



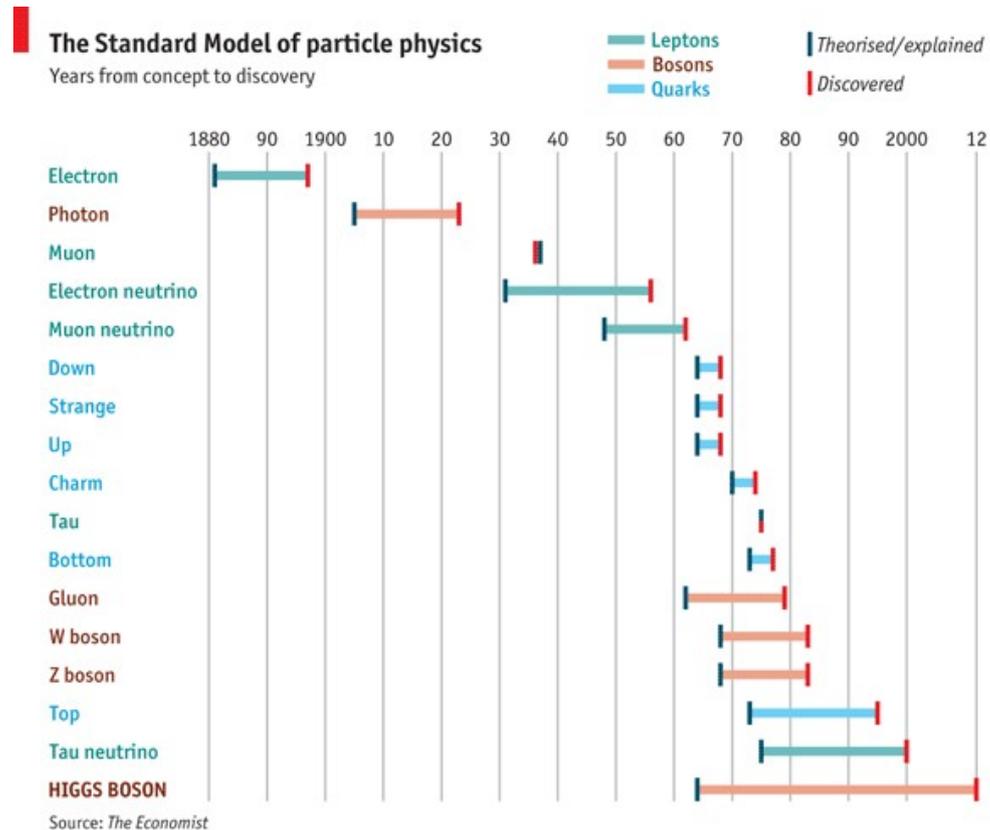
L'expérience LHCb

- ❖ Principes généraux
- ❖ Le CERN
- ❖ Le grand collisionneur LHC
- ❖ L'expérience LHCb

Principes généraux

La découverte du Modèle Standard

Les particules du Modèle Standard ont toutes été observées !



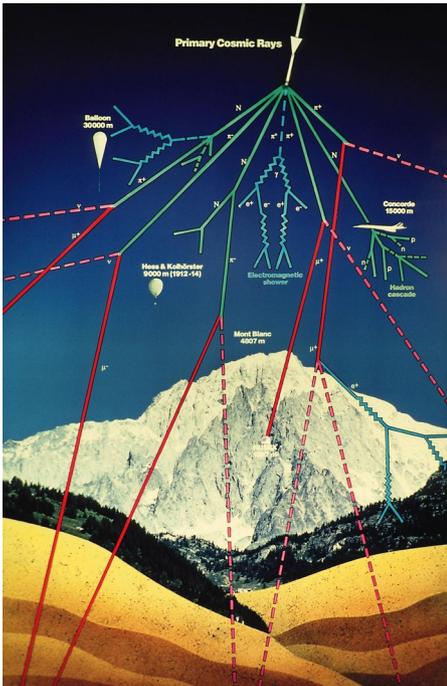
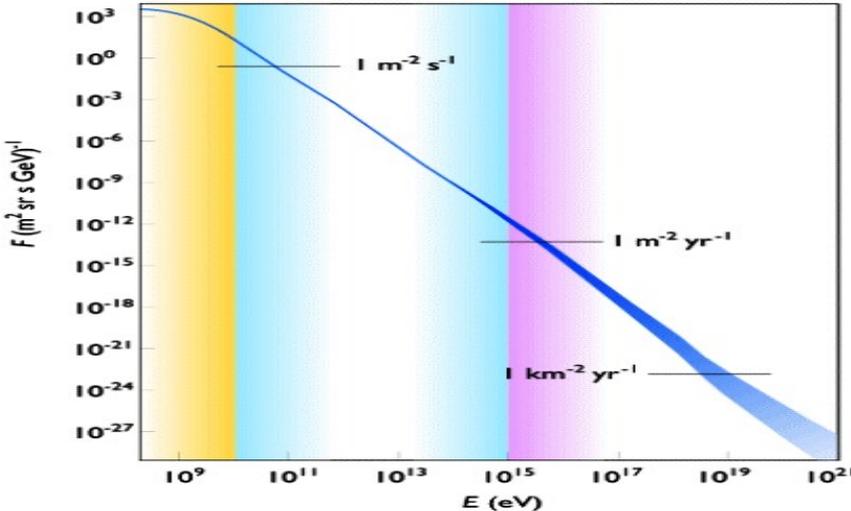
Comment ?

→ en tapant de plus en plus fort ! $E = mc^2$

(plus l'énergie augmente, plus lourdes les particules qu'on peut créer)

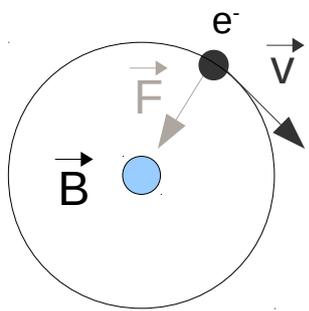
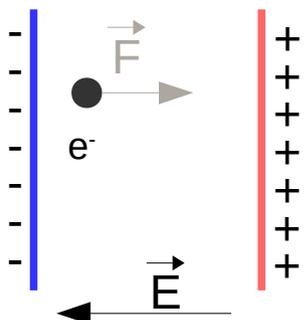
L'accélération des particules

Les rayons cosmiques (Hess, 1912)

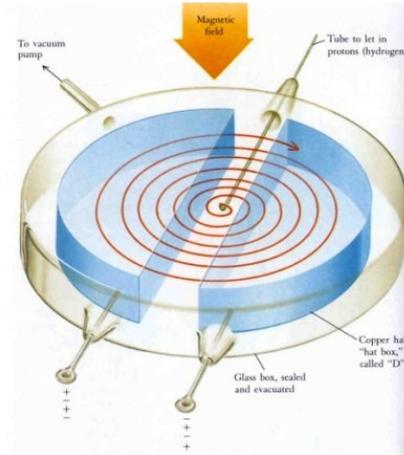


Moyen d'accélération :

→ particule chargée dans un champ électrique



dans un champ magnétique



L'accélé

Les rayons

Moyen d'ac

→ particu

LES UNITES

Les unités usuelles sont souvent inadaptés à la physique des particules

On utilisera :

- Energie : eV (*électron-volt*)

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

énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V

Et, en vertu de l'équivalence masse-énergie ($E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$) :

- Impulsion : eV/c

- Masse : eV/c²

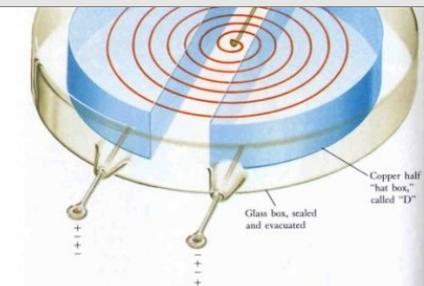
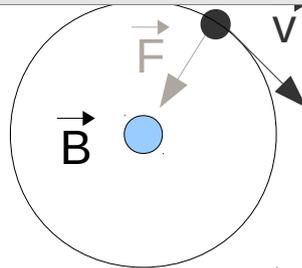
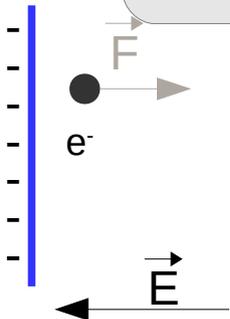
$$1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Multiples usuels : keV (10³), MeV(10⁶), GeV(10⁹), TeV (10¹²)

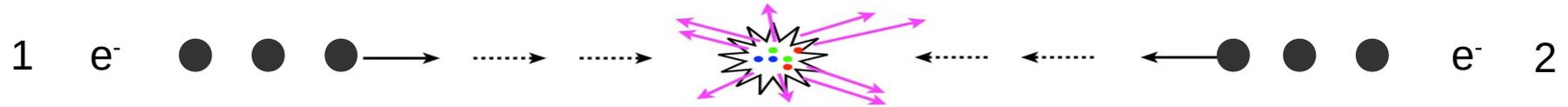
Pour les distances (peu utiliser en physique des particules), on verra :

- l'ångström : 1 Å = 10⁻¹⁰ m

- le *fermi* (ou *femtomètre*) : 1 fm = 10⁻¹⁵ m



Énergie et masse



$$\left. \begin{aligned} E_1^2 &= M_1^2 c^4 + P_1^2 c^2 \\ E_2^2 &= M_2^2 c^4 + P_2^2 c^2 \end{aligned} \right\} \text{Énergie disponible} = E_1 + E_2$$

L'énergie disponible va se matérialiser en nouvelles particules

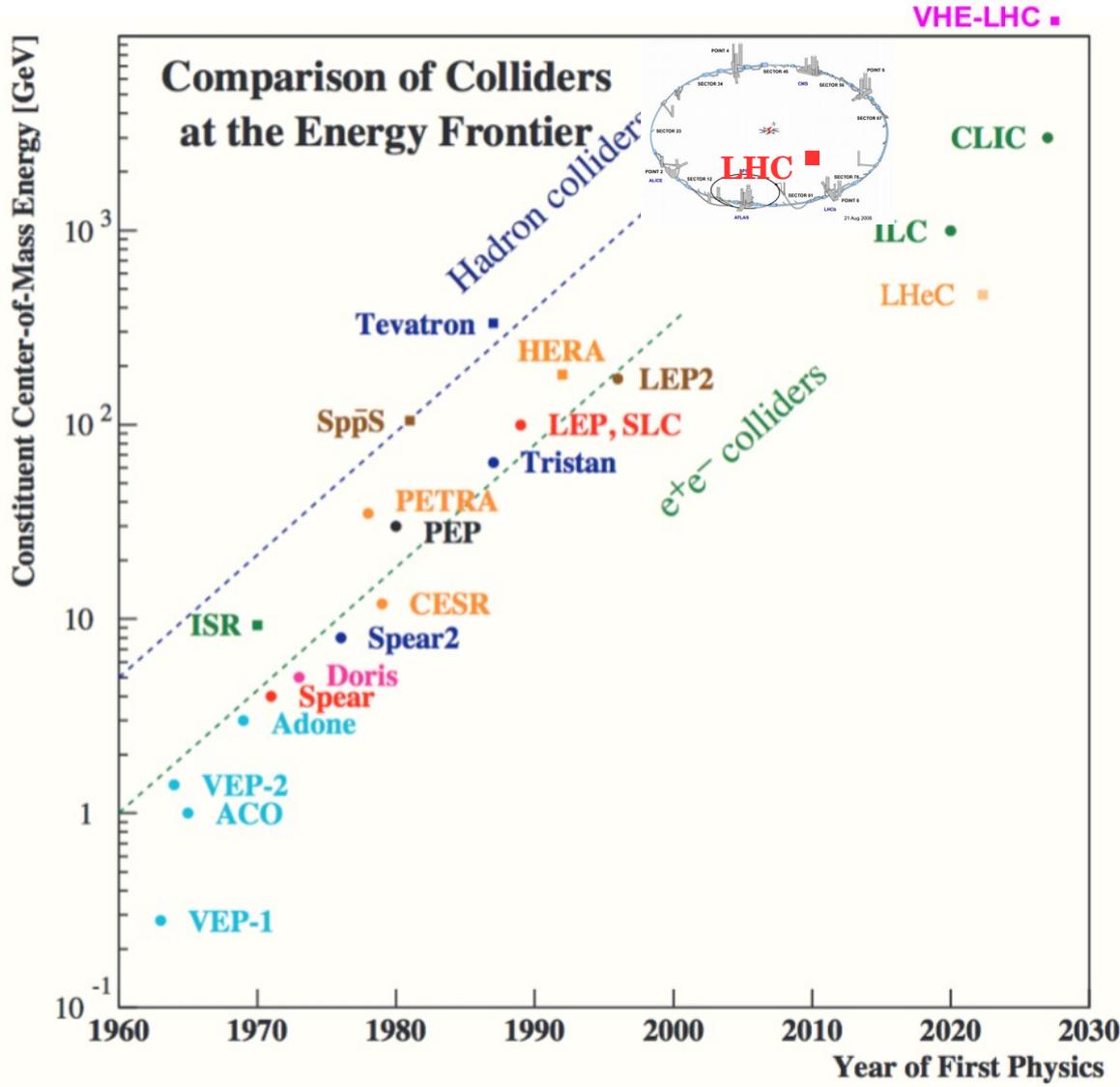
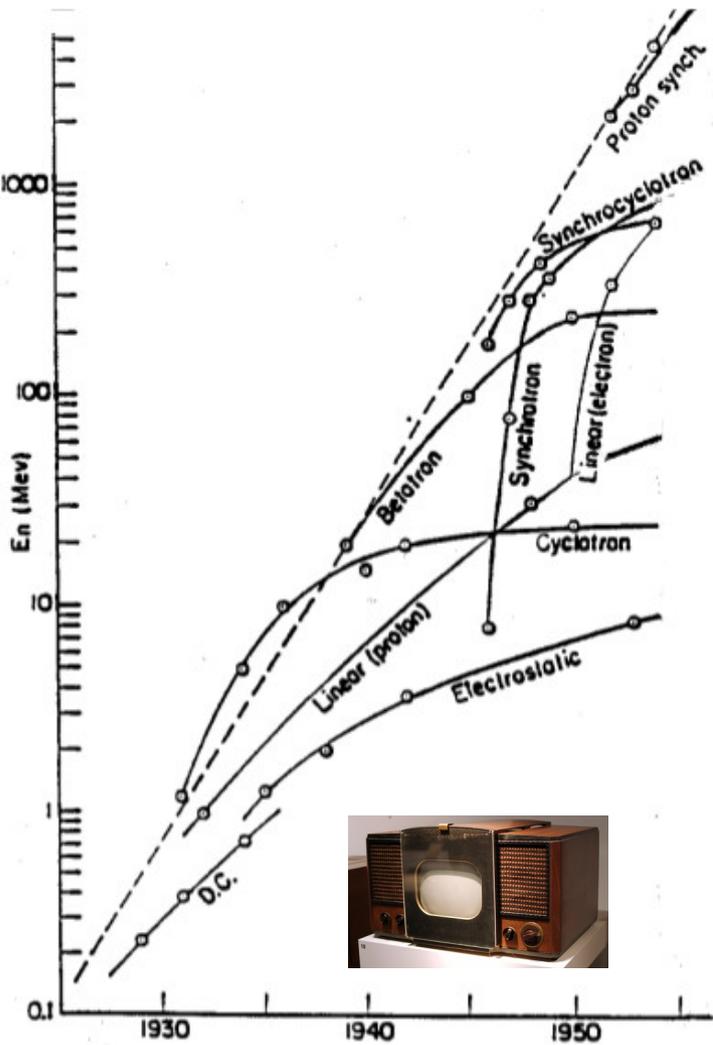
- suivant des lois de probabilités
- les particules produites n'étaient pas présentes avant le choc !!!

Ex : LEP Collisionneur $e^+ e^-$ (1989-1995) :

- 91 GeV / faisceau
- énergie disponible : 182 GeV
assez pour créer des paires de bosons Z et W
(17 Millions de bosons Z → étude précise)



Des accélérateurs de plus en plus puissants



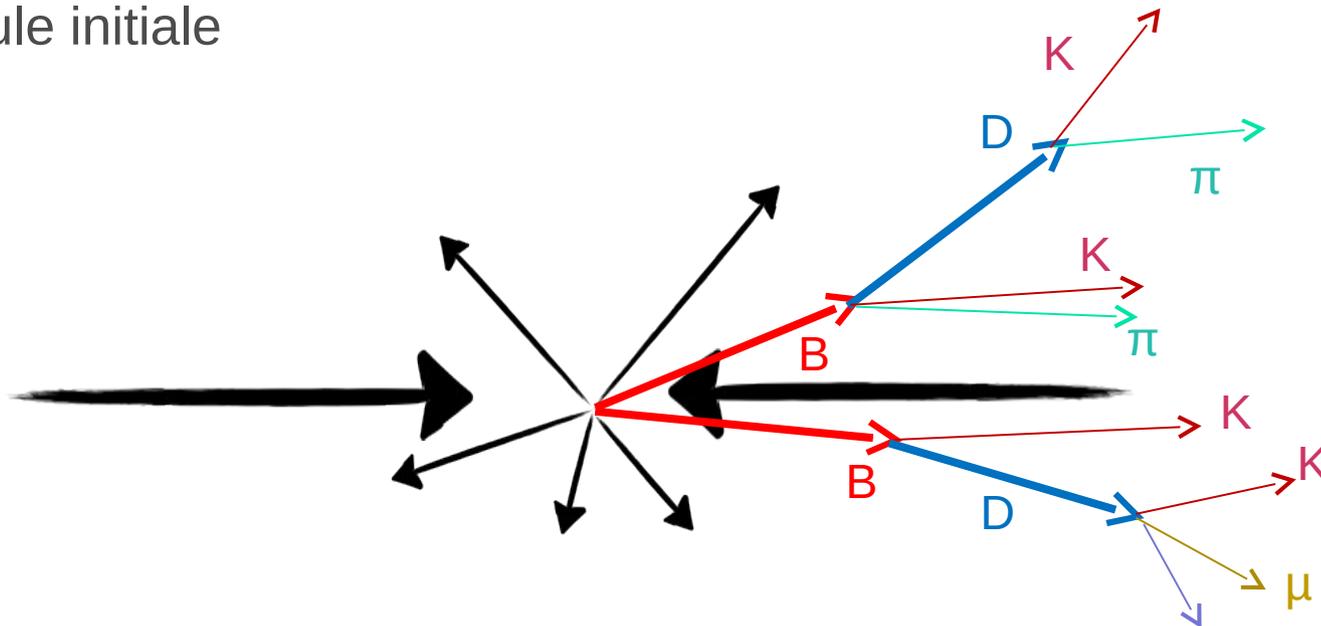
Production et observation

Les accélérateurs de haute énergie permettent de **produire** des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

- de nouvelles particules jamais observées
- des particules connues que l'on va étudier

Comment **observer** ces particules ?

- elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter
- en mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale



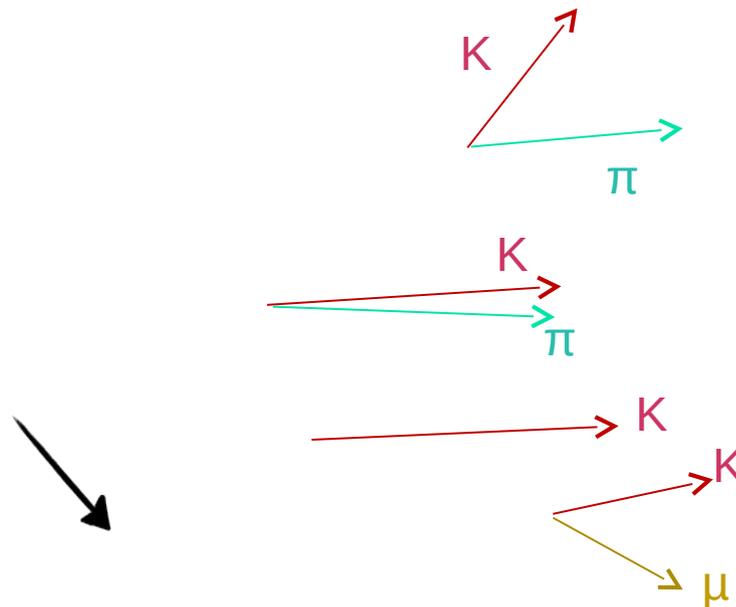
Production et observation

Les accélérateurs de haute énergie permettent de **produire** des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

- de nouvelles particules jamais observées
- des particules connues que l'on va étudier

Comment observer ces particules ?

- elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter
- en mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale



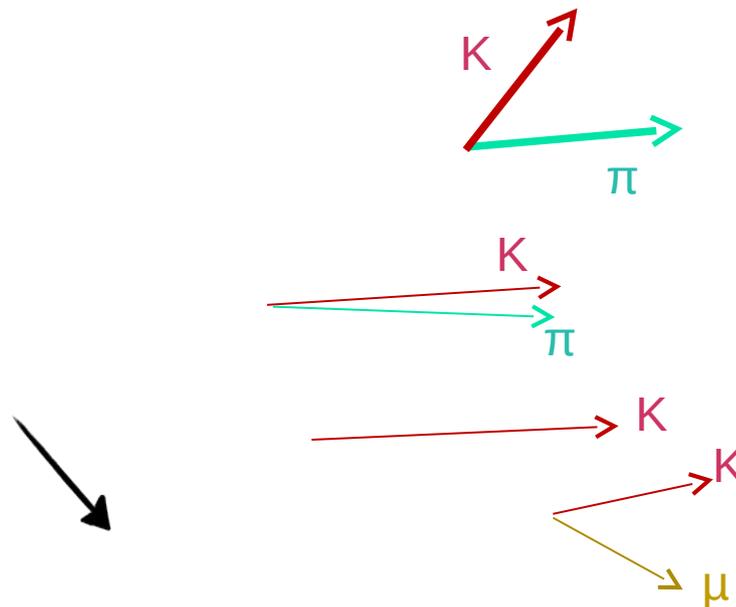
Production et observation

Les accélérateurs de haute énergie permettent de **produire** des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

- de nouvelles particules jamais observées
- des particules connues que l'on va étudier

Comment observer ces particules ?

- elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter
- en mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale



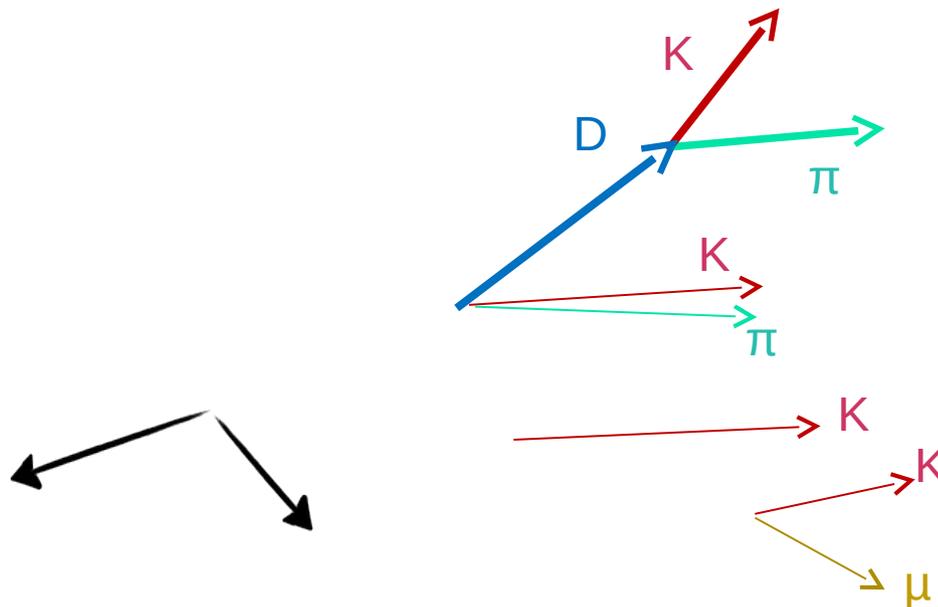
Production et observation

Les accélérateurs de haute énergie permettent de **produire** des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

- de nouvelles particules jamais observées
- des particules connues que l'on va étudier

Comment observer ces particules ?

- elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter
- en mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale



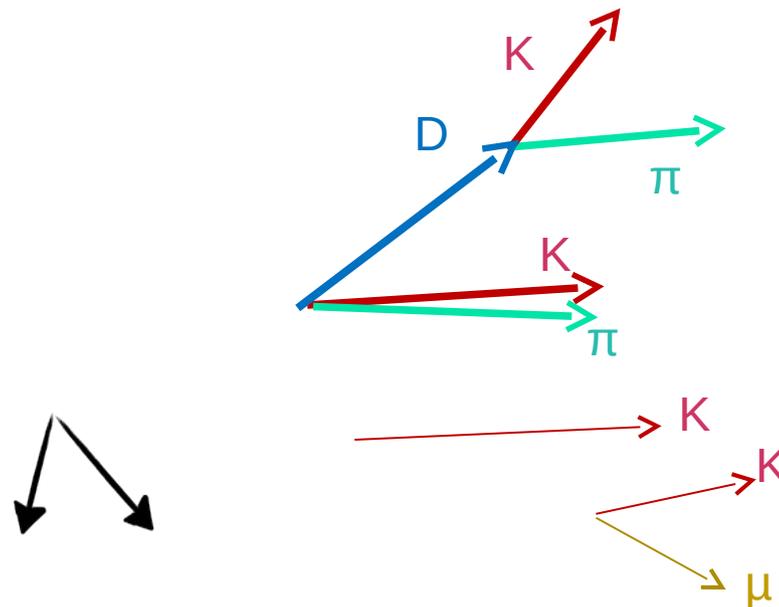
Production et observation

Les accélérateurs de haute énergie permettent de **produire** des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

- de nouvelles particules jamais observées
- des particules connues que l'on va étudier

Comment observer ces particules ?

- elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter
- en mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale



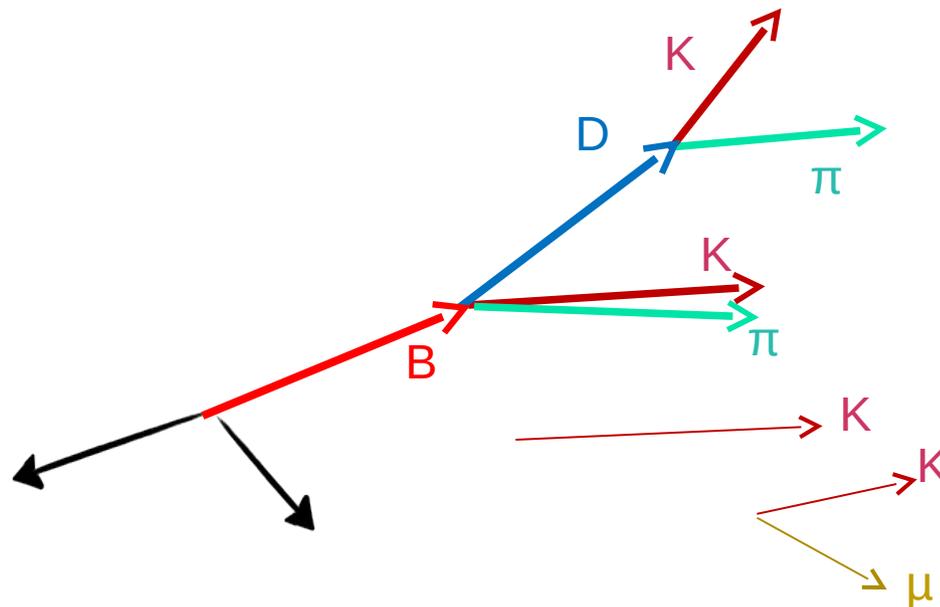
Production et observation

Les accélérateurs de haute énergie permettent de **produire** des particules lourdes qui n'existent pas autour de nous

- de nouvelles particules jamais observées
- des particules connues que l'on va étudier

Comment observer ces particules ?

- elles sont souvent instables et vont se désintégrer spontanément avant qu'on ait la chance de les détecter
- en mesurant les produits de ces désintégrations, on peut remonter à la particule initiale



Détection

Les particules stables ou vivant suffisamment longtemps :

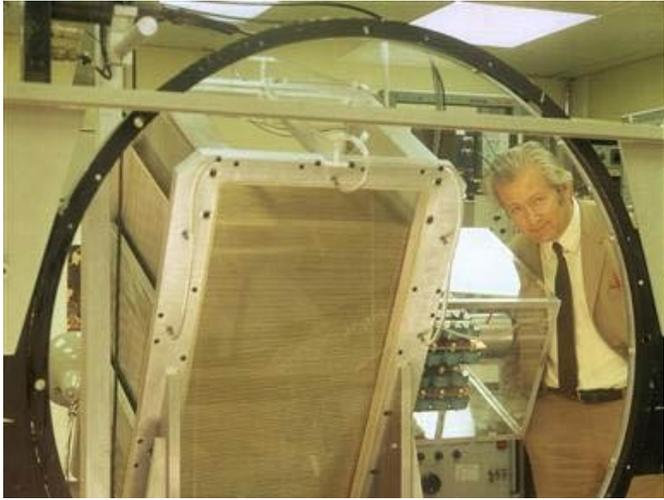
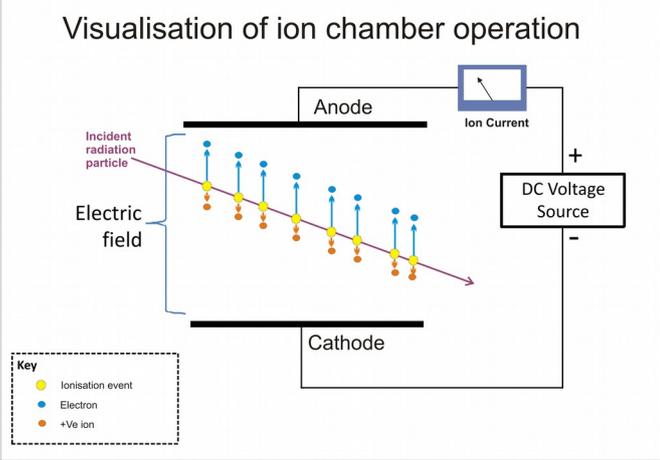
- électrons / positrons
- muons
- pions et kaons chargés
- protons
- neutrons
- photons
- neutrino

Pour détecter une particule, il faut la faire interagir

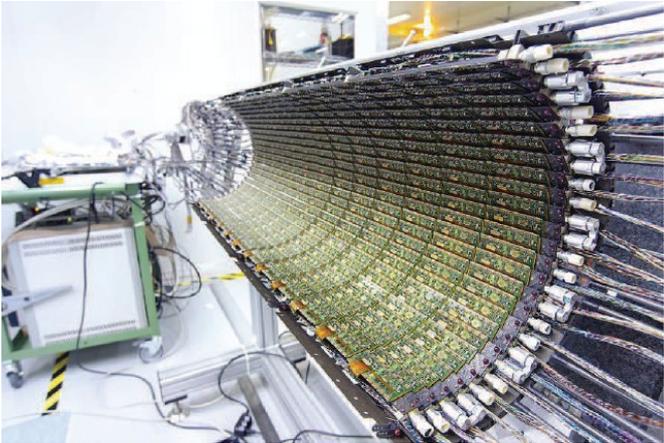
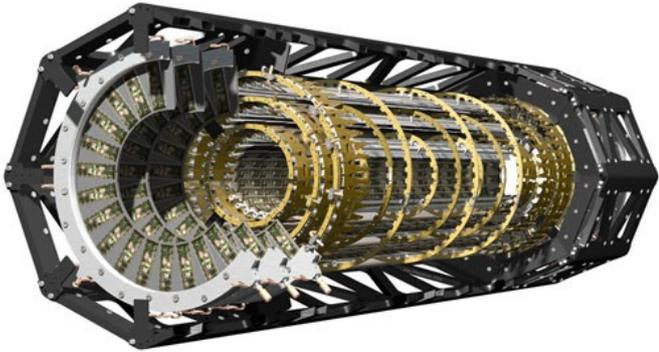
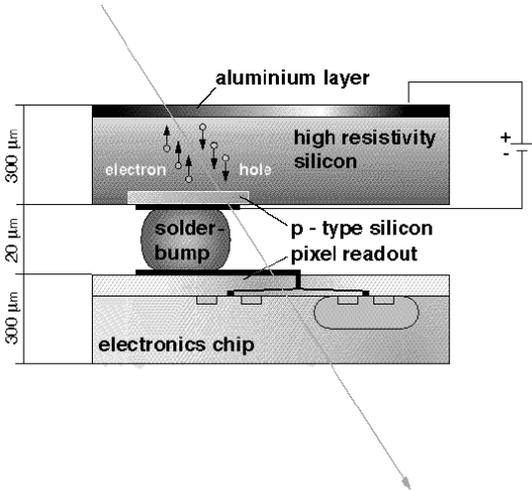
- particules chargées sensible à l'interaction électromagnétique :
 - facile : ionisation → signal électrique / lumineux
- particules neutres :
 - interaction avec la matière → production de particules chargées

Exemples de détecteur

Chambre à fils (détecteur gazeux)



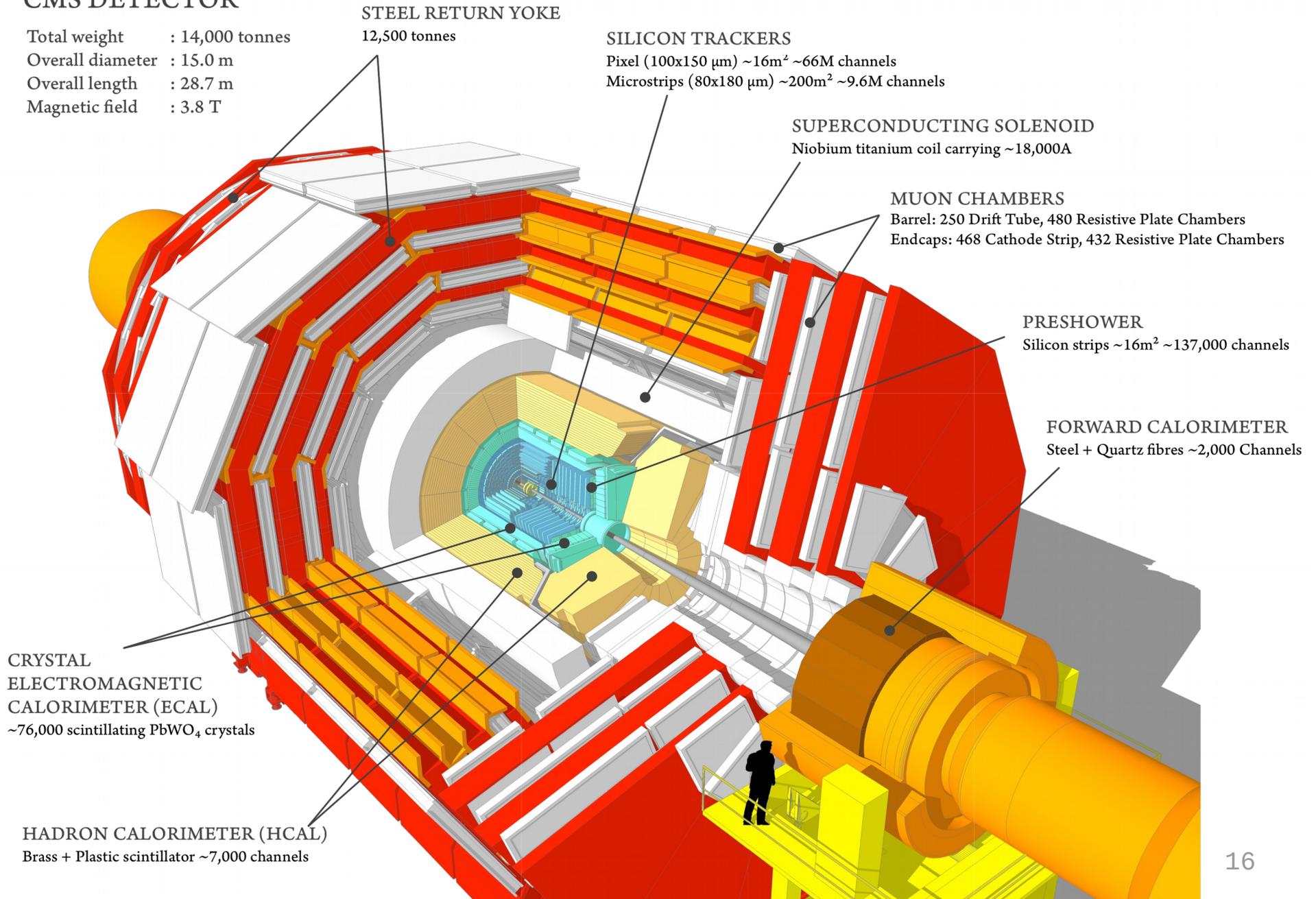
Détecteur à semi-conducteur



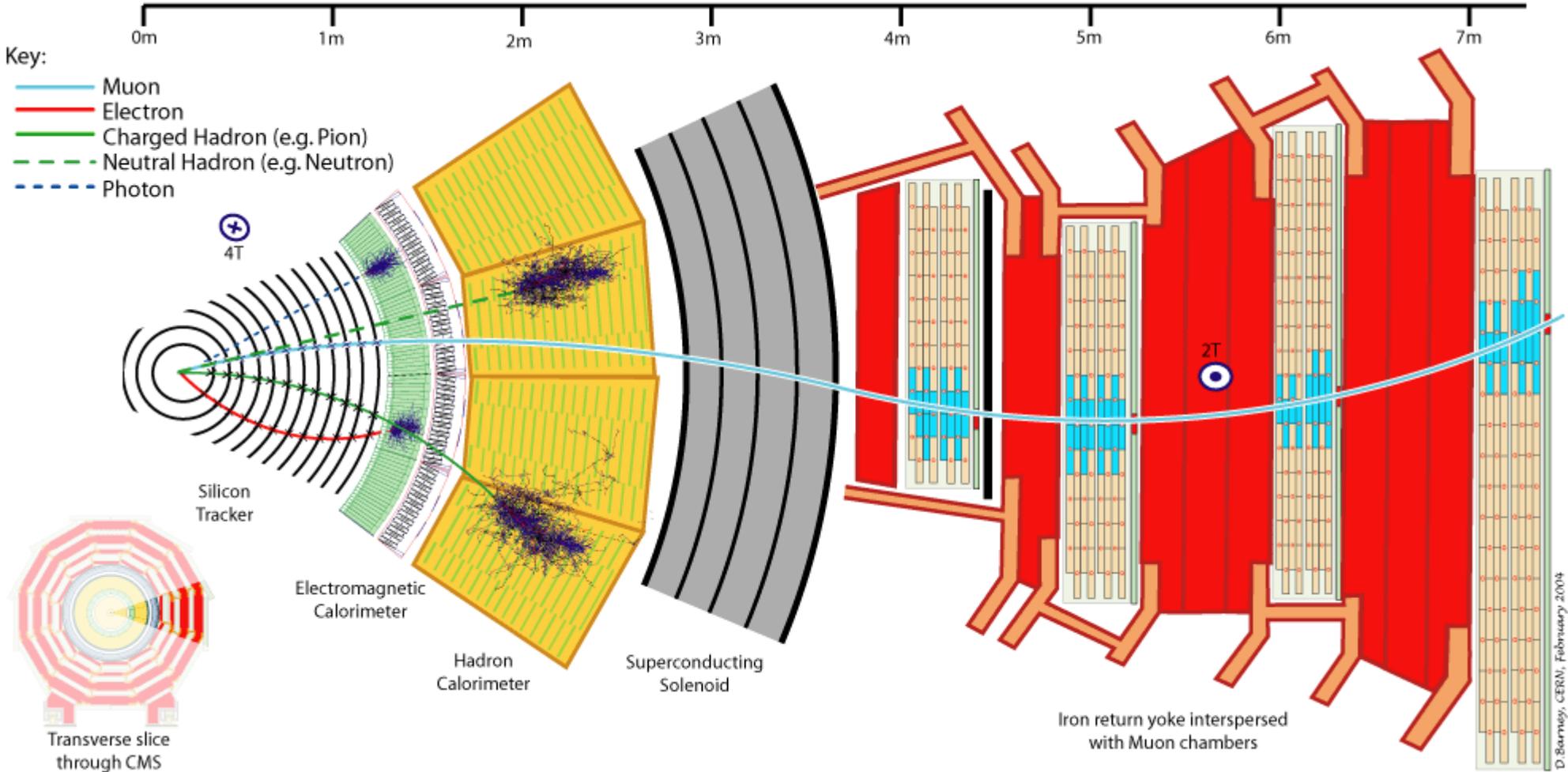
Un détecteur en couche

CMS DETECTOR

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



Le rôle de chaque couche



Le CERN



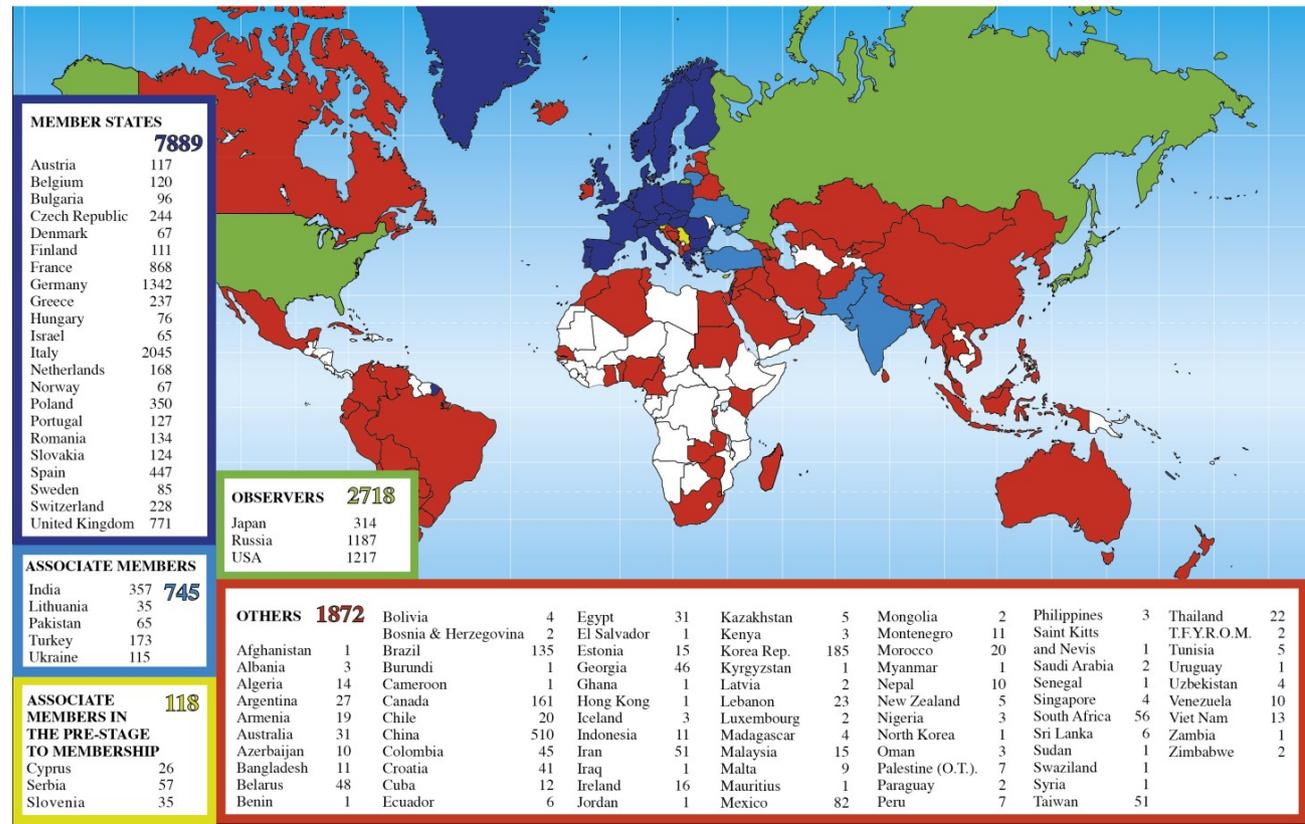
Le CERN en quelques chiffres



Organisation européenne pour la recherche nucléaire
 Le laboratoire européen pour la physique des particules

- organisation internationale
- créé en 1954
- 23 état membres
- New : Serbie (24/3/2019)
- emploie ~2500 personnes
- ~10000 utilisateurs
- 500 instituts
- 80 pays

Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018



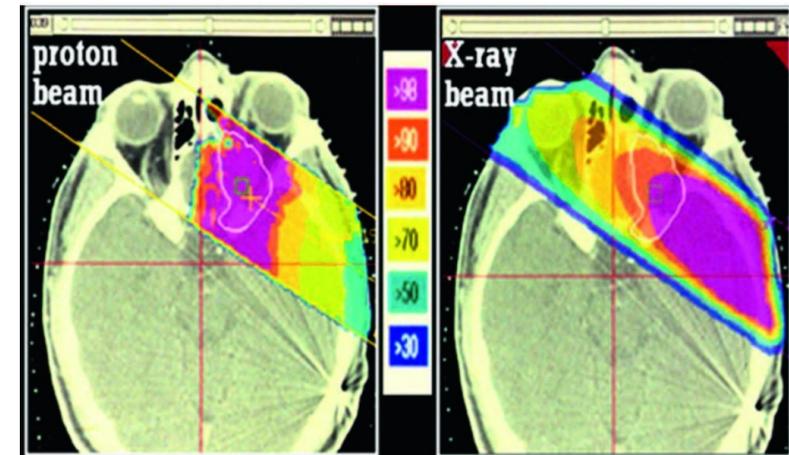
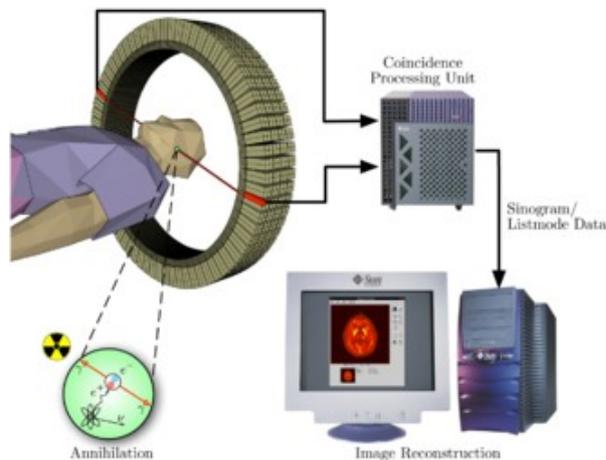
A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

Raison d'être :

↘ satisfaire la curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

Applications :

- Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- Faisceaux utilisés en hadronthérapie



A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

Raison d'être :

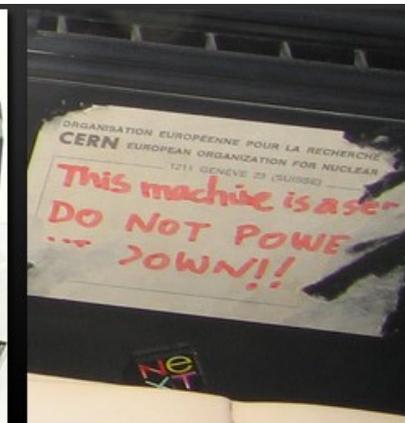
↳ satisfaire la curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

Applications :

- Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- Faisceaux utilisés en hadronthérapie

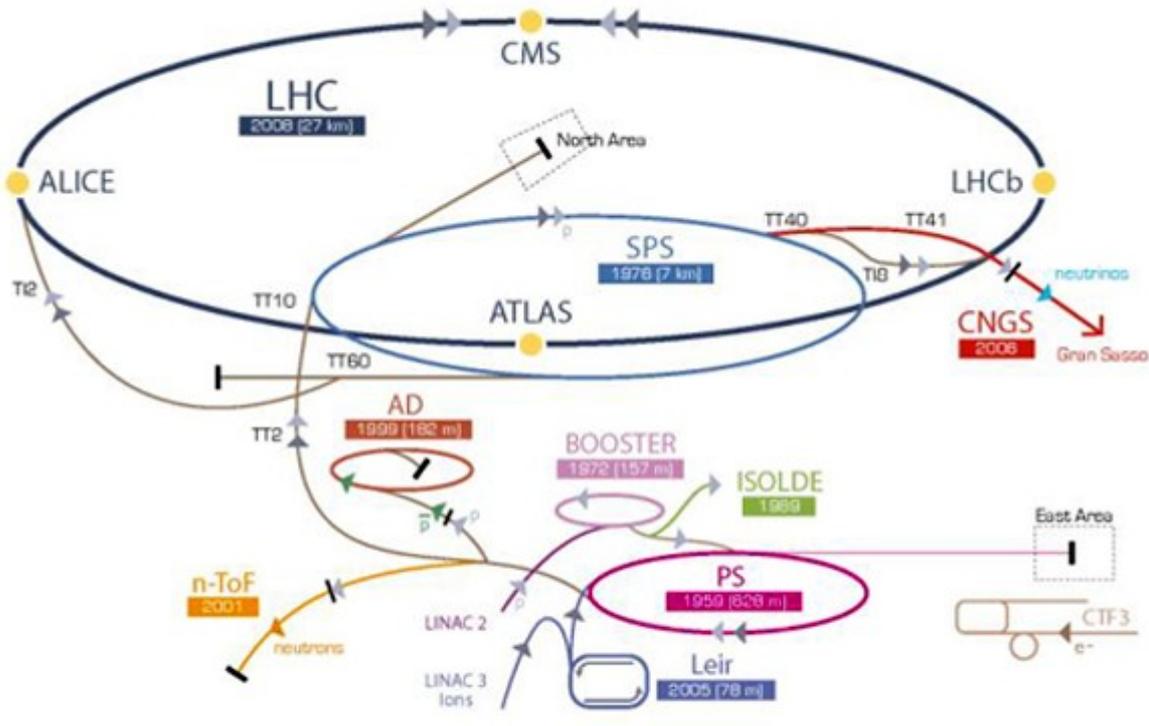
Plus inattendu :

- Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
- Grille de calcul
- Le Web a été inventé au CERN !



Le CERN : les accélérateurs

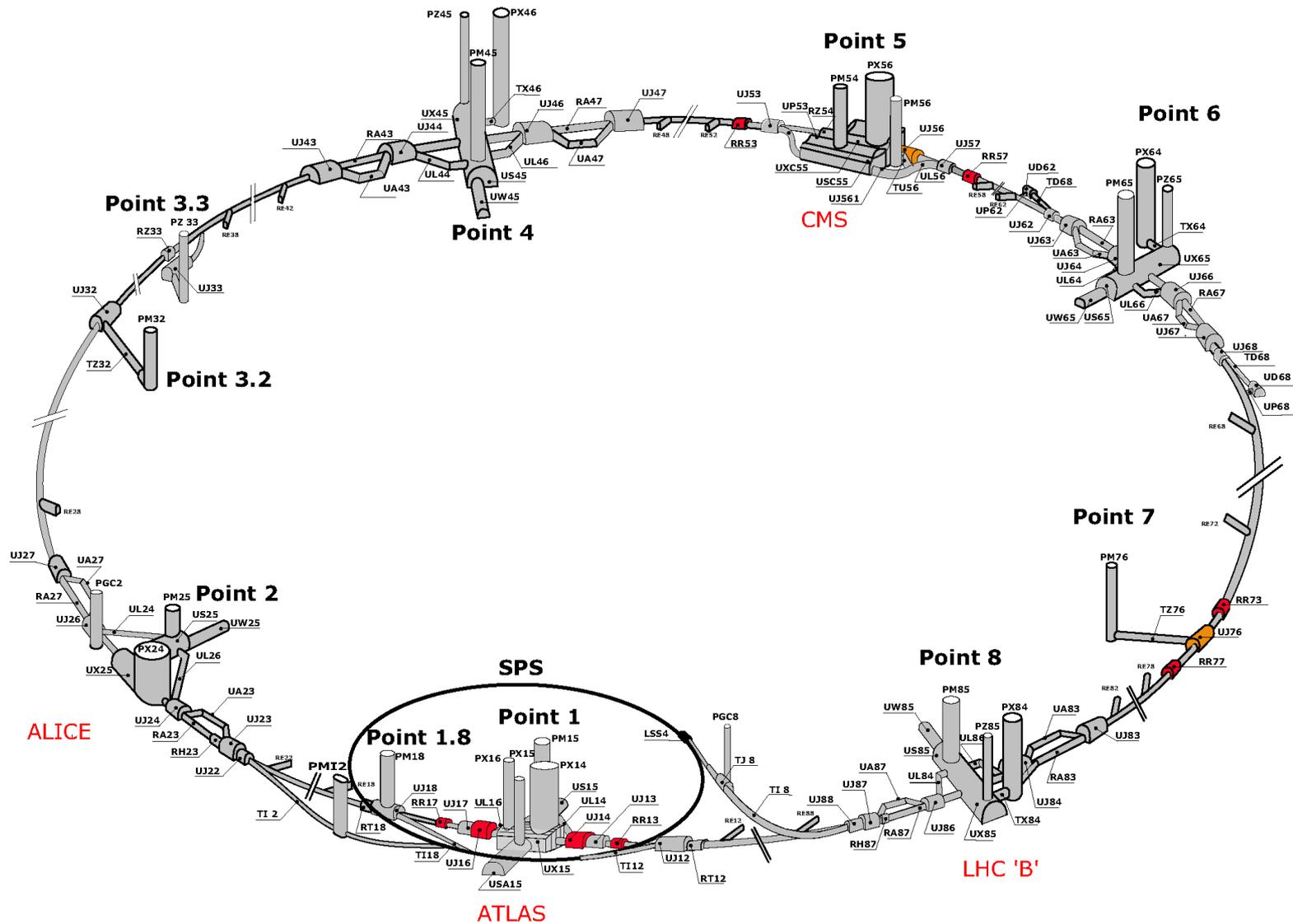
Complexe des accélérateurs du CERN



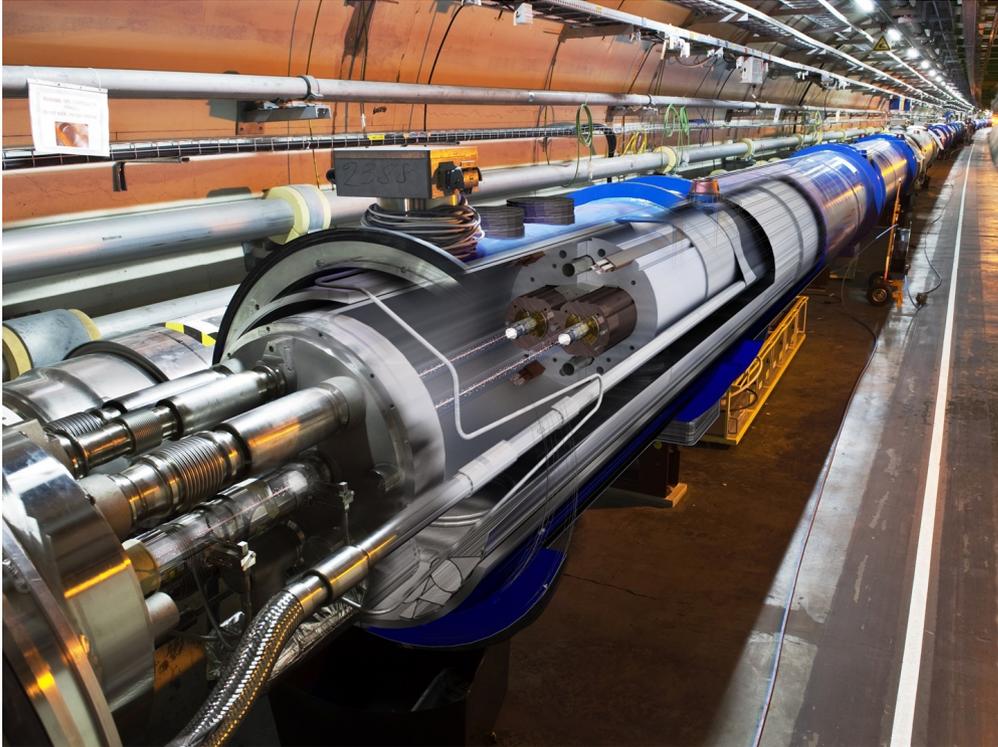
▶ p [protons] ▶ ions ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ↔ conversion proton/antiproton ▶ neutrinos ▶ électrons
 LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



Le LHC



Le LHC



Infrastructure

- 27 km de circonférence
(dont 20 km en France)
- 100 m sous terre

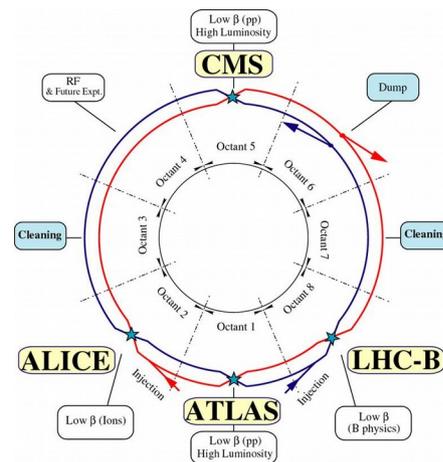
2 faisceaux de protons

- très haute intensité
 - 2800 paquets de protons par faisceau
 - cent milliards de protons par paquet
- très haute énergie
 - 7/8 TeV (14 TeV)
 - = 1 moustique en vol
 - 350 MJoules / faisceau
 - = 1 TGV @ 150 km/h
 - 99,9999991 % vitesse de la lumière
 - 11245 tours par secondes

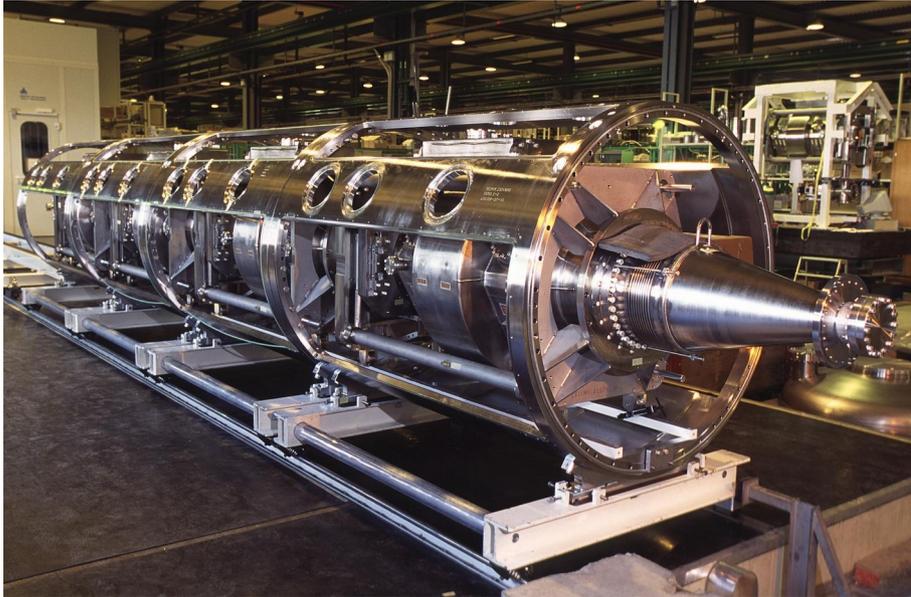
4 points de collisions : 4 expériences

ALICE – ATLAS – CMS – LHCb

- à chaque point : 1 croisement de paquets toutes les 25 ns ($25 \cdot 10^{-9}$ s) → 40 Millions / s



Le LHC



16 cavités accélératrices

9532 aimants (1232 dipôles)

→ câbles supraconducteurs (bout à bout : 5 fois la distance terre-soleil)

→ 1 dipôle : 15 m de long ; 35 tonnes

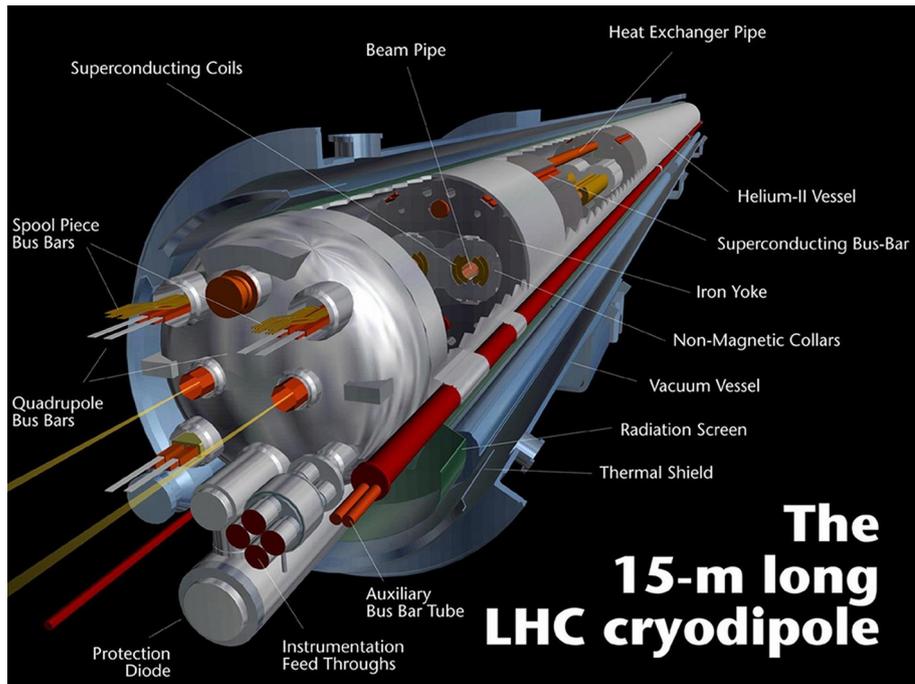
@ 1,9K (-271 °C)

→ 120 tonnes d'hélium liquide

→ plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K)

10⁻¹³ atm

→ vide 10 fois plus poussé que sur la lune



Historique

1984 : 1^{ères} idées, début de la R&D

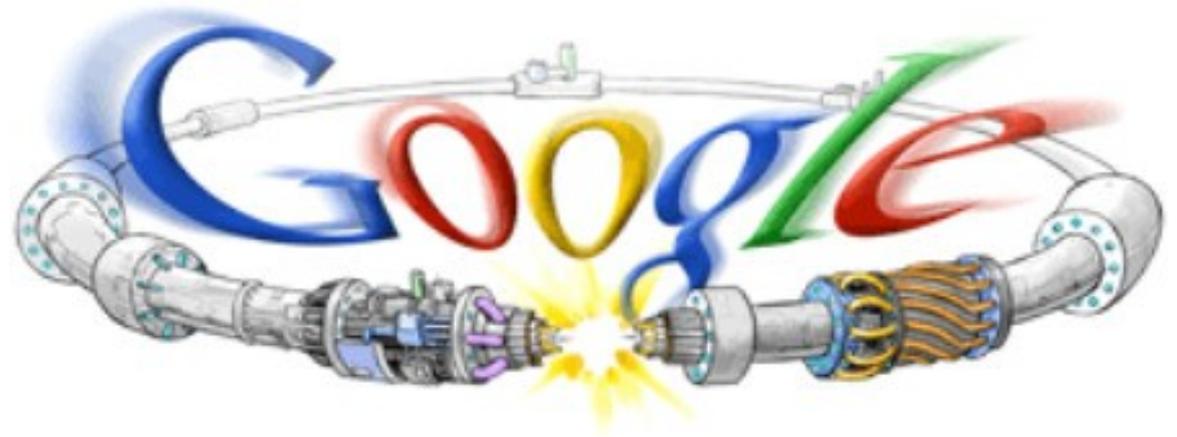
1994 : approbation par le conseil du CERN

2000 : arrêt et démantèlement du LEP

2002 : début de l'installation

2008 :

- 10 septembre : **circulation des premiers faisceaux**



Historique

1984 : 1^{ères} idées, début de la R&D

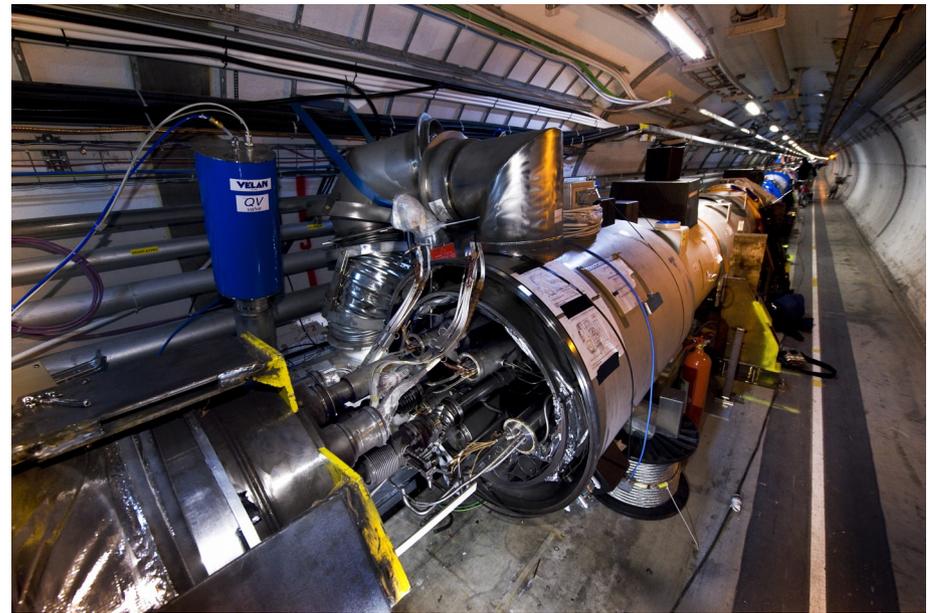
1994 : approbation par le conseil du CERN

2000 : arrêt et démantèlement du LEP

2002 : début de l'installation

2008 :

- 10 septembre : **circulation des premiers faisceaux**
- 19 septembre : incident majeur !!



Historique

1984 : 1^{ères} idées, début de la R&D

1994 : approbation par le conseil du CERN

2000 : arrêt et démantèlement du LEP

2002 : début de l'installation

2008 :

- 10 septembre : **circulation des premiers faisceaux**
- 19 septembre : incident majeur !!

2009 :

- octobre : **premières collisions de protons dans le LHC**

2010 :

- mars : **premières collisions à très haute énergie (7 TeV)**

2011-2012 :

- mars à novembre/décembre : **prise de données à haute intensité**

2013-2015 :

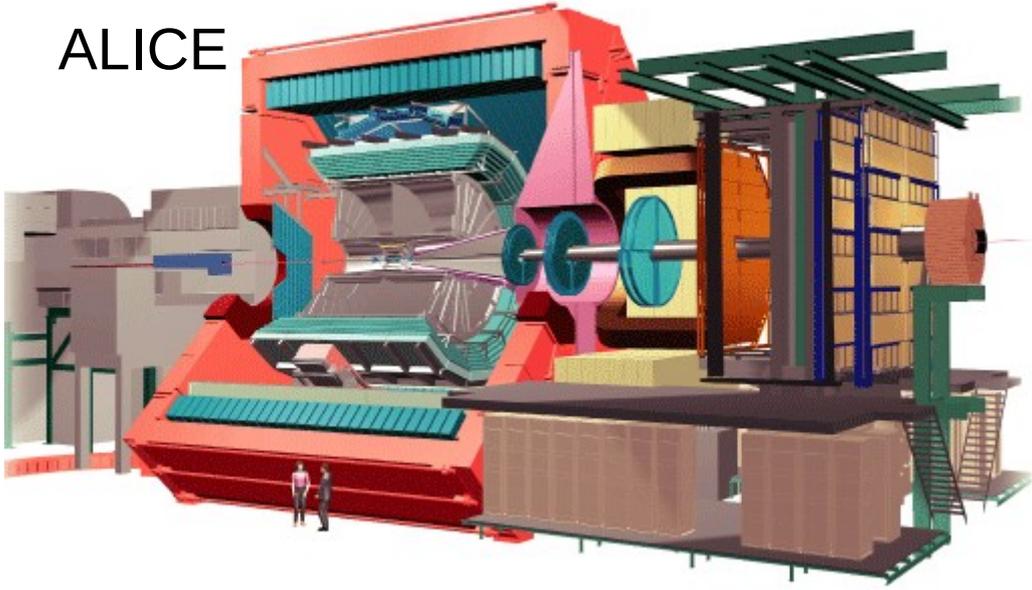
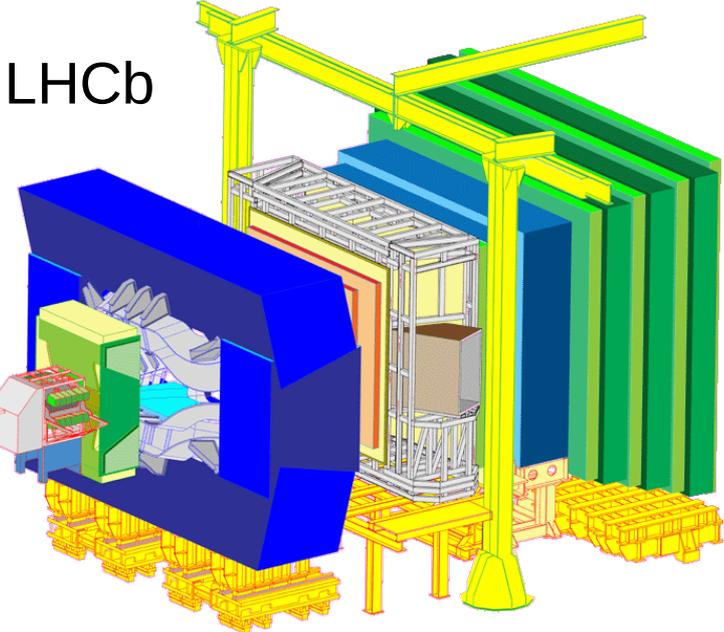
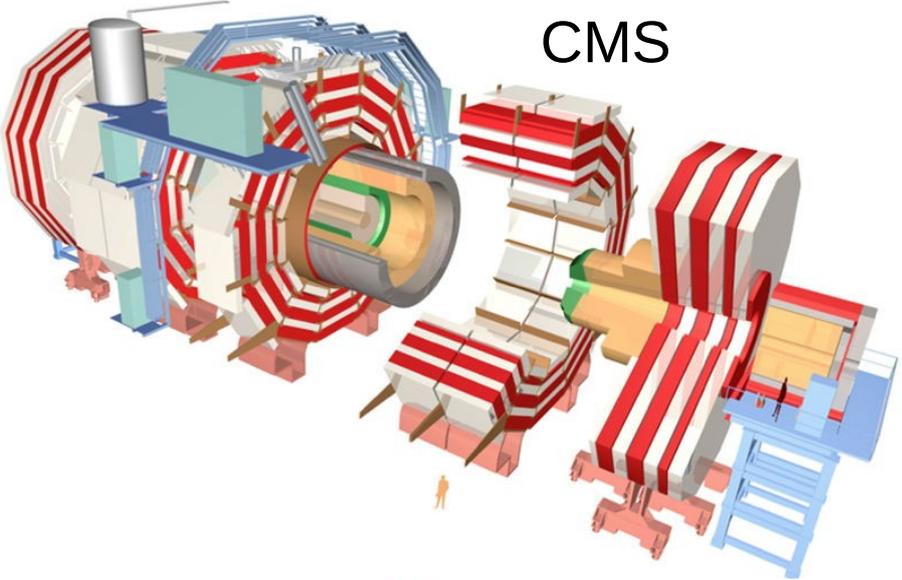
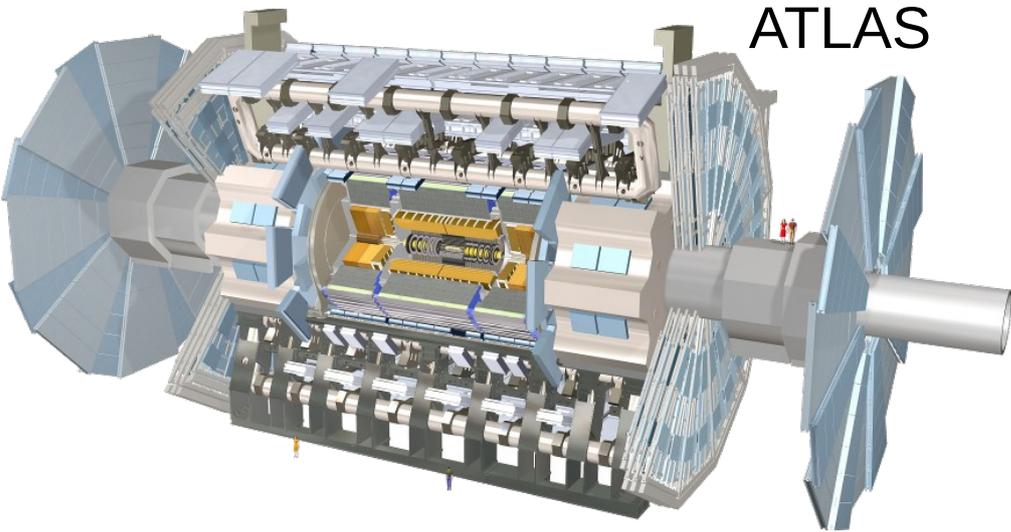
- Shutdown : **amélioration de l'accélérateur et des détecteurs**

2015 :

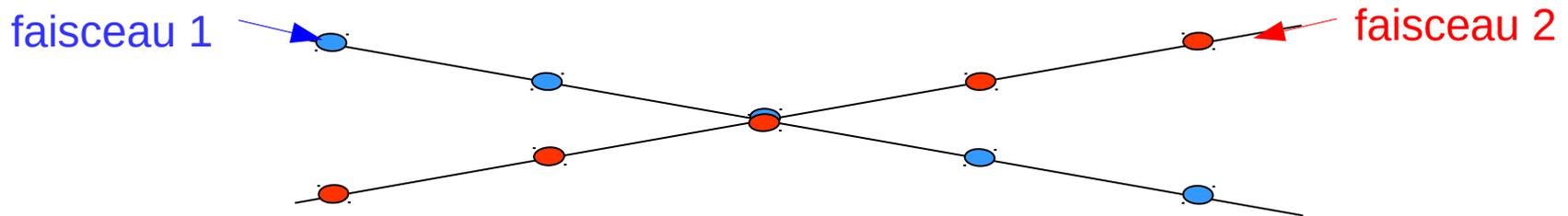
- Reprise à plus haute énergie : **13 TeV ?**



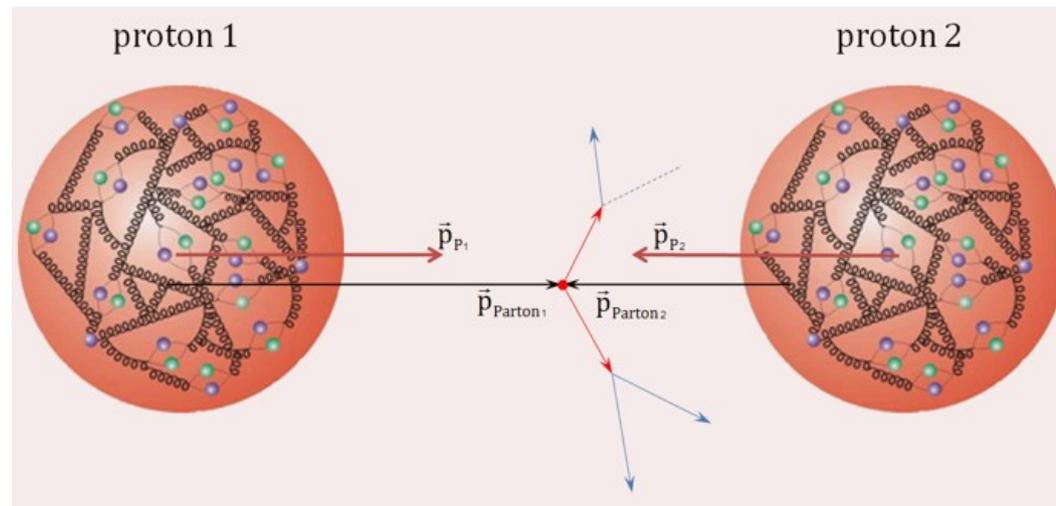
Les expériences du LHC : 4 détecteurs géants



Les collisions au LHC

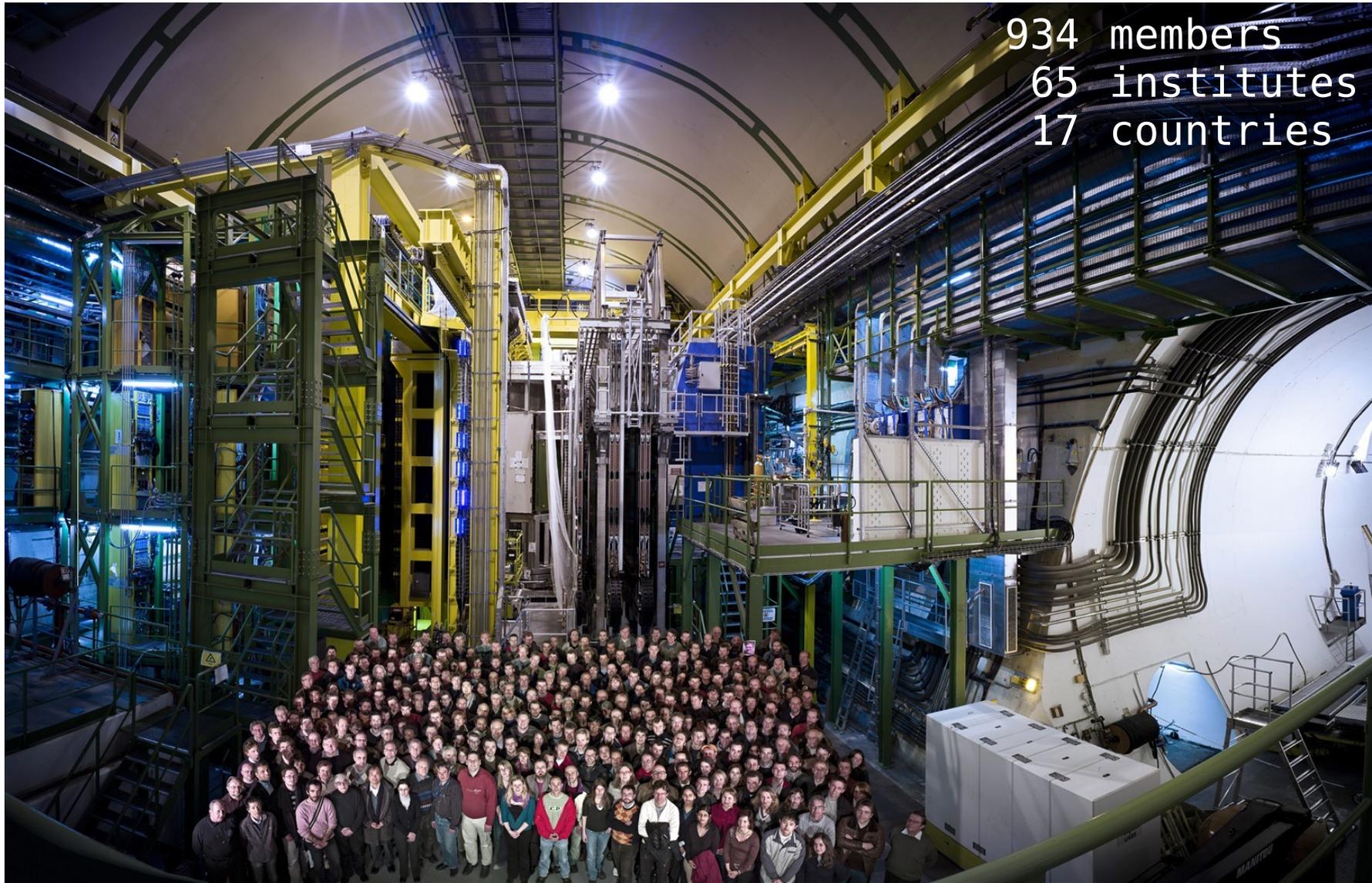


- 40 Millions de croisement par seconde
- plusieurs collisions de protons par croisement

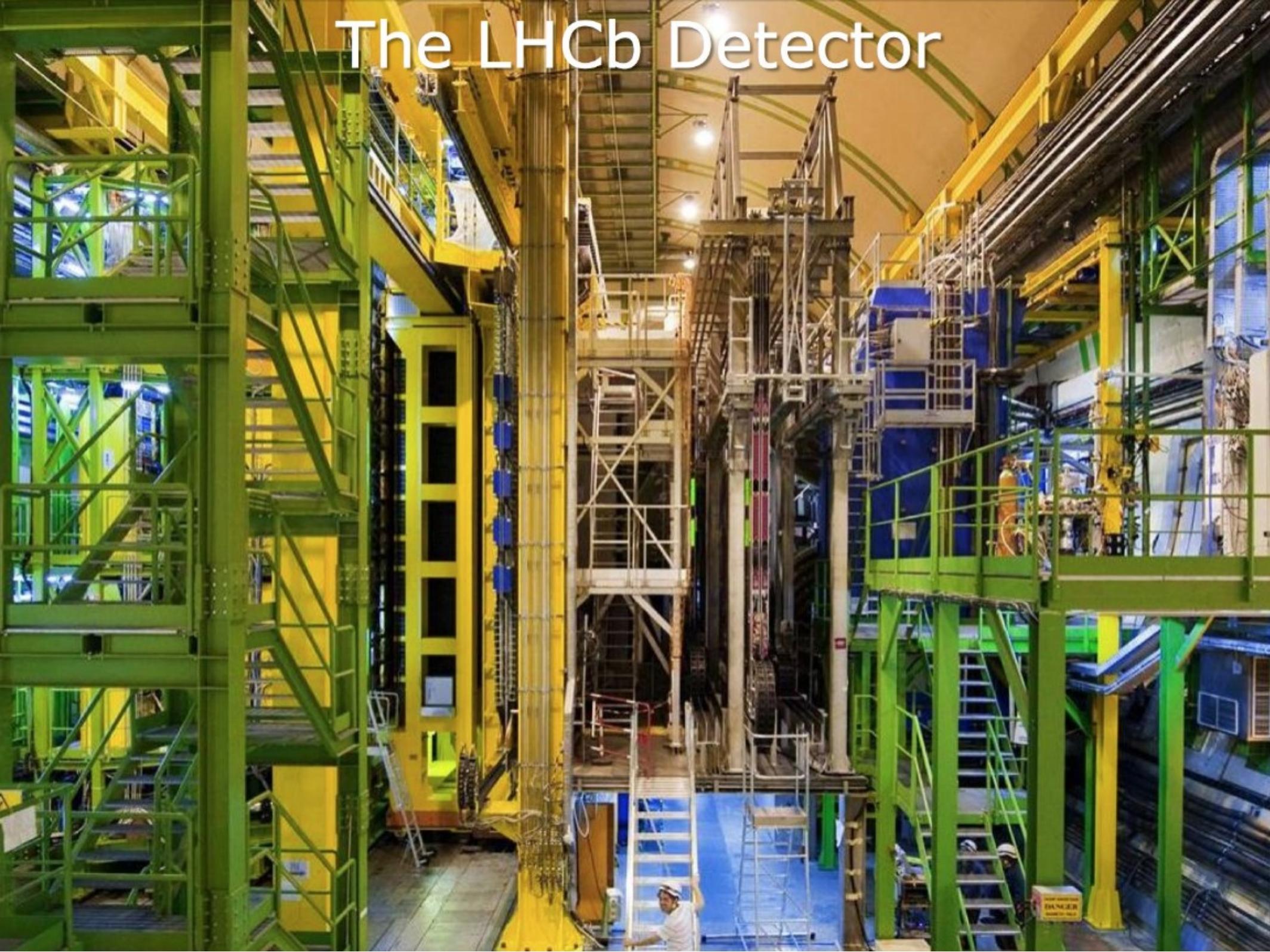


- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

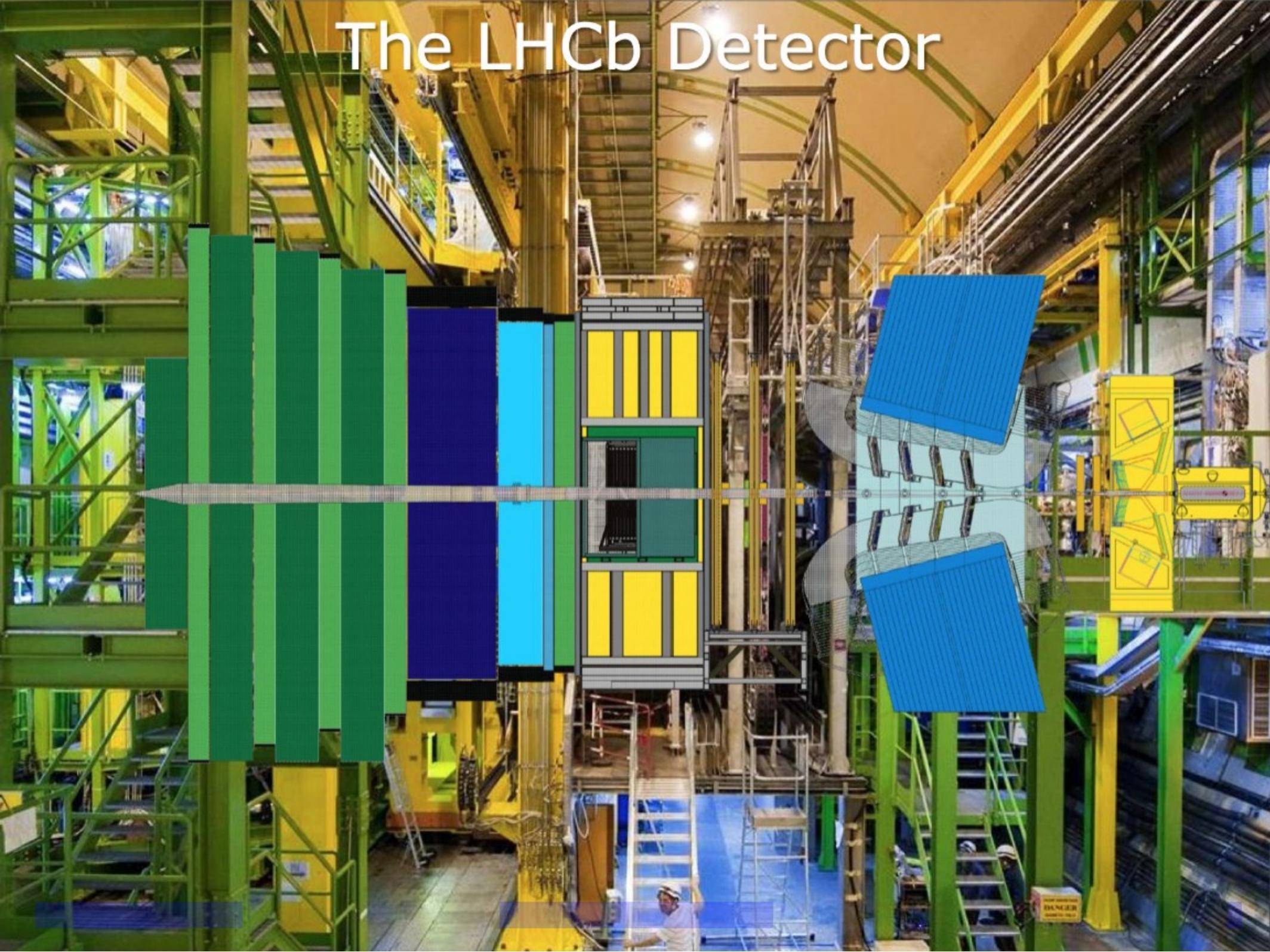
L'expérience LHCb



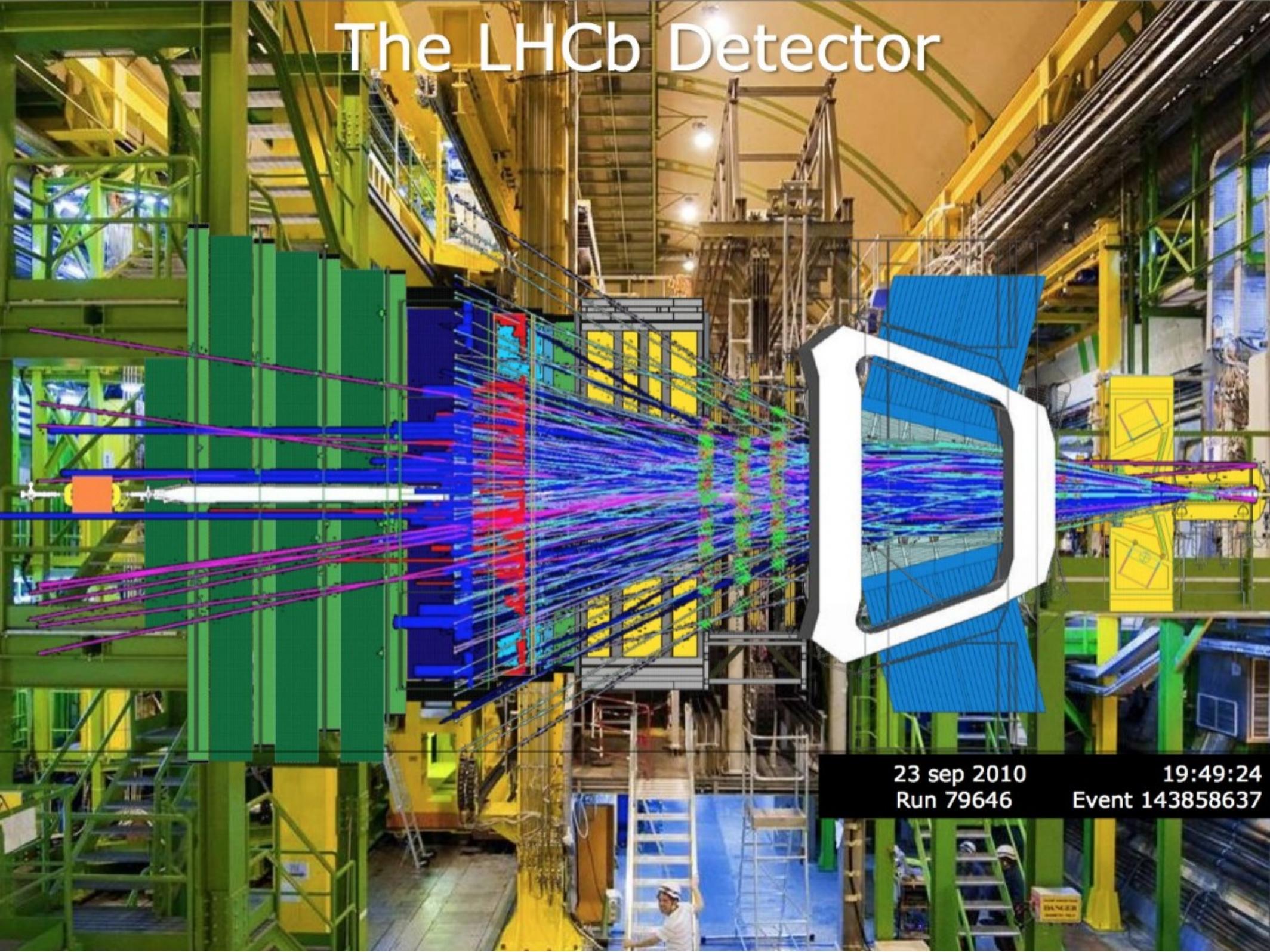
The LHCb Detector



The LHCb Detector



The LHCb Detector



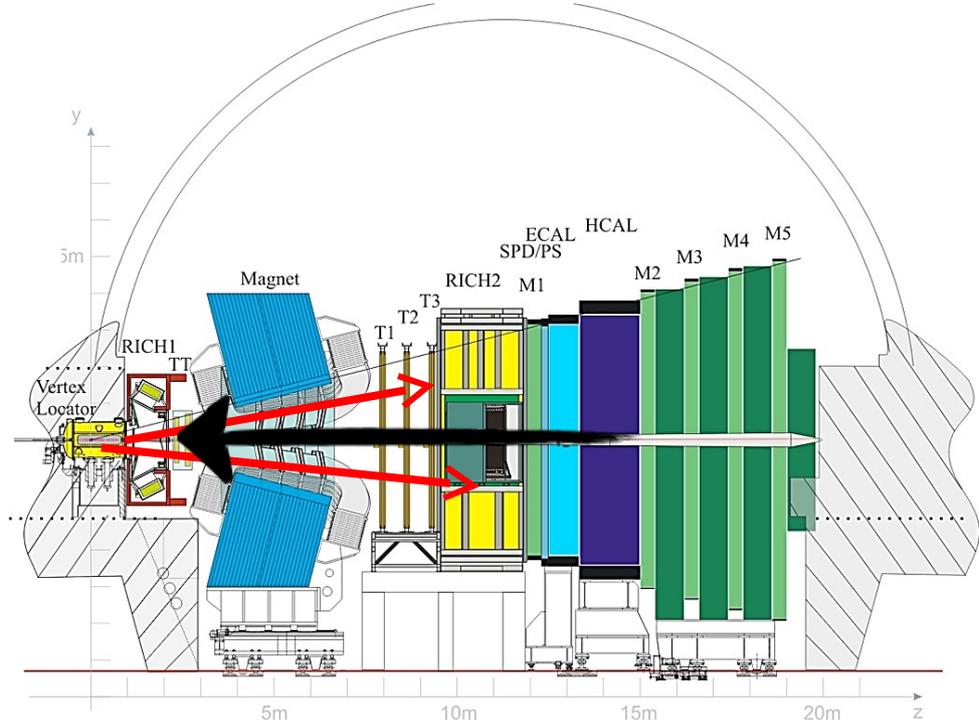
23 sep 2010
Run 79646

19:49:24
Event 143858637

DANGER

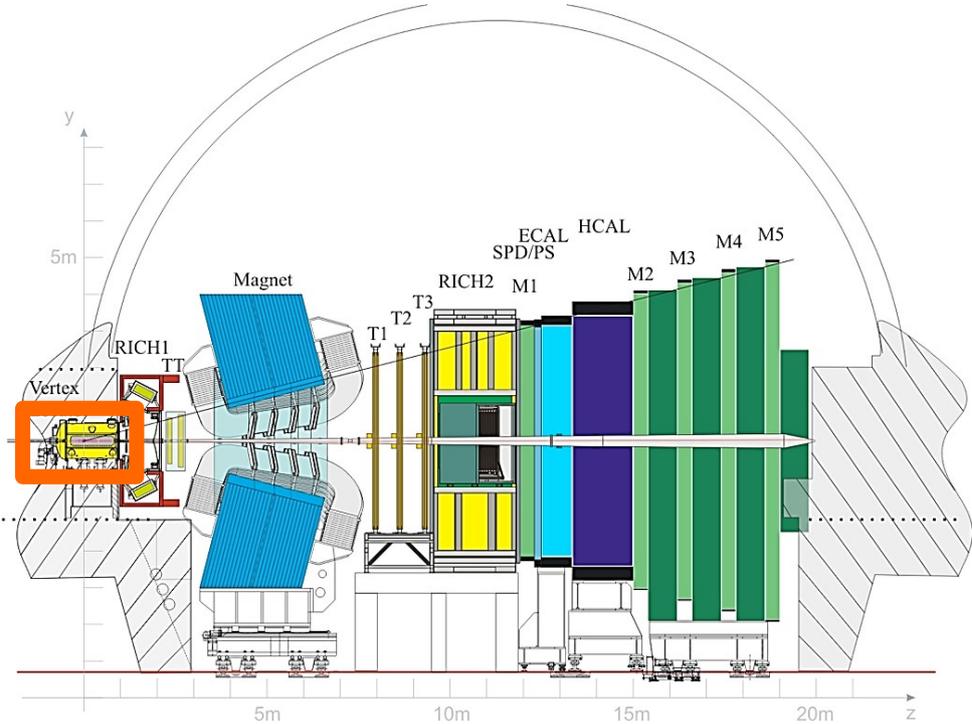
Les collisions dans LHCb

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	u up	c charm	t top
QUARKS			
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2
	d down	s strange	b bottom



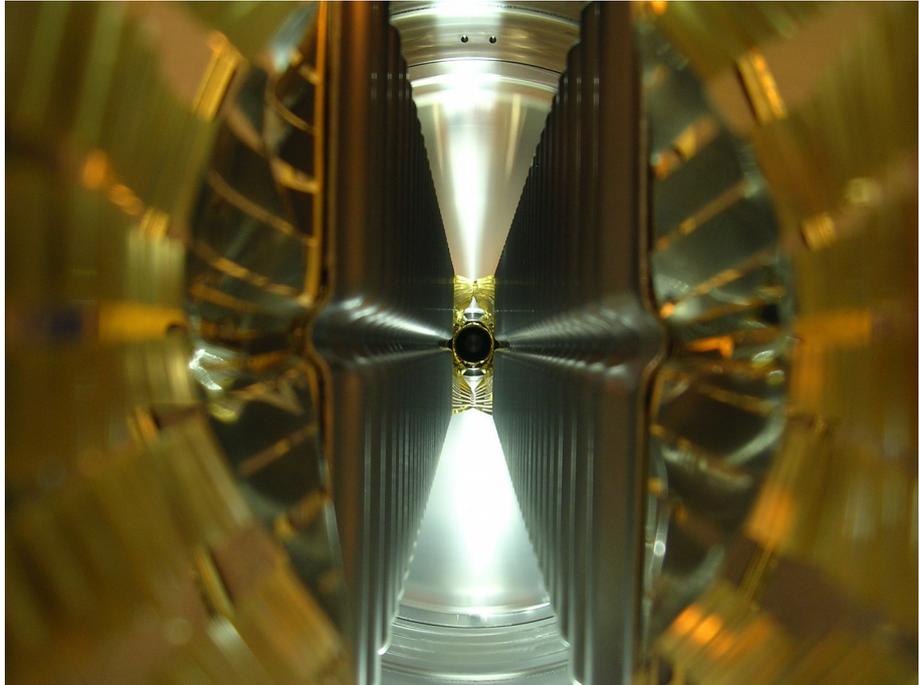
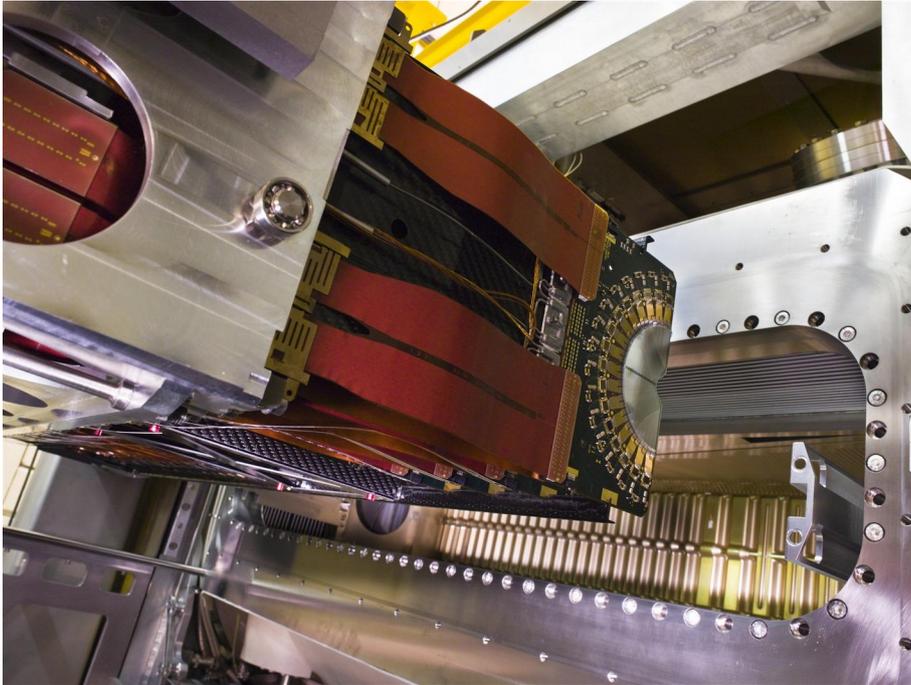
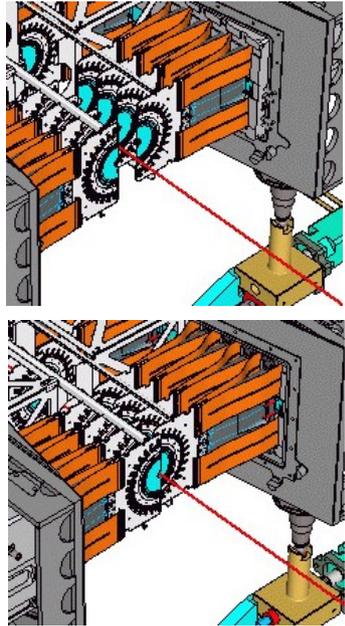
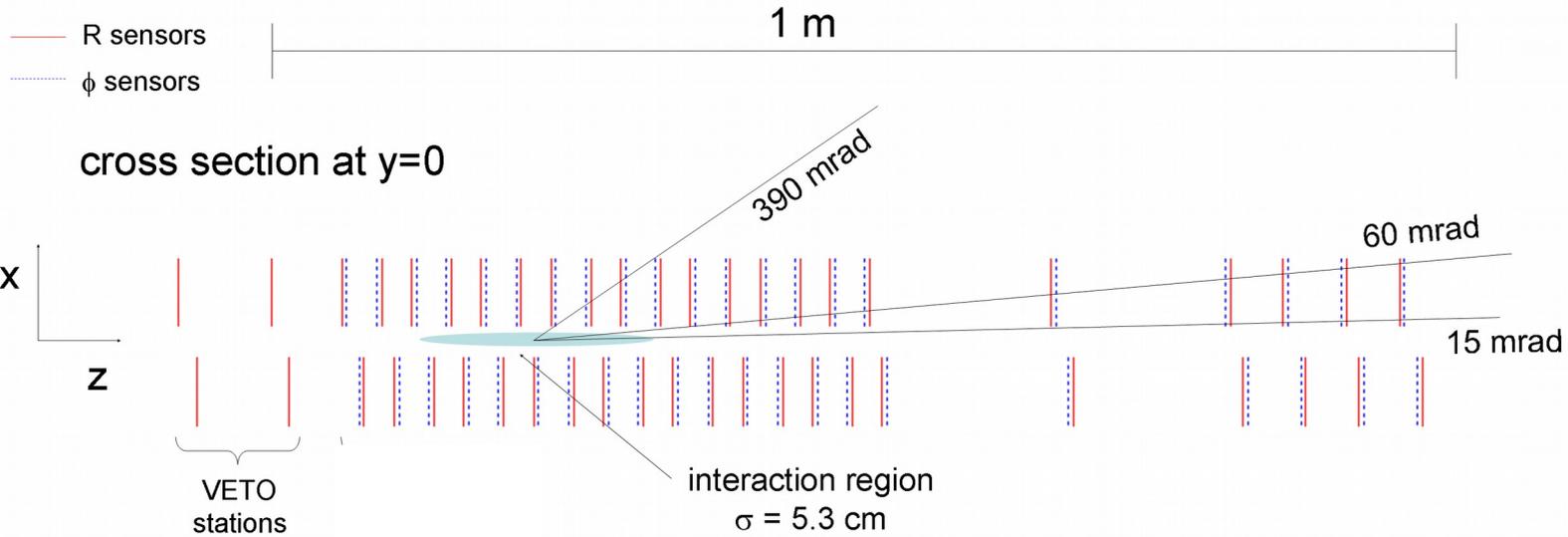
→ Contrairement à ATLAS et CMS, LHCb couvre seulement la direction vers « l'avant », car c'est là où sont produits les mésons B

Les sous-détecteur composant LHCb

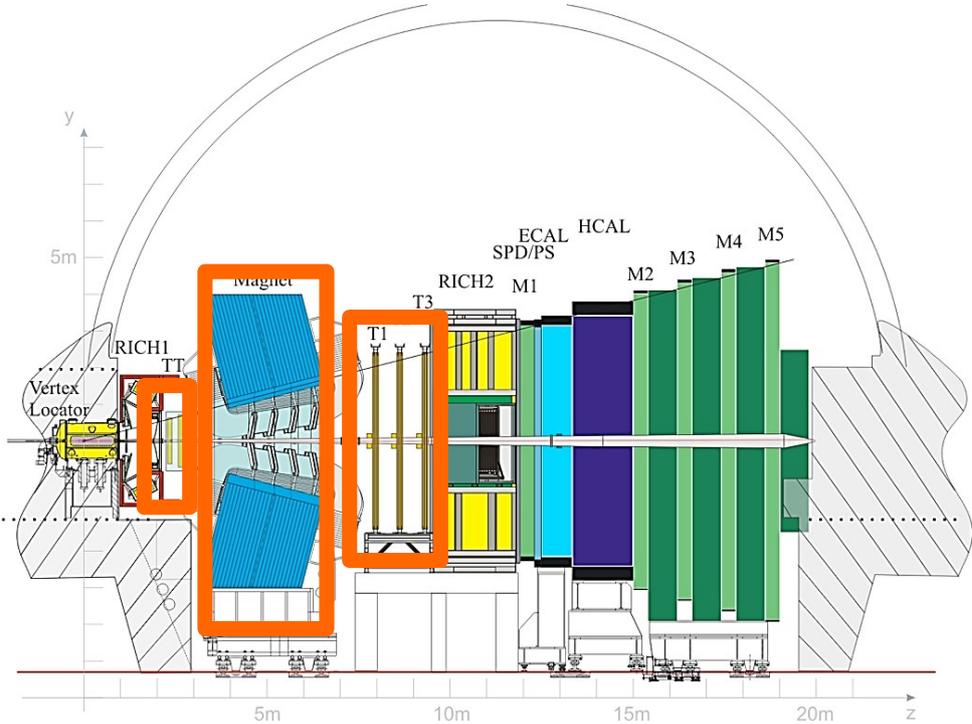


Le détecteur de vertex (VELO)

Le VELO

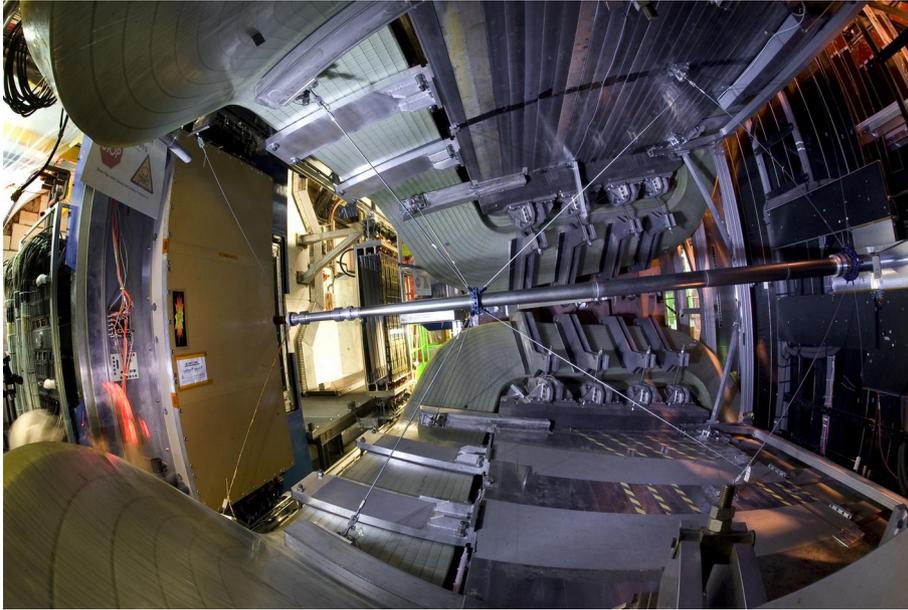


Les sous-détecteur composant LHCb



Le trajectographe

Le trajectographe

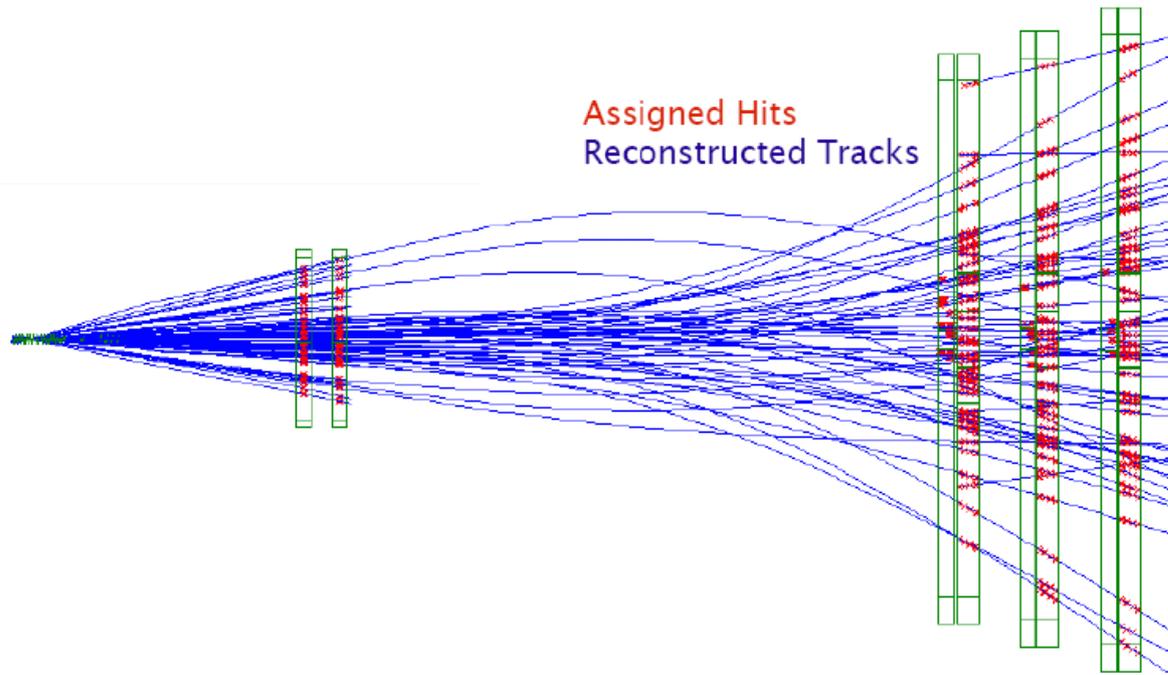


Mesure non perturbative

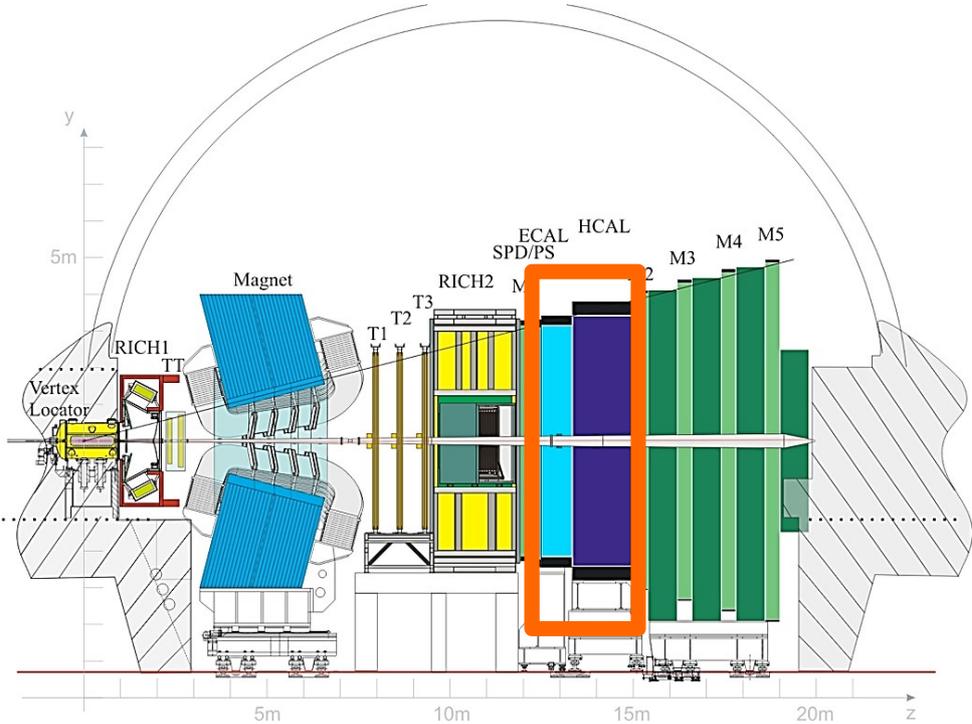
Reconstruction de la trajectoire des particules chargées

Mesure de la courbure des traces dans le champ magnétique

➤ Mesure de l'impulsion

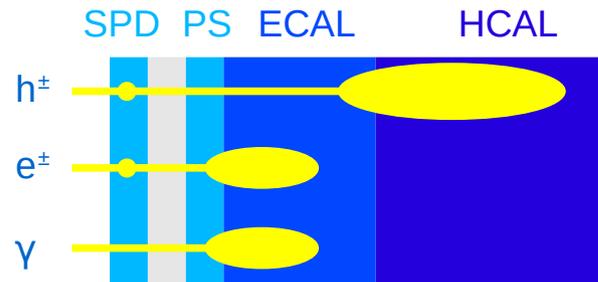


Les sous-détecteur composant LHCb



Les calorimètres

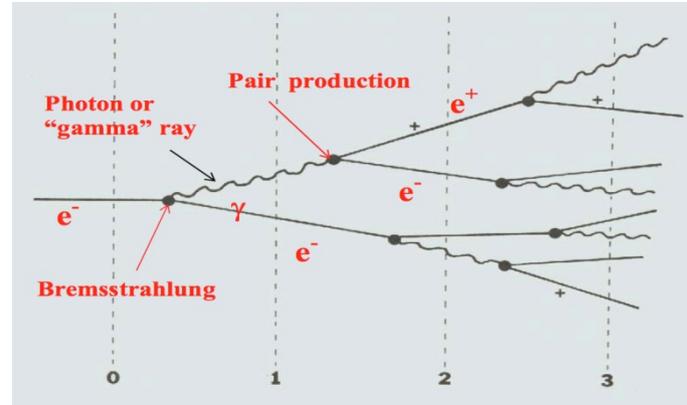
Les calorimètres



Mesure destructive

Calorimétrie électromagnétique (ECAL) :

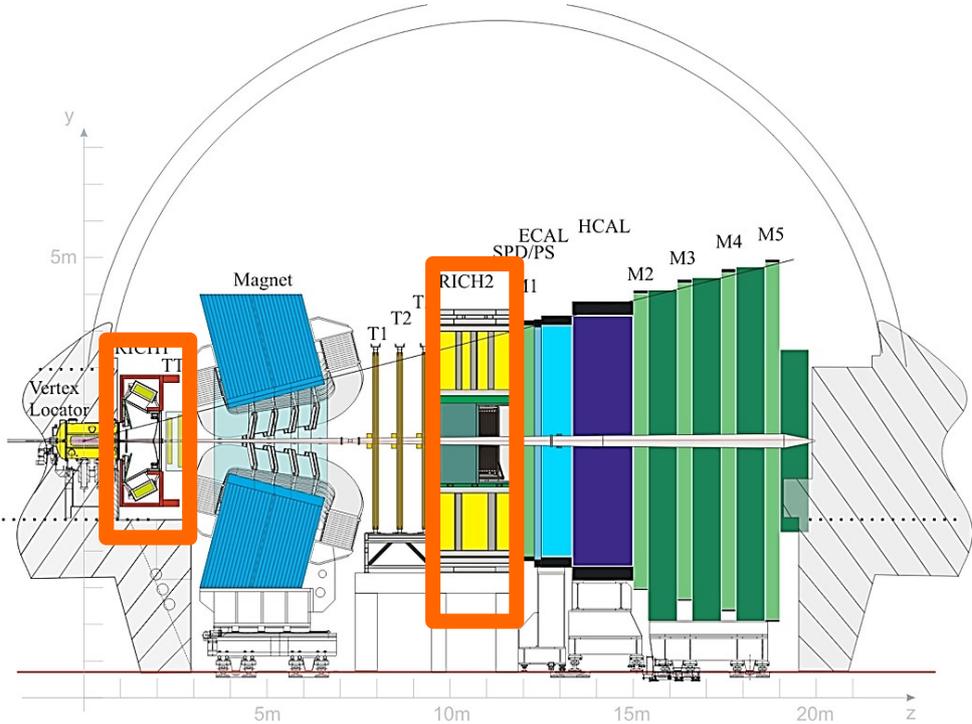
- détection des électrons :
 - création de paires $\gamma \rightarrow e^+ e^-$
 - bremsstrahlung $e^+ \rightarrow \gamma e^+$
- } gerbe électromagnétique
- détection des désintégrations $\Pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.



Calorimètre hadronique :

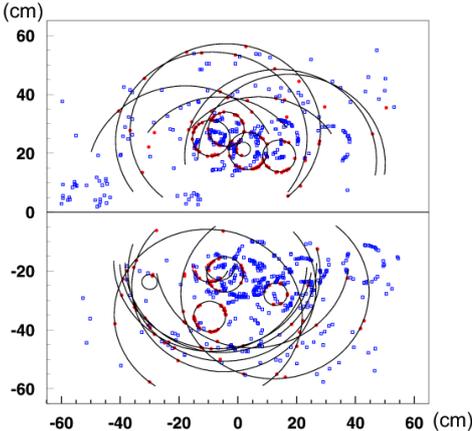
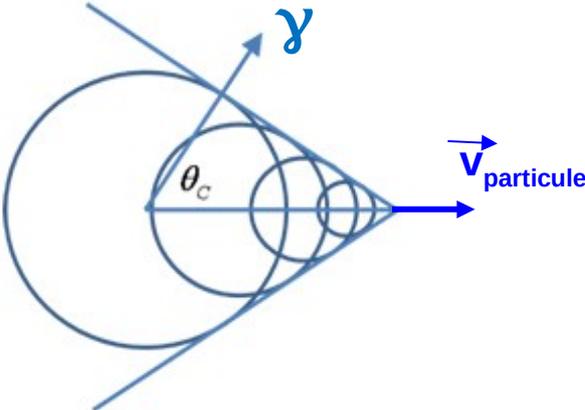
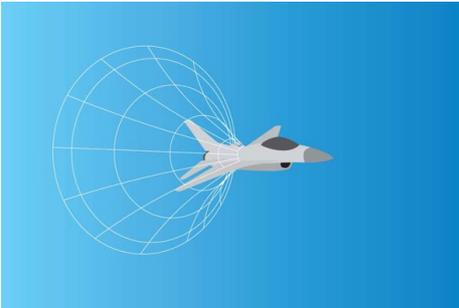
- détection des hadrons (neutron, protons, pions chargés)
- interaction forte avec les noyaux du milieu
- gerbe hadronique

Les détecteur Cerenkov

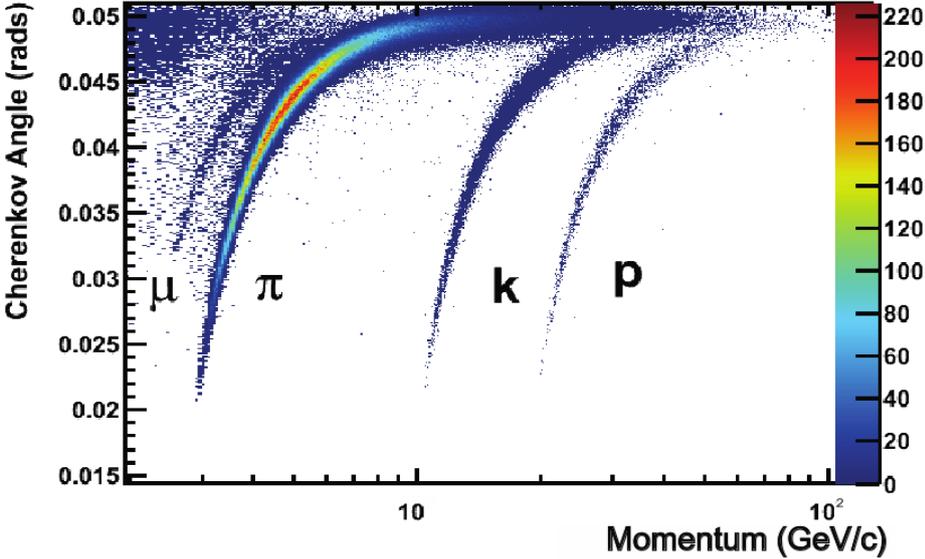
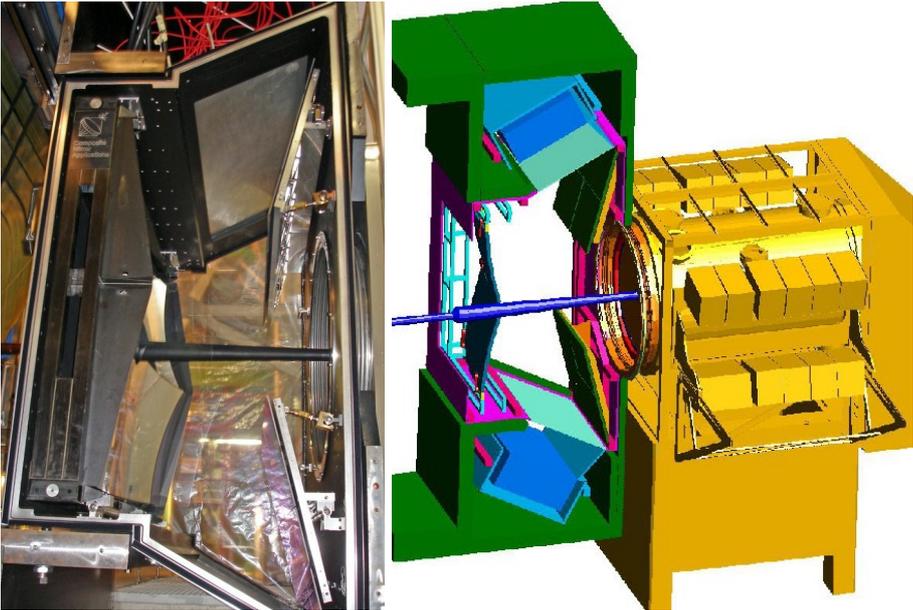


Les détecteurs Cerenkov (RICH)

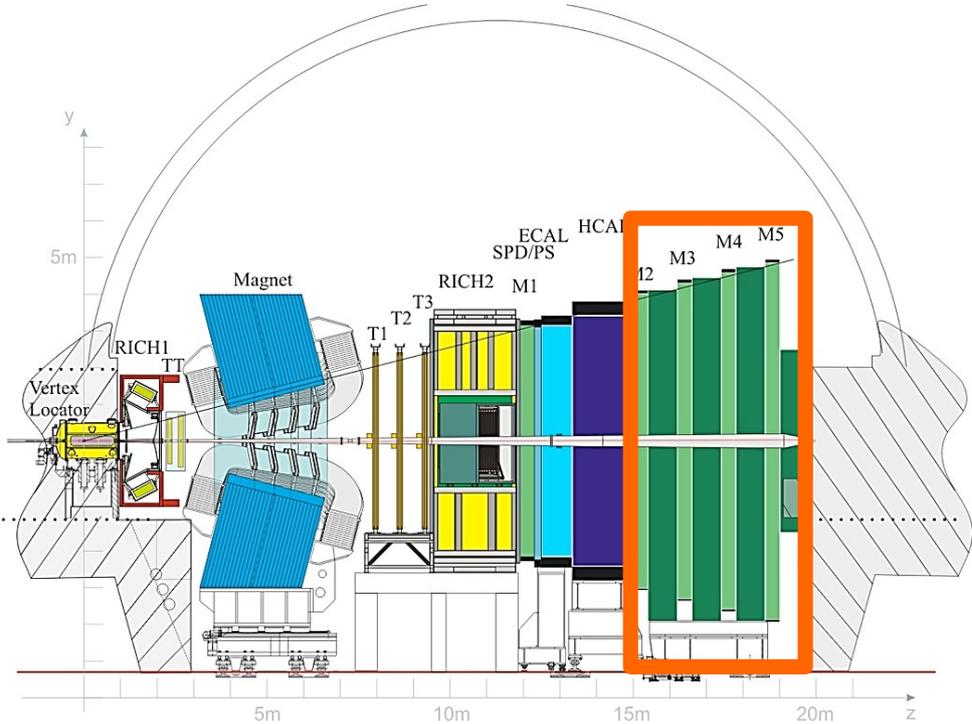
Les RICHs



Effet Cerenkov : lorsqu'une particule va plus vite que la lumière dans un milieu d'indice n , elle émet des photons (γ)

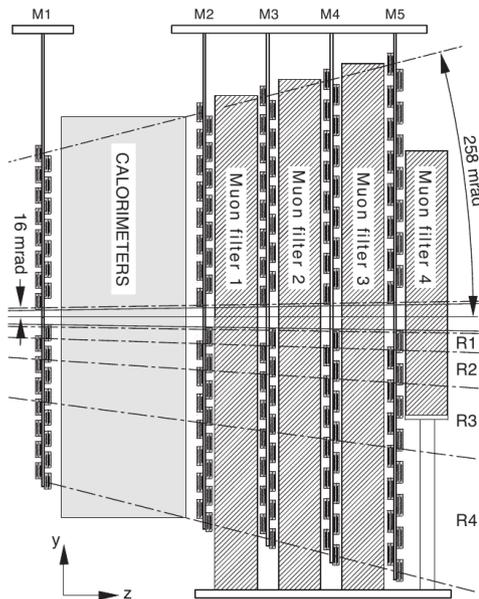


Les détecteurs de muons



Les détecteurs détecteurs de muons

Les détecteurs de muons



Muons :

- seuls particules assez pénétrantes pour traverser les calorimètres (avec les neutrinos)
- détecteurs intercalés avec des blocs de fer pour filtrer les autres particules que les muons

La prise de données

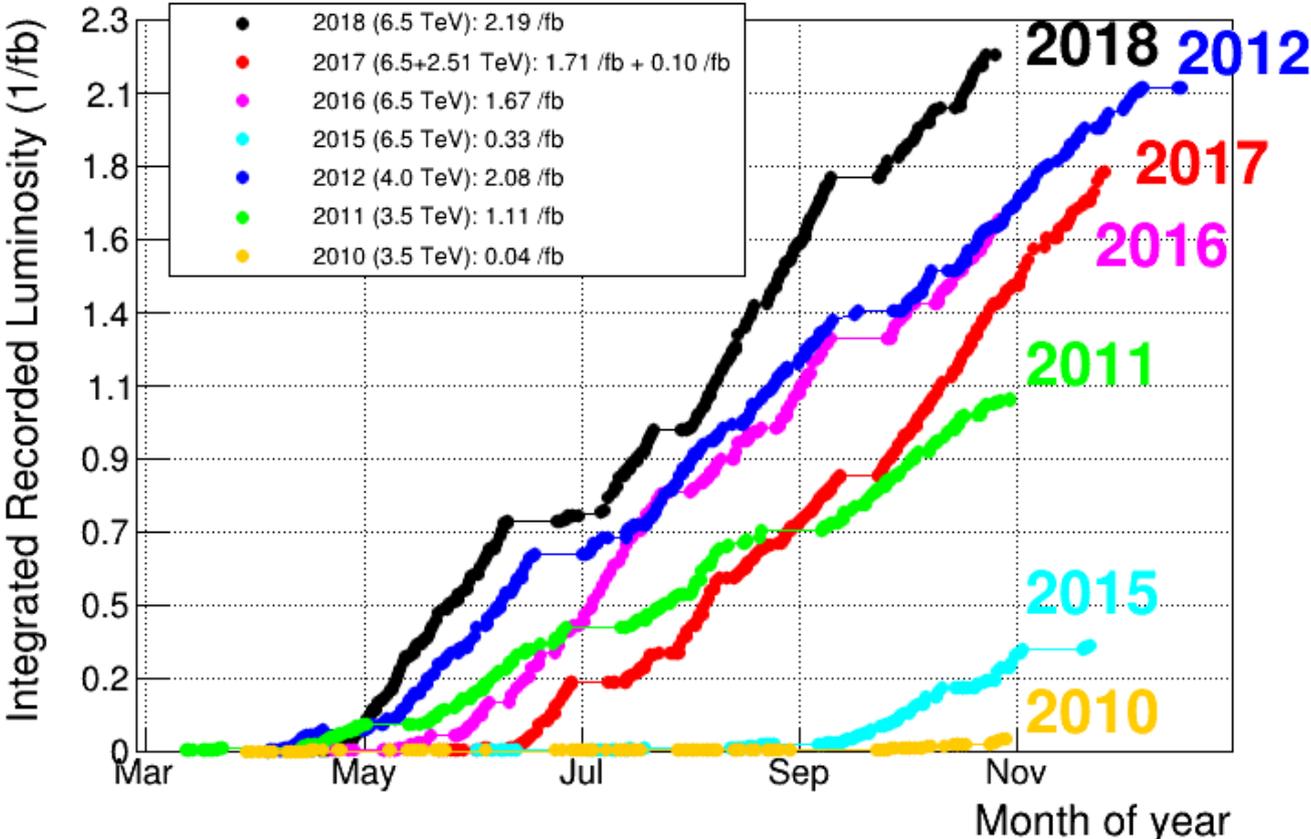
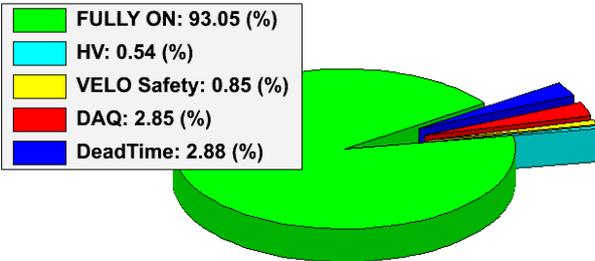


Le LHC tourne 24/24 – 7/7

- remplissage de la machine et accélération : ~ 1h
- collision tant que le faisceaux sont bons : ~10h
- astreintes (3x8) pour faire fonctionner l'expérience

La prise de données

LHCb Efficiency breakdown pp collisions 2010-2012



L'acquisition des données



40 millions de croisements de paquets de protons par seconde

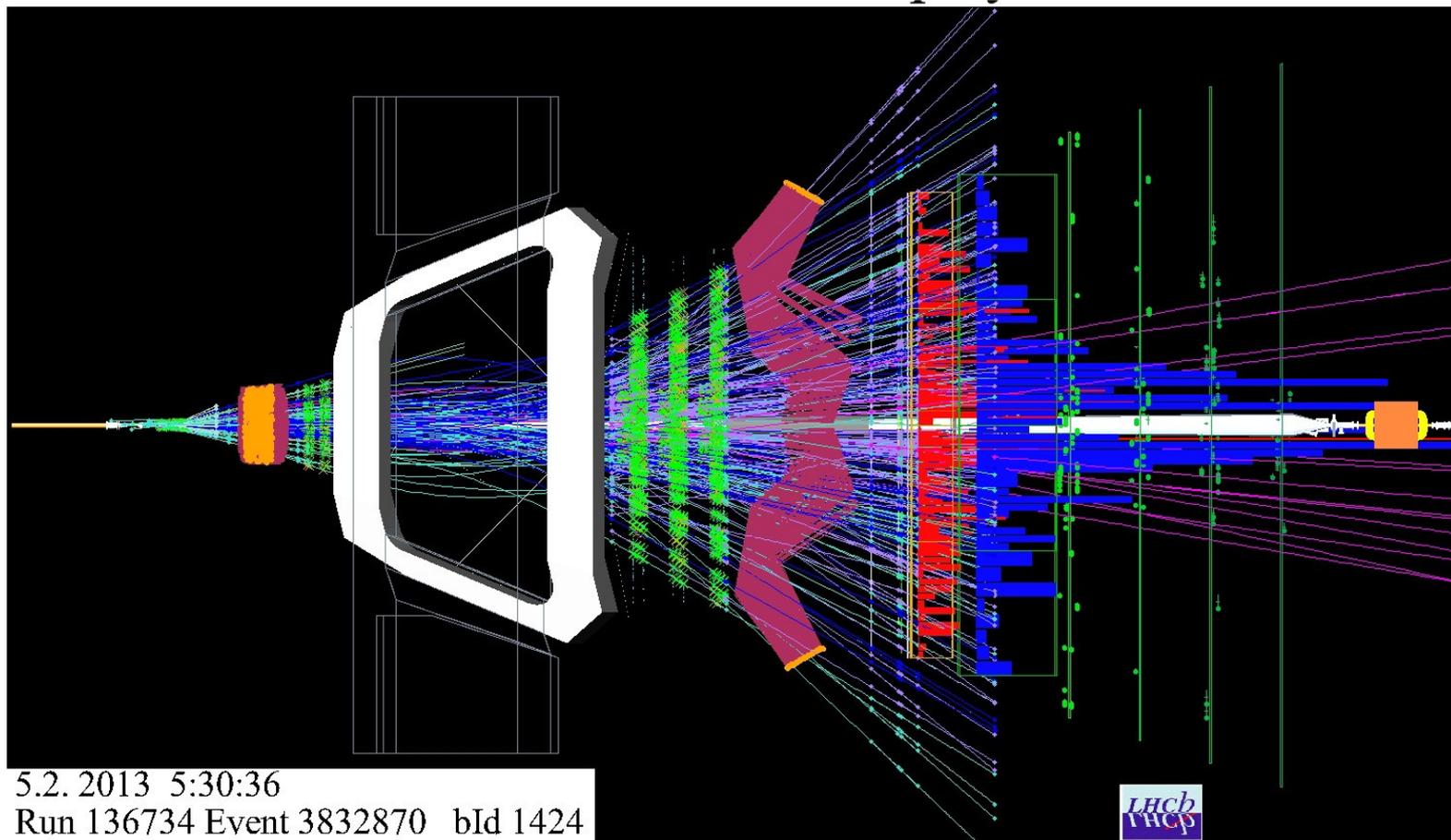
- pas toujours intéressant ...
- on recherche des processus particuliers qui sont souvent rares

↘ Il faut filtrer !

- système de déclenchement
- on enregistre les événements qui paraissent intéressant et on rejette le reste
- pas facile de faire le tri en temps réel !
- LHCb : on enregistre 5000 evts/s (~ 200 GBytes / s)

Le système de déclenchement à muons de niveau 0
MADE in CPPM !!

La reconstruction des données



A partir des signaux recueillis dans chaque sous-détecteur :

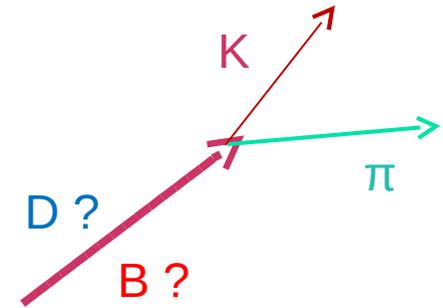
- reconstruction impulsion, énergie des particules suffisamment stables
- détermination de leur nature

L'analyse de données : une astuce

Avec les énergies et les impulsions mesurées pour **K** et π , on détermine la masse invariante de la particule mère

On compare avec la masse (connue) des B et D

→ Ça n'est peut être pas exactement la même à cause de la résolution!



D^0

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

$$\text{Mass } m = 1864.83 \pm 0.14 \text{ MeV}$$

B^0

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

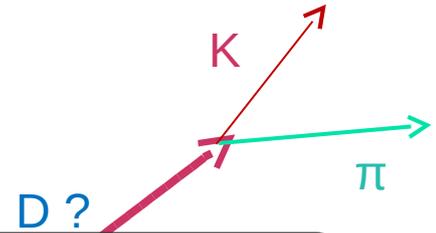
I, J, P need confirmation. Quantum numbers shown are quark-model predictions.

$$\text{Mass } m_{B^0} = 5279.50 \pm 0.30 \text{ MeV}$$

50

L'analyse de données : une astuce

Avec les énergies et les impulsions mesurées pour K et π , on détermine la masse invariante de la particule mère
On compare avec la masse (connue) des B et D



A VOUS DE JOUER !