

Les détecteurs en physique des particules

Marc Goulette, CERN, Mardi 26 Mars 2013

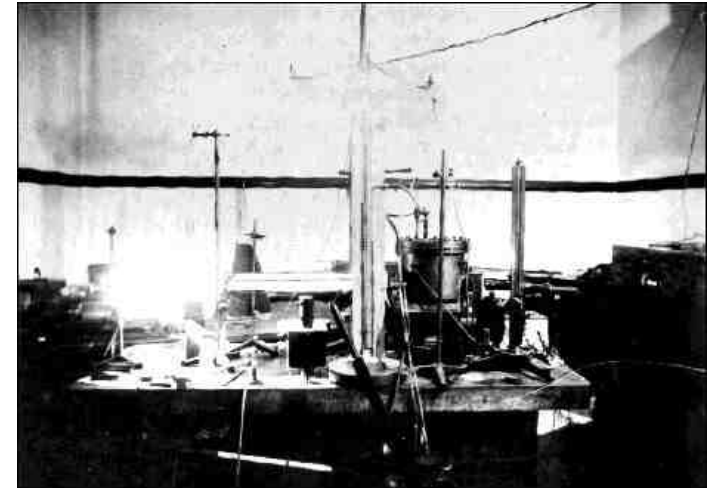
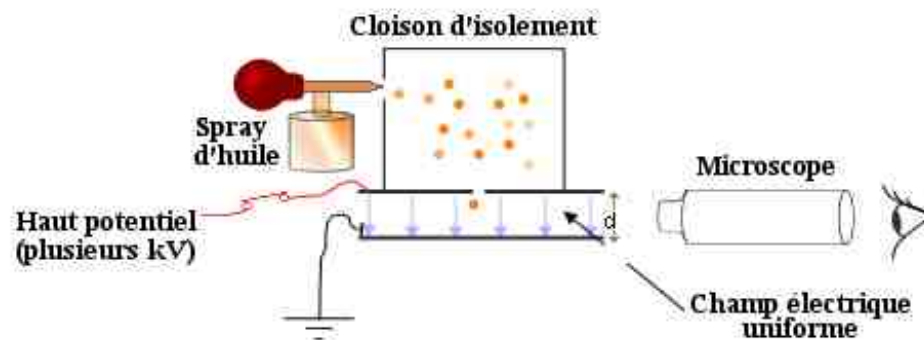
1. Petit historique sur les particules
2. Quelques mots sur le Modèle Standard
3. Petit historique sur les détecteurs
4. Quelques concepts
5. Détecteurs “modernes”

Historique rapide des particules

- 1895: X-rays, W.C. Röntgen
- 1896: Radioactivity, H. Becquerel
- 1899: Electron, J.J. Thomson
- 1911: Atomic Nucleus, E. Rutherford
- 1919: Atomic Transmutation, E. Rutherford
- 1920: Isotopes, E.W. Aston
- 1920-1930: Quantum Mechanics, Heisenberg, Schrödinger, Dirac
- 1932: Neutron, J. Chadwick
- 1932: Positron, C.D. Anderson
- 1937: Mesons, C.D. Anderson
- 1947: Muon, Pion, C. Powell
- 1947: Kaon, Rochester
- 1950: QED, Feynman, Schwinger, Tomonaga
- 1955: Antiproton, E. Segre
- 1956: Neutrino, Rheines
- 1964: CP Violation, Cronin, Fitch
- 1967: Electroweak theory, Glashow, Weinberg, Salam
- 1974: J/ψ , S. Ting, B. Richter
- 1983: W/Z bosons, C. Rubbia, S. Van der Meer
- 1990: 3 light neutrinos, LEP
- 1995: Top quark, Fermilab
- 1998: Neutrino oscillation, Super-Kamiokande
- 2012: Higgs boson, P. Higgs, R. Brout, F. Englert

La goutte d'huile de Robert Milikan

L'expérience consiste à pulvériser de minuscules gouttes d'huiles életrisées dans un condensateur plan chargé, et d'étudier les déplacements autour de l'équilibre.



Dispositif de R. Milikan
(début XX^e siècle)

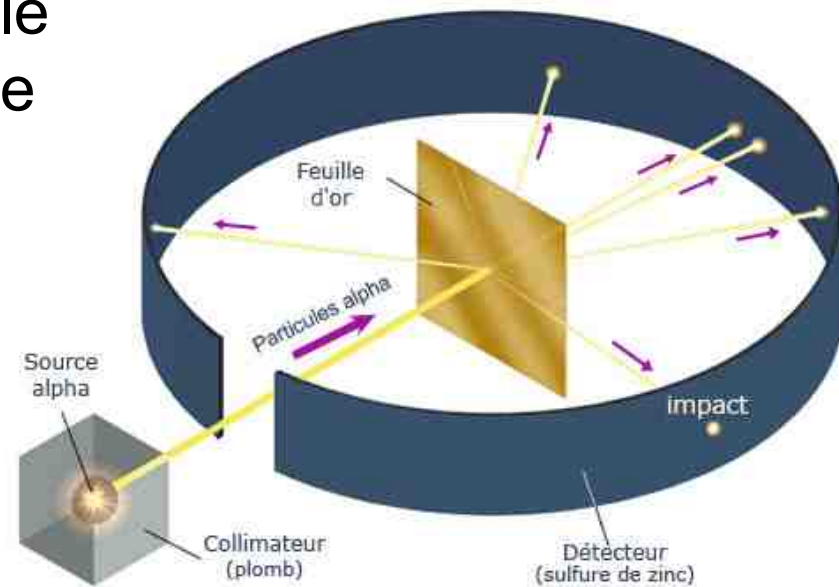
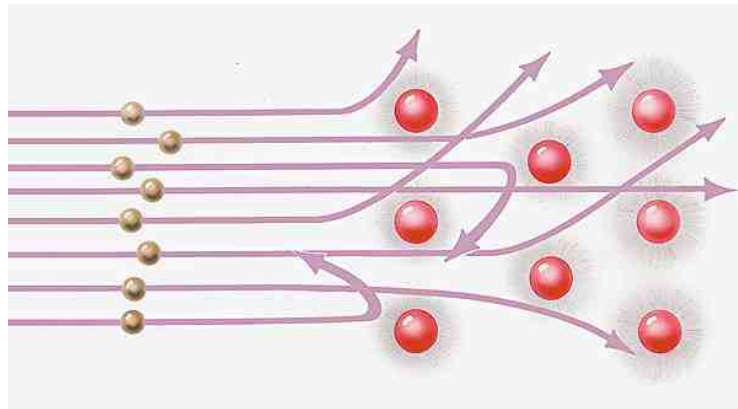
Principe fondamental de la dynamique $\Rightarrow$ relation v , q

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_h - \rho_a) - qE - 6\pi\eta r v. \quad \dots \quad v_{\text{lim}}(E_0) = 0 \quad \Rightarrow \quad q = \frac{6\pi\eta r v_0}{E_0}.$$

$\Rightarrow$ **Mesure de la charge élémentaire !** Aujourd'hui: $e = 1,60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$

L'expérience de E. Rutherford (1909)

Sous vide, des particules alpha (He^{2+}) sont dirigés vers une feuille d'or très fine. Autour, un écran de sulfure de zinc permet de visualiser les impacts par un scintillement lumineux (0.01%).



Dispositif d'Ernest Rutherford

Conservation de l'énergie $\Rightarrow \frac{1}{2}\mu v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{a_0} \Rightarrow a_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2q_1 q_2}{\mu v^2}$

$\Rightarrow$ Observation de la diffusion inélastique et estimation de la taille d'un noyau !
(non cons. E_c) $r_{\text{Au}} \sim 2.7 \times 10^{-14} \text{ m}$

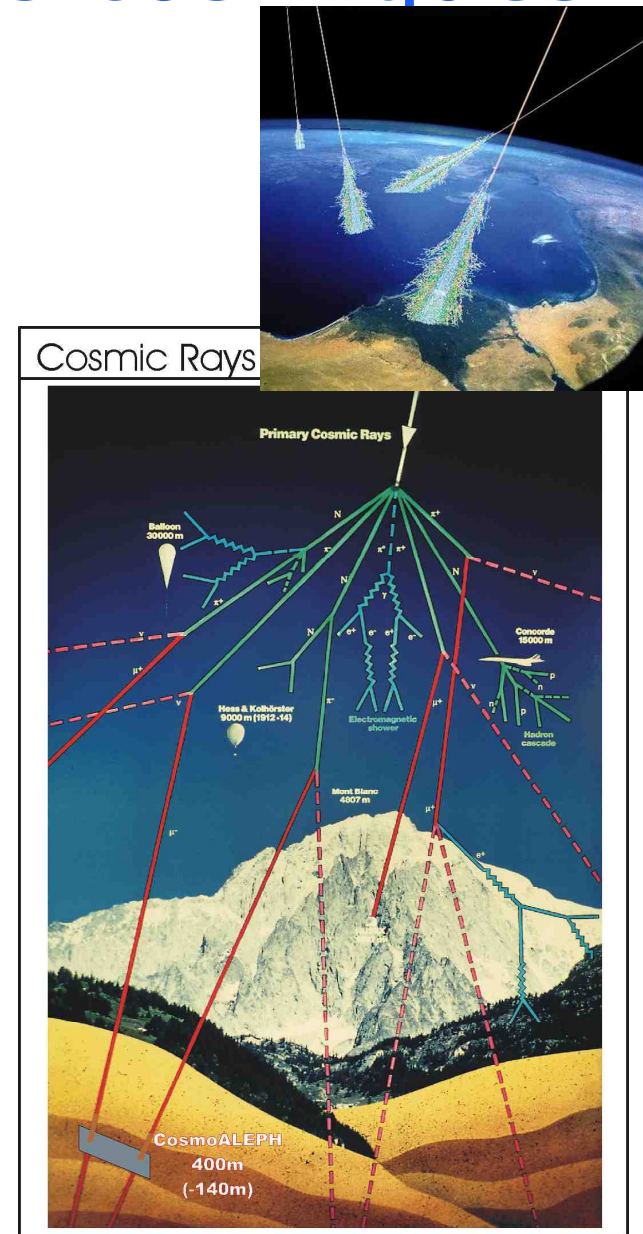
La découverte des rayons cosmiques



Victor Hess, 1912

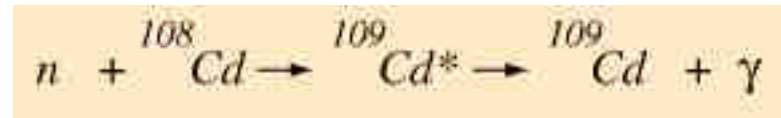
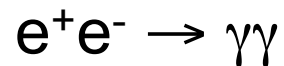
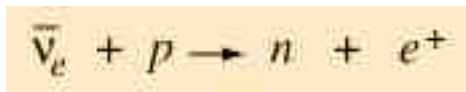
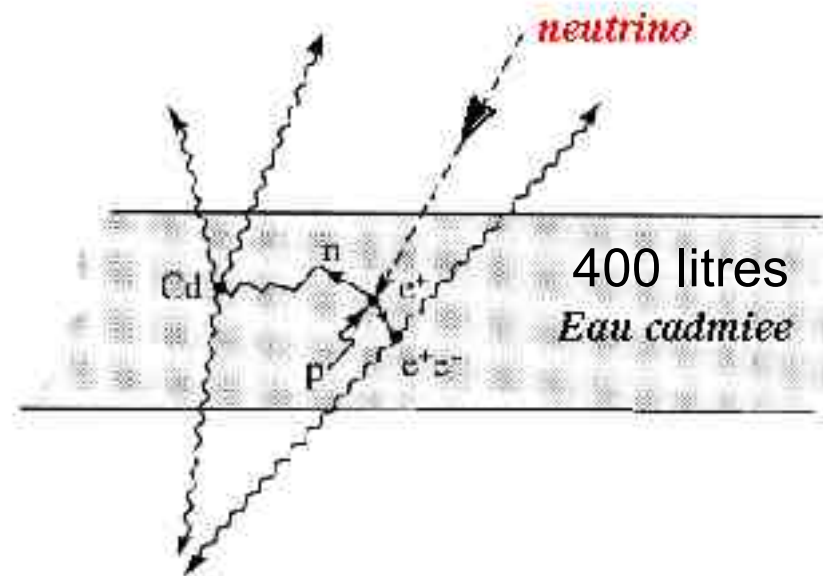
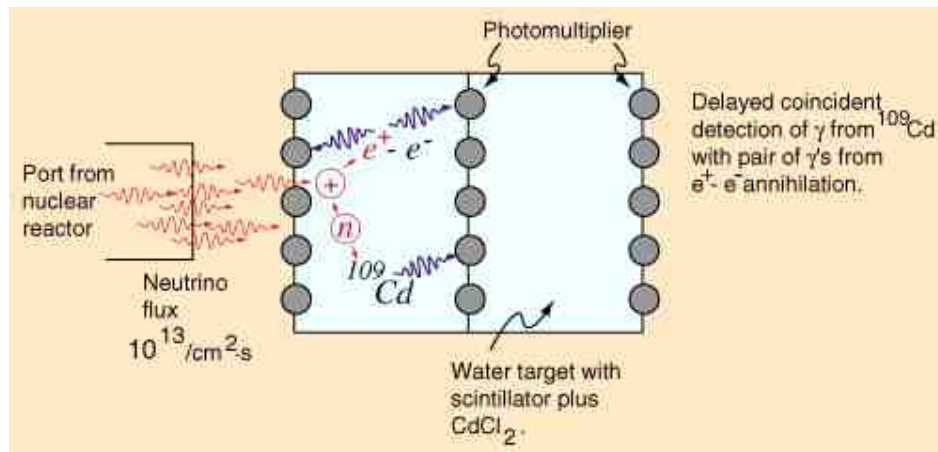
- A l'aide d'une chambre d'ionisation, Victor Hess observe au cours de ses 11 vols en ballons, qu'au delà de 1 km d'altitude, le rayonnement augmente significativement en fonction de l'altitude.

⇒ Découverte des rayons cosmiques !



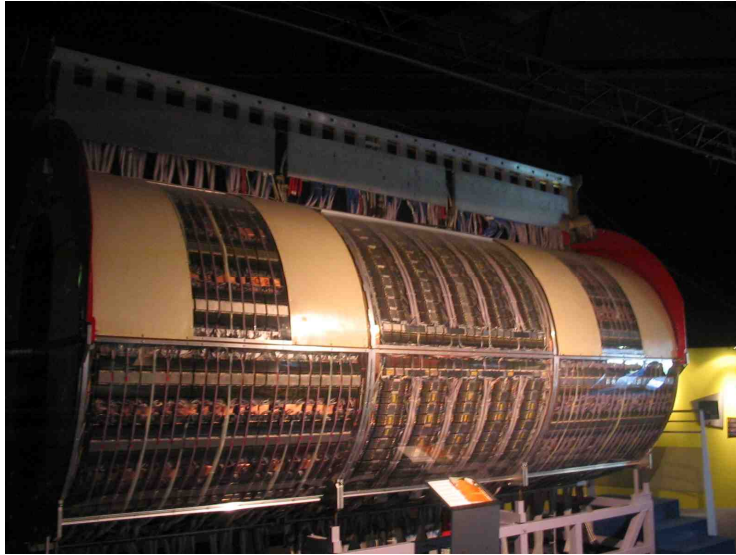
L'expérience de F. Reines et C. Cowan

- 1900→Années 30: problème dans les désintégrations beta.
- En 1959, Frederick Reines et Clyde Cowan place un dispositif à proximité d'un réacteur nucléaire (10^{12} à $10^{13} \nu \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$).

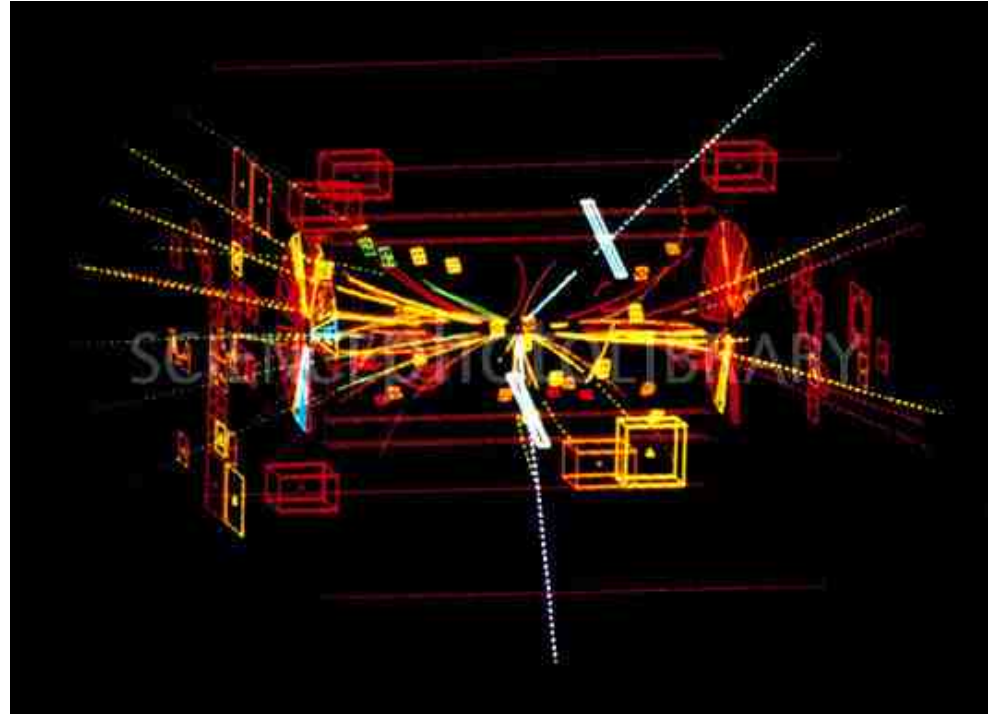


⇒ **Découverte des anti-neutrinos** et par suite des neutrinos !

Découverte des bosons W/Z en 1983



UA1, exposé au CERN



Découverte du boson Z dans UA1



C. Rubbia et S.Meier (Nobel 84)

UA1+UA2: $m_{W^\pm} = 82.1 \pm 1.7 \text{ GeV}$

$m_{Z^0} = 93.0 \pm 1.7 \text{ GeV}$

Aujourd'hui: $m_{W^\pm} = 80.385 \pm 0.015 \text{ GeV}$

$m_{Z^0} = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$

La découverte du quark top

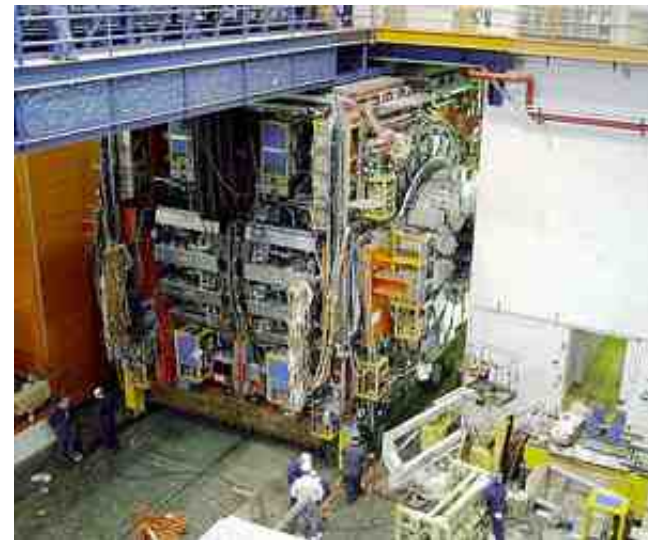


D0

- Le top a été découvert en 1995 au laboratoire Fermilab, près de Chicago, dans les expériences CDF et D0.

$$m_{\text{top}} = 173.5 \pm 0.6 \pm 0.8 \text{ GeV}$$

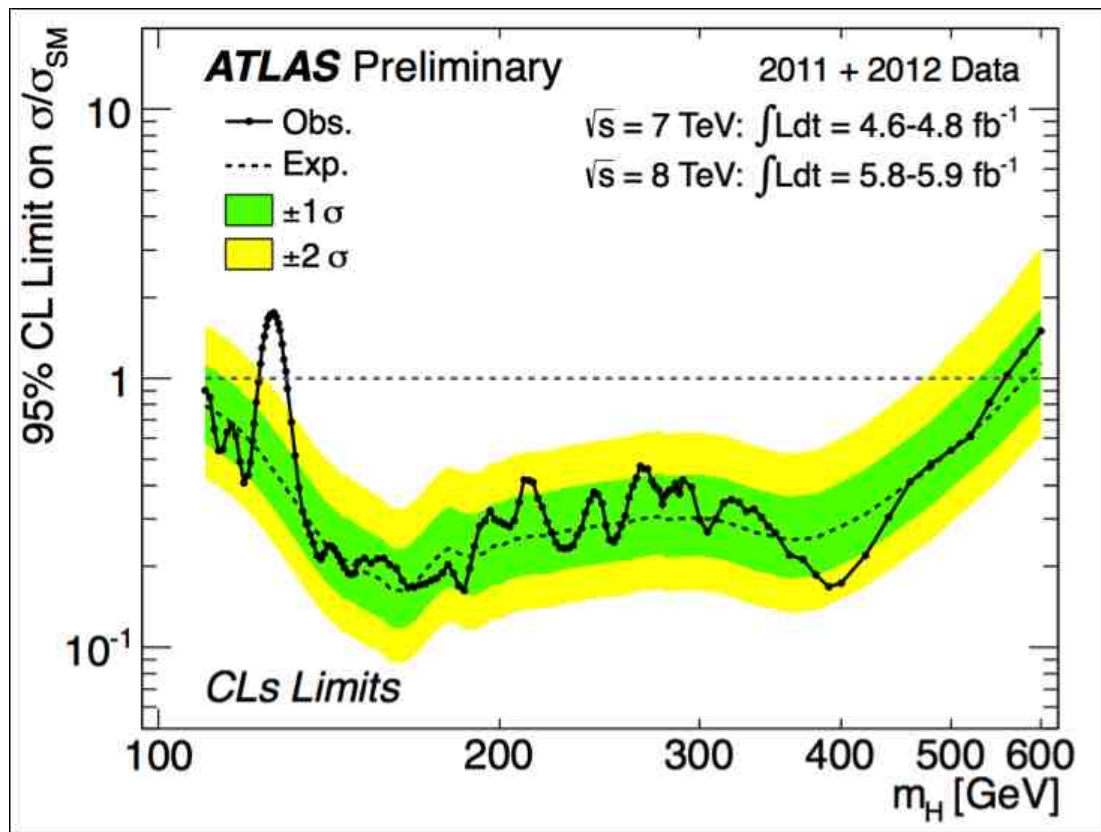
- Le Tevatron a été stoppé en Septembre 2011.



CDF

La découverte du boson de Higgs

Après 2 ans de prise de données et d'intenses analyses, les physiciens d'ATLAS et de CMS ont finalement trouvé un nouveau boson (de Higgs).



ATLAS et CMS:

$$m_H = 125.5 \pm 0.2 \pm 0.6$$

$$m_H = 125.3 \pm 0.4 \pm 0.5$$

Spin 0, parité +

$H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow 4 \text{ leptons}$

- Compatible avec le
Modèle Standard ?

Mécanisme de Higgs ?

- Y'a-t-il de la physique
au-delà du Modèle
Standard ?

Le Modèle Standard: les composants

Fermions

(m en GeV)

Quarks

Spin 1/2

Leptons

Bosons

↓ $q = 2/3$ $q = -1/3$ ↓



Up
 $m = 3 \text{ MeV}$



Down
 $m = 6 \text{ MeV}$



Charm
 $m = 1.3$



Strange
 $m = 0.1$



Top
 $m = 173.2$



Beauty
 $m = 4.3$

↓ $q = -1$



Electron
 $m = 511 \text{ keV}$

$q = 0$ ↓



Neutrino Electron
 $m = ?$



Muon
 $m = 0.106$



Neutrino Muon
 $m = ?$



Tau
 $m = 1.777$



Neutrino Tau
 $m = ?$



Photon
 $m = 0$

$q = 0$



Gluon
 $m = 0$



Z^0
 $m = 91.2$



W^-
 $m = 80.4$



W^+
 $m = 80.4$

Spin 0



Higgs
 $m = 125.5$

Spin 2 ?



Graviton
 $m = ?$

Spin 1

Spin 1

Le Modèle Standard: les interactions

Interactions

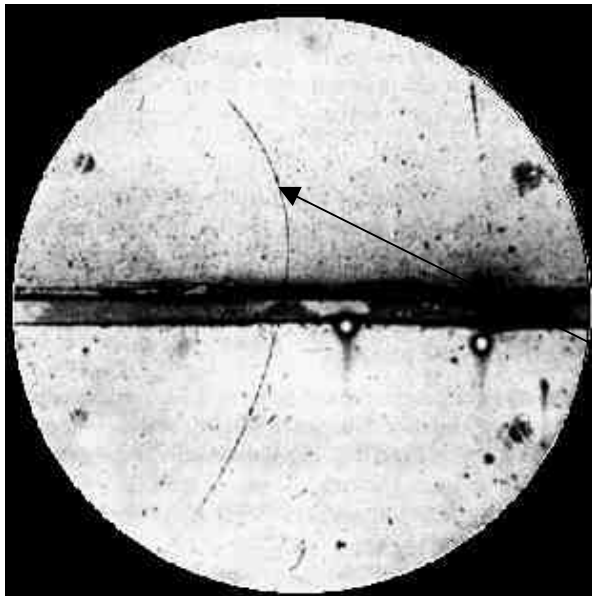
Nom	Intensité relative	Particules subissant	Portée (m)	Quanta du Champ	Domaine d'action	Charge
Forte	1	Quarks Hadrons	10^{-15}	8 Gluons	Baryons, Mésons Nucléons Etoiles à Neutrons	Couleur
Electromagnétique	10^{-2}	Particules électriquement chargées	Infinie	Photon	Atomes Optique Electricité	Charge électrique
Faible	10^{-5}	Electrons Neutrinos Quarks	10^{-18}	W^+ Z^0 W^-	Bêta Mésons π Muons	Charge faible
Gravitationnelle	10^{-39}	Tout	Infinie	Graviton ???	Orbites Trous Noirs	Masse

Histoire des détecteurs

- 1906: Geiger Counter, H. Geiger, E. Rutherford
- 1910: Cloud Chamber, C.T.R. Wilson
- 1912: Tip Counter, H. Geiger
- 1928: Geiger-Müller Counter, W. Müller
- 1929: Coincidence Method, W. Bothe
- 1930: Emulsion, M. Blau
- 1940-1950: Scintillator, Photomultiplier
- 1952: Bubble Chamber, D. Glaser
- 1962: Spark Chamber
- 1968: Multi Wire Proportional Chamber, C. Charpak
- 1975+: Time Projection Chamber, D. Nygren
- ... CCD, détecteurs au silicium, CMOS ...

La chambre à brouillard

- Inventé par Charles T. Wilson en 1895 (prix Nobel en 1927)
- Précision position: 10-150 μm , résolution en temps: 1 ms.
- Application: chambre diamètre 15 cm, remplie d'un gaz super-saturé en vapeur d'eau, dans un champ magnétique de 1.5 T. Plaque de 6mm de Pb au centre.
- Le passage des ions dans la chambre provoque l'apparition de gouttelette de brouillard.



C. Wilson



C. Anderson

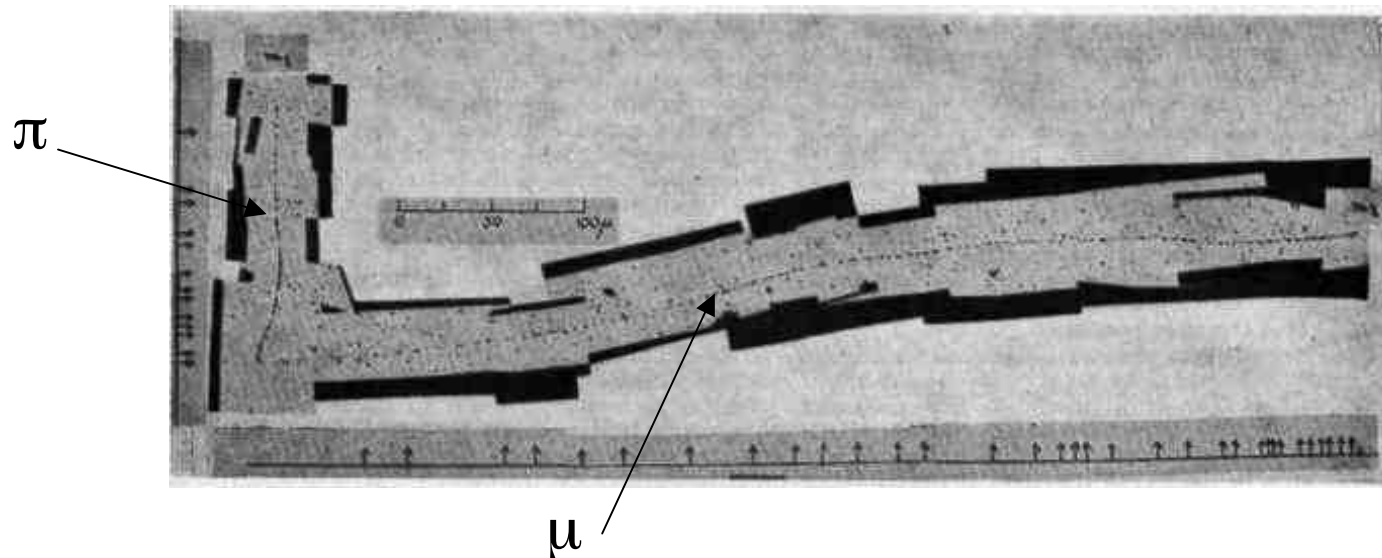
⇒ **Découverte du positron** en 1933 par Carl David Anderson (prix Nobel en 1936).

Emulsion nucléaire

- Utilisation de films photographiques obtenus par émulsion nucléaire. Au départ, ces films étaient destinés à l'étude de la radioactivité.
- En 1947, Cecil Powell (Prix Nobel en 1950) et Giuseppe Occhialini **découvre le pion** dans des émulsions photographiques exposés aux rayons cosmiques au Pic du midi en France (2800 m) et dans les Andes en Bolivie (5500 m).

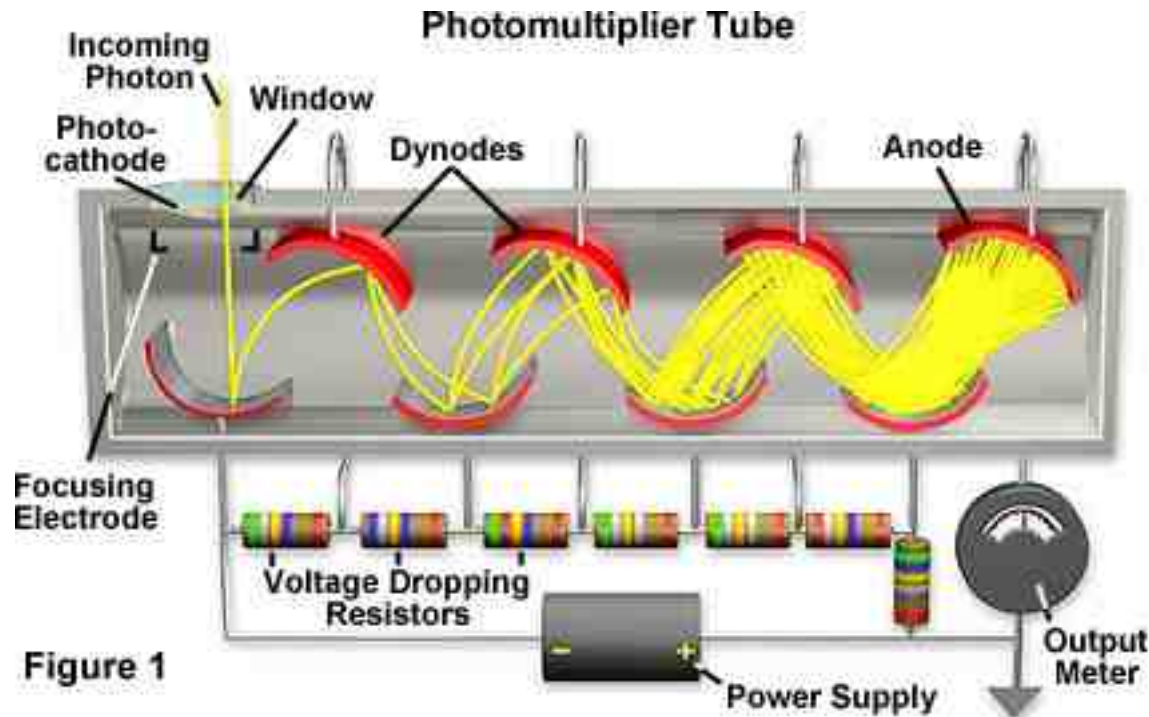


C. Powell



Précision
position:
 $1\mu\text{m}$

Photomultiplicateurs (PM)

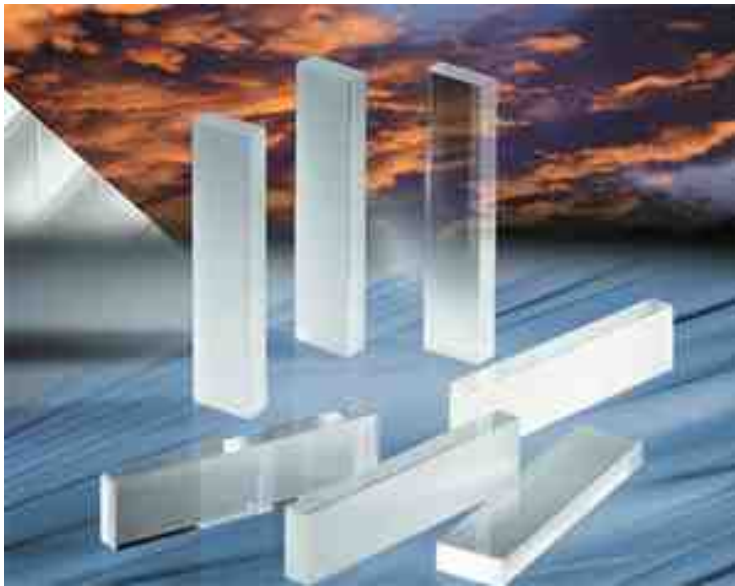


Gain $\sim 10^5$ - 10^6

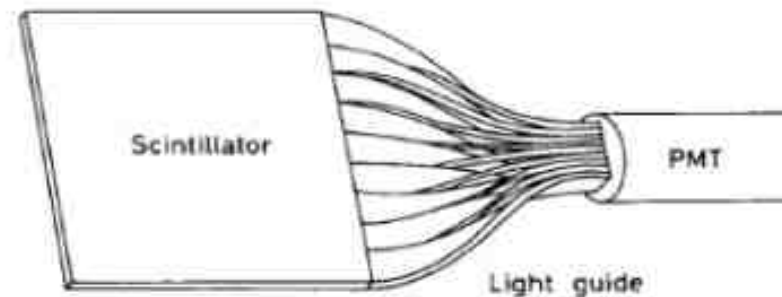
- Un photomultiplicateur permet de compter les photons individuellement. Sous l'action de la lumière, des électrons sont arrachés d'un métal par effet photoélectrique à une photocathode. Sensible de l'UV à l'IR, avec des temps de réponse de l'ordre de la nanoseconde.

Scintillateurs

- Des particules chargées traversant certains milieux peuvent laisser des atomes excités, qui par la suite peuvent émettre des photons.
- Ces photons peuvent être détectés par différents types de scintillateurs (plastiques, liquides, cristaux) si le milieu est transparent dans le domaine de longueur d'onde des photons.
- Généralement, la résolution en temps est de l'ordre de 100 ps



Scintillateurs



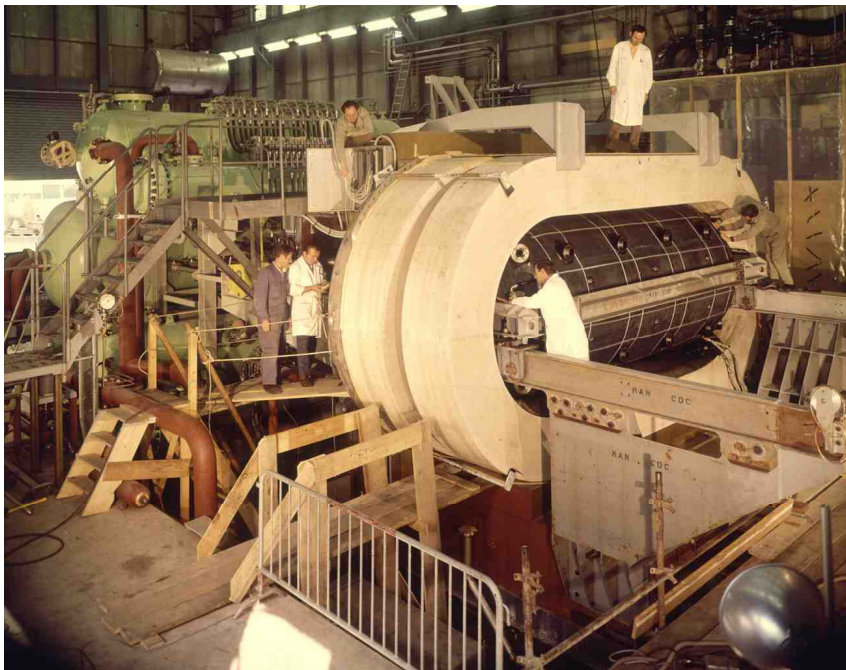
Un guide d'onde transporte ensuite les photons vers des PM qui convertissent les photons en signal électrique.

La chambre à bulle

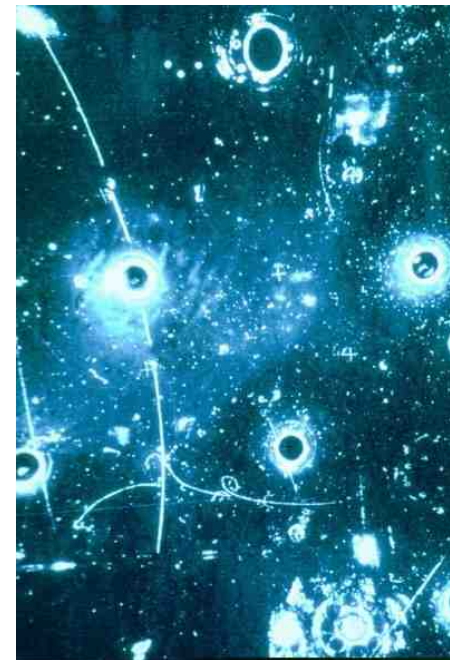
- Inventé par Donald Glaser en 1952 (prix Nobel en 1960)
- exemple: Gargamelle (**découverte des courants neutres 1973**)

Une chambre de 2 m de diamètre, 4 m de long, et remplie de Fréon à 20 atm, avec un champ magnétique de 2 T.

- Le passage des neutrinos dans la chambre produit des bulles.



Détecteur Gargamelle



Traces dans la chambre

Ionisation

L'ionisation consiste à enlever ou ajouter des charges à la structure électronique d'un atome, le transformant ainsi en ion.

Le milieu ionisable peut être un gaz, un liquide, ou un solide.

Une particule chargée suffisamment énergétique est capable d'arracher les électrons des atomes du milieu traversé, c'est le processus d'ionisation (ex dans les gaz $W \sim 30$ eV).

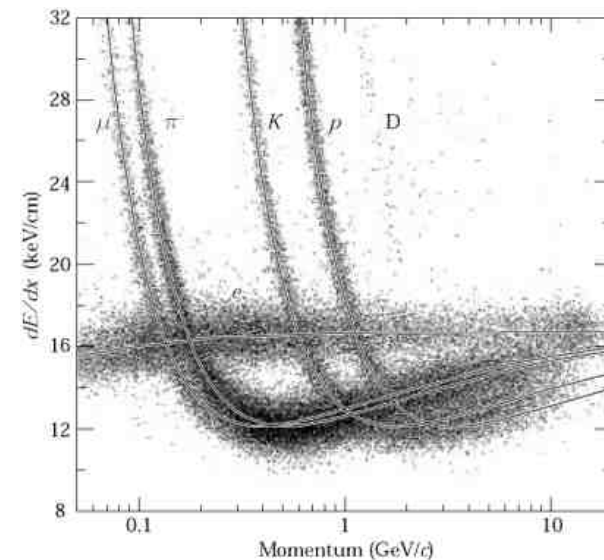
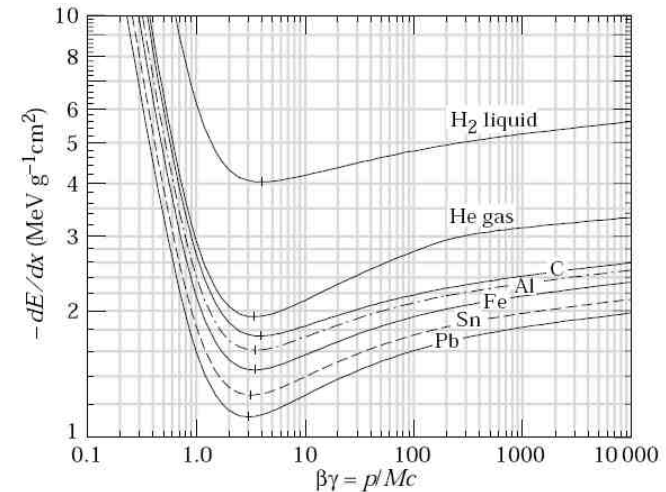
Les photons peuvent également agir comme rayonnement ionisant.

Le nombre moyen de paires d'électron-ion produit est donné par la formule de Bethe-Bloch.

Formule de Bethe-Bloch

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = -4\pi r_e^2 m_e c^2 \frac{Z_1^2}{\beta^2} N_A \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 F}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

- Lorsqu'une particule chargée interagit avec un milieu (ex: liquide, gaz), elle perd de l'énergie et les atomes de la cible sont alors ionisés ou excités.
- La perte d'énergie est proportionnelle à la vitesse de la particule.
- Ex: un muon de 1 GeV peut traverser 1m de Fer.
- A l'aide d'un champ magnétique, on peut mesurer l'impulsion, et combiné à la mesure dE/dx , on peut identifier la particule.

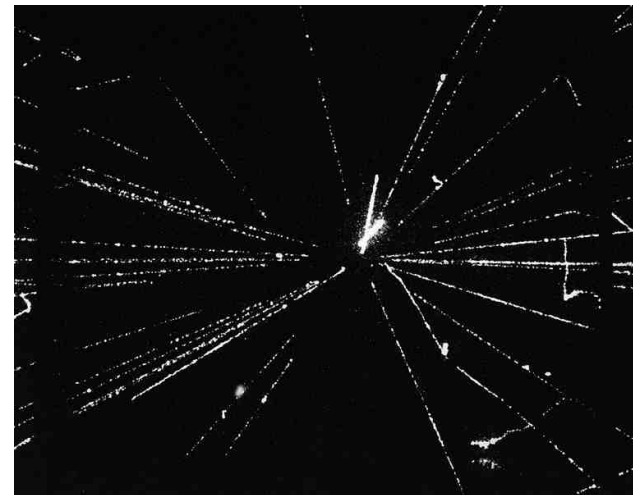


La chambre à étincelles

- Utilisée entre 1930 et 1960 pour détecter les particules chargées. Sera remplacée par la suite par les chambres multi-fils ou les détecteurs au silicium.
- Une chambre à étincelle contient une série de plaques de métal placée dans un volume rempli de gaz (He, Ne, les 2)
- Lorsque la particule chargée traverse le milieu, elle ionize le gaz entre les plaques, ce qui produit des étincelles dû à la haute tension. Moins bonne qu'une chambre à bulle.



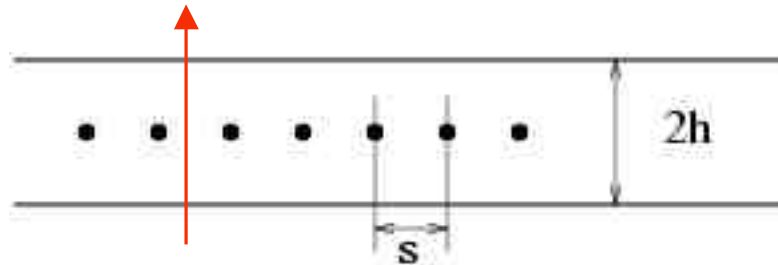
Physics Museum de Rome



Collision ppbar à 540 GeV UA5

La chambre proportionnelle multi-fils

- Inventée par Georges Charpak en 1968 (prix Nobel en 1992)



Lecture des fils individuels

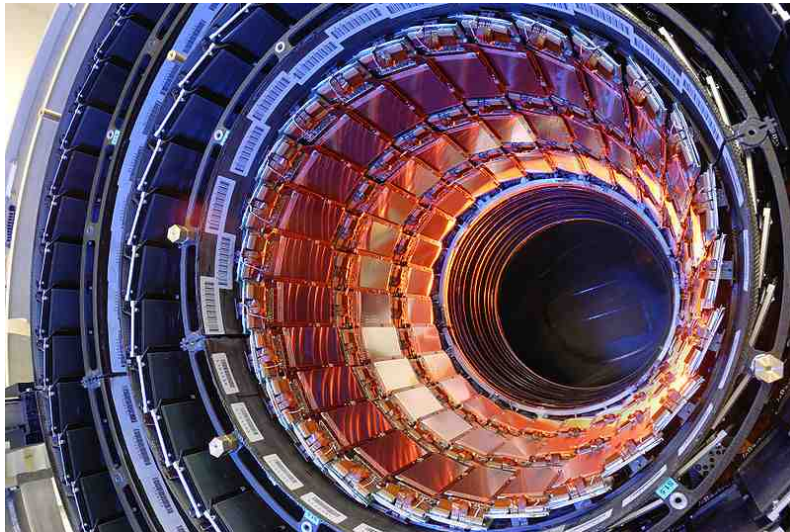
- Une particule chargée qui traverse le détecteur laisse une trace d'électrons et d'ions. Les fils sont à haute tension (+).
- Les électrons se déplacent dans un champ électrique vers le fil. Cela produit un signal dans celui-ci, amplifié par la suite.
- La mesure de ce temps de dérive en a fait un **détecteur de position de précision !** Meilleure résolution spatiale: $50 \mu\text{m}$.
temps: $\sim 2 \text{ ns}$



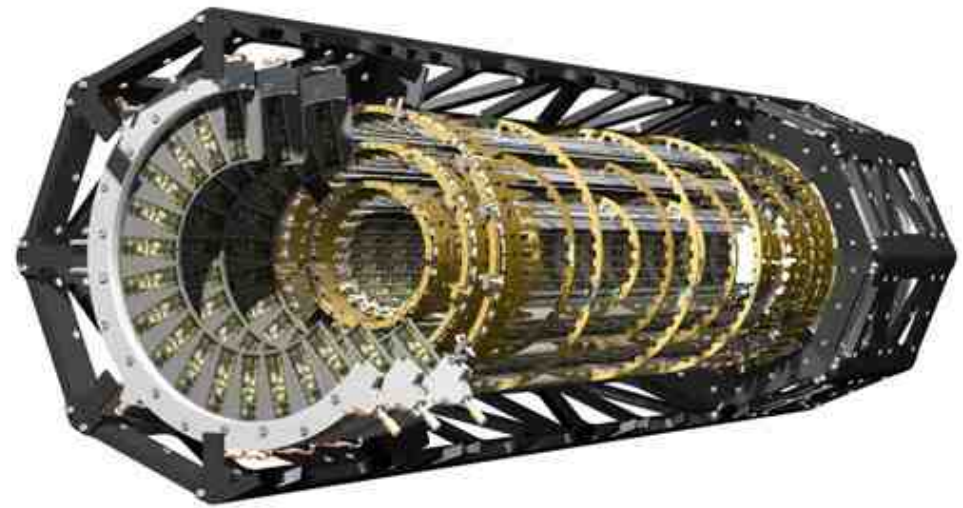
G. Charpak

Détecteurs à semi-conducteur

- Les détecteurs à semi-conducteurs sont un type particulier de détecteurs à ionisation. Au lieu d'exciter ou d'ioniser le milieu, une particule chargée crée des paires d'électron-trous dans le semi-conducteur.
- Il faut seulement environ 3 eV pour l'ionisation.
- **Exemples:** Détecteur au silicium micro-bande, détecteur à pixel, CCD (charge coupled device). Résolution jusque $2\mu\text{m}$!
- Principaux matériaux semi-conducteur: germanium, silicium



CMS tracker (pixel: $10\text{-}20\ \mu\text{m}$)



ATLAS pixel ($15\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$)

Tomographie par muons

Search for Hidden Chambers in the Pyramids

The structure of the Second Pyramid of Giza
is determined by cosmic-ray absorption.

Luis W. Alvarez, Jared A. Anderson, F. El Bedwai,
James Burkhard, Ahmed Fakhry, Adib Gergis, Amer Gonsaid,
Fikih Hassan, Dennis Iverson, Gerald Lynch, Zenab Miligy,
Ali Hilmy Moussa, Mohammed-Sharkawi, Lauren Yazolino

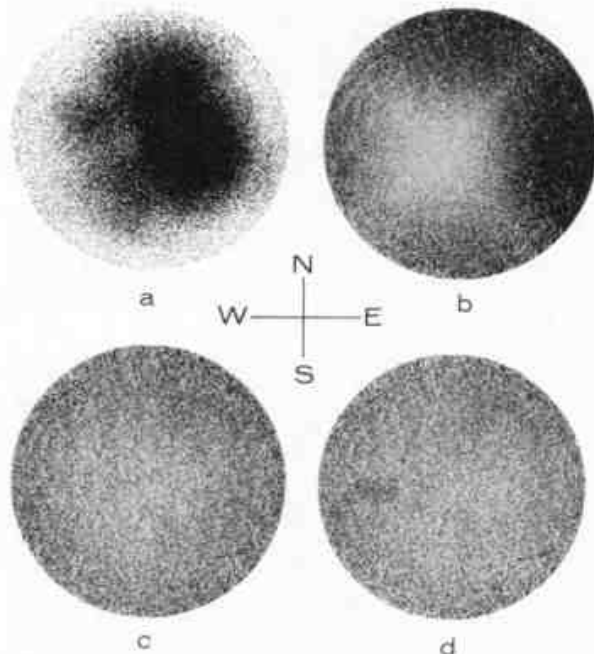


Fig. 13. Scatter plots showing the three stages in the combined analytic and visual analysis of the data and a plot with a simulated chamber. (a) Simulated "x-ray photograph" of uncorrected data. (b) Data corrected for the geometrical acceptance of the apparatus. (c) Data corrected for pyramid structure as well as geometrical acceptance. (d) Same as (c) but with simulated chamber, as in Fig. 12.

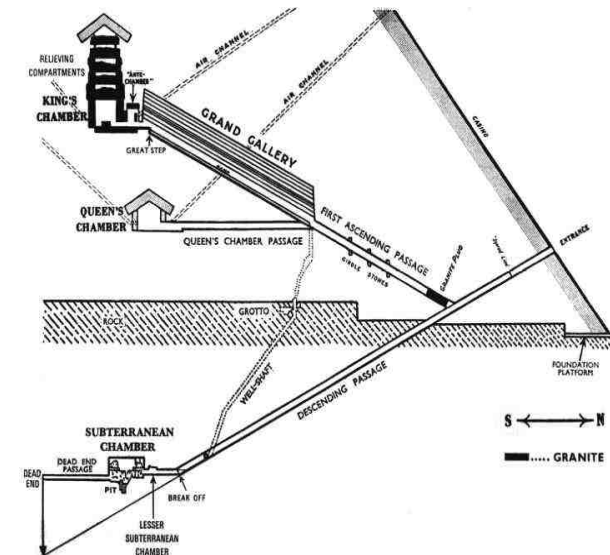
Fig. 2 (bottom right). Cross sections of (a) the Great Pyramid of Cheops and (b) the Pyramid of Chephren, showing the known chambers: (A) Smooth limestone cap, (B) the Belzoni Chamber, (C) Belzoni's entrance, (D) Howard-Vyse's entrance, (E) descending passageway, (F) ascending passageway, (G) underground chamber, (H) Grand Gallery, (I) King's Chamber, (J) Queen's Chamber, (K) center line of the pyramid.

6 FEBRUARY 1970

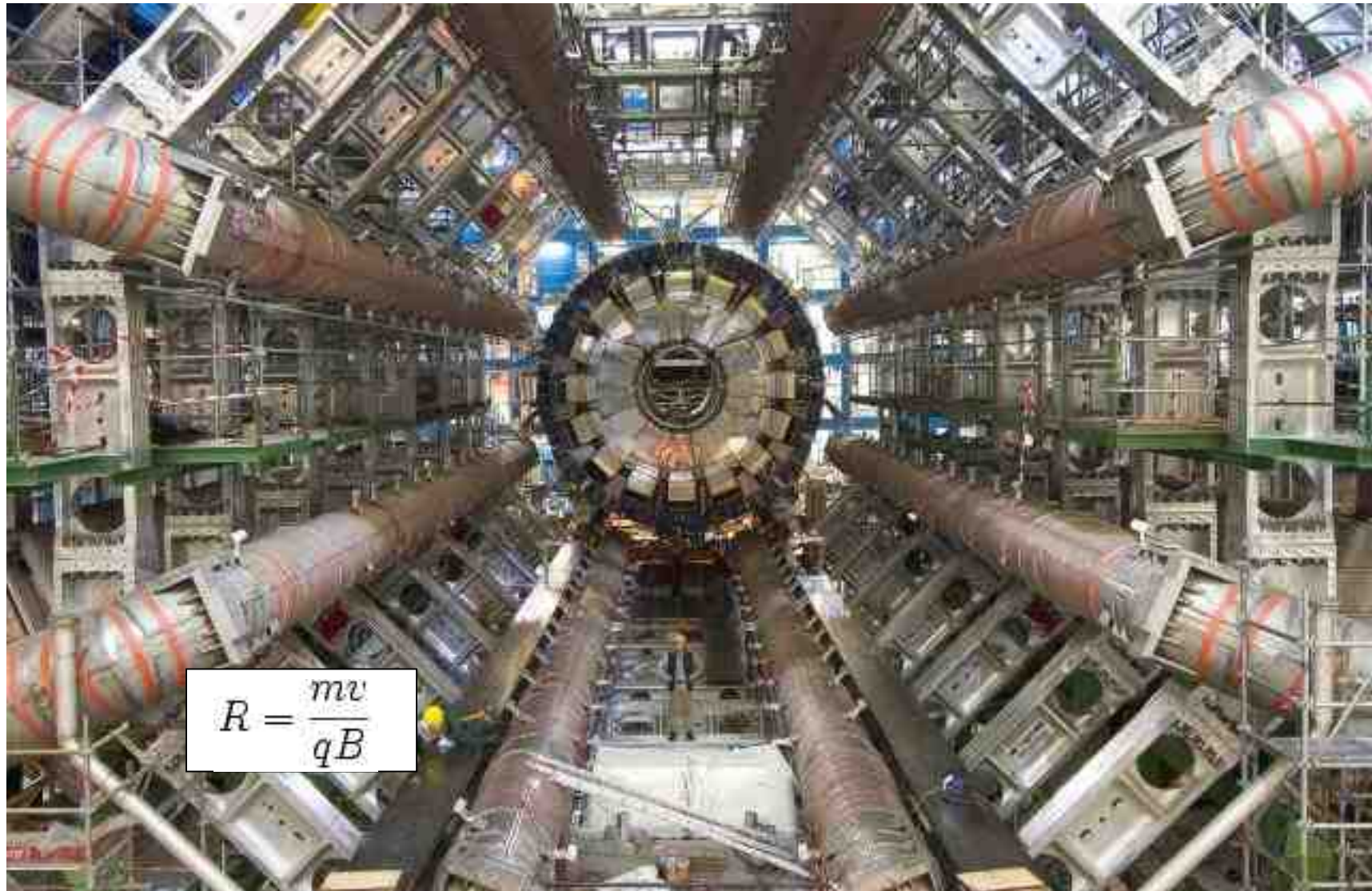


Luis Alvarez a utilisé la tomographie par muons pour chercher des chambres dans la seconde pyramide de Gizeh.

Il a ainsi prouvé qu'il n'y avait pas de chambres !



Utilisation des aimants



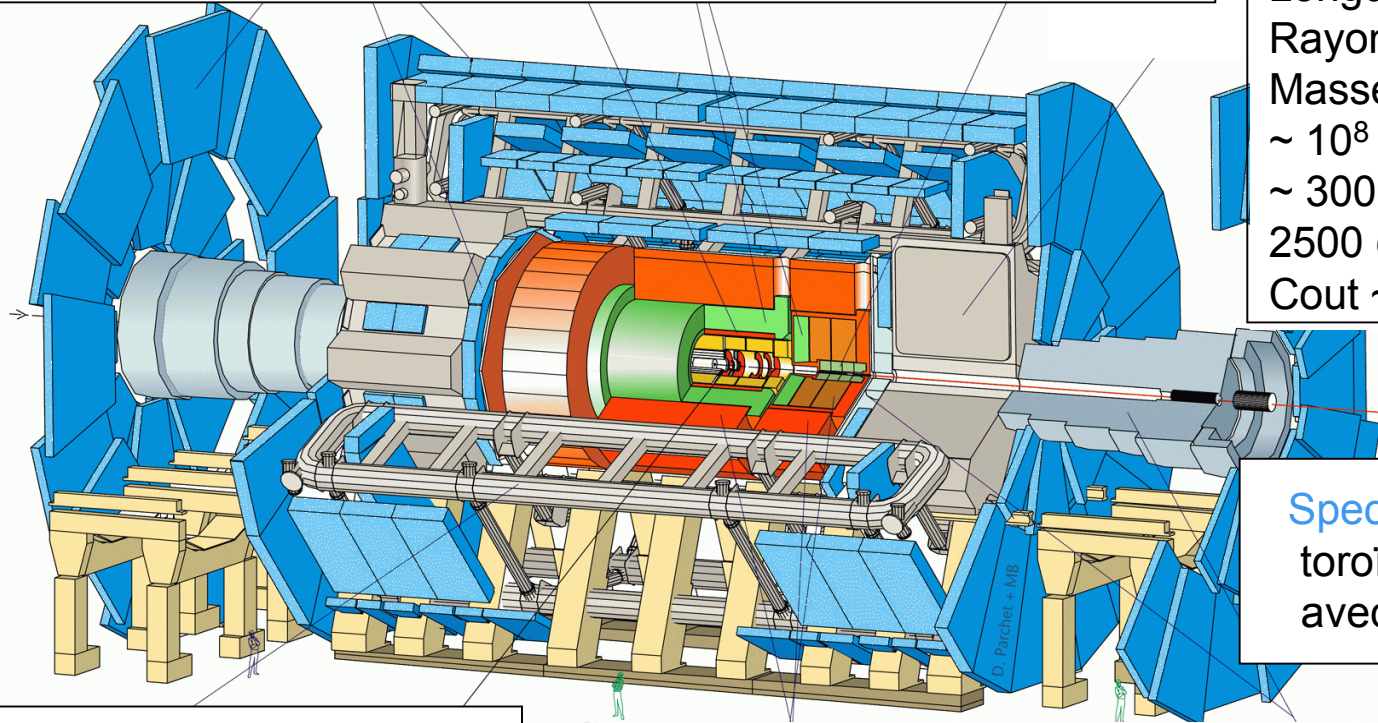
$$R = \frac{mv}{qB}$$

Huit aimants toroïdaux entourent le cœur d'ATLAS (2 T)

Le détecteur ATLAS

Trajectographe (entouré d'un **solénoïde** avec $B=2T$) :

- Silicium : pixels et strips
- Détecteur à rayonnement de transition (séparation e^-/π)



Détecteur généraliste
 Collisions pp à $\sqrt{s} = 14$ TeV
 et $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 Démarrage à $\sqrt{s} = 7$ TeV
 et $L = 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 Longueur : ~ 45 m
 Rayon : ~ 12 m
 Masse : ~ 7000 tonnes
 $\sim 10^8$ canaux électroniques
 ~ 3000 km de cables
 2500 chercheurs, 38 pays
 Cout ~ 550 Millions chf

Spectromètre à muons:
 toroïdes à air ($B=0,5T$)
 avec chambres à muons

Calorimétrie :

- **EM** : Pb-LAr en forme d'accordéon
- **HAD** : Fe/scintillateur (central), Cu/W-LAr (avant)

Sous-détecteur	Résolution requise	Couverture en η	
		Measurement	Trigger
Tracking	$\sigma_{p_T}/p_T = 0.05\% \text{ } p_T \oplus 1\%$	± 2.5	
EM calorimetry	$\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	± 3.2	± 2.5
Hadronic calorimetry (jets)			
barrel and end-cap	$\sigma_E/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$	± 3.2	± 3.2
forward	$\sigma_E/E = 100\%/\sqrt{E} \oplus 10\%$	$3.1 < \eta < 4.9$	$3.1 < \eta < 4.9$
Muon spectrometer	$\sigma_{p_T}/p_T = 10\% \text{ at } p_T = 1 \text{ TeV}$	± 2.7	± 2.4

Le détecteur interne

Composé de 3 sous-détecteurs :

Pixels :

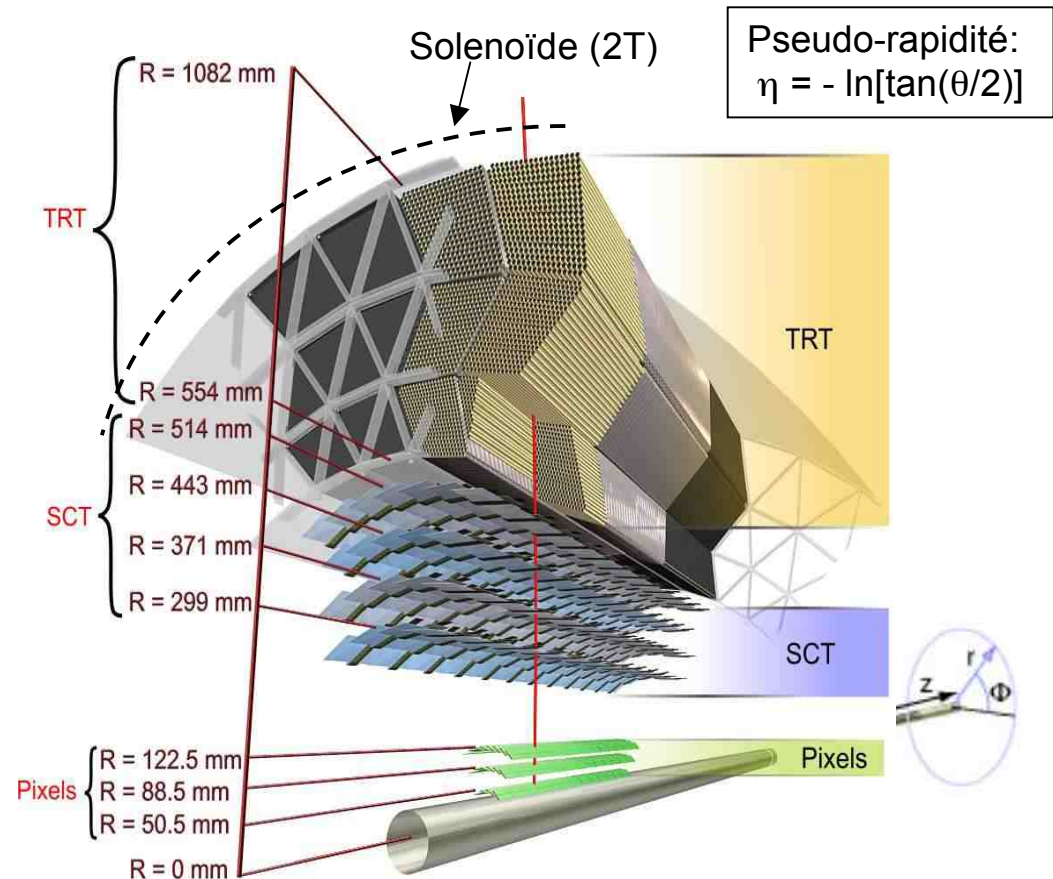
3 couches tonneau
4 disques pour chaque bouchon
 $\sigma(R-\varphi) \sim 12 \mu\text{m}$, 80 M de canaux

Semi-conductor tracker (SCT) :

4 couches tonneau
9 disques pour chaque bouchon
 $\sigma(R-\varphi) \sim 23 \mu\text{m}$, 6 M de canaux

Transition Radiation Tracker (TRT) :

pailles // au faisceau (tonneau)
pailles radiales (bouchons)
 $\sigma(R-\varphi) \sim 150 \mu\text{m}$, 0.4 M de canaux



1 trace $\sim$ 3 hits pixel, 8 hits SCT, 35 hits TRT

Vue du tonneau du détecteur interne. Une trace ($p_T=10 \text{ GeV}$, $\eta=0,3$) traversant les $\neq$ couches est montrée.

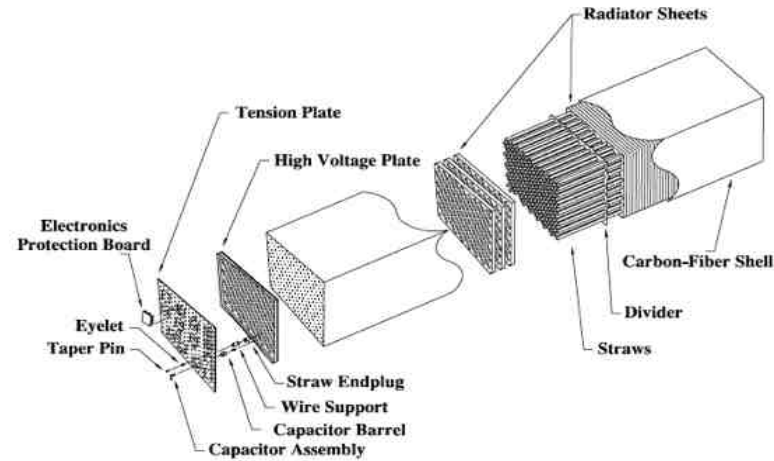
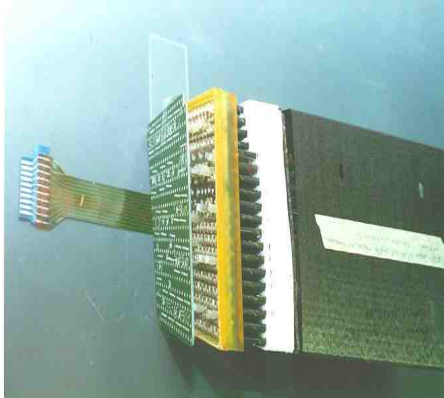
Performances du détecteur interne :

Haute efficacité, haute granularité et faible taux d'occupation, rapidité de réponse

Performances robustes faces aux effets d'empilement (environ 25 interactions par événement)

Mesure de l'impulsion jusqu'à $1 \text{ TeV} \Leftrightarrow B = 2 \text{ T}$.

Les modules du TRT



(b) Isometric view of a module with end plates, radiator, straws and shell.

Une particule chargée produit un **rayonnement de transition** lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre ayant des propriétés optiques différentes.



Description d'un module du tonneau



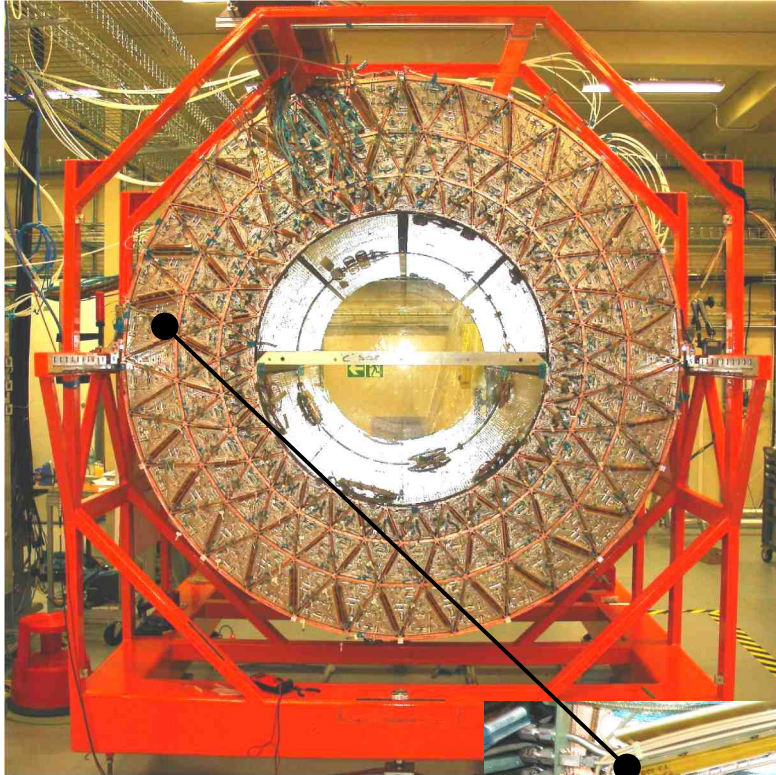
Roue 4-plans d'un bouchon

Dans le TRT, les pailles sont remplies de xénon et les feuilles de polypropylène

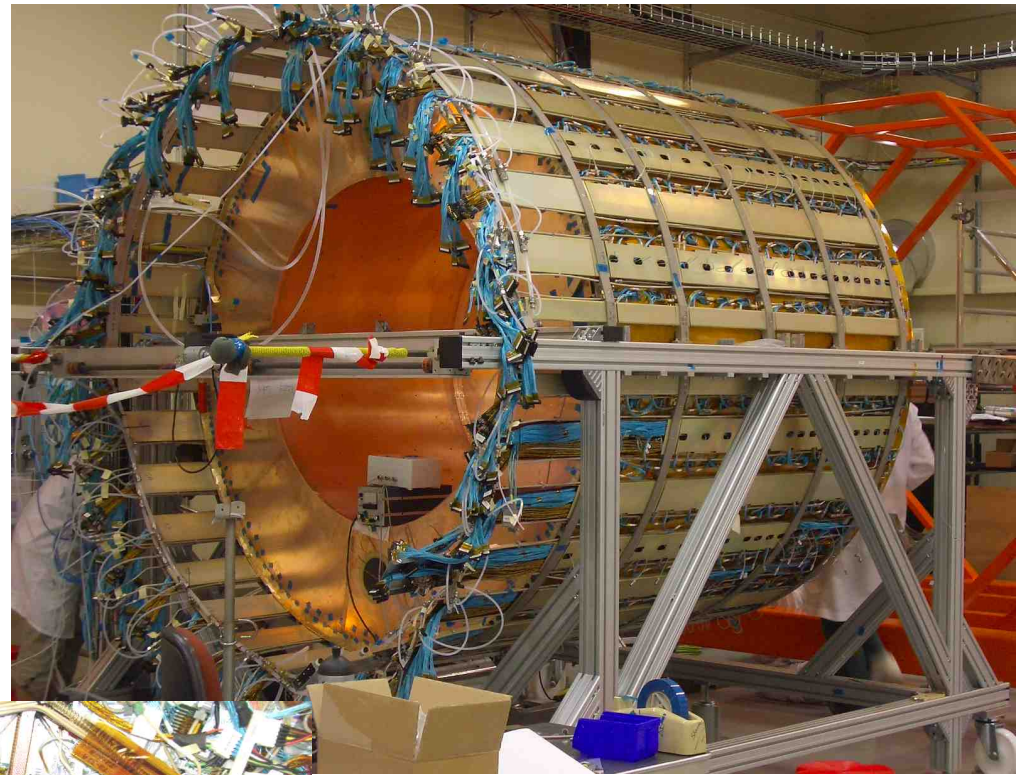


Séparation électron/pion avec un seuil typique de 5 à 7 keV

Le TRT d'ATLAS



Tonneau du TRT
52 544 pailles

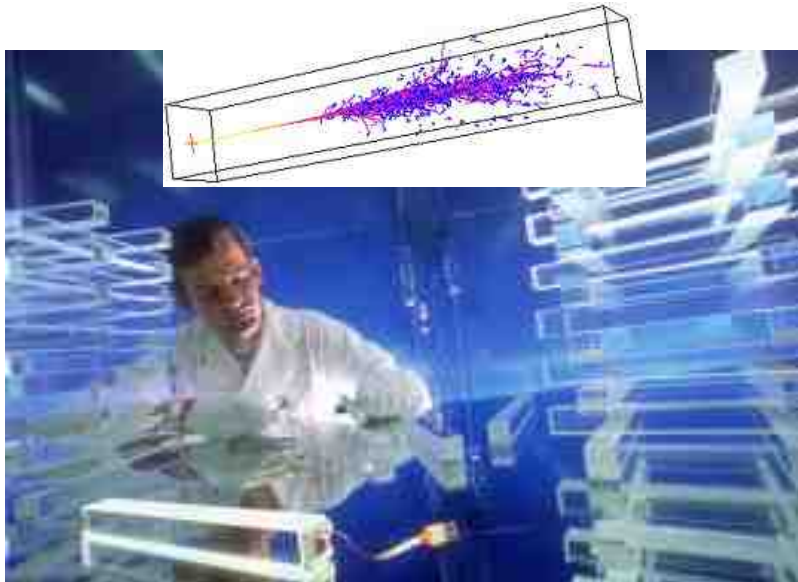
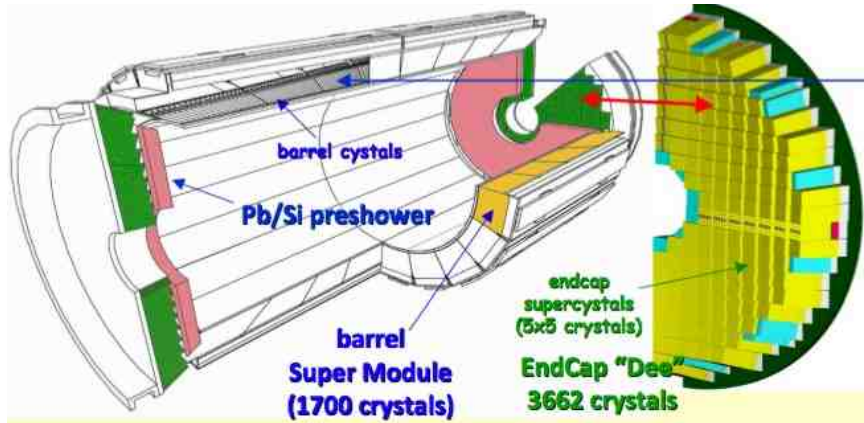


Bouchon côté C du TRT
122 880 pailles

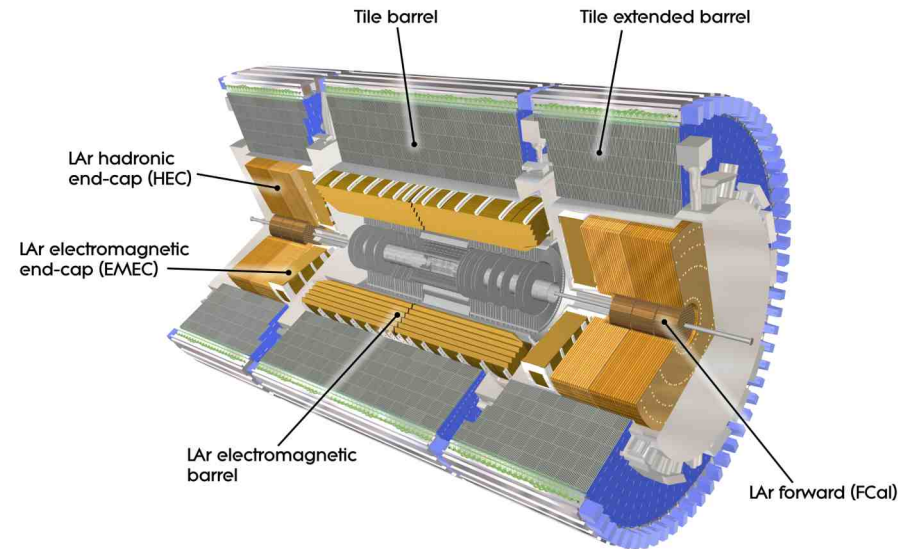


Une multitude de composants
et de connections

Les calorimètres EM d'ATLAS et CMS



CMS : 76 000 cristaux
scintillateurs de PbWO_4

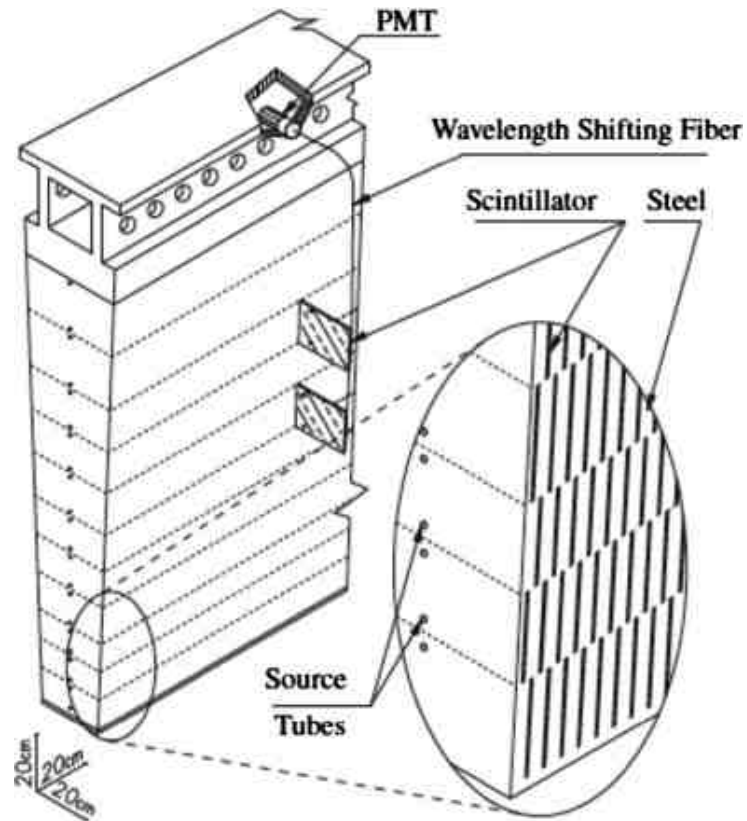


ATLAS : argon liquide (milieu
actif) + plomb (absorbeur)

Les calorimètres hadroniques

ATLAS

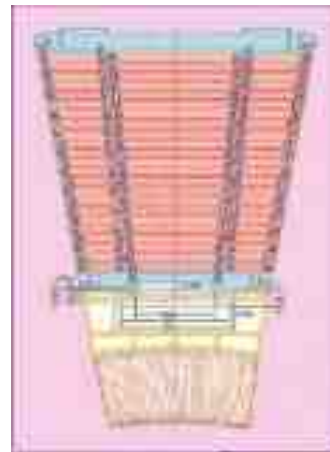
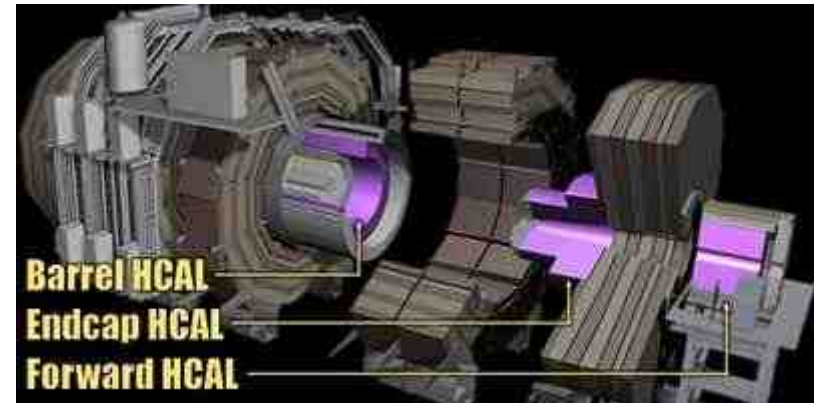
Fer +scintillateurs / Cu+Lar



ATLAS Hcal,
module TileCal

CMS

laiton + scintillateurs



Hcal CMS

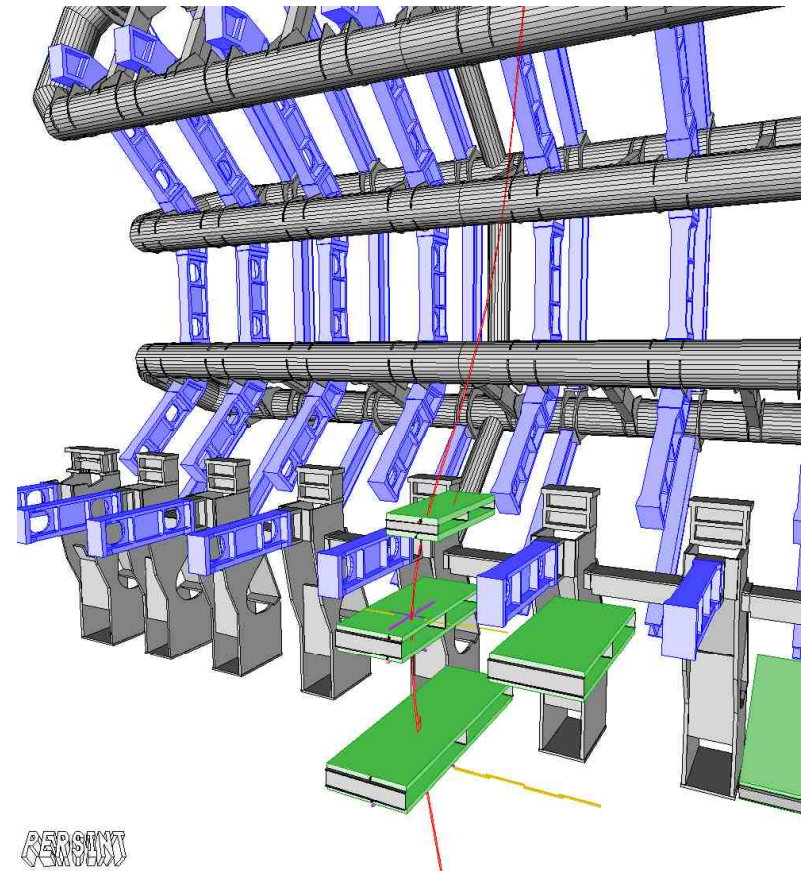


Guide d'ondes

Le spectromètre à muon d'ATLAS



Chambre à muons

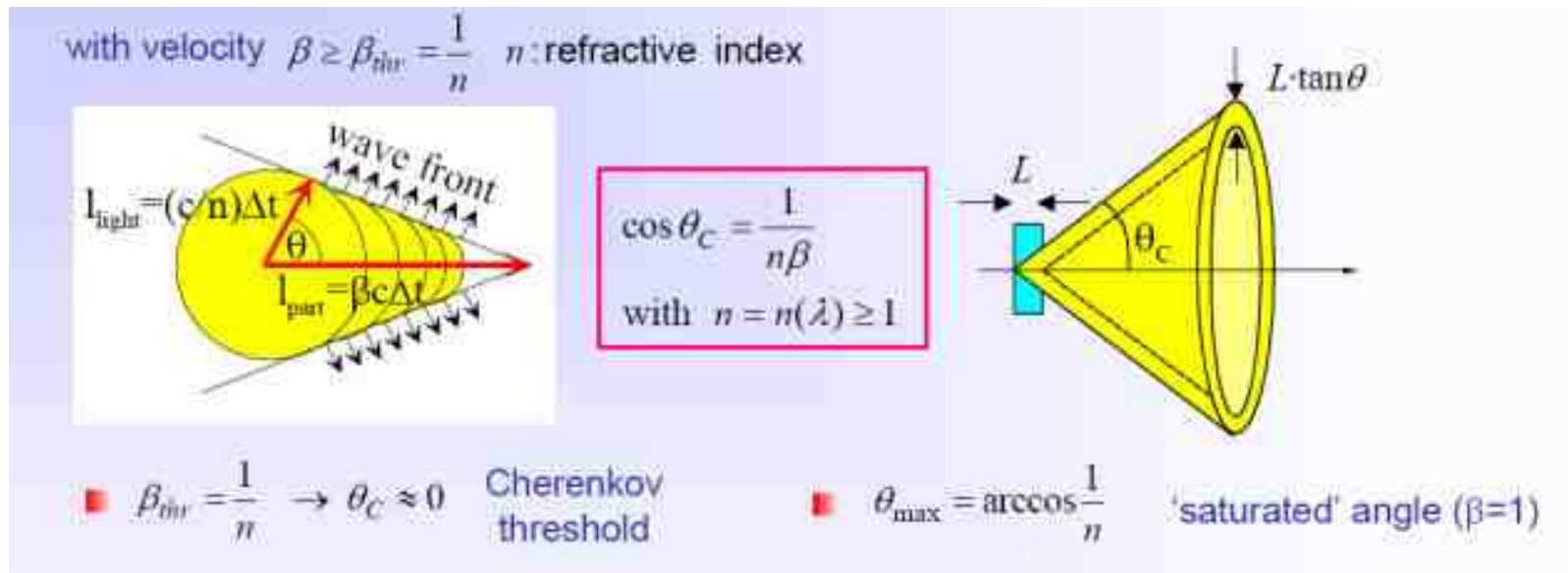


Cosmic Muon in MDT/RPC with Toroid On

- Constitué de pailles comme dans le détecteur interne, mais avec un plus gros diamètre $\Rightarrow$ mesure de l'impulsion des muons

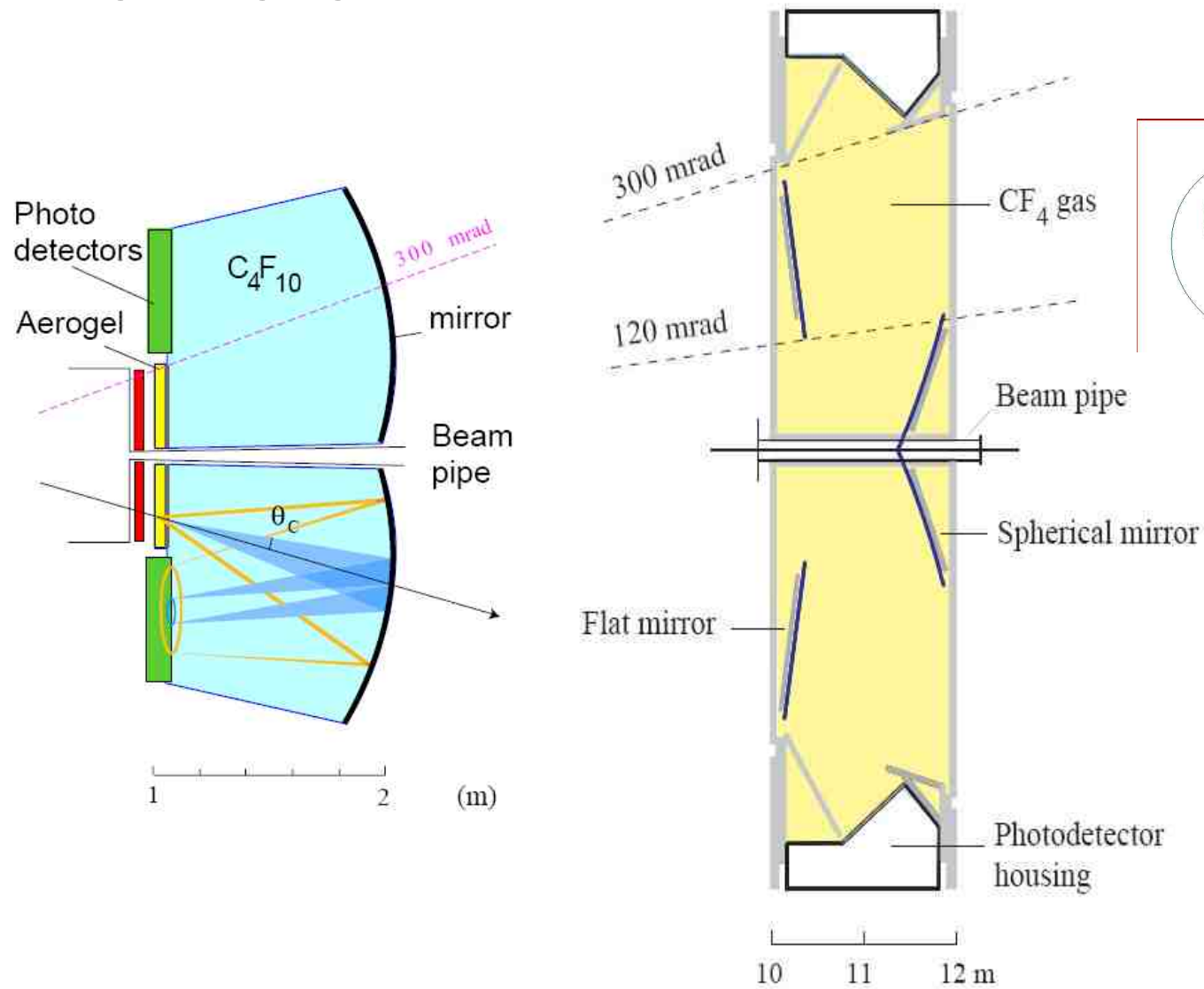
Lumière Cherenkov

Si une particule chargée se propage dans un matériau d'indice n avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu, une radiation Cherenkov est émise à un angle caractéristique $\cos(\theta_c) = 1/(n\beta)$.



Le RICH de LHCb

Ring Imaging CHerenkov



La Time Projection Chamber d'ALICE

Volume rempli d'un gaz ou liquide et soumis à un champ **E** et **B** //.

- Une particule chargée traversant la TPC ionise le milieu, et libère des électrons qui dérivent jusqu'au bout de la chambre.

TPC d'ALICE

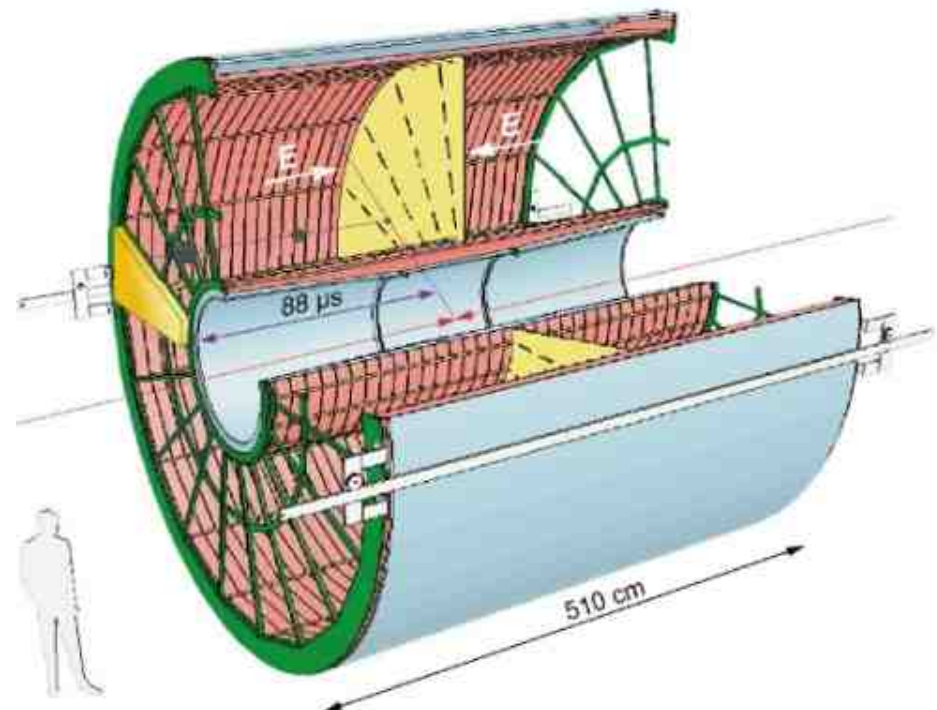
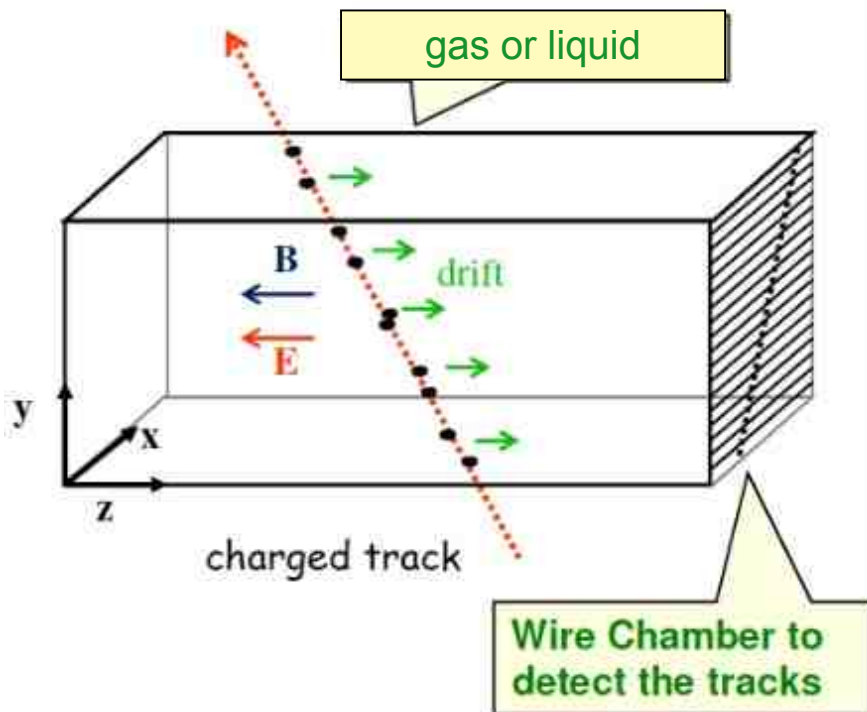
Gas Ne (90%)/CO₂ (10%)

$E = 400 \text{ V/cm}$, $B = 0.5 \text{ T}$

Resolution position: 0.25mm

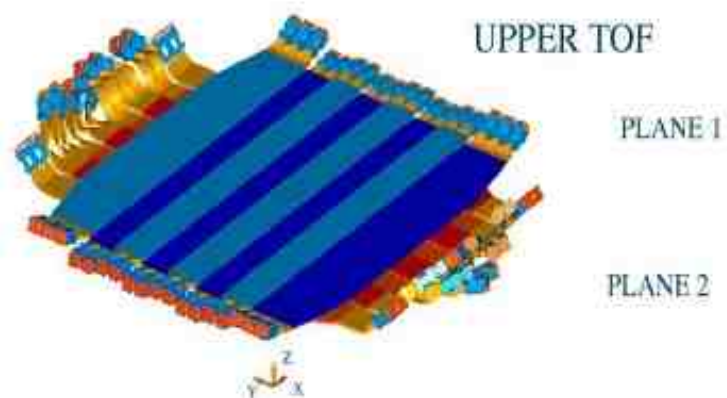
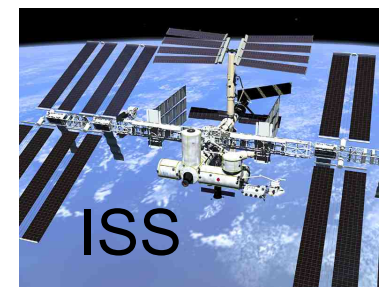
Temps de dérive: 10-100 μs

Granularité: $7 \times 4.5 \text{ mm}^2$





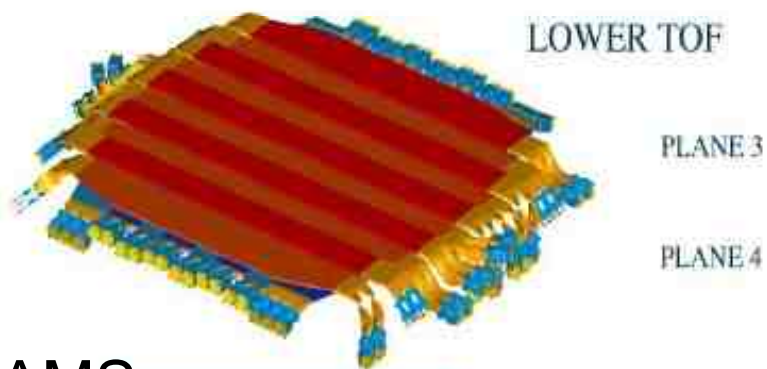
ToF AMS



UPPER TOF

PLANE 1

PLANE 2



LOWER TOF

PLANE 3

PLANE 4

AMS



TOF consists of 4 plastic scintillator planes, 2 above and 2 below the magnet.

Each TOF counter is composed by:

- a plastic scintillator 1 cm thick and around 120 cm long (Eljen-Technology type: Ej-200),
- read at both ends by 2 independently powered photomultiplier tubes (fine-mesh Hamamatsu R5946 with max spectral response at 420 nm),
- connected with transparent light guides.

Kaon, Pion, Proton separation up to a few GeV/c.



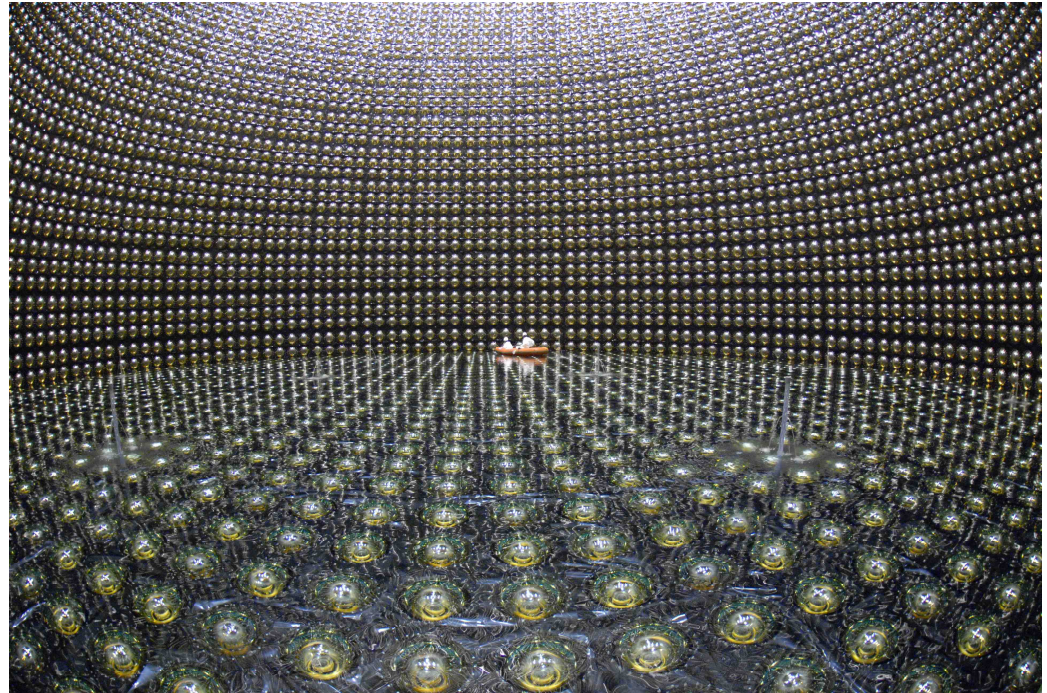
The AMS-02 TOF



Le détecteur de neutrinos Kamiokande

Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector

- Tank de 50 000 tonnes d'eau pure, avec 12000 tubes PM, 1 km sous le Mont Kamioka.
- L'interaction d'un neutrino avec les électrons ou les noyaux de l'eau produit une particule chargée qui va plus vite que la lumière dans l'eau.



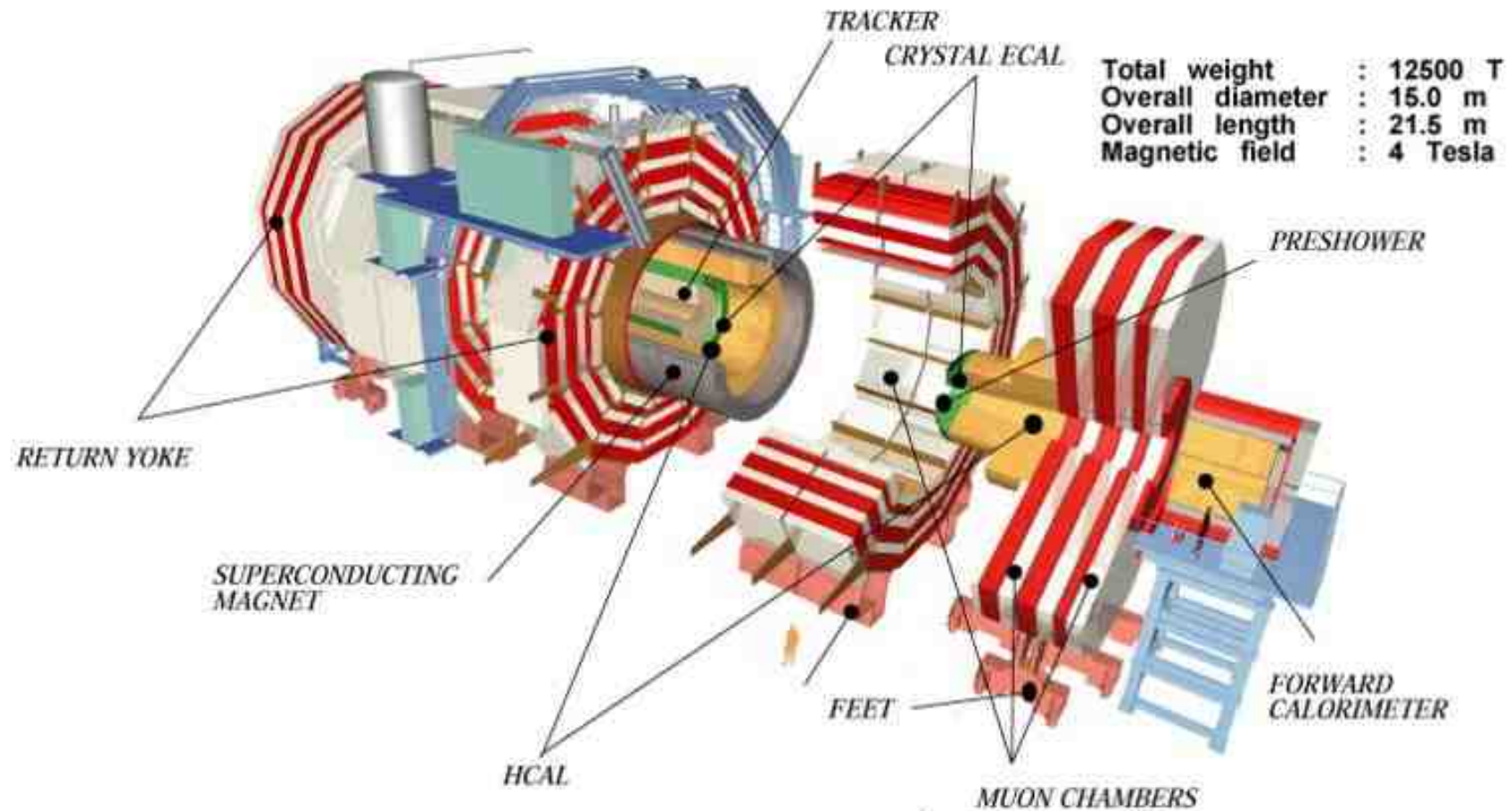
Super-Kamiokande, Hida (Japon)

⇒ Production d'un cône de lumière Cherenkov (détecté par PM)

⇒ Découverte de l'oscillation des neutrinos en 1998 !

CMS

2500 chercheurs, 38 pays



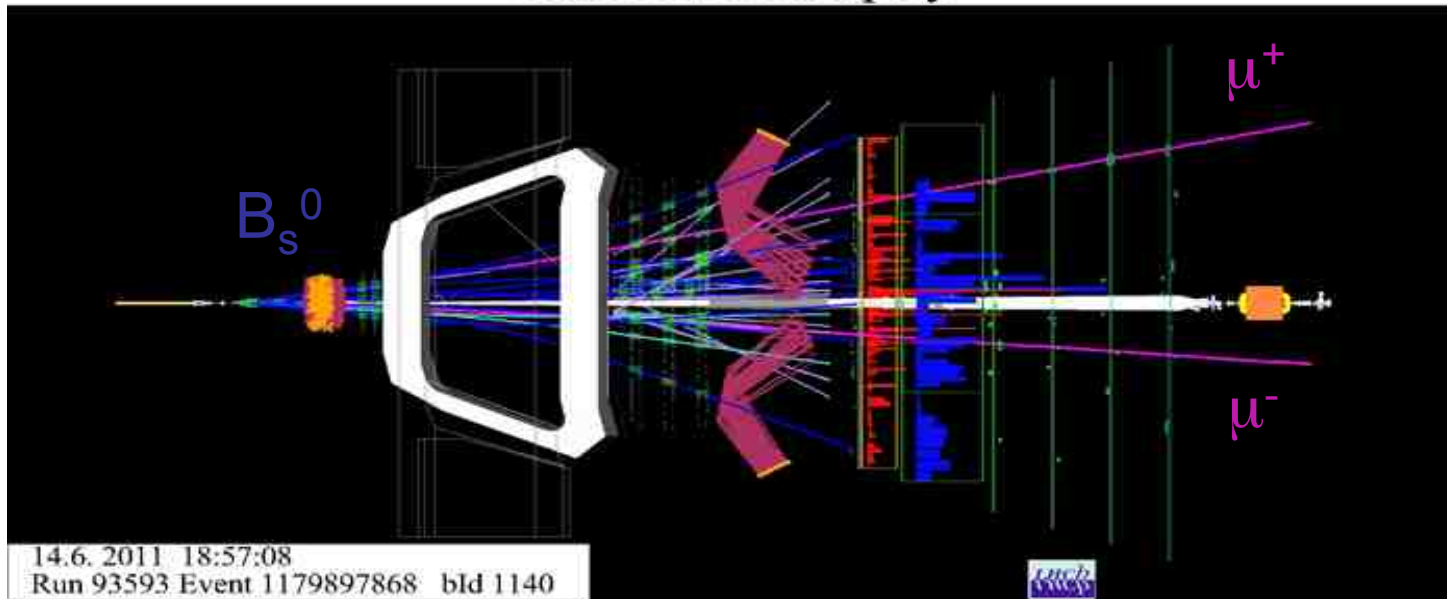
CMS: Compact Muon Solenoïd

→ expérience généraliste: Boson de Higgs, matière noire, anti-matière, SUSY, etc..

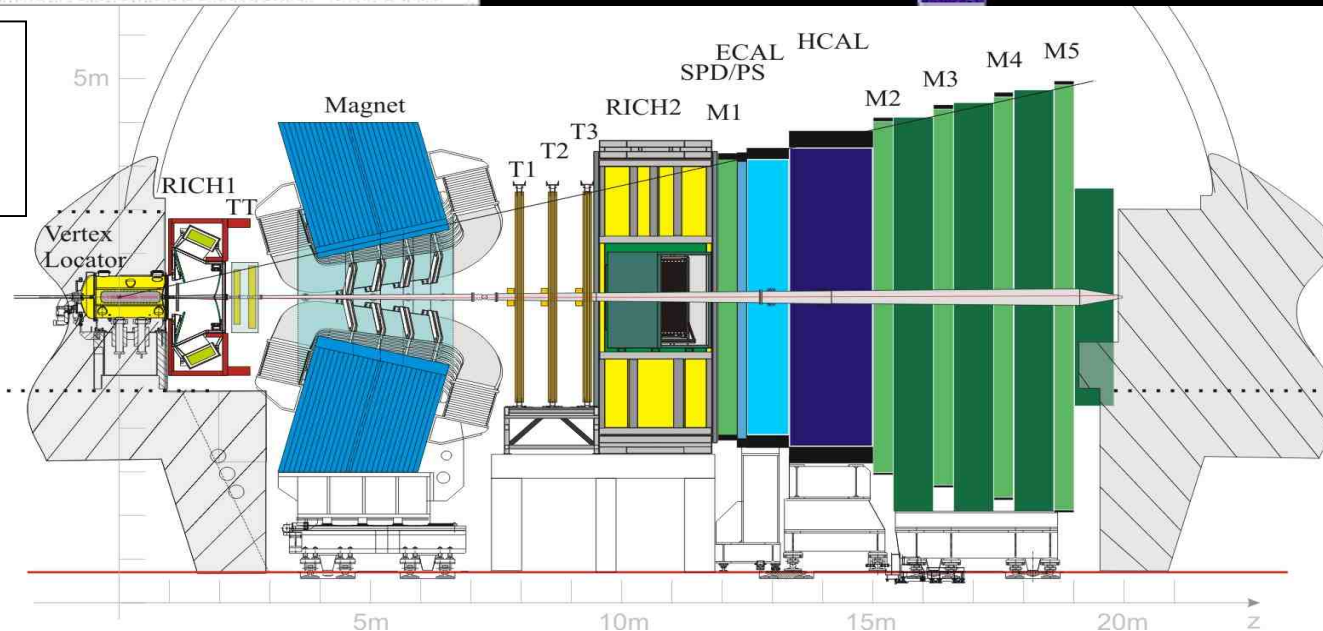
1000 chercheurs, 33 pays
16 m x 26 m, 10 000 t



LHCb Event Display

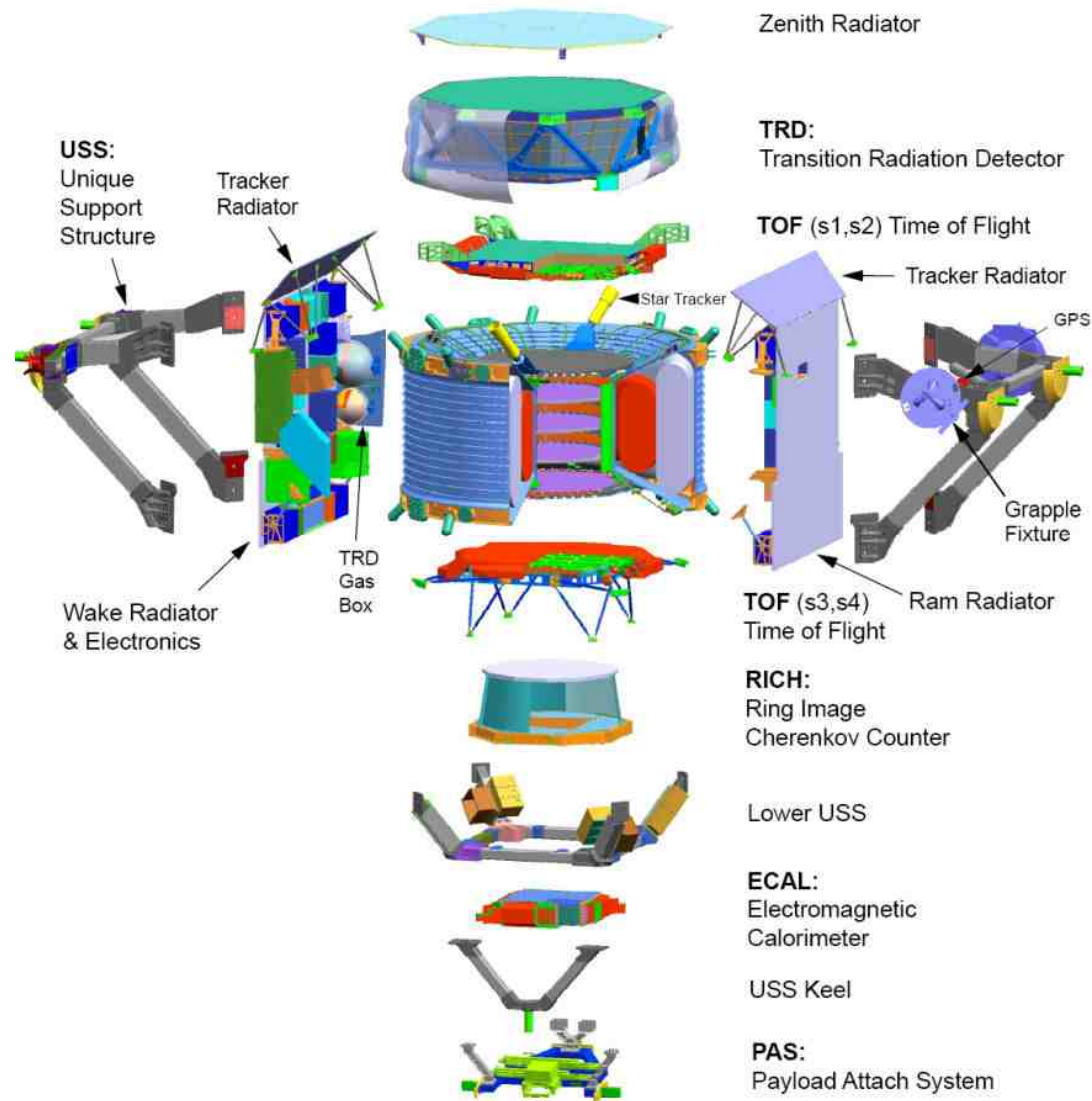


700 scientists,
15 countries
6 m x 25 m



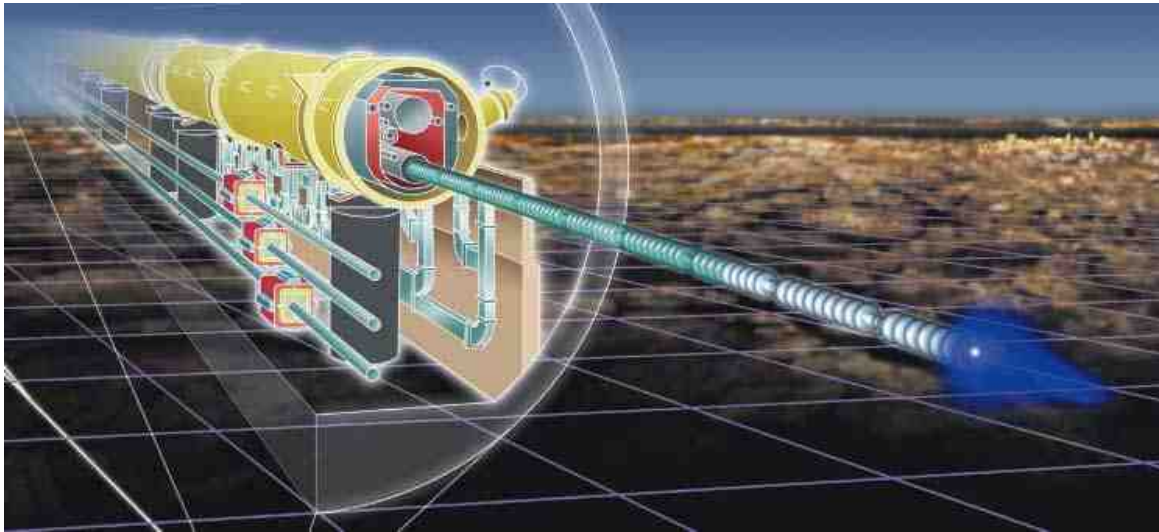
LHCb: Une expérience du LHC sur la physique du b
→ Etudier la différence entre matière et antimatière

AMS

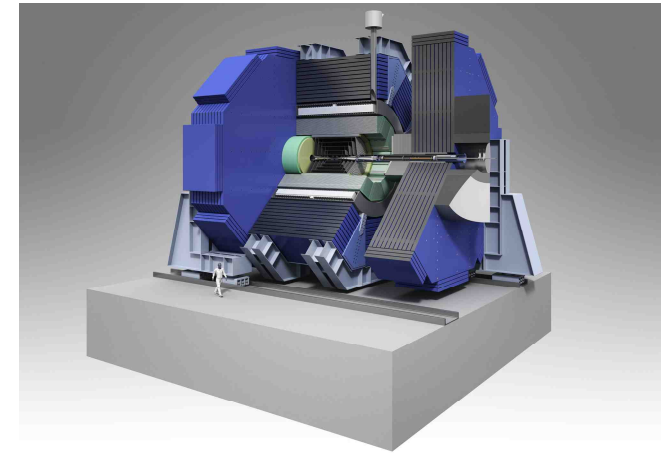


→ Etudier la matière noire, l'anti-matière, et les rayons cosmiques

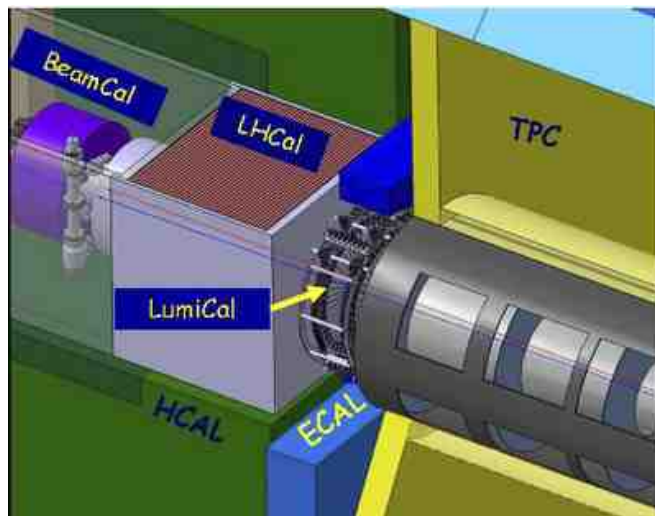
L'avenir ?



International Linear Collider

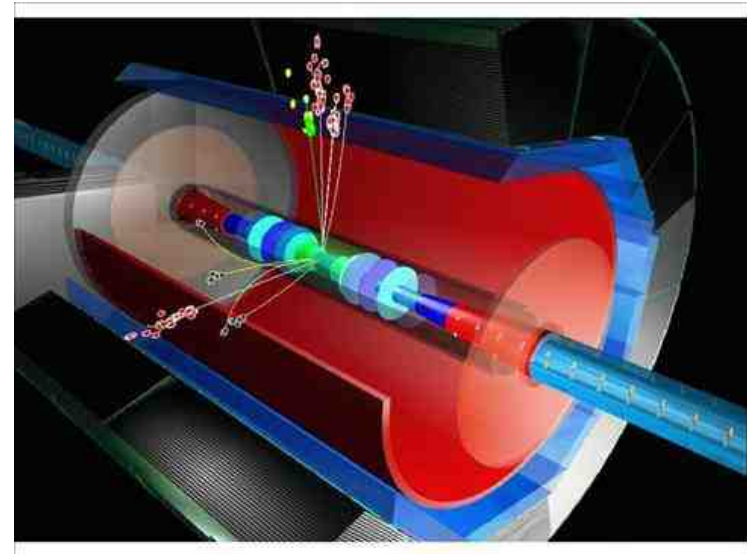


Si Detector



ILD forward region

5-10 μm ?



Vertex Detector