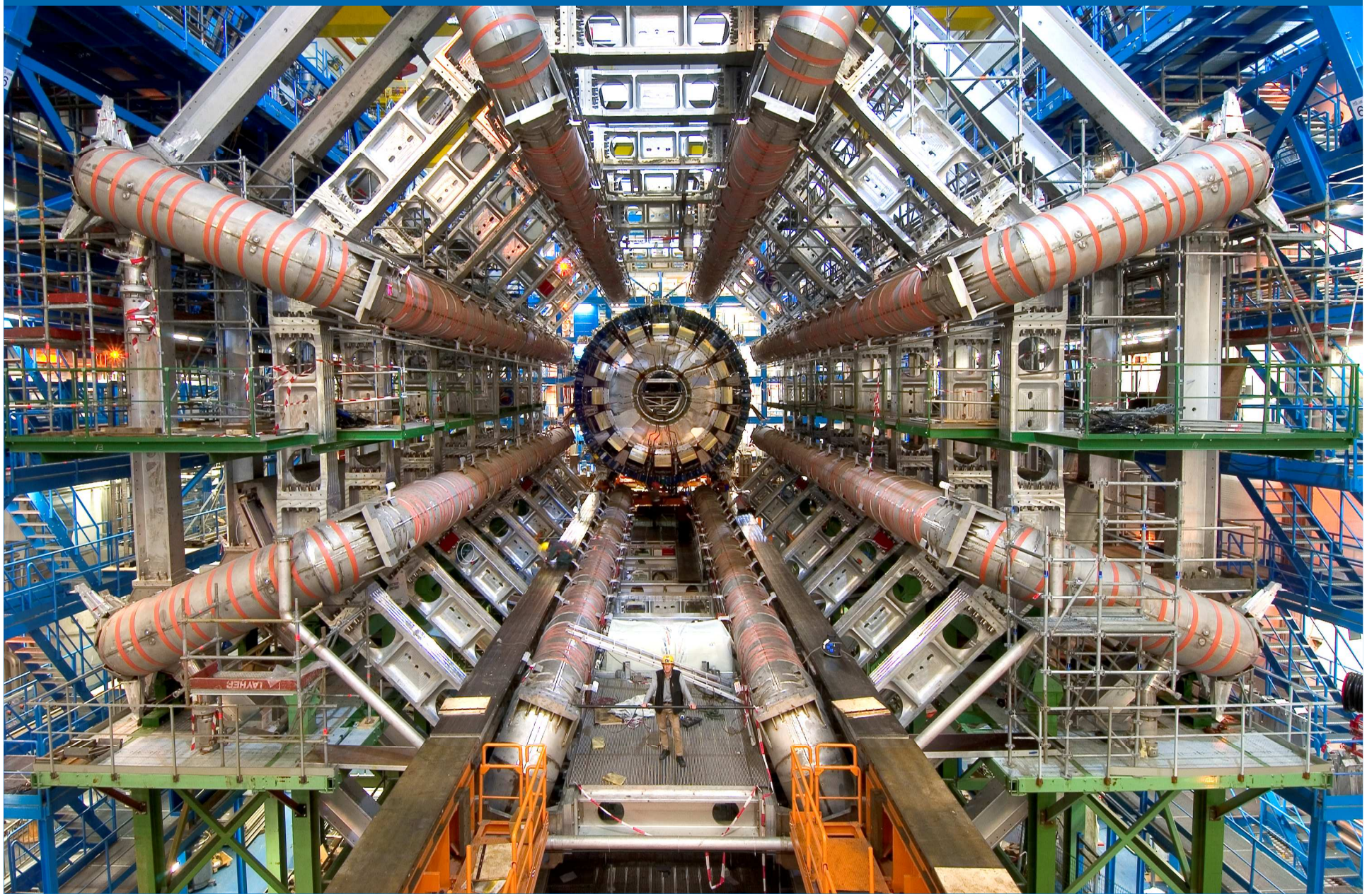
# Les autres grands détecteurs

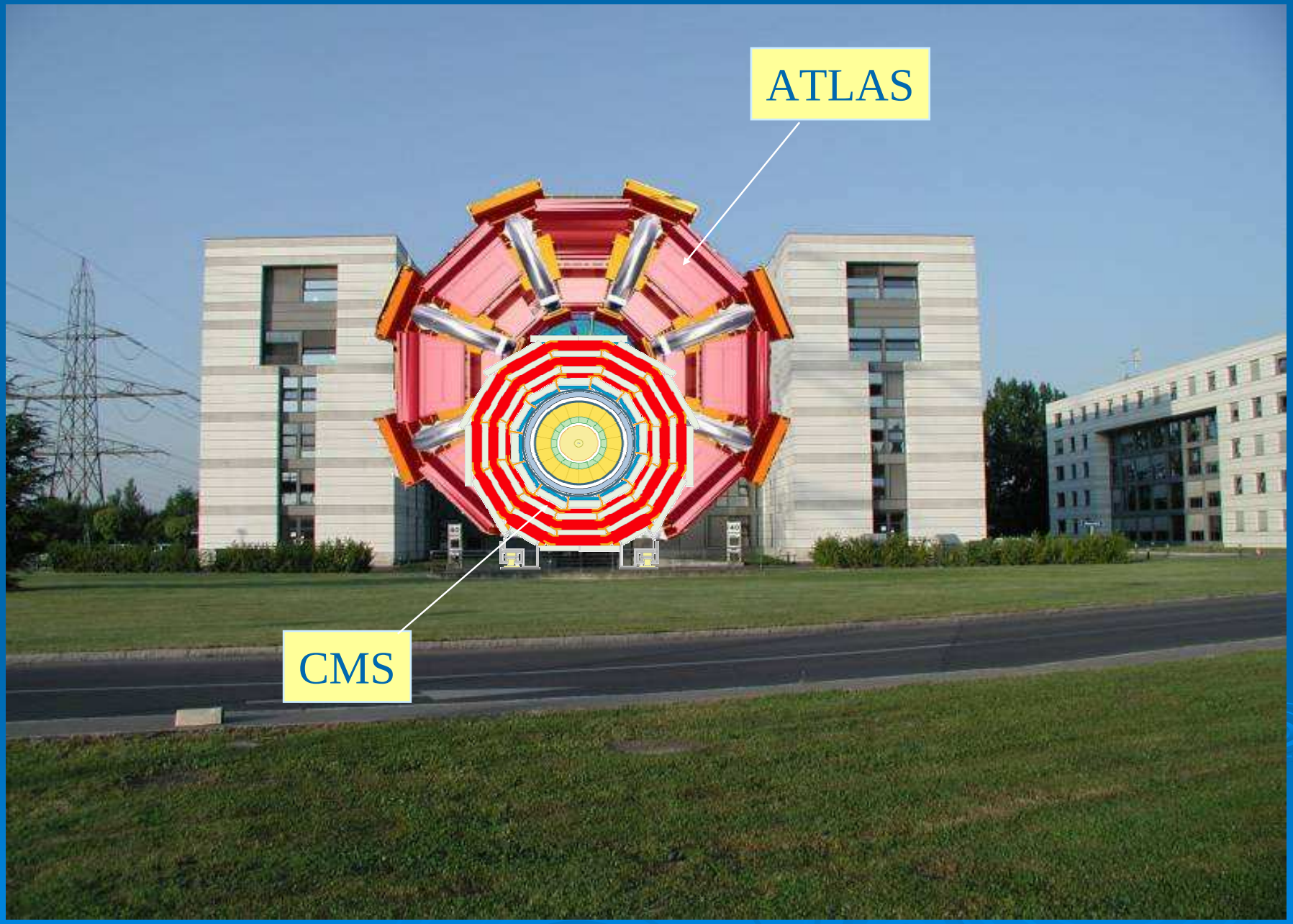
ALICE

LHCb



# ATLAS




ATLAS
CMS

# De grandes avancées techniques

- Utilisation à grande échelle de la supraconductivité
- Système cryogénique de très grande ampleur
- Réalisation d'un vide très poussé dans un très grand volume
- Développement de la grille informatique
- Application de certaines techniques de détection à la société

# Les conditions extrêmes liées à la physique étudiée

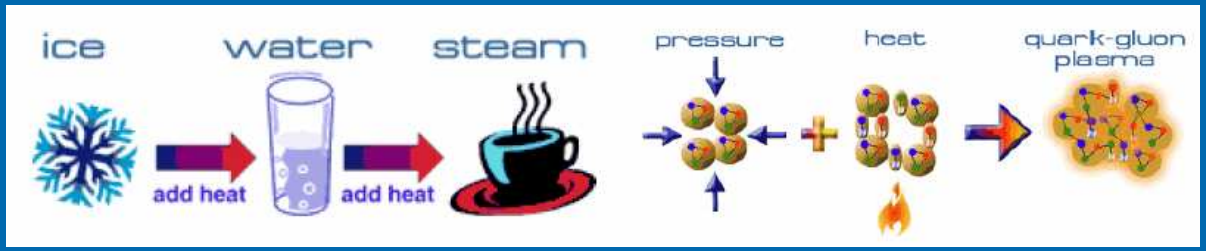
- Frontières de l'infiniment petit : $10^{-19}$ m
- Energie des protons : 4 TeV
- Densité d'énergie aux points de collisions

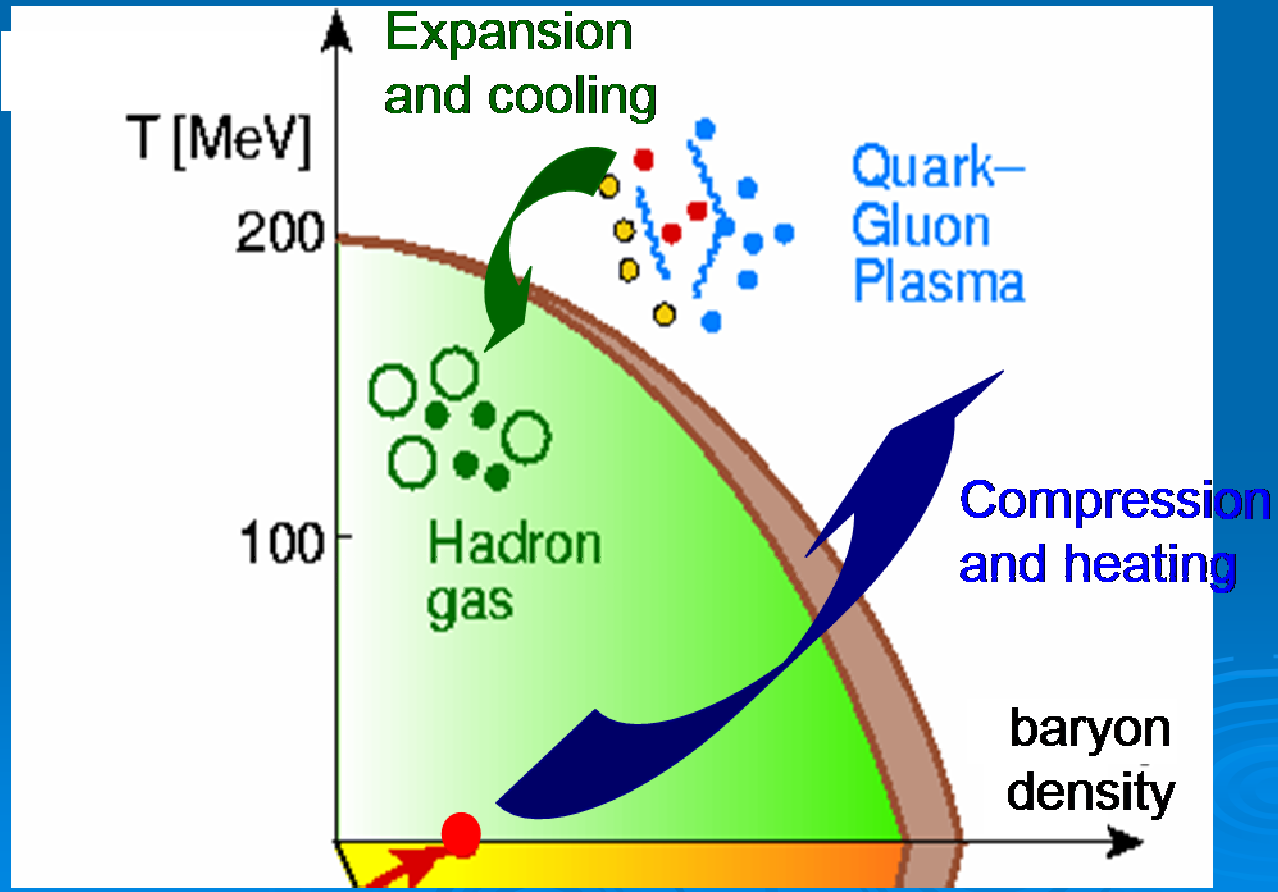
- Températures atteintes lors des collisions $> 10^{13}$ K $\Rightarrow$ premiers instants du Big Bang
- Nouvel état de la matière : plasma de quarks et gluons

# Les grandes questions

- Quelles sont les propriétés de la matière dense et chaude de l'Univers primordial?
- Quelle est l'origine de la masse des particules? (donc de la matière qui nous constitue)
- Pourquoi y-a-t'il aussi peu d'antimatière?
- De quoi est constitué la matière noire de l'Univers ?
- Existe-t-il des dimensions supplémentaires à celles de notre espace-temps?

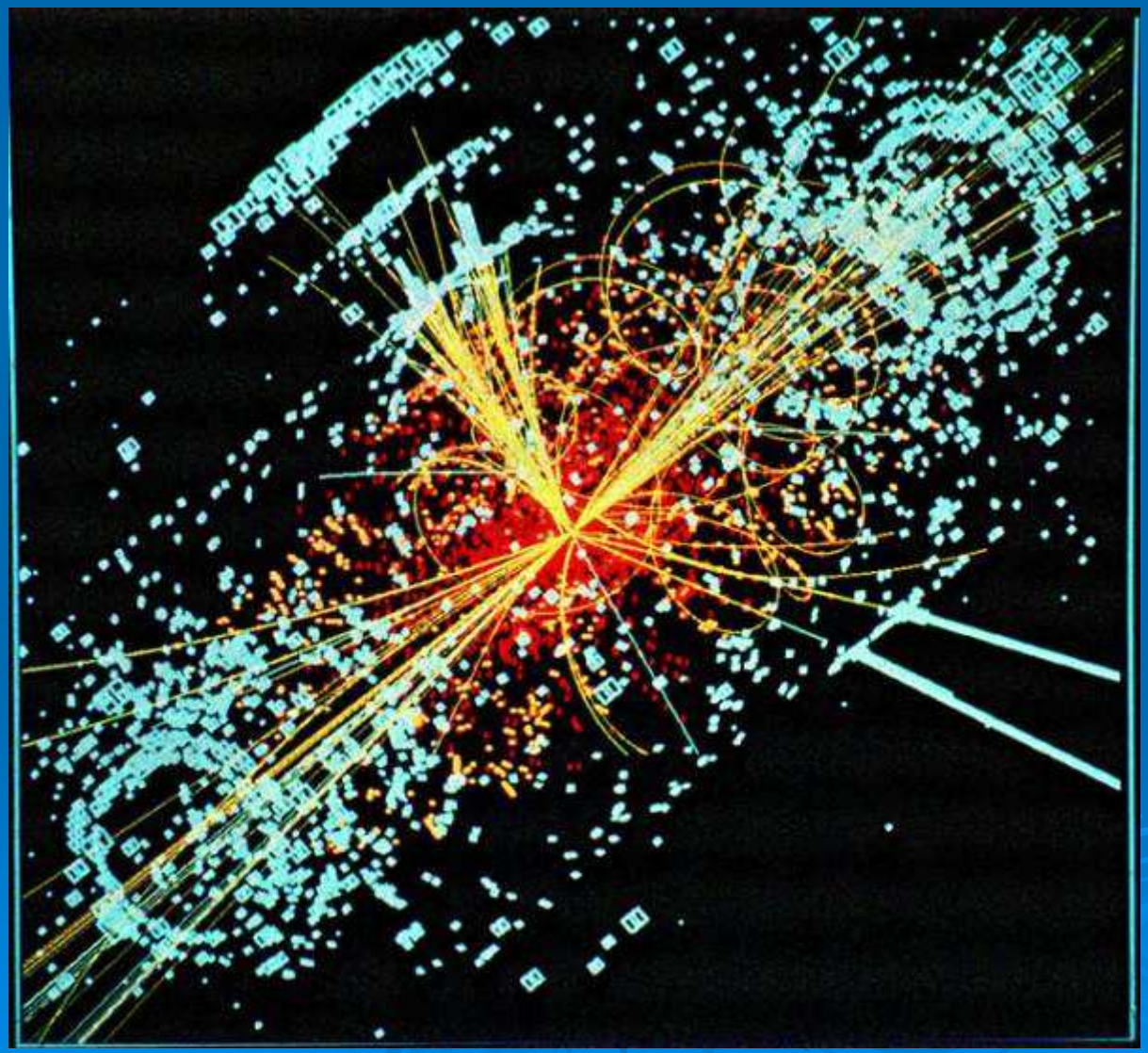
# Le plasma de quarks et gluons



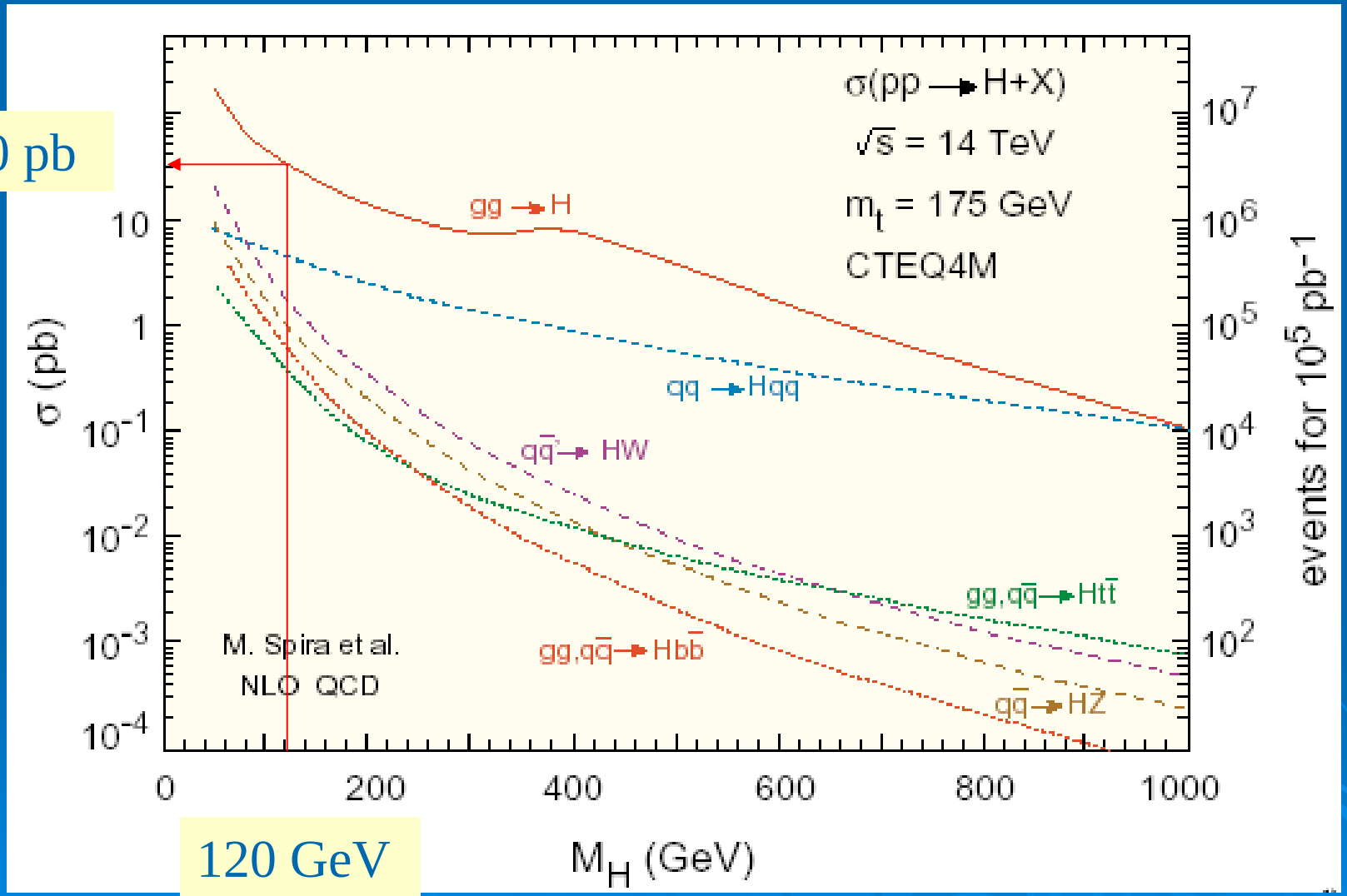




nuclei ($n_B$=0.14/fm$^3$)

# Le boson de Higgs

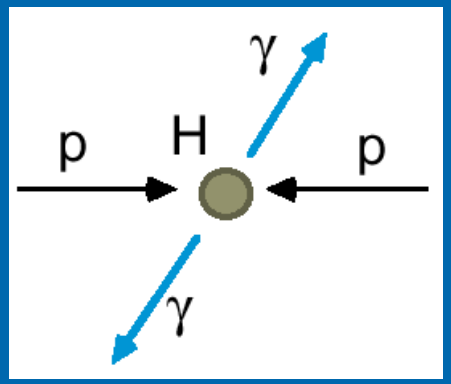


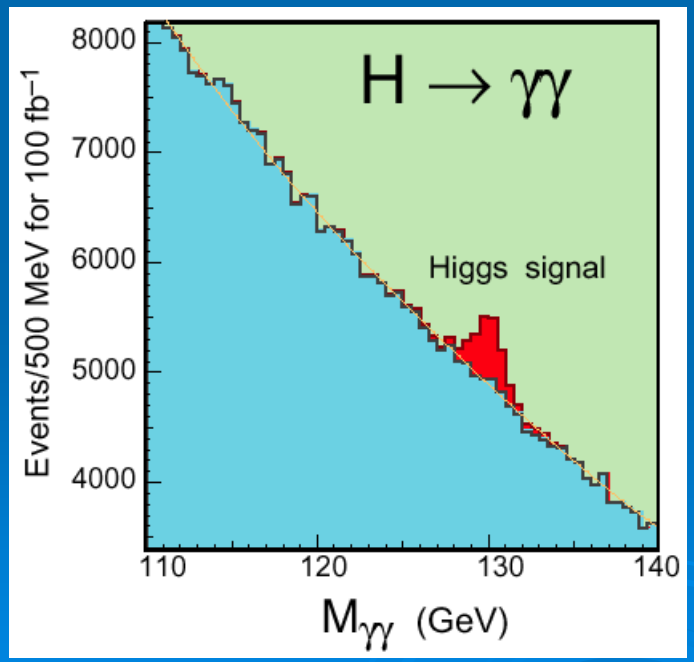
# Production du Higgs au LHC

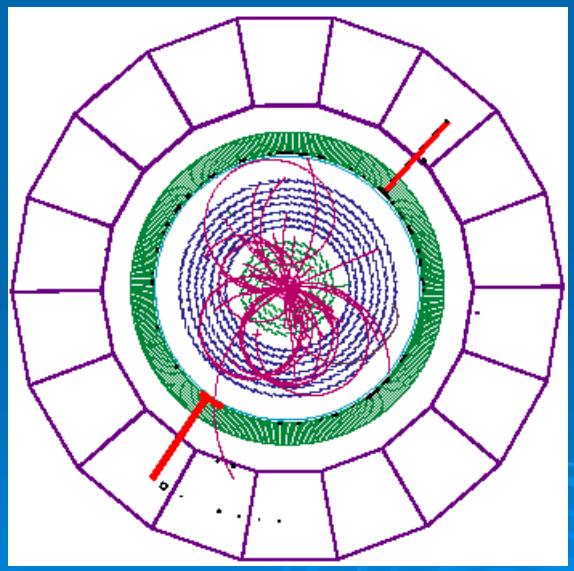


# Higgs de basse masse ($M_H$<140 GeV/$c^2$)

- $H \rightarrow \gamma\gamma$: faible taux de désintégration ($B \sim 10^{-3}$)
  - Mais avec une bonne résolution du détecteur $\Rightarrow$ pic en masse
  - Résolution à 100 GeV, $\sigma \approx 1$GeV, S/B≈1:20

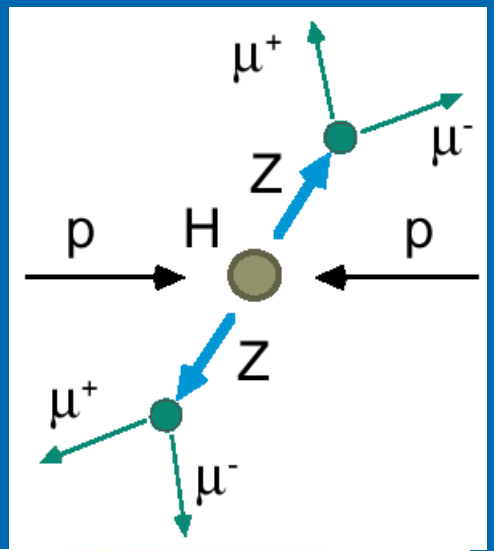


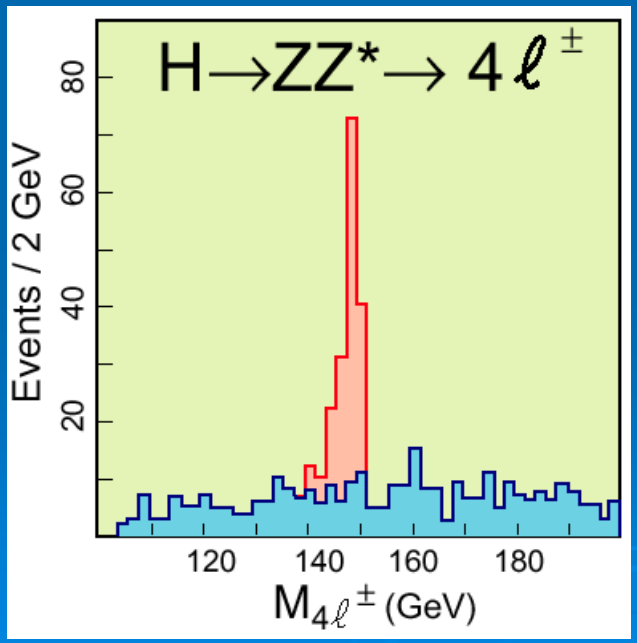



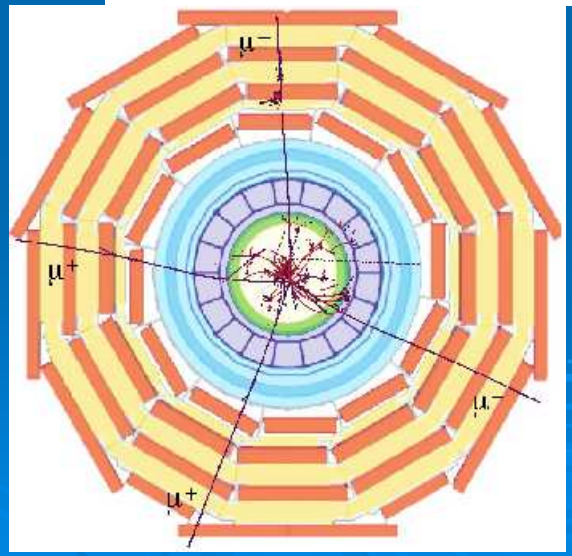



# Zone de masse Higgs intermédiaire

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+\ell^- \ \ell^+\ell^-$ ($\ell$ =e,μ)
  - Très belle signature
    - Résolution : meilleure que 1 GeV (autour de 100 GeV)
  - Recherche dans la gamme : $130 < M_H < 500$ GeV/$c^2$

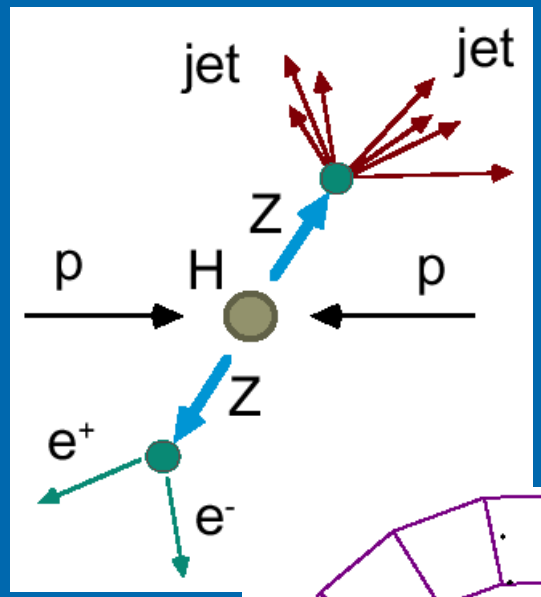


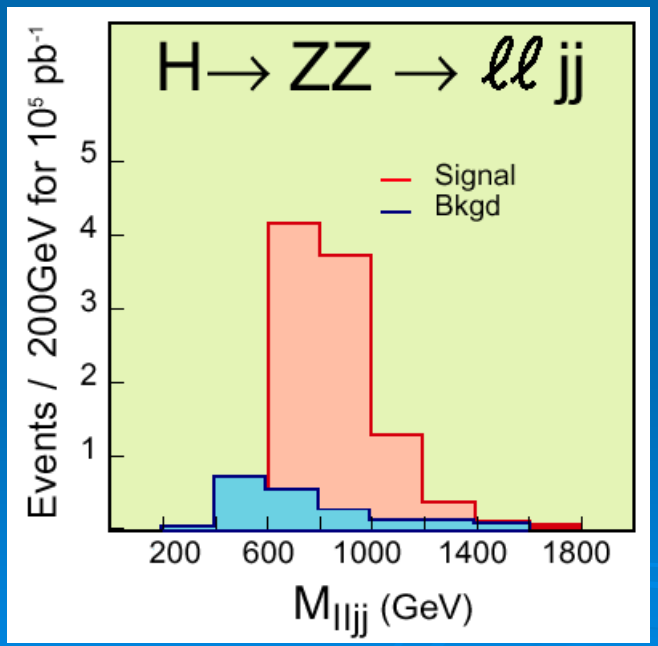



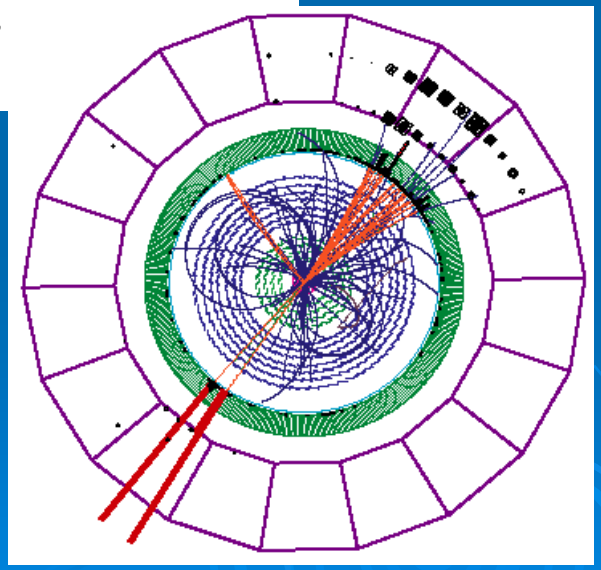



# Zone de haute masse Higgs

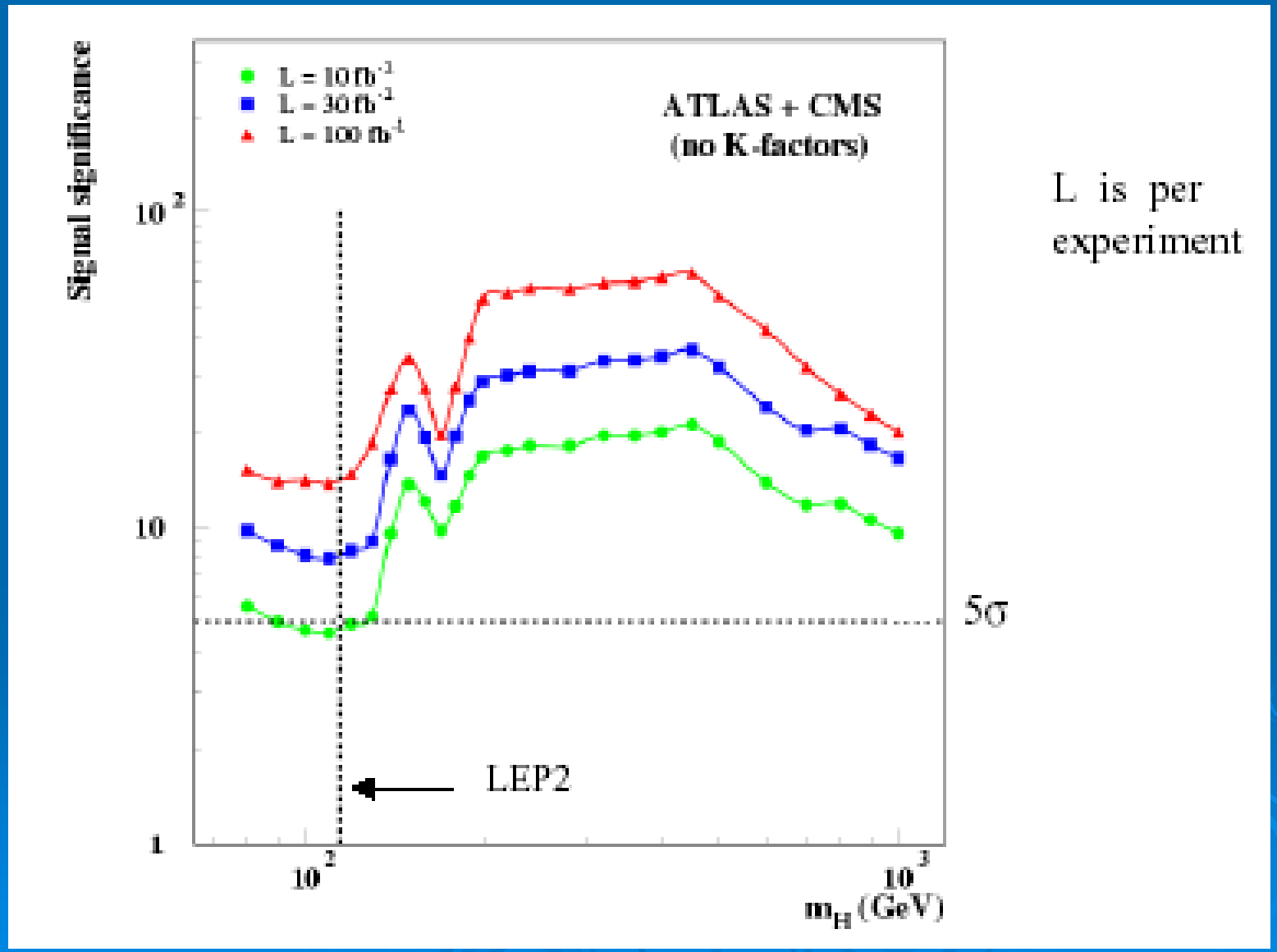
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-$ jet jet
  - Nécessite un rapport d'embranchement plus élevé (dont $\nu\nu$ pour les masses ~ 800 GeV/$c^2$)
  - A la limite de la statistique



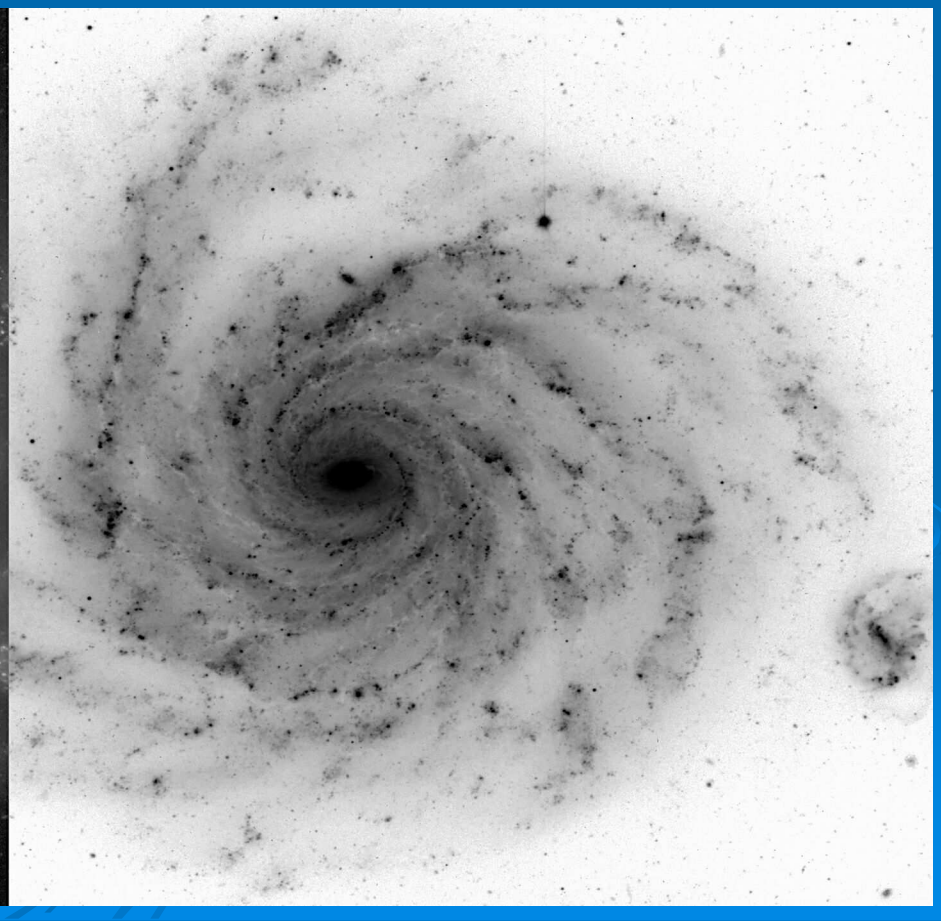



# Potentiel de découverte au LHC

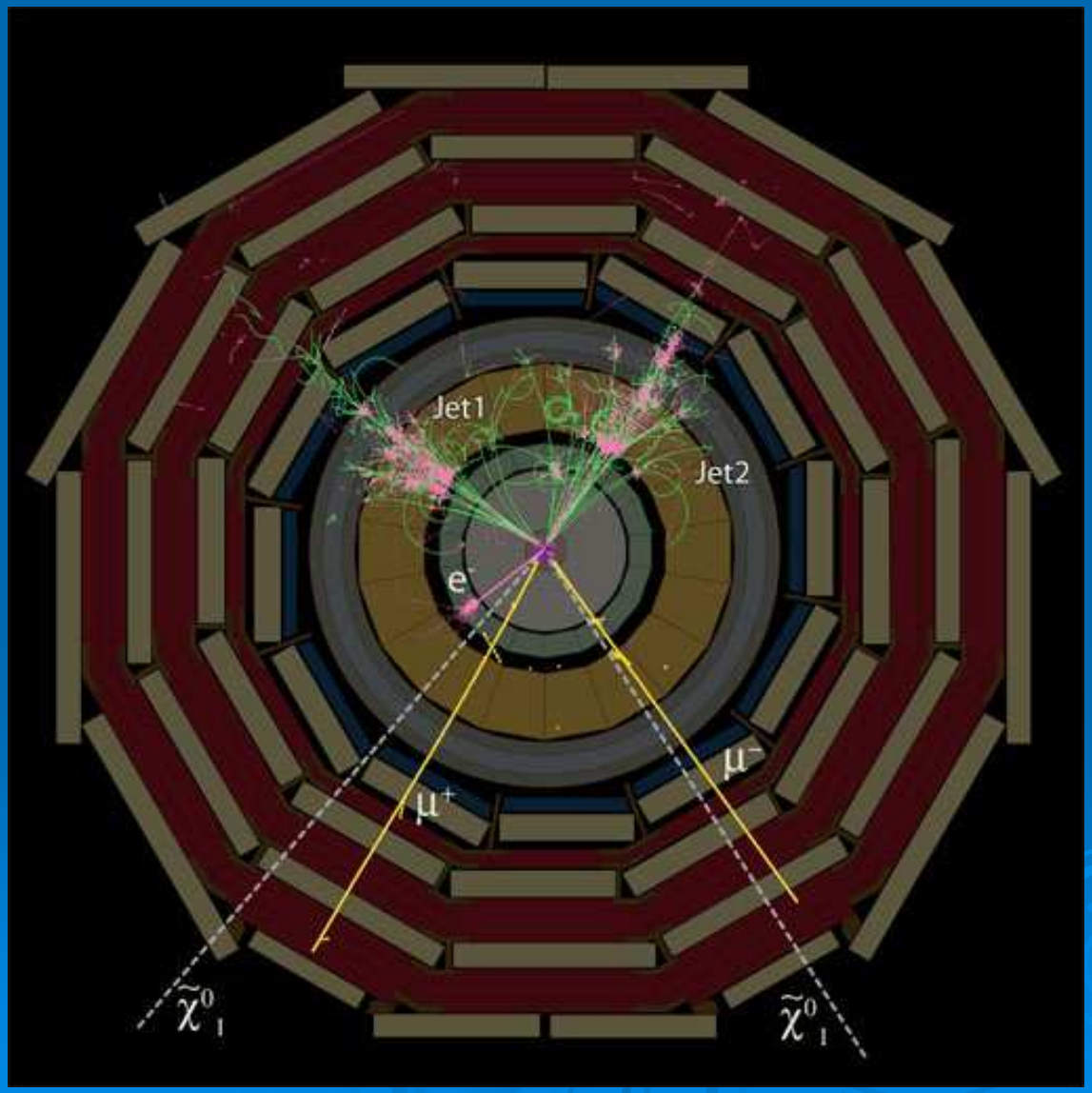


# Où est passé l'antimatière ?

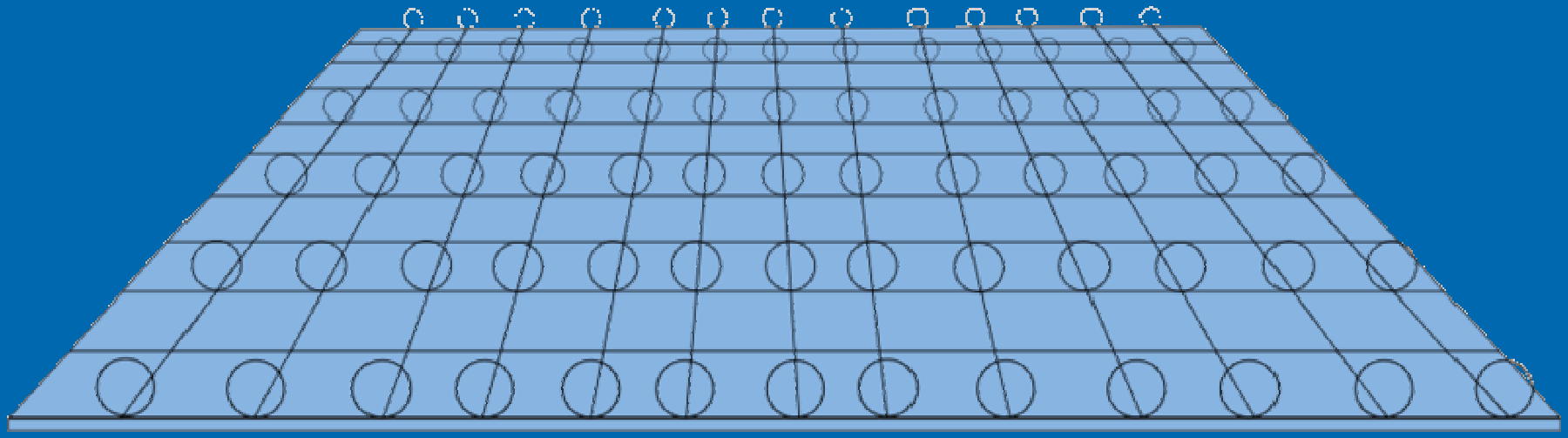
La matière a été favorisée au cours des réactions entre $10^{-43}$s et $10^{-34}$s.
**1 particule a survécu** pour **1 milliard de particules s'annihilant avec l'antimatière**.

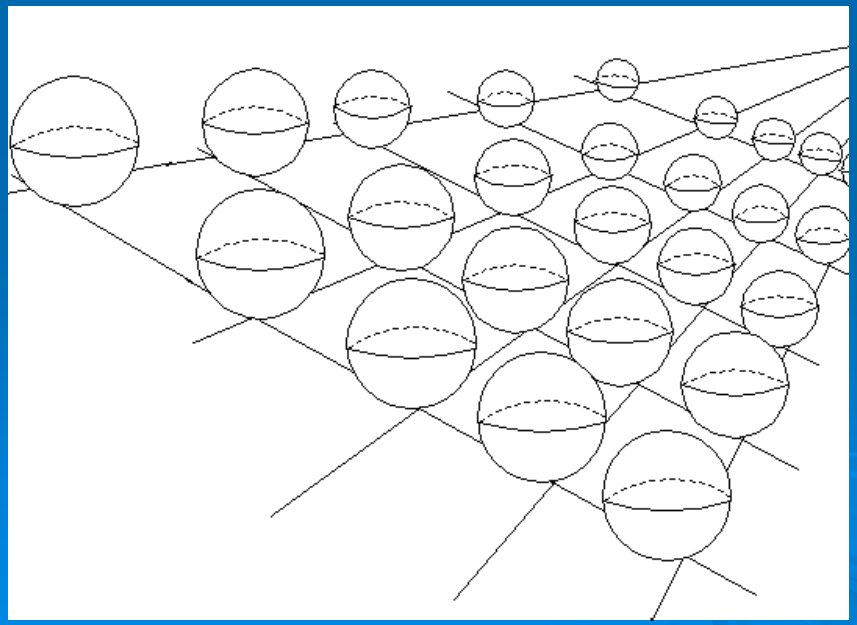


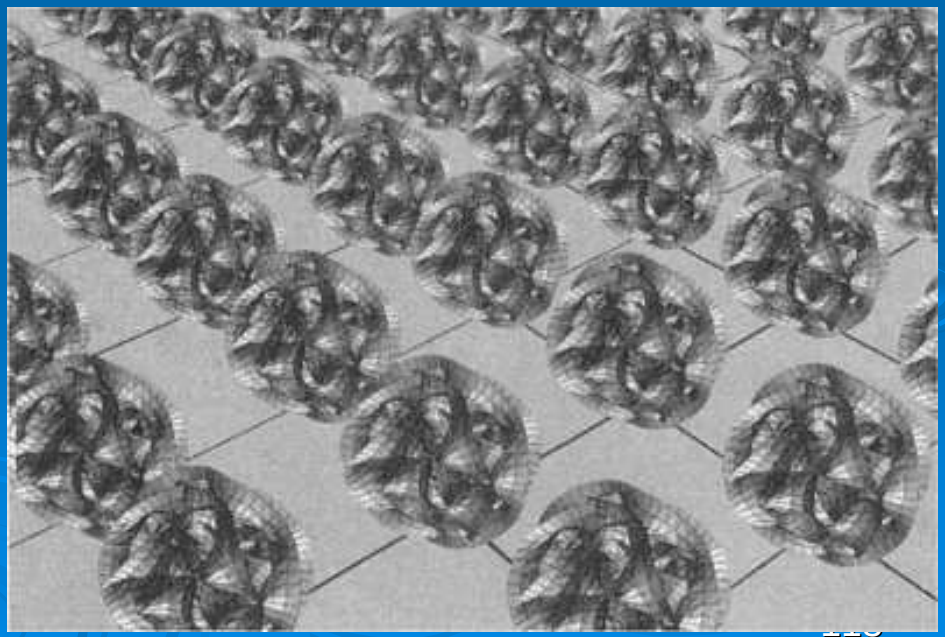
# Les particules supersymétriques



# Les dimensions supplémentaires







# L'avenir

Exploitation des données : 2009 - 2020

Amélioration du collisionneur :

Super LHC (SLHC) 2015

La quête de nouvelles connaissances…

…et peut-être des découvertes inattendues!