

Conférences CPPM : cycle 2008

1. 100 ans d'exploration en physique des particules : de Becquerel au LHC...

26 janvier 2008, Maximilien Melissas

2. - Le LHC – la machine à remonter le temps

01 mars 2008, Fabrice Hubaut

3. - Le LHC - objectifs scientifiques : le Higgs

29 mars 2008, Sylvain Tisserant

4. - **Le LHC - objectifs scientifiques : l'antimatière, les dimensions supplémentaires**

26 avril 2008, Julien Cogan

5. - A la croisée des deux infinis

17 mai 2008, Damien Dornic

6. - La cosmologie

07 juin 2008, Charling Tao

7. - Du LHC à l'imagerie médicale

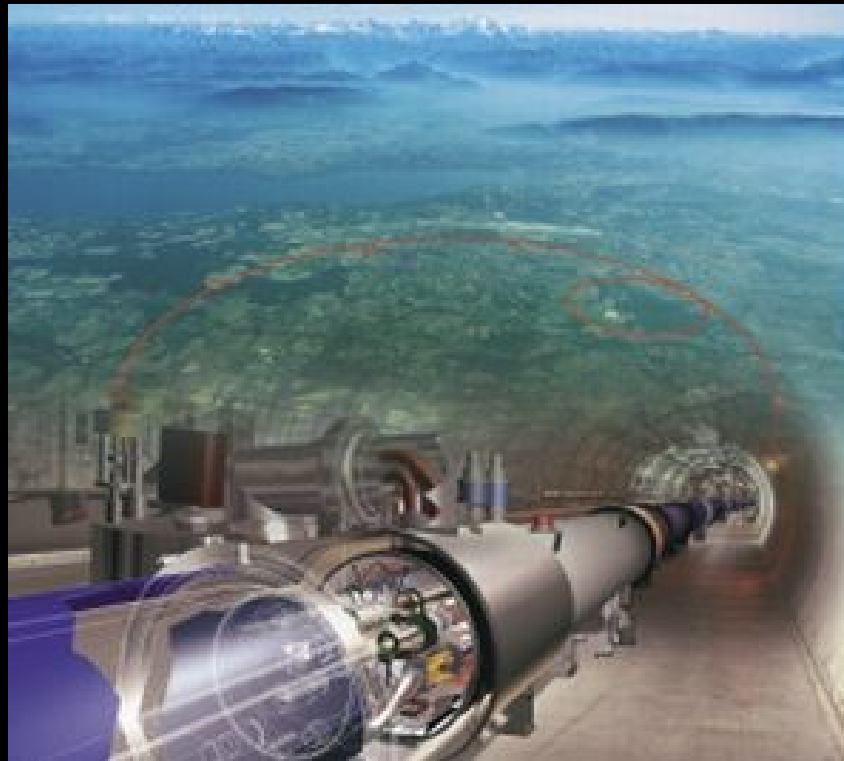
18 octobre 2008, Jean-Claude Clemens

8. - La recherche à hautes énergies : incitateur de hautes technologies depuis 100 ans

15 novembre 2008

9. - Nouvelles du LHC

Les objectifs scientifiques du LHC : matière & anti-matière, ...



Julien Cogan

Sommaire

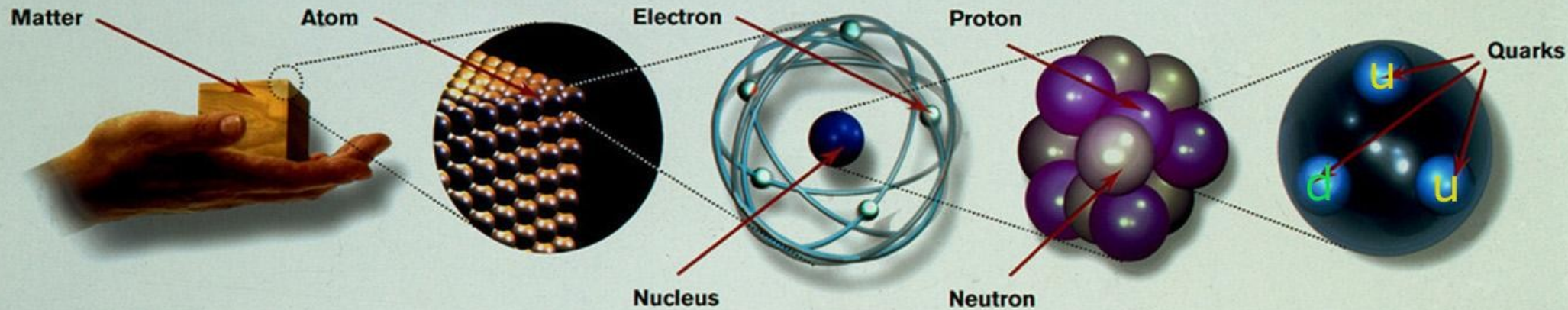
Descente vers l'infiniment petit : structure la matière ordinaire

Le Modèle Standard de la physique des particules

Au delà du Modèle Standard

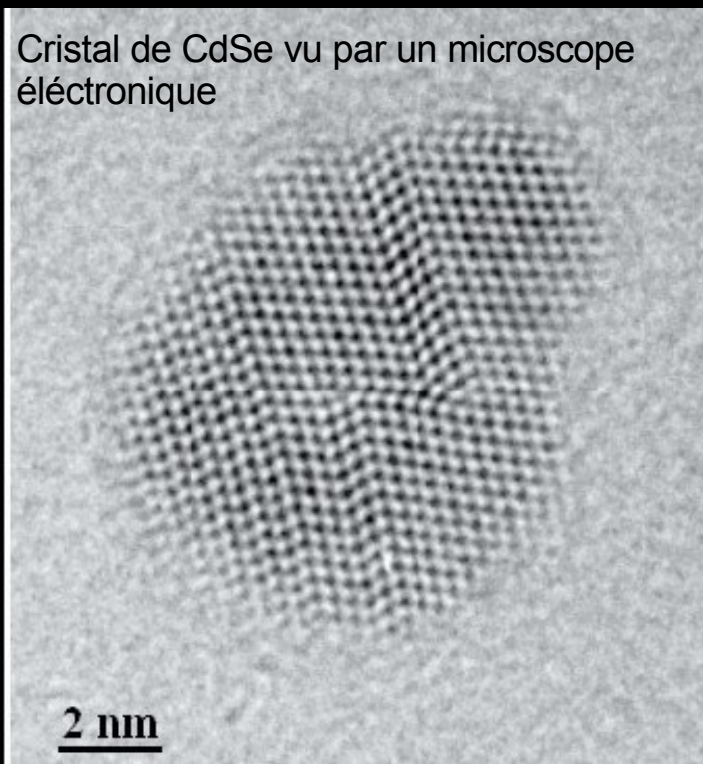
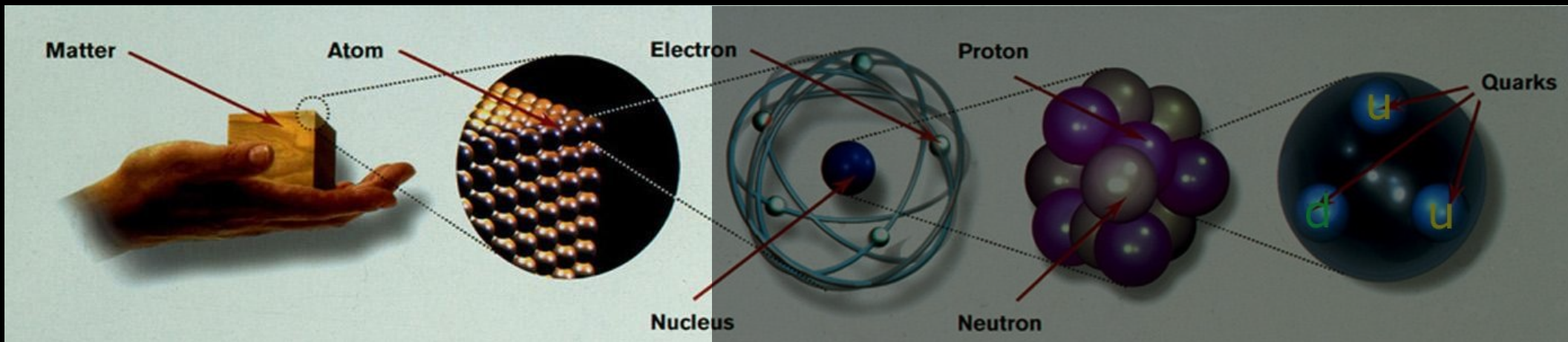
Et encore au delà ?

Descente vers l'infiniment petit



Structure de la matière ordinaires
ses constituants élémentaires et leurs interactions

Descente vers l'infiniment petit



La matière qui nous entoure tient ses propriétés des molécules qui la composent.

Les molécules sont un assemblage d'atomes.

Comment ces molécules se forment ? Comment interagissent-elles ? D'où tire-t-elle leurs propriétés ?

→ structure de l'atome

Descente vers l'infiniment petit

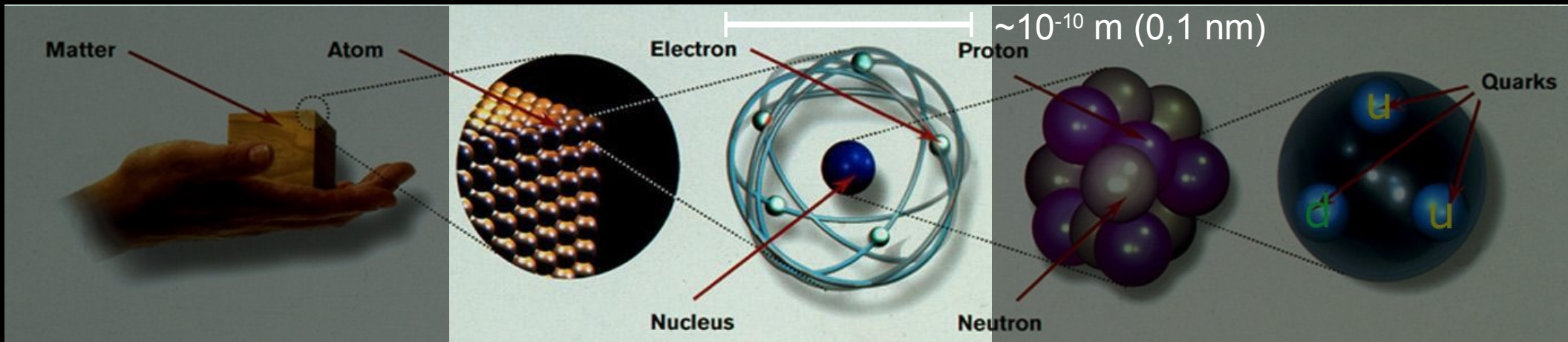


Table des éléments atomiques :

Etat physique du corps simple(25°C,1 atm)																			
SOLIDE						LIQUIDE				GAZEUX				SYNTHÈSE					
* Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
# Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				
1																		18	
1	H																	He	
2	Li	Be																Ne	
3	Na	Mg																Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										

Atomes composés :

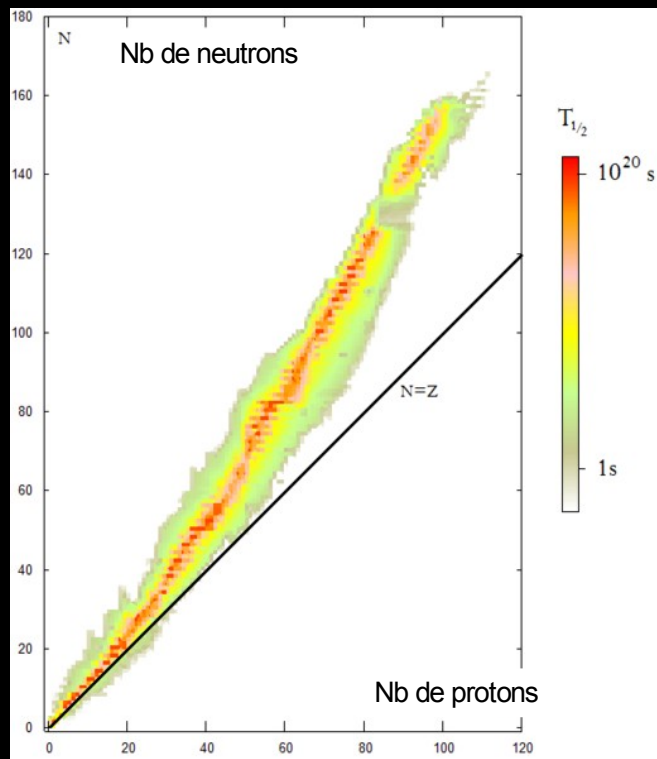
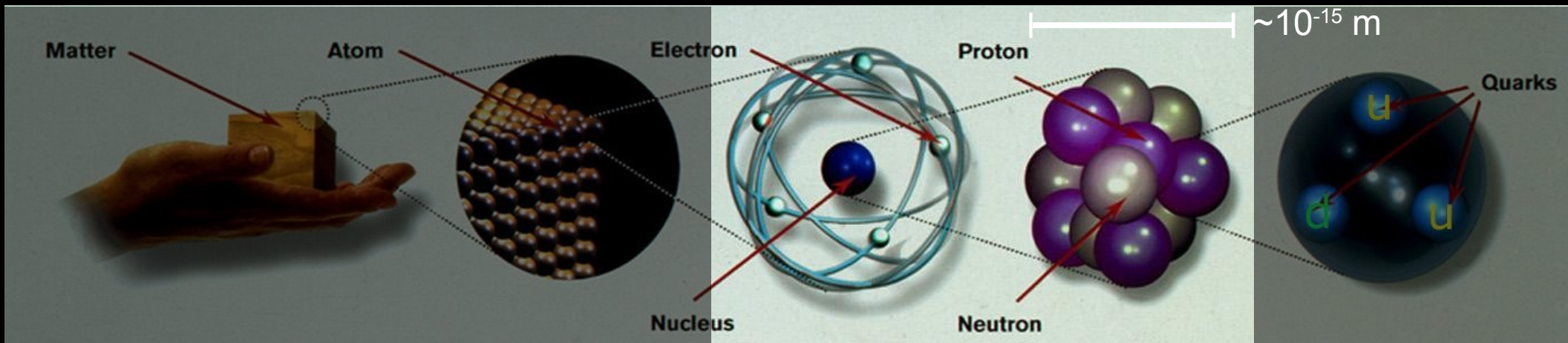
- d'un noyau
 - $\sim 100\ 000$ x plus petit que l'atome
- d'un nuage d'électron en orbite autour du noyau
 - régit les interactions entre atomes ou molécules

→ **interaction électromagnétique**

Qu'est-ce qui différencie ces atomes ?

→ structure du noyau

Descente vers l'infiniment petit



Noyau atomique formé de nucléons : protons & neutrons.

Le nombre de protons (=nombre d'électrons) détermine la nature de l'élément chimique.

La cohésion du noyau est assurée par :

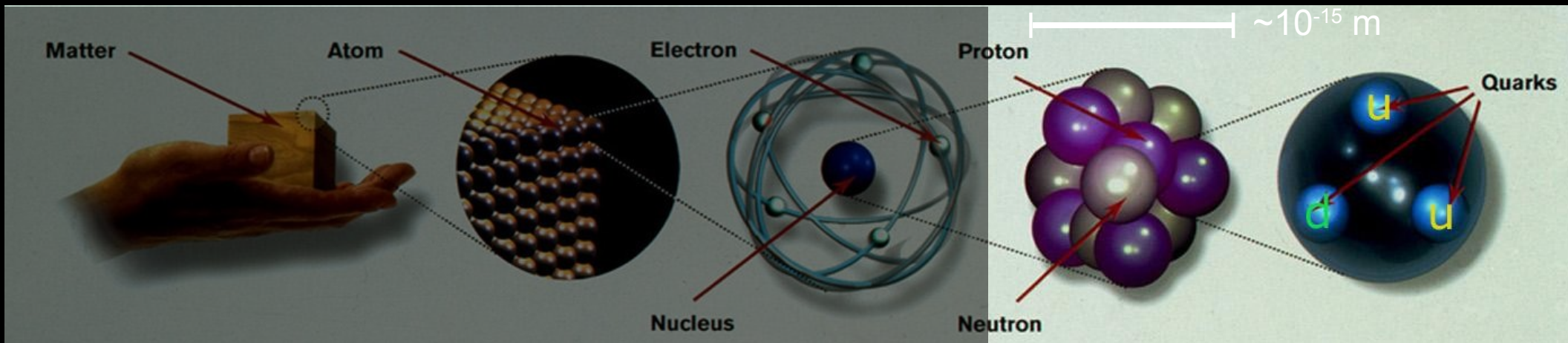
→ **l'interaction forte**

La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de nucléons qui le composent.

Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un electron et un neutrino : e.g. $\text{Co} \rightarrow \text{Ni} + e + \nu$

→ **interaction faible**

Descente vers l'infiniment petit



Nucléons (protons & neutrons) sont constitués de quarks

2 types de quarks (à ce stade) :

- Up ($q=+2/3$) : u
- Down ($q=-1/3$) : d

Teneur en quarks de nucléons :

- proton ($q=1$) : uud
- neutron ($q=0$) : udd

Les quarks sont confinés à l'intérieur de nucléons par l'**interaction forte**

Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

Constituants élémentaires :

q nom			
Quarks	+2/3	up	}
	-1/3	down	
Leptons	-1	electron	}
	0	neutrino	

sensible à l'interaction forte

ne réagissent pas à l'interaction forte

Interactions fondamentales :

- gravitation (trop faible : pas de rôle en physique des particules)
- faible (agit sur toutes les particules)
- électromagnétique (agit sur les particules chargées électriquement)
- forte (agit sur les quarks seulement)

→ **Est-ce tout ?**

Descente vers l'infiniment petit

Autre forme de matière

1 ^{ère} famille				2 ^{ème} famille		3 ^{ème} famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	μ	tau	τ
	0	neutrino	ν_e	neutrino muon	ν_μ	neutrino tau	ν_τ

Il existe 2 autres générations de particules en plus de celles composant la matière ordinaire :

- même structure (même contenu en quark et leptons)
- dont les particules sont :
 - plus lourdes
 - instables

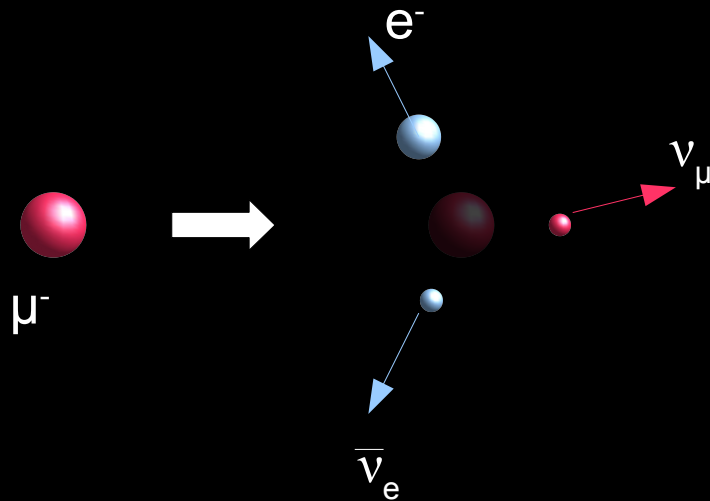
Le Modèle Standard

Le Modèle Standard

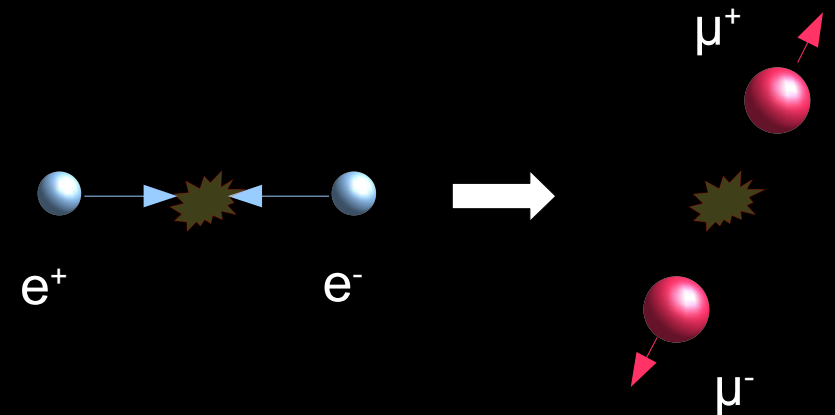
Théorie sous-jacente : *mécanique quantique relativiste*

Relativiste : adapté aux vitesses proches de celle de la lumière

→ $E=mc^2$: équivalence entre matière et énergie



Désintégration du muon



Collision de particules :
annihilation d'une paire d'électrons (e^+e^-)
et création d'une paire de muons ($\mu^+\mu^-$)

→ **En mettant en jeu suffisamment d'énergie cinétique, on peut créer des particules très lourdes !**

Le Modèle Standard

Théorie sous-jacente : *mécanique quantique relativiste*

Quantique : adapté au monde microscopique

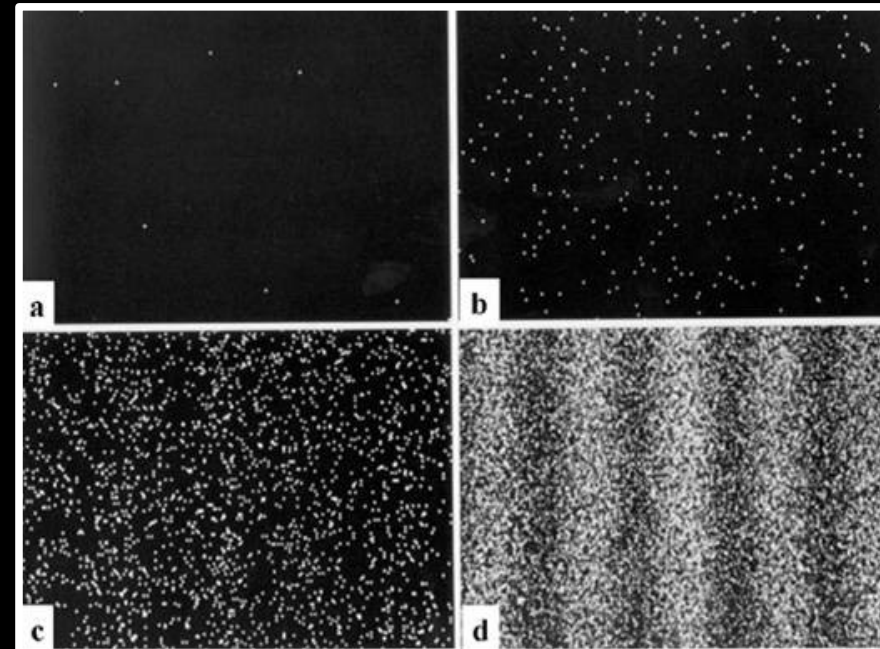
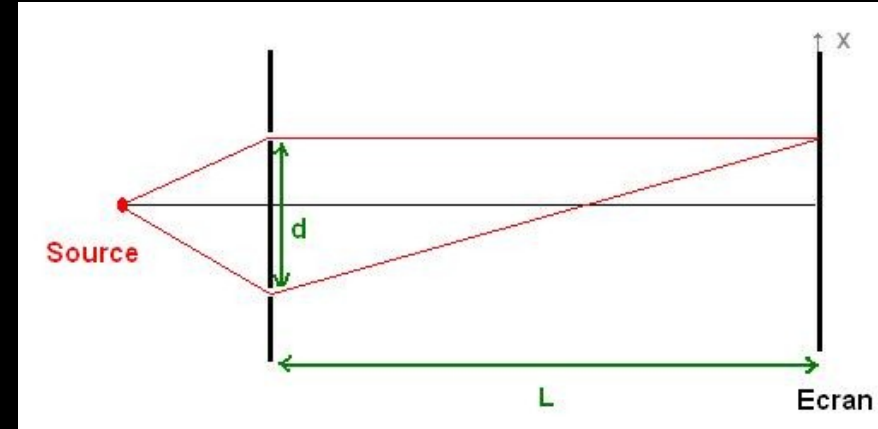
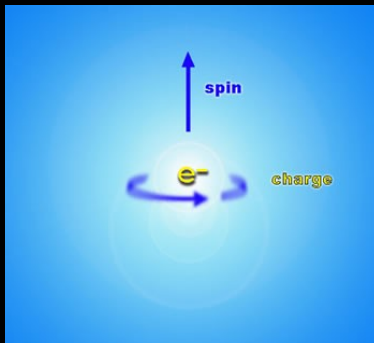
→ dualité onde-corpuscule

- onde : effet d'interférence
- corpuscule : comportement individuel
- $\lambda = h/P$ (h = constante de Planck)

→ **Plus l'énergie est élevée, plus la longueur d'onde est faible (plus on sera sensible à des détails petits)**

→ propriétés purement quantique

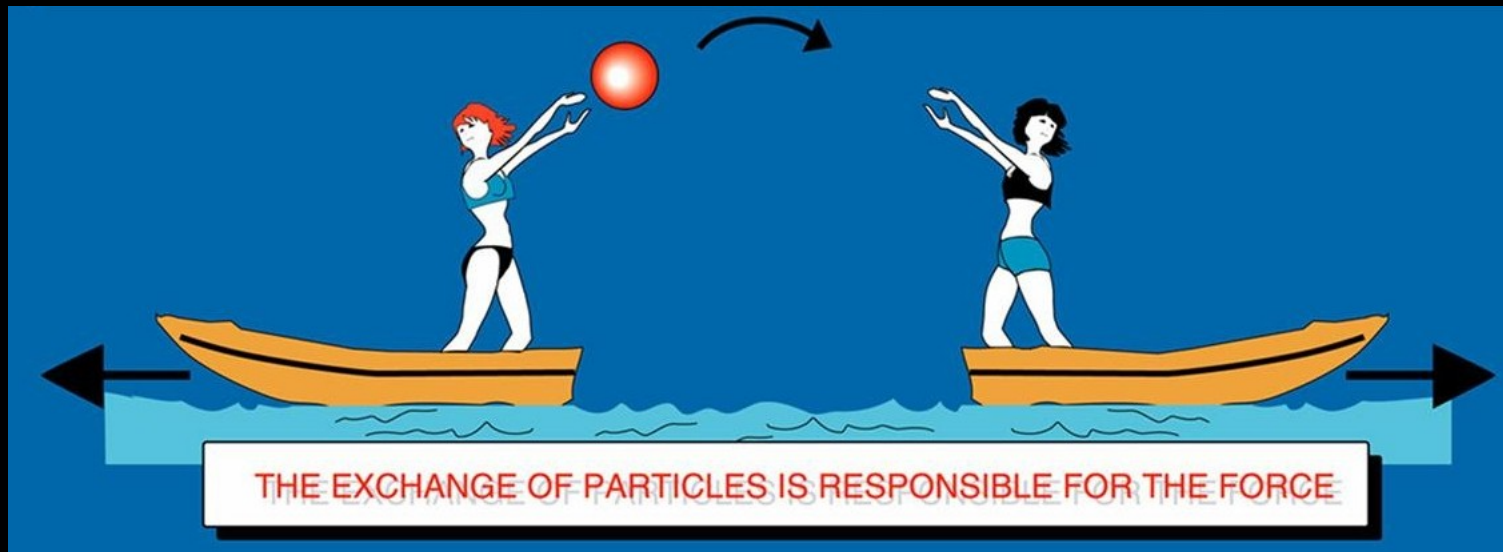
- spin : assimilable à une rotation intrinsèque d'une particule (moment angulaire)



Le Modèle Standard

Les interactions

Les vecteurs des interactions



→ **les forces élémentaires sont véhiculées par des particules**

Les charges des interactions

- forces interagissent avec les porteurs des charges associées, e.g. :
 - force électromagnétique : charge électrique
 - force forte : charge de couleur (b, r, v)
- la charge totale d'un système est conservée lors d'une réaction

Le Modèle Standard

Les particules de matière : les **fermions**
spin 1/2

Les particules de matière : les **bosons**
spin 1

Particles

Leptons

	Electric Charge		Electric Charge
Tau	 -1	Tau Neutrino	 0
Muon	 -1	Muon Neutrino	 0
Electron	 -1	Electron Neutrino	 0

Quarks

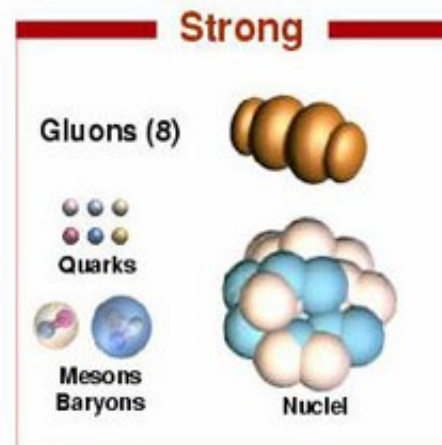
	Electric Charge		Electric Charge
Bottom	 -1/3	Top	 2/3
Strange	 -1/3	Charm	 2/3
Down	 -1/3	Up	 2/3

each quark:  R,  B,  G 3 colors

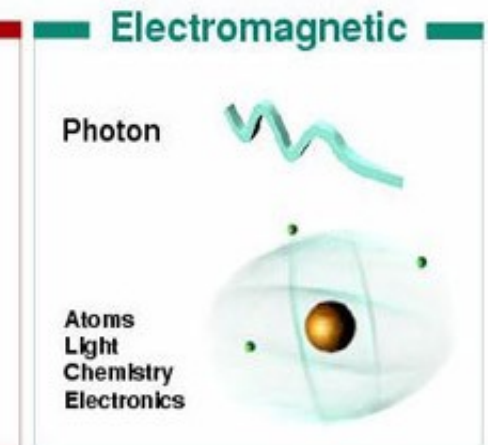
The particle drawings are simple artistic representations

Forces

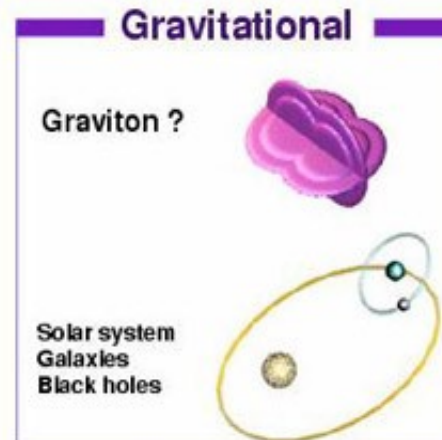
Strong



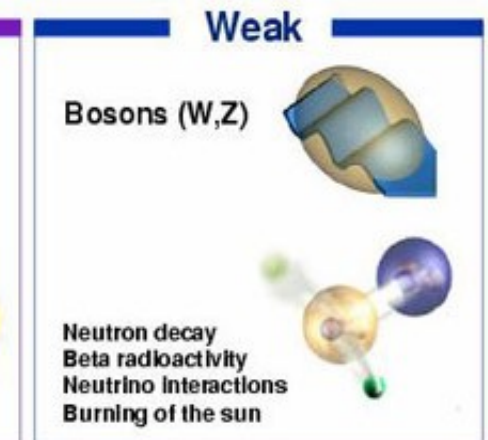
Electromagnetic



Gravitational



Weak



The particle drawings are simple artistic representations

Le Modèle Standard

L'anti-matière

A toute ces particules, il faut adjoindre une anti-particule, c.à.d. une particule :

- de même masse, même spin
- autres nombres quantiques renversés
 - charge électrique

Certaines particules sont leur propre anti-particule, e.g. :

- le photon

Notation : $\bar{b}$ anti-particule associée au quark b

→ les anti-particules se comportent-elles comme les particules ?

Le Modèle Standard

Les symétries discrètes

La construction du modèle standard s'appuie sur des symétries :

- symétries d'espace-temps :
 - conservation de l'énergie
 - conservation du moment angulaire
 - conservation de l'impulsion

- symétrie de « gauges » propres aux interactions

- **symétries discrètes** :
 - renversement droite/gauche : Parité (**P**)
 - renversement des charges : Conjugaison de charge (**C**)
 - renversement du temps (**T**)

Le Modèle Standard

La symétrie CP

Effet de transformations discrètes :

→ Opération P :

- symétrie miroir

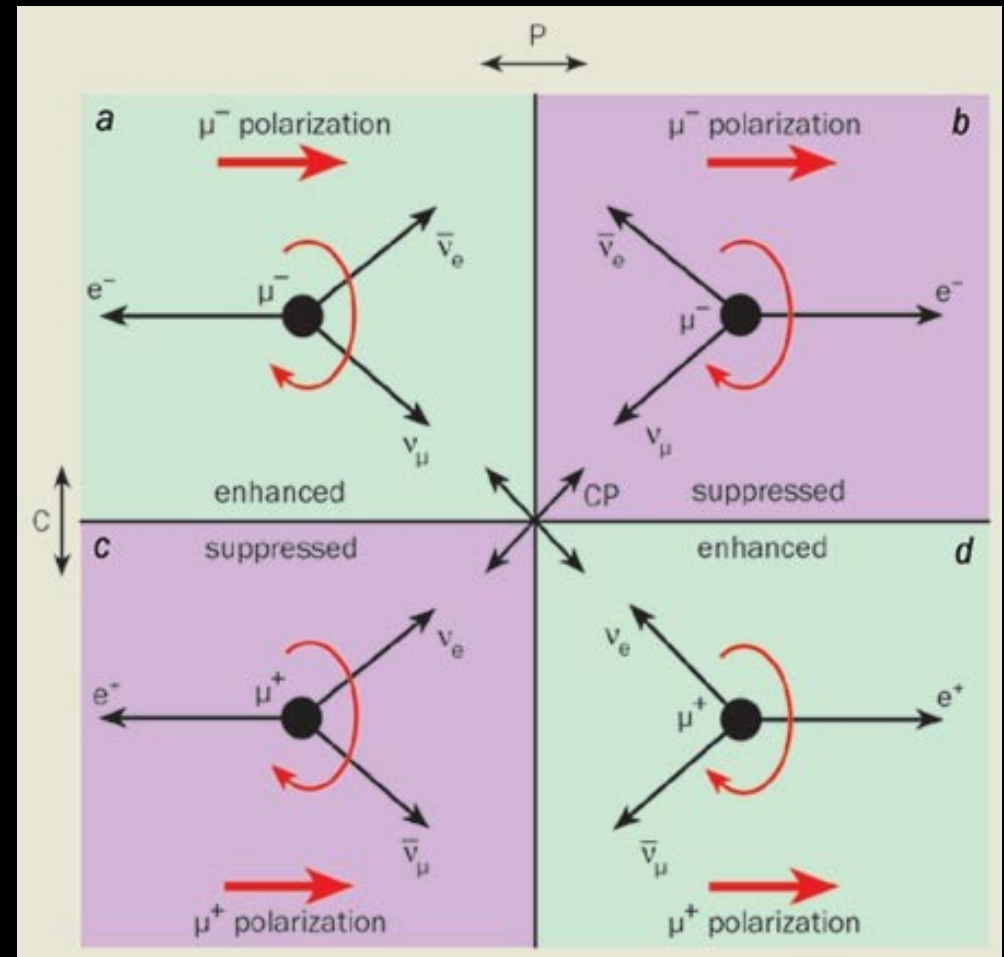
→ Opération C :

- particule → anti-particule

La désintégration du muon (met en jeu l'interaction faible) n'est symétrique ni par C ni par P

→ Madame WU (1957)

→ **CP** : la composé des 2 transformations semble rester valide ! c.à.d : l'anti-matière se comporte comme le reflet de la matière dans un miroir.

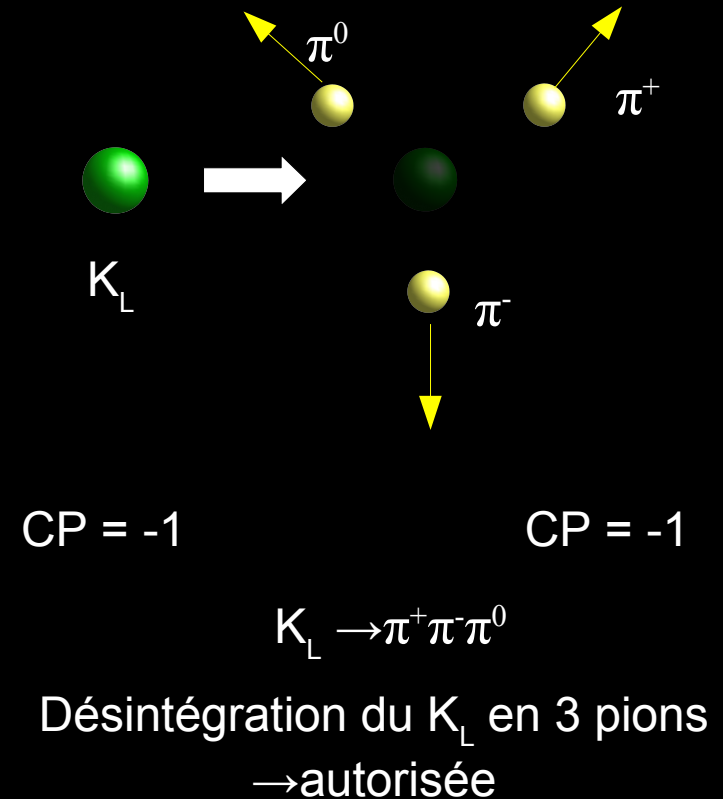
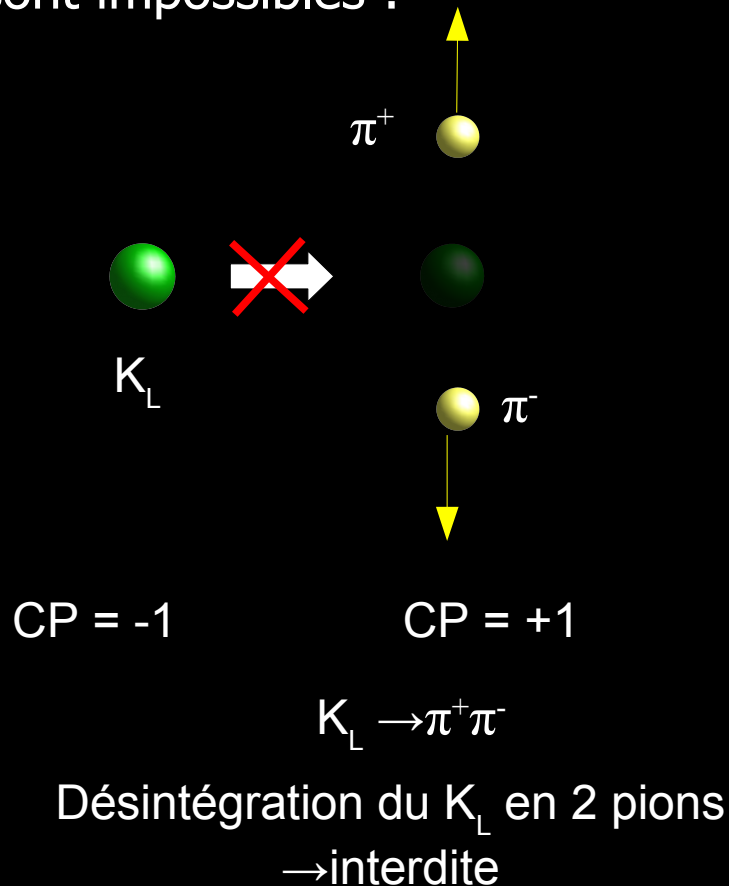


Le Modèle Standard

La violation de CP

Les particules possèdent des parités intrinsèques (propriété quantique !).

Si la conservation de CP est une propriété de la nature, certaines réactions sont impossibles :



Le Modèle Standard

La violation de CP

En 1964, Christenson, Cronin, Fitch & Turlay observent la désintégration : $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$

→ **découverte de la violation de CP**

▫ faible : ~ 2 cas pour mille seulement

A l'époque, seul les 3 quarks les plus légers étaient connues (u, d & s)

Les théoriciens se rendent compte que la théorie en vigueur s'accommoderait naturellement de la violation de CP si il y avait 3 familles de quarks

→ 1974 : découverte du quark c

→ 1977 : découverte du quark b

→ 1995 : découverte du quark t

→ **la matière et l'anti-matière ne sont pas rigoureusement symétrique.**

Depuis l'étude de la violation de CP a continué de susciter un très fort intérêt. Elle reste un moyen de tester le Modèle Standard très finement.

Le Modèle Standard

Les questions en suspens

Le Modèle Standard décrit très précisément tous les phénomènes aujourd'hui observés

→ il reste un élément prédit par le Modèle non encore observé : le Higgs

Pour autant :

- presque 30 paramètres libres (comme les masses des particules et l'intensité des forces dont les valeurs ne reposent que sur des mesures)
- pourquoi il y a 3 familles de particules
- pourquoi ont-elles des masses si différentes : e.g. $m(t) \approx 10^5 m(u)$!
- le MS décrit la force électromagnétique et la force faible comme une seule et même force (la force électrofaible).
 - Pourquoi la force forte est-elle si différente ?
 - GUT (Grand Unified Theory) ? SUSY ?
- il n'explique pas la disparition de l'anti-matière

→ **Qu'y a-t-il au delà du Modèle Standard ?**

Au delà du Modèle Standard ?

Comment y accéder ?

Les clefs :

- $E=mc^2$!! Pour produire des particules très massive (bosons de Higgs, particules supersymétriques), il faut mettre en jeu suffisamment d'énergie dans les collisions
- Pour voir des effets fins et rares, il faut produire un très grand nombre de collisions

Réponse :

Le Large Hadron Collider (LHC) construit au CERN près de Genève sur la frontière franco-suisse

Le LHC



Le LHC

Situation

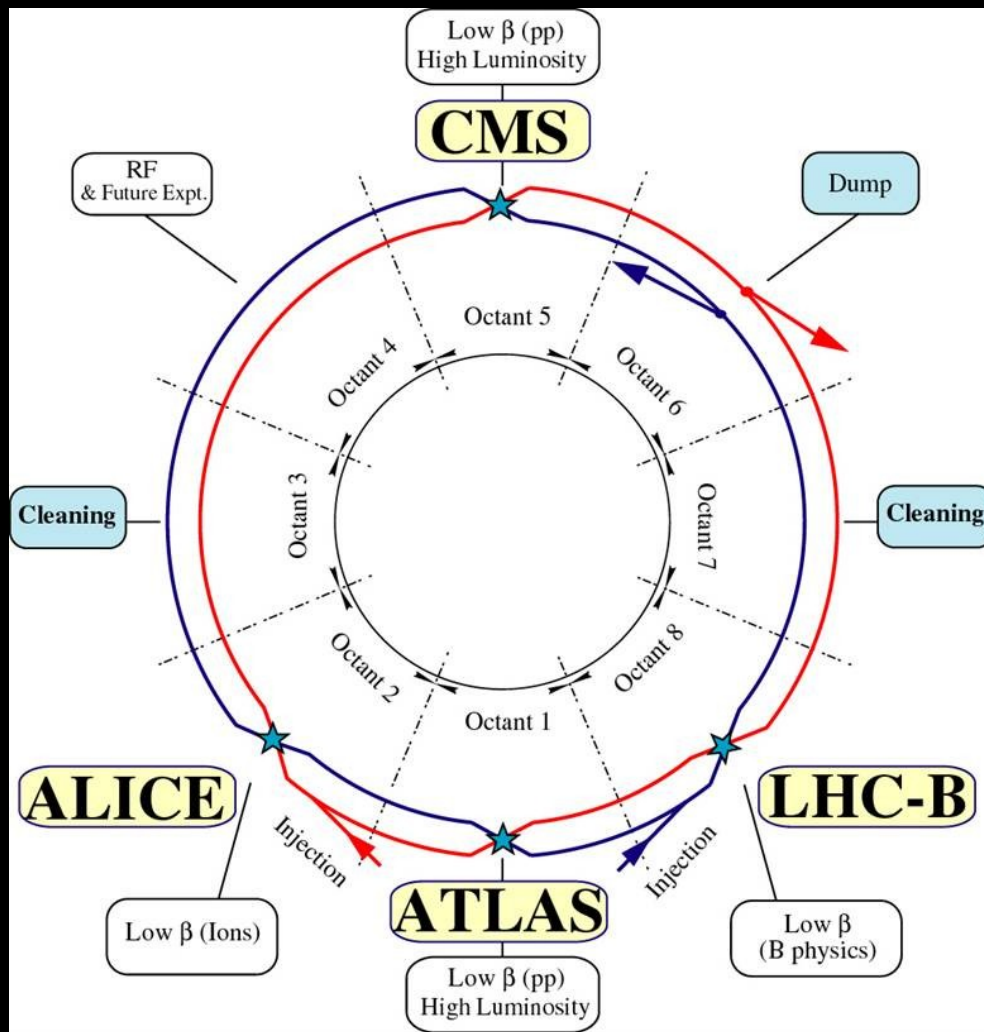
Le CERN est le laboratoire européen pour la Physique des Particules

Il a été créé en 1955

Il comprend 20 états membres

Il emploie ~2600 personnes et ~8000 scientifiques (de 500 instituts de 80 pays) y travaillent régulièrement

Le LHC



2 faisceaux de protons :

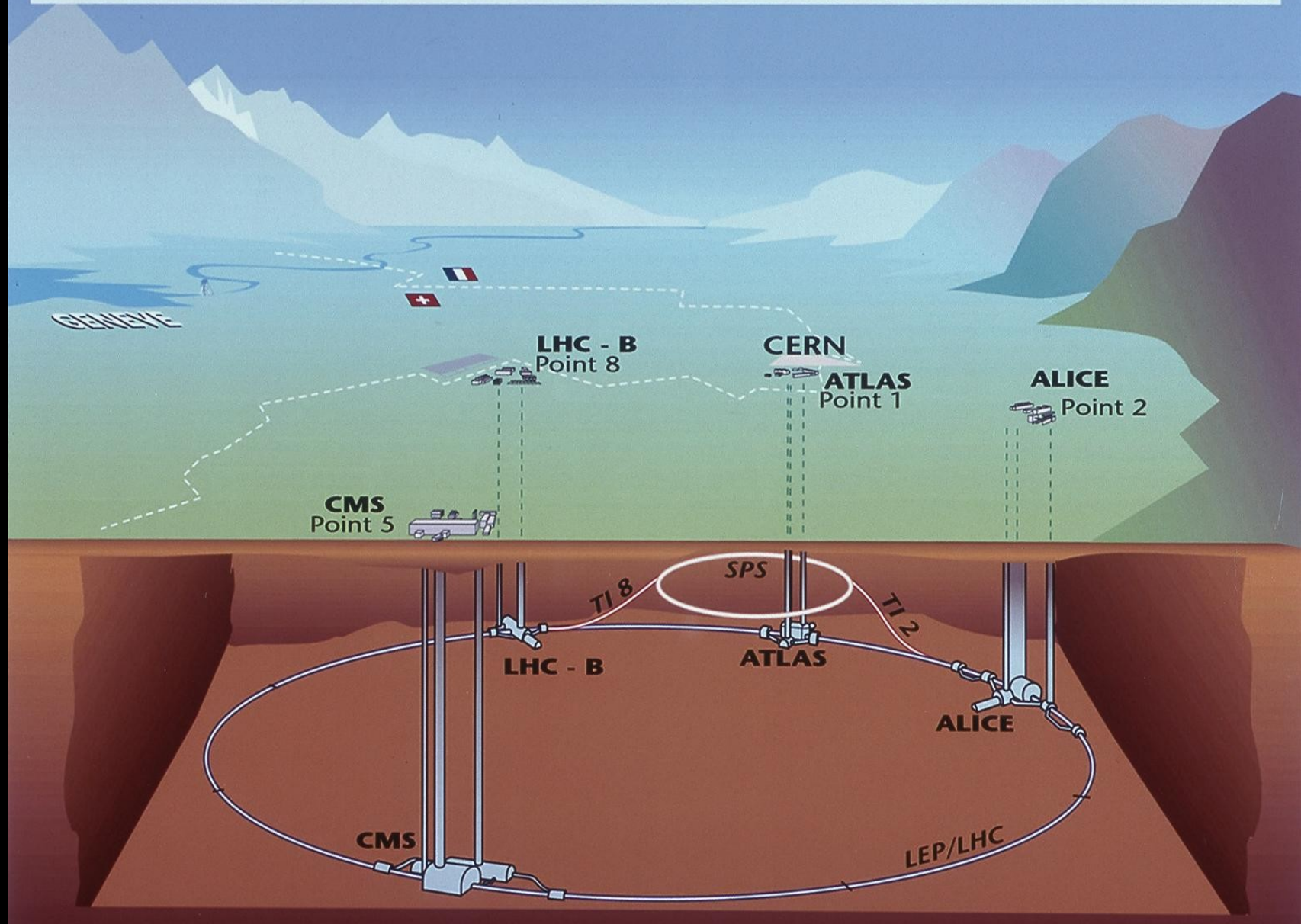
- faisceaux de très hautes intensités
 - 160 millions de collisions par secondes
- protons de haute énergie
 - 7 TeV par faisceau
- 27 km de circonférence
- 350 MJ / faisceau

4 points de collisions : 4 expériences

- ALICE
- ATLAS
- LHCb
- CMS

Le LHC

Overall view of the LHC experiments.



Le LHC



Le LHC



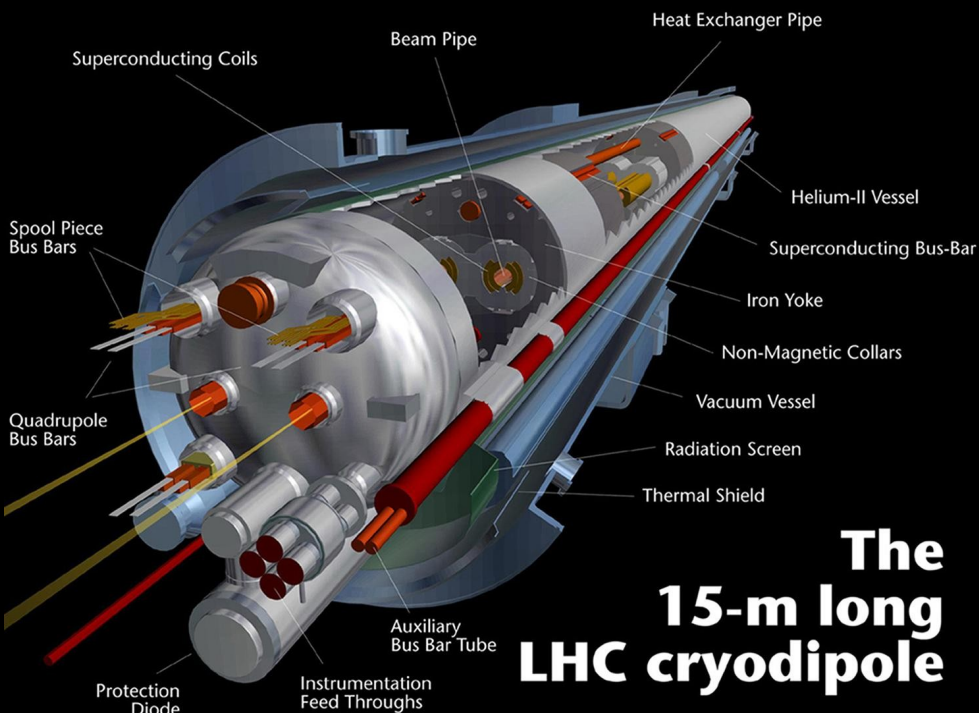
26 659 m

9532 aimants

1232 dipôles @ 1,9K

392 quadripoles principaux

16 cavités accélératrices

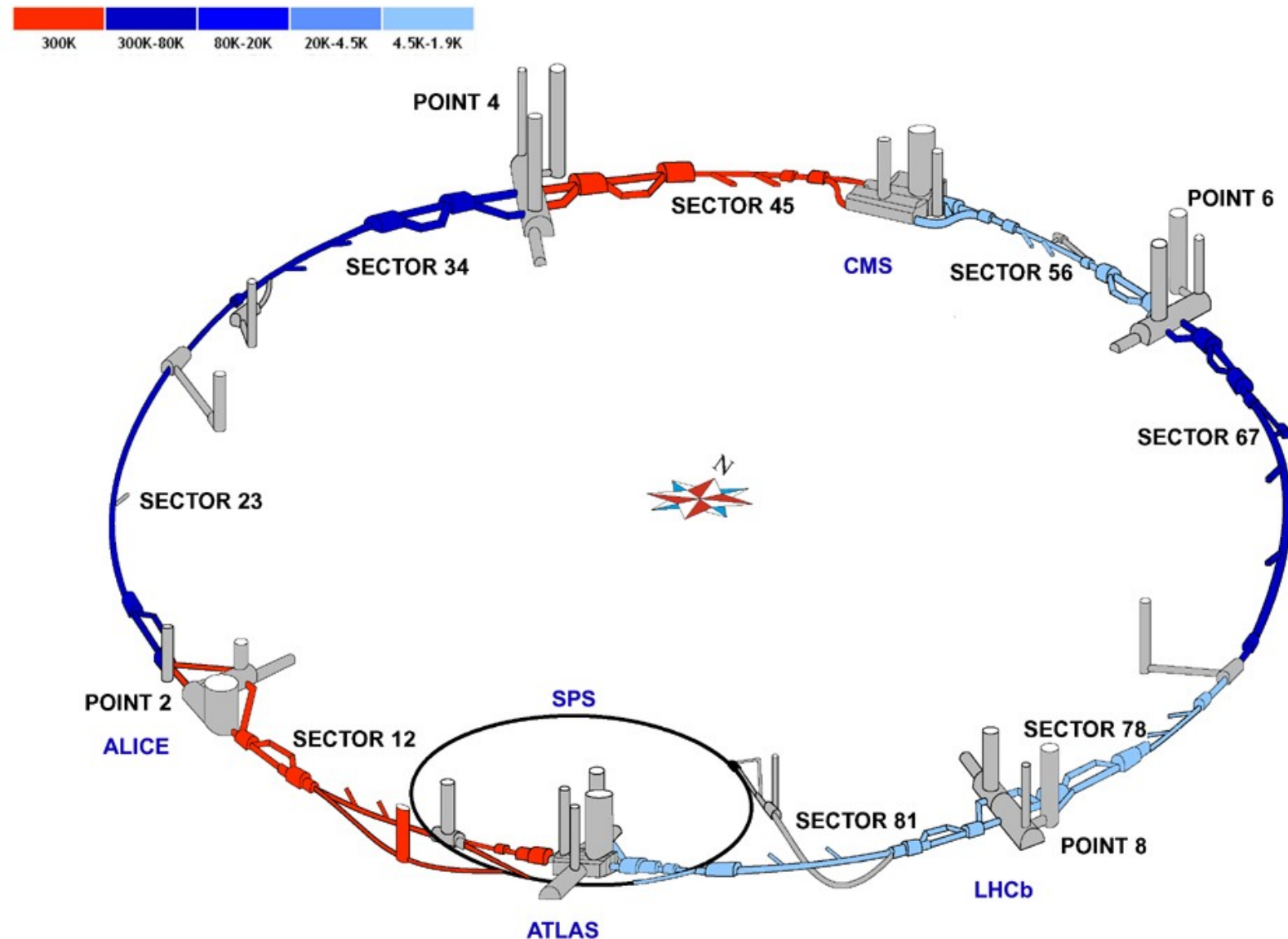


2800 paquets de protons par faisceau

10^{11} protons par paquets

11245 tours par seconde

Le LHC : aujourd'hui



Situation le 25/04/2008

Au delà du Modèle Standard

Les recherches

2 approches complémentaires :

→ recherches directes

- l'énorme énergie mise en jeu au LHC devrait permettre de créer de nouvelles particules
- ATLAS, CMS

→ recherches indirectes

- recherche de déviations par rapport aux prédictions du Modèle Standard
- LHCb

LHCb

Expérience dédiée à l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans le secteur des quarks b

- énorme quantité produites au LHC
- permet de tester finement le Modèle Standard

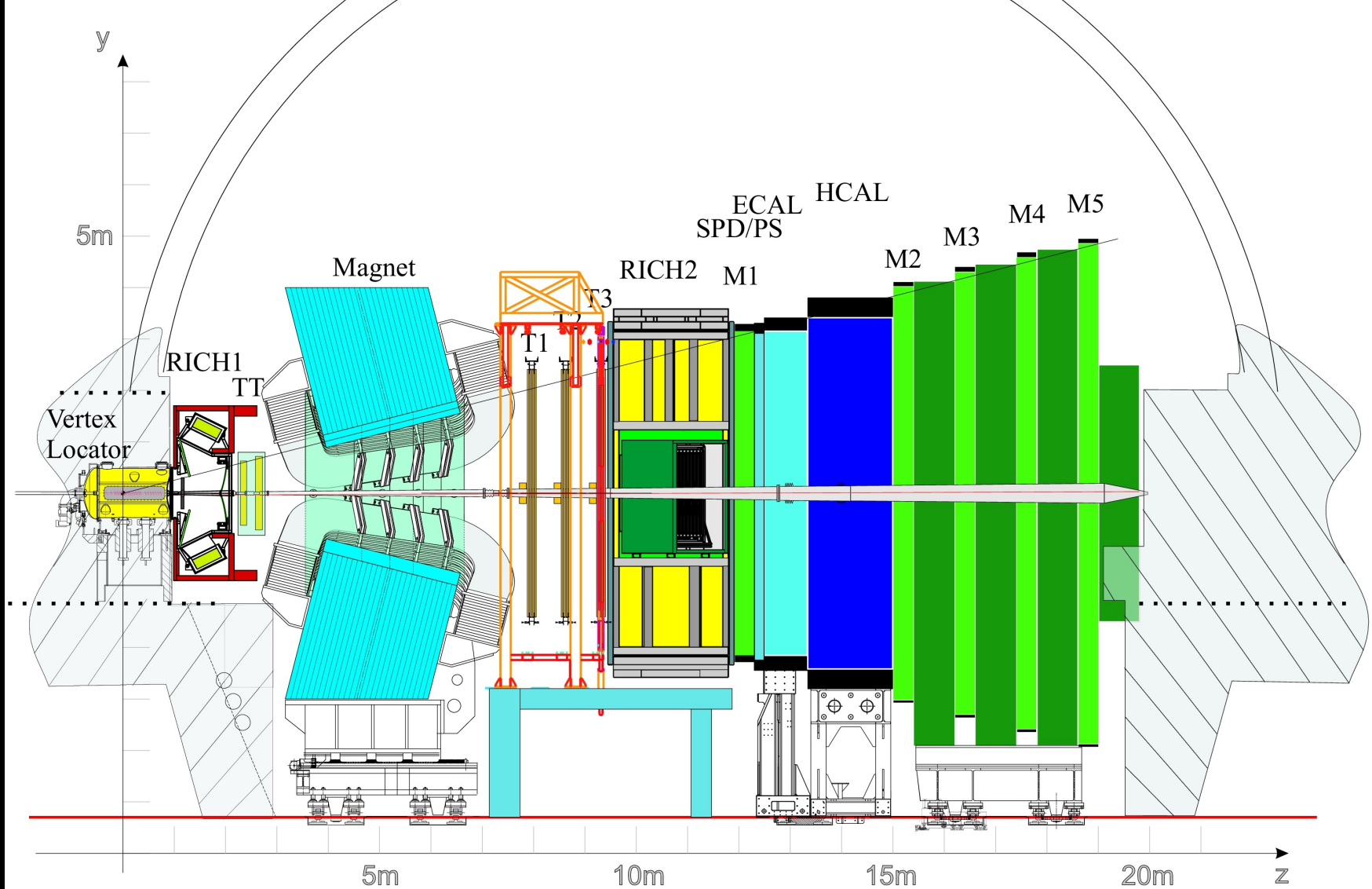


Une « petite » collaboration :
660 scientifiques
48 laboratoires
15 pays

LHCb

Le détecteur

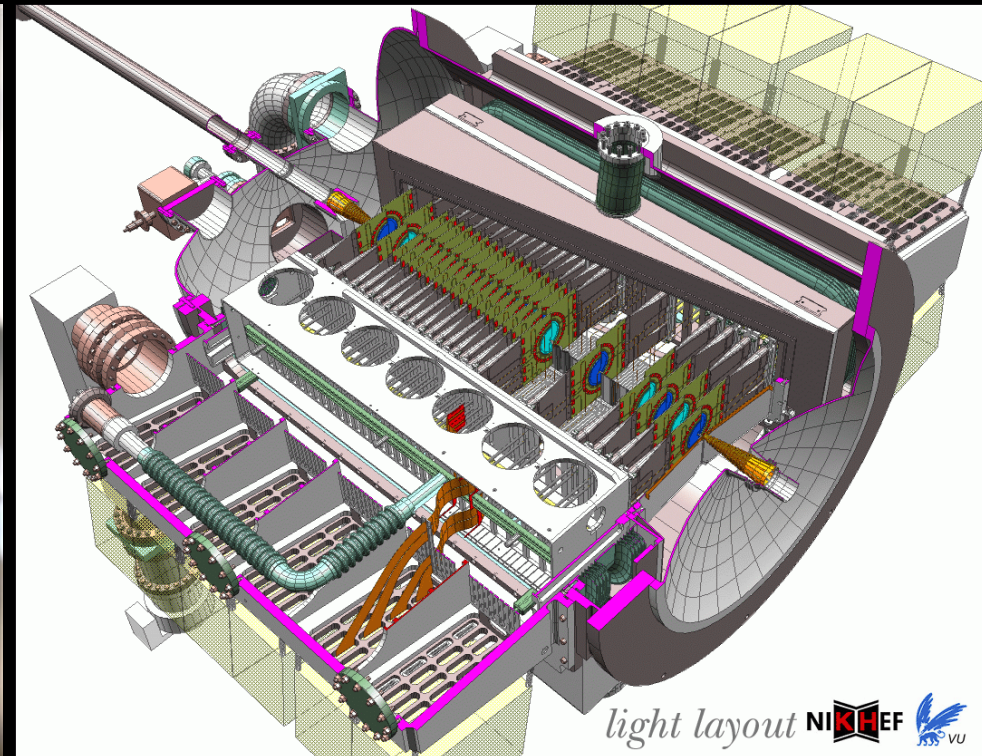
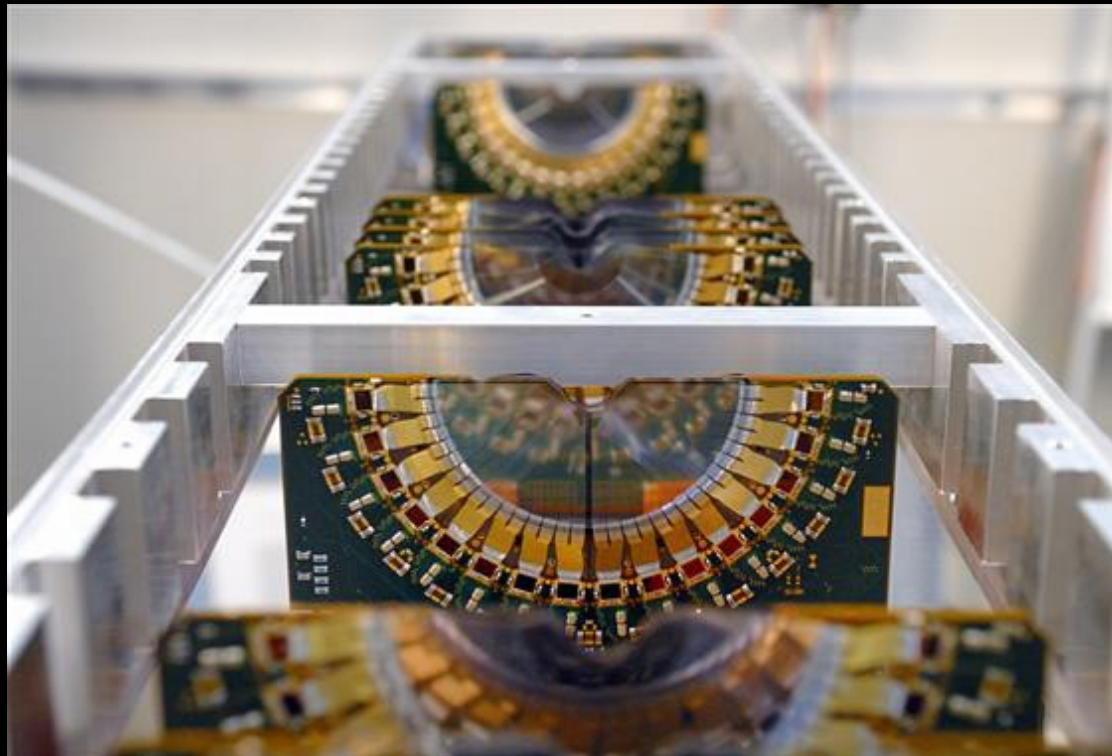
Détecteur atypique auprès d'un collisionneur : spectromètre avant !



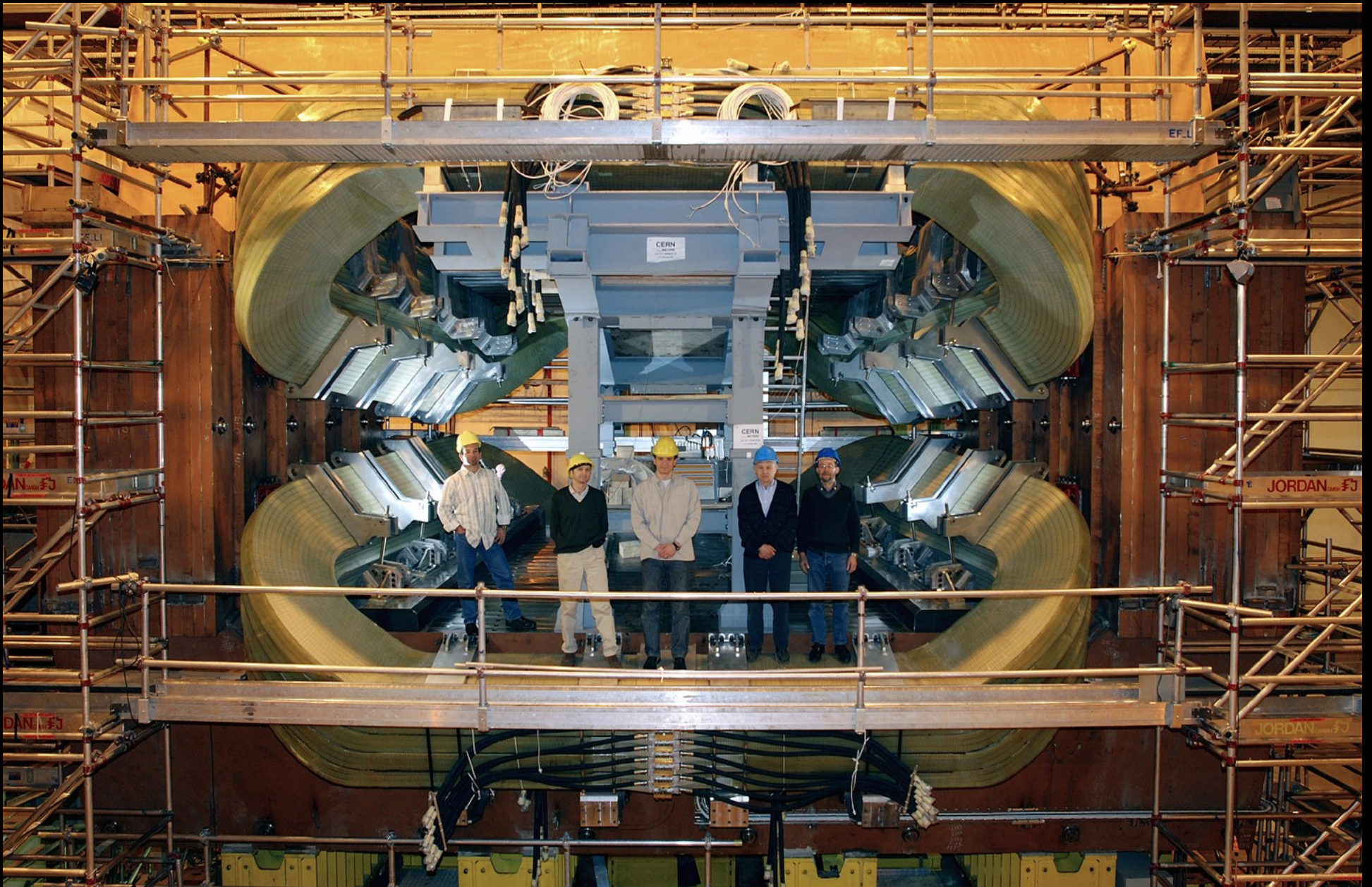
LHCb : le VELO

le VELO : détecteur de vertex

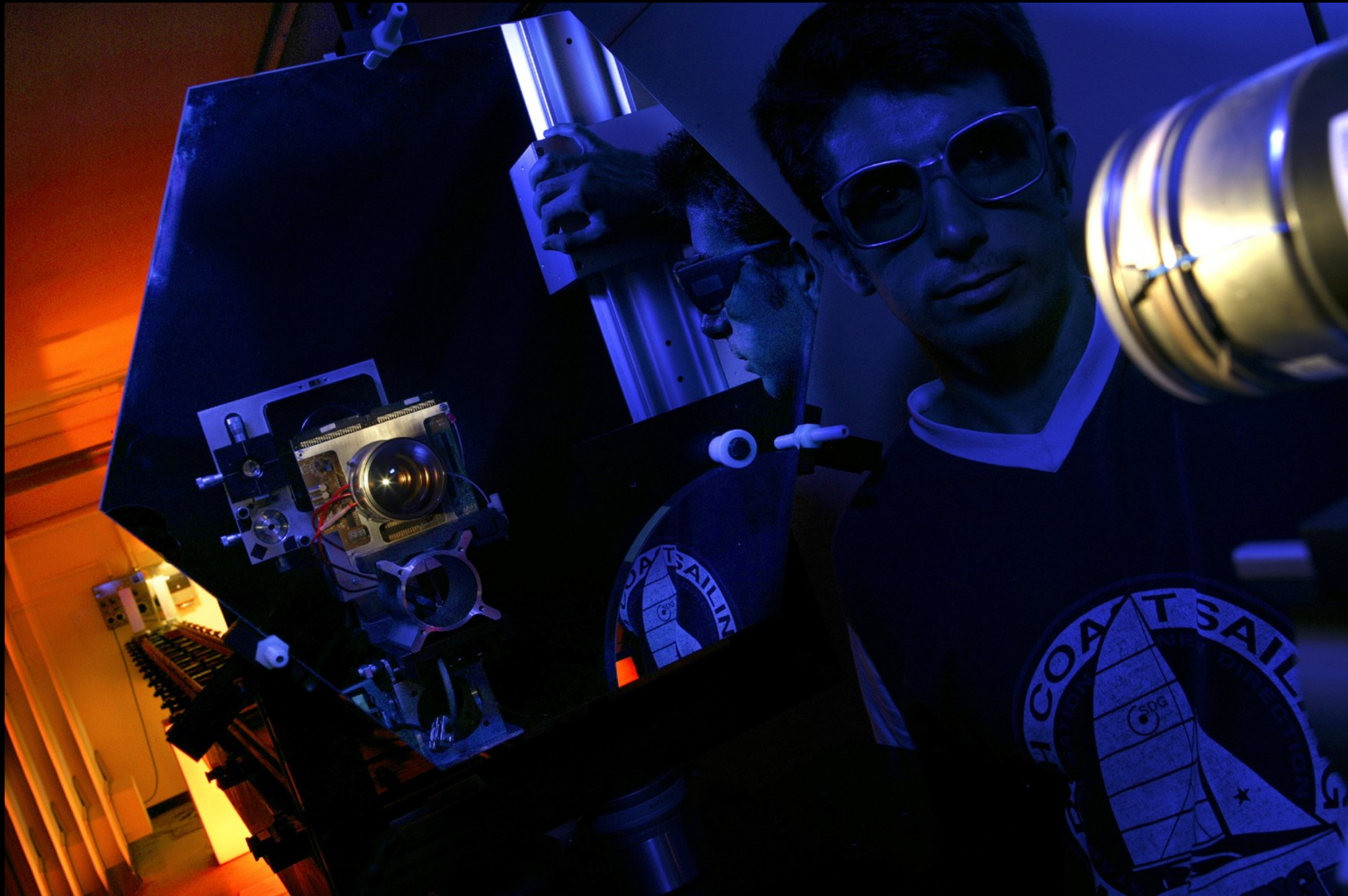
- 42 plans de détecteur en silicium
- opéré dans l'enceinte à vide où passe les faisceaux
- positionné à 5 mm du point d'interaction
- reconstruction très précise de ce qui se passe au point de collision



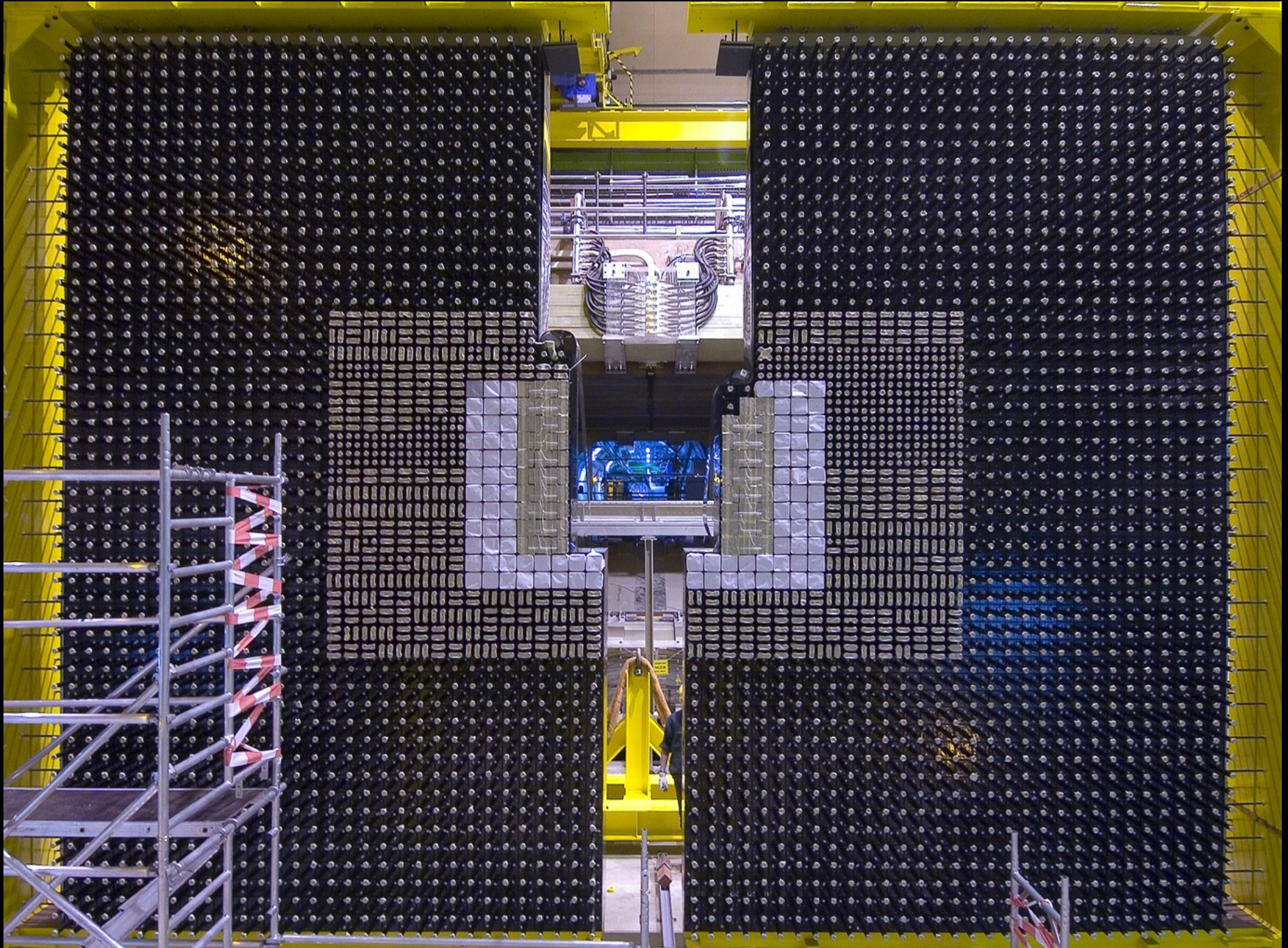
LHCb : l'aimant



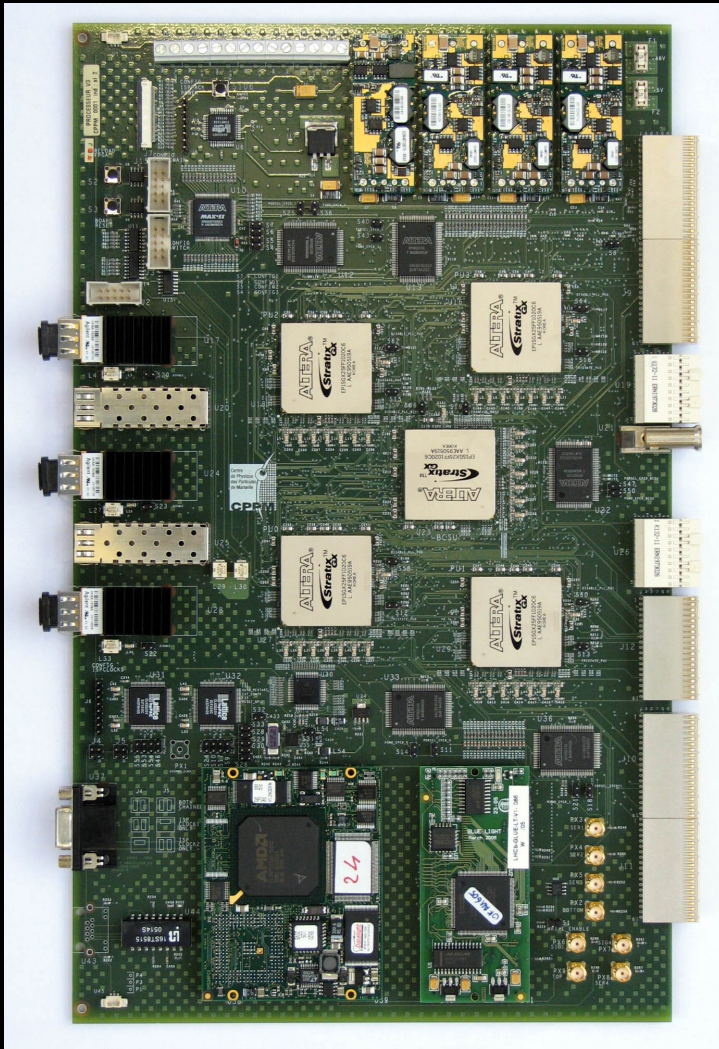
LHCb : les RICHs



LHCb : les calorimètres



LHCb @ Marseille



Système de déclenchement à muon

- reconstruit en ligne la trajectoire des muons traversant le détecteur
- mesure leur impulsion
- détermine si il faut enregistrer l'événement

60 cartes électroniques

- 1248 fibres optiques en entrée
- traite l'information en $\sim 1\mu\text{s}$

LHC : le démarrage

La machine devrait être en froid fin juin

Il faut environ 2 mois pour monter les aimants à leur courant nominal

On attend les 1ères collisions pour cet automne

Il faut que les détecteurs soient fin prêts d'ici là !!!

Encore au delà du Modèle Standard ?

Le Modèle Standard n'est pas la théorie ultime !

Il manque par exemple la gravitation.

Les théoriciens élaborent des théories qui permettraient d'unifier toutes les interactions fondamentales moyennant l'introduction de dimensions supplémentaires ... les verra-t-on au LHC ?

La matière noire ? 75% de la matière présente dans l'univers semble totalement absente du Modèle Standard ... qu'apprendrons nous au LHC ?