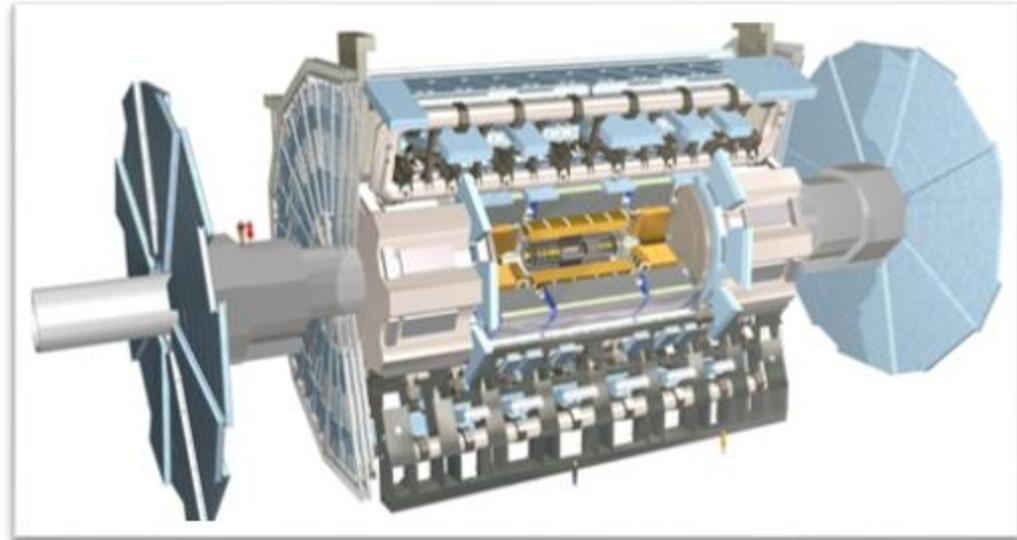


# Création et détection



Le LHC

- Accélérer des protons ou des ions
- Les amener en collision
  
- $E = mc^2$

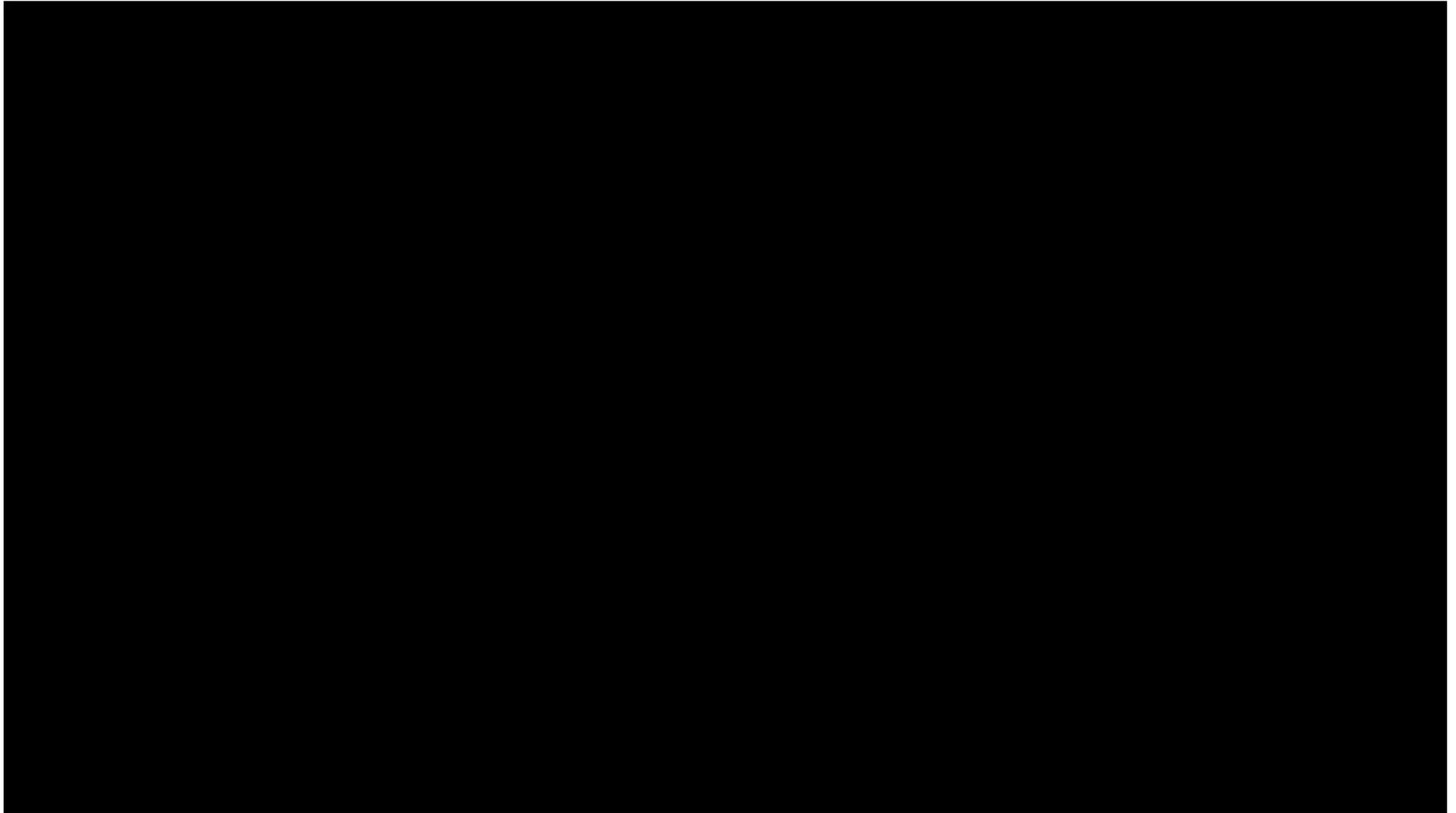


ATLAS

- Déterminer la trajectoire des particules
- Leurs énergies
  
- Comparer aux prédictions



# Comment accélérer des particules ?



**Le cas de l'électron ...**

# Les accélérateurs de particules

## Principe:

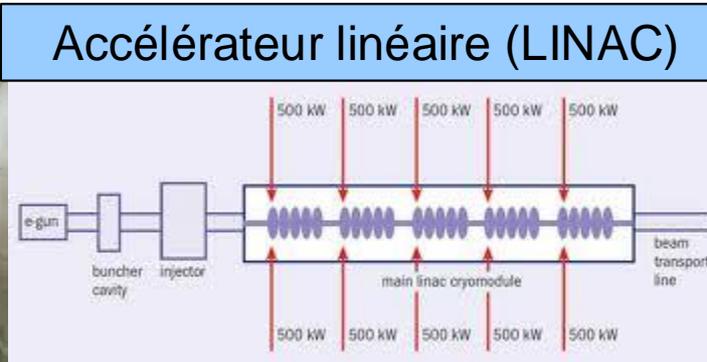


$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= q\vec{E} \\ \sum \vec{F} &= m\vec{a} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E}$$

Les particules chargées sont **accélérées** en présence d'un **champ électrique**

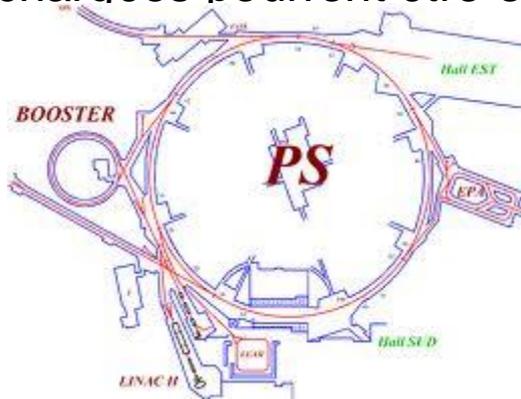


## Accélérateur linéaire (LINAC)

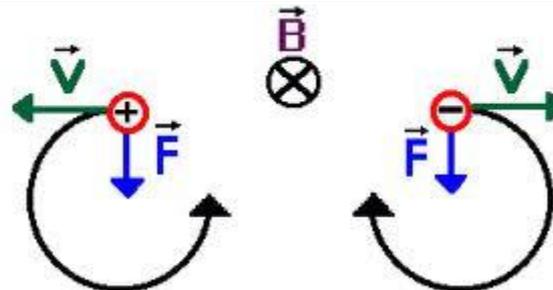


$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

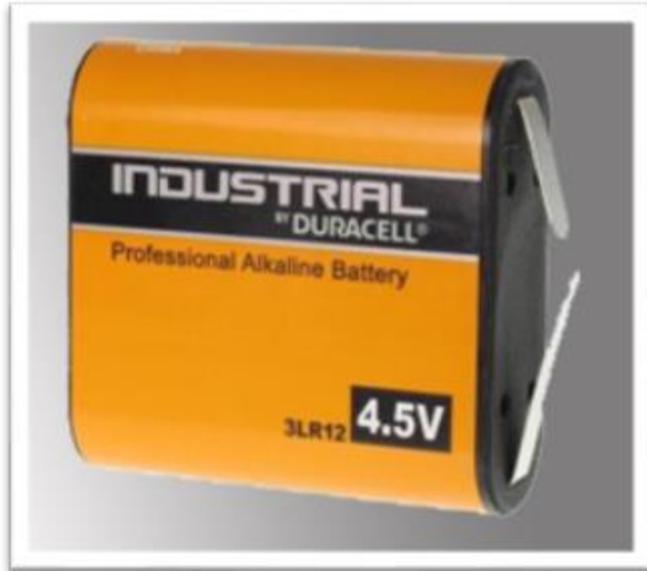
Les particules chargées pourront être **courbées** sous l'action d'un **champ magnétique** ( $\perp v$ )



## Cyclotron/Synchrotron



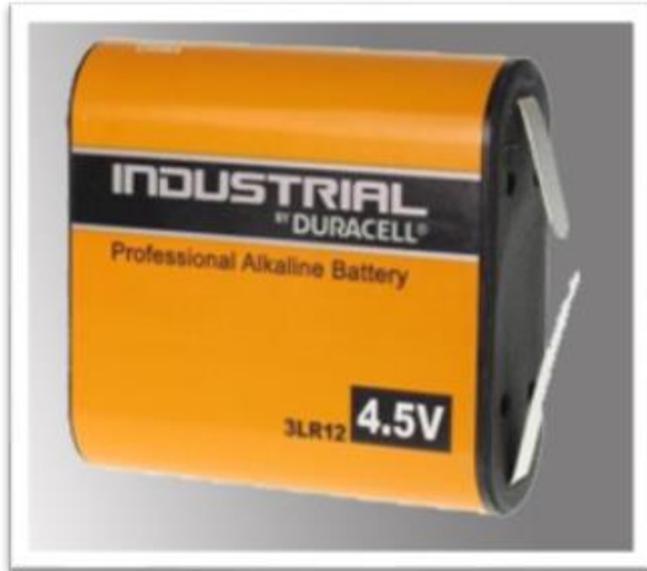
# Quelle énergie ?



Si un électron passe de la borne positive de la pile à la borne négative, quelle **énergie** gagne-t-il ?

- a)  $7,2 \cdot 10^{-19}$  Joules
- b) 4,5 Watts
- c) Cela dépend du temps qu'il met pour passer d'une borne à l'autre

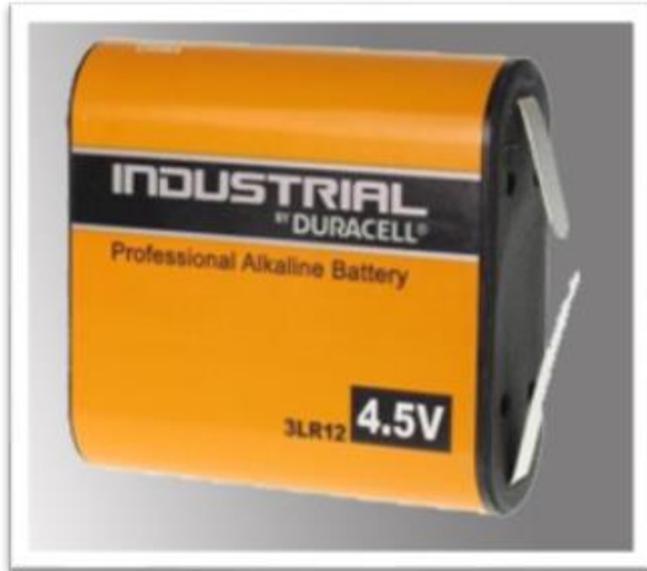
# Quelle énergie ?



Si un électron passe de la borne positive de la pile à la borne négative, quelle **énergie** gagne-t-il ?

- a)  $7,2 \cdot 10^{-19}$  Joules
- b) ~~4,5 Watts~~
- c) ~~Cela dépend du temps qu'il met pour passer d'une borne à l'autre~~

# Quelle énergie ?

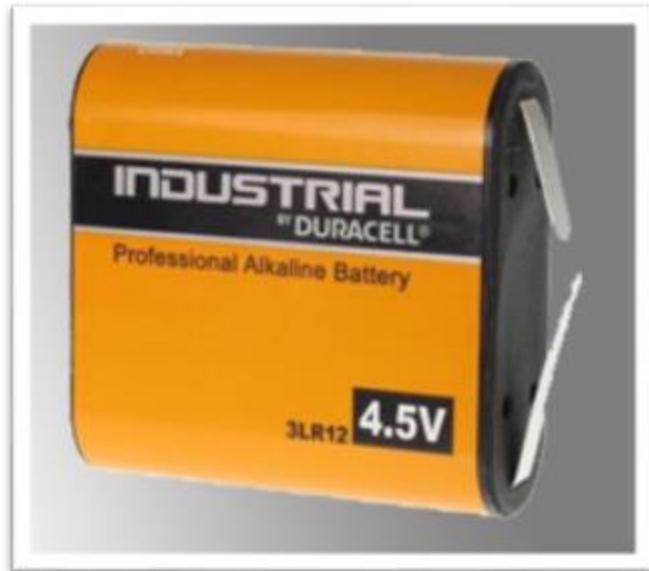


Si un électron passe de la borne positive de la pile à la borne négative, quelle **énergie** gagne-t-il ?

- a)  $7,2 \cdot 10^{-19}$  Joules
- b) ~~4,5 Watts~~
- c) ~~Cela dépend du temps qu'il met pour passer d'une borne à l'autre~~

$$\begin{aligned} E &= \text{charge de l'électron} * \text{différence de potentiel} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} * 4,5 \text{ Volts} \\ &= 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Joules} \end{aligned}$$

# Quelle énergie ?



Si un électron passe de la borne positive de la pile à la borne négative, quelle **énergie** gagne-t-il ?

- a)  $7,2 \cdot 10^{-19}$  Joules
- b) ~~4,5 Watts~~
- c) ~~Cela dépend du temps qu'il met pour passer d'une borne à l'autre~~

$E = \text{charge de l'électron} * \text{différence de potentiel}$

$= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} * 4,5 \text{ Volts}$

$= 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$

$= 4,5 \text{ eV} \rightarrow \text{Nouvelle unité d'énergie: l'électron Volt (eV)}$

# Quelle énergie au LHC ?

# Les accélérateurs de particules

## Energie

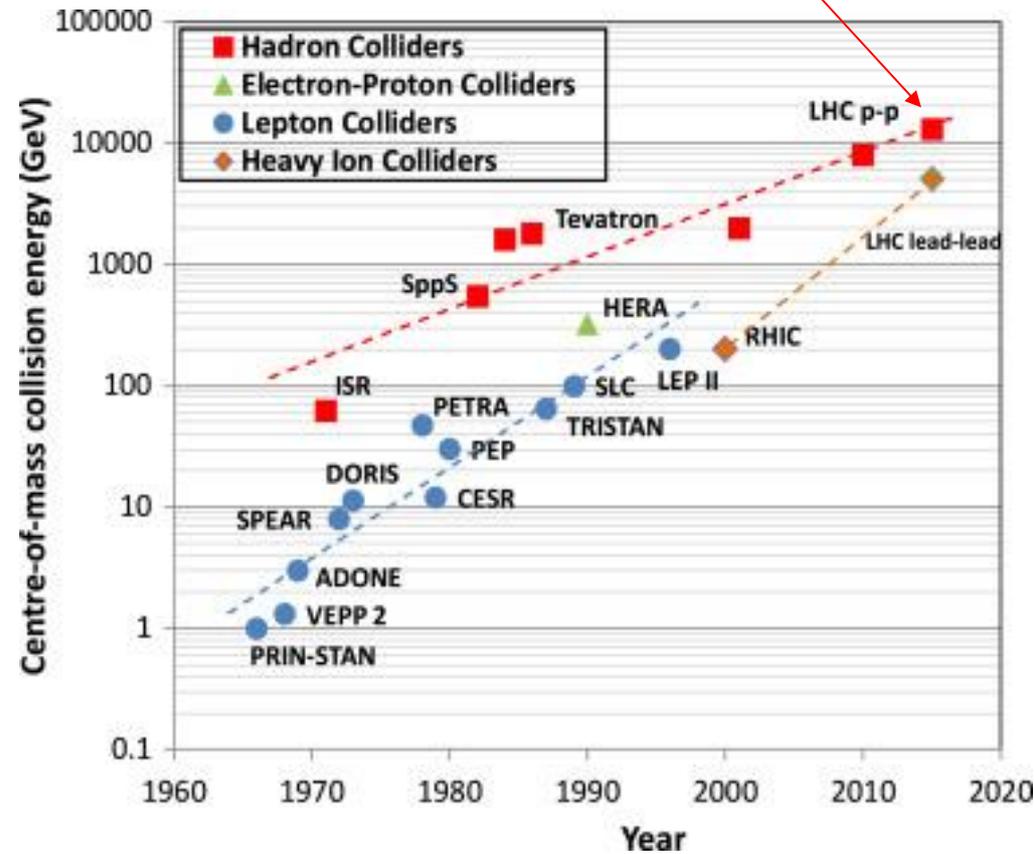
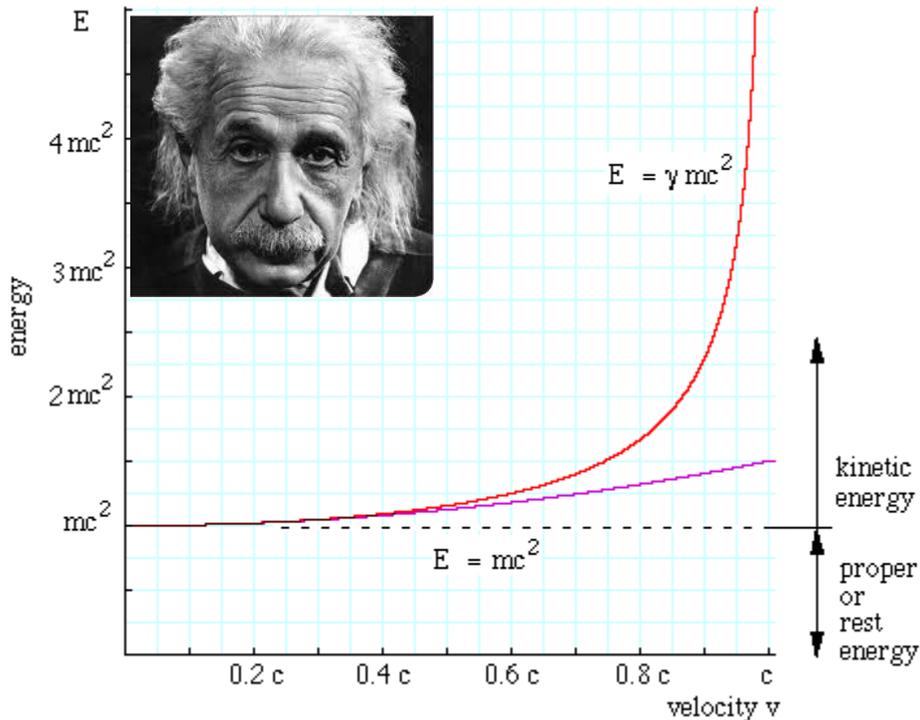
1 ev = énergie d'un électron soumis à  $\Delta V=1V$

20 MégaVolts



keV	$10^3=1000$
MeV	$10^6$
GeV	$10^9$
TeV	$10^{12}$

13.6 TeV au LHC  
13 600 000 000 eV



Montée en énergie des accélérateurs

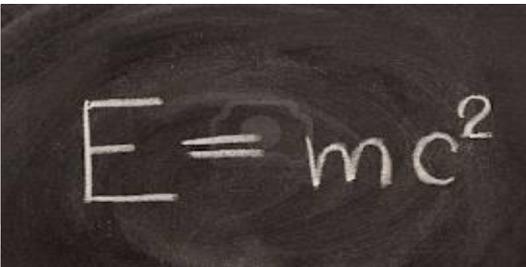
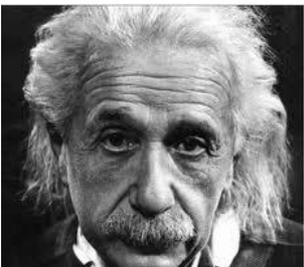
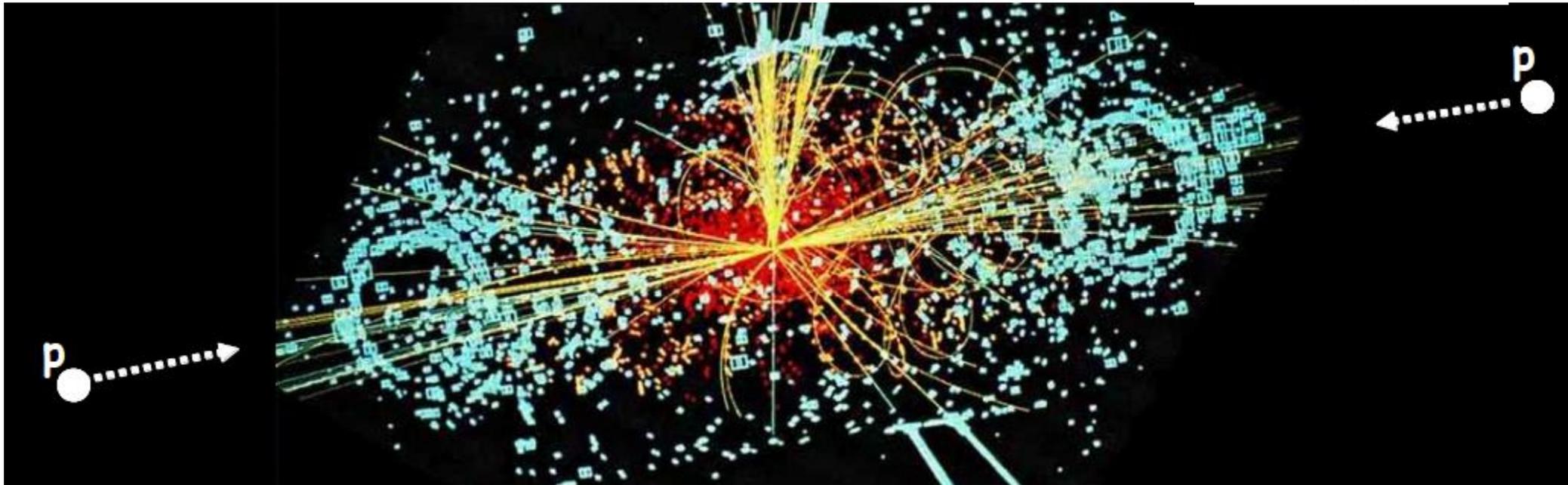
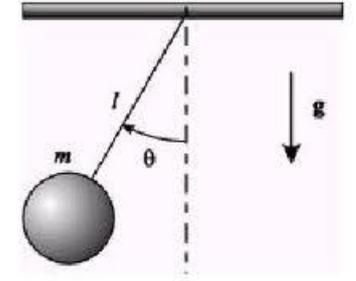
Des protons accélérés à plus de 99.999999% de la vitesse de la lumière

**Pourquoi ?**

# Collisions : transformation de l'énergie

L'énergie, une quantité conservée !

Energie(pp) = Energie(produits de collisions)



Relativité restreinte

## Transfert d'énergie :

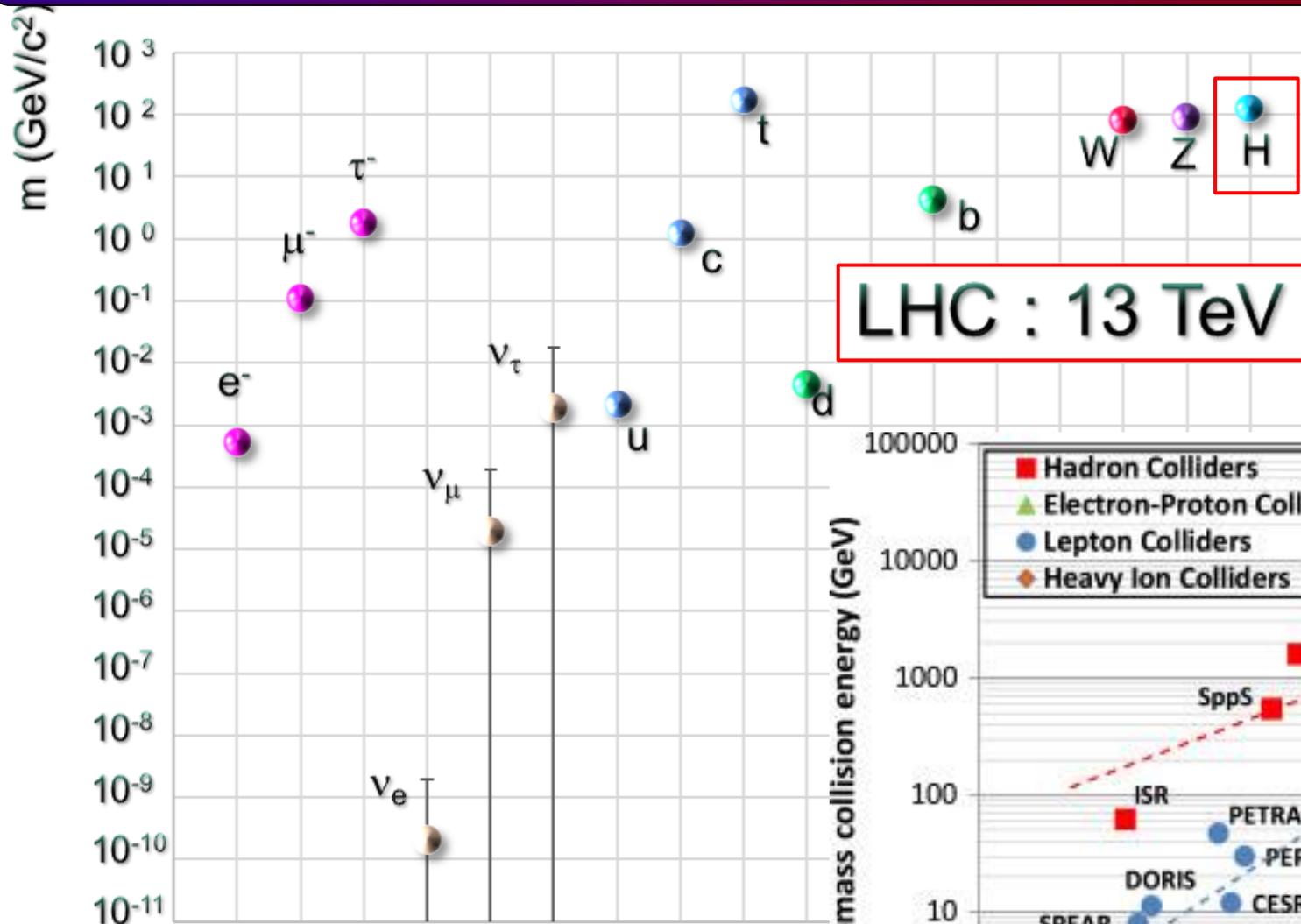
L'énergie cinétique initiale permet de créer de la matière (énergie de masse)

## A la différence des réactions chimiques ..

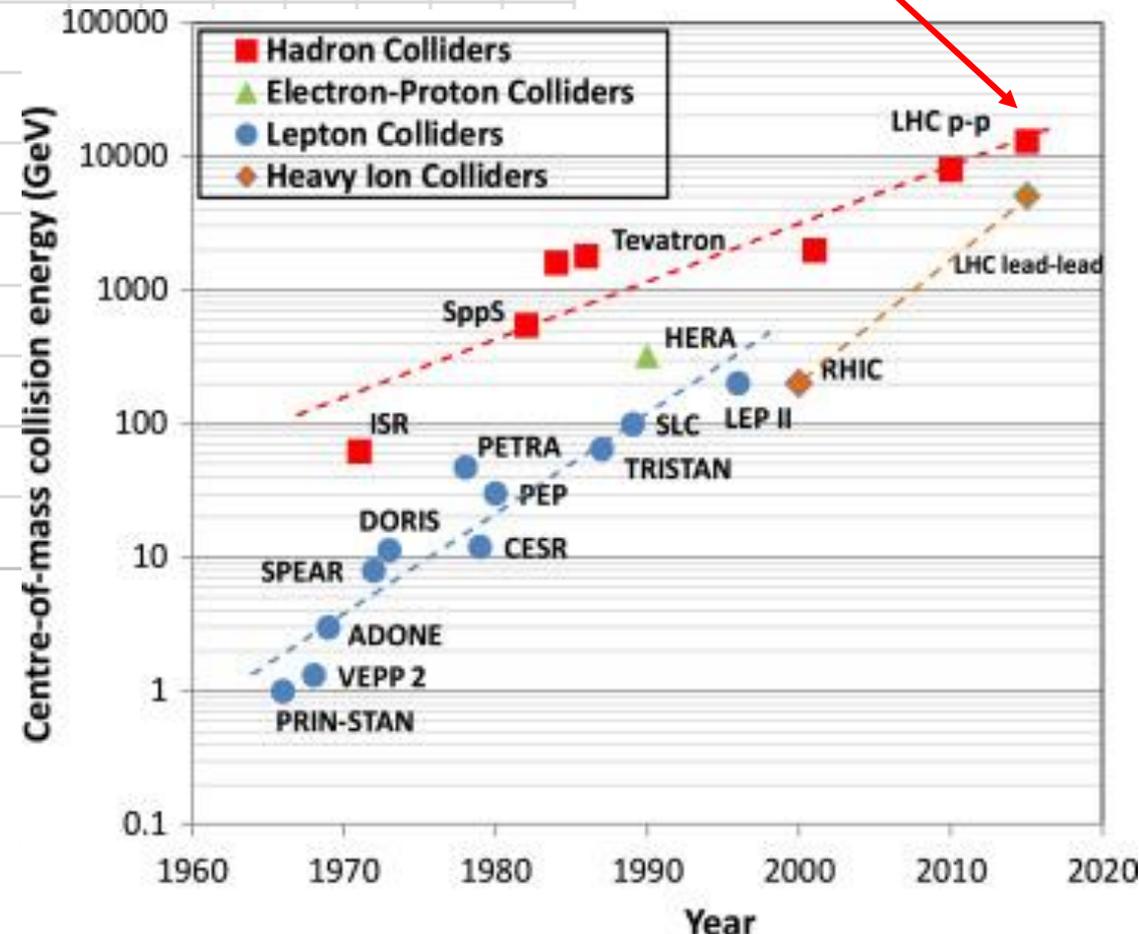
- Le nombre de particules n'est pas constant
- La masse n'est pas « conservée » ...



# Masse des particules



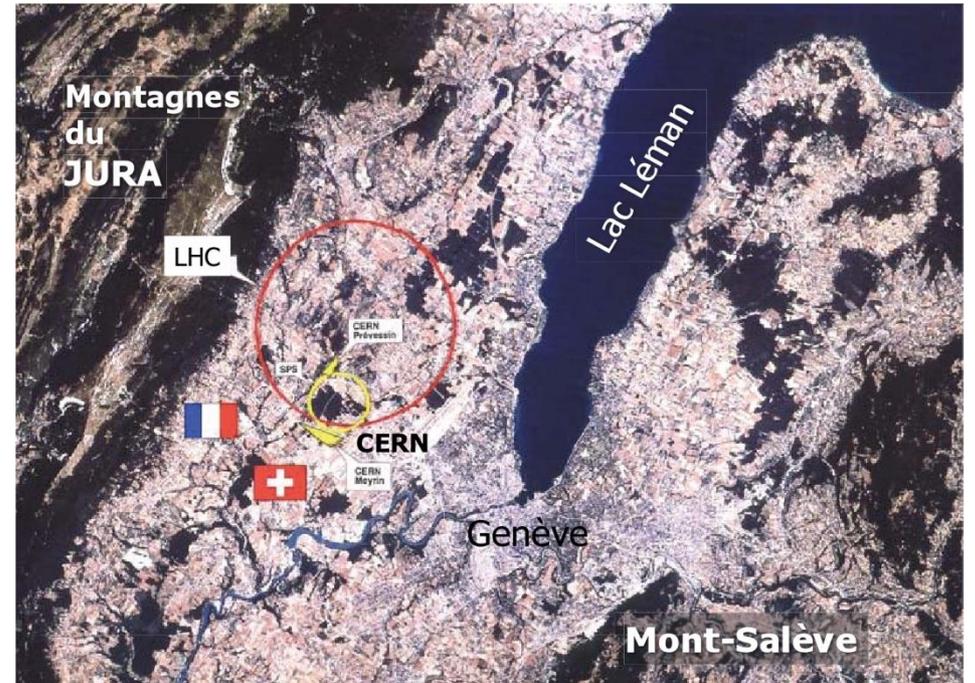
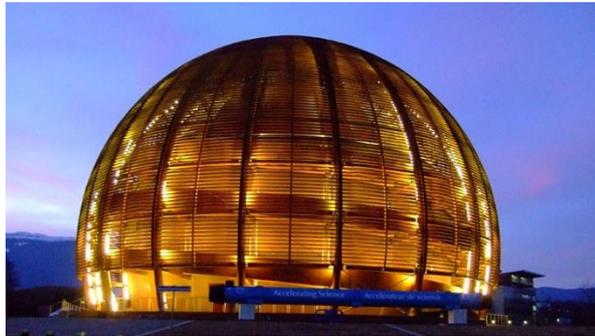
LHC : 13 TeV = 13 000 GeV



$m_{\text{Higgs}} = 125,18 \pm 0,16 \text{ GeV}/c^2$

# Le CERN

Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



Le plus grand laboratoire au monde

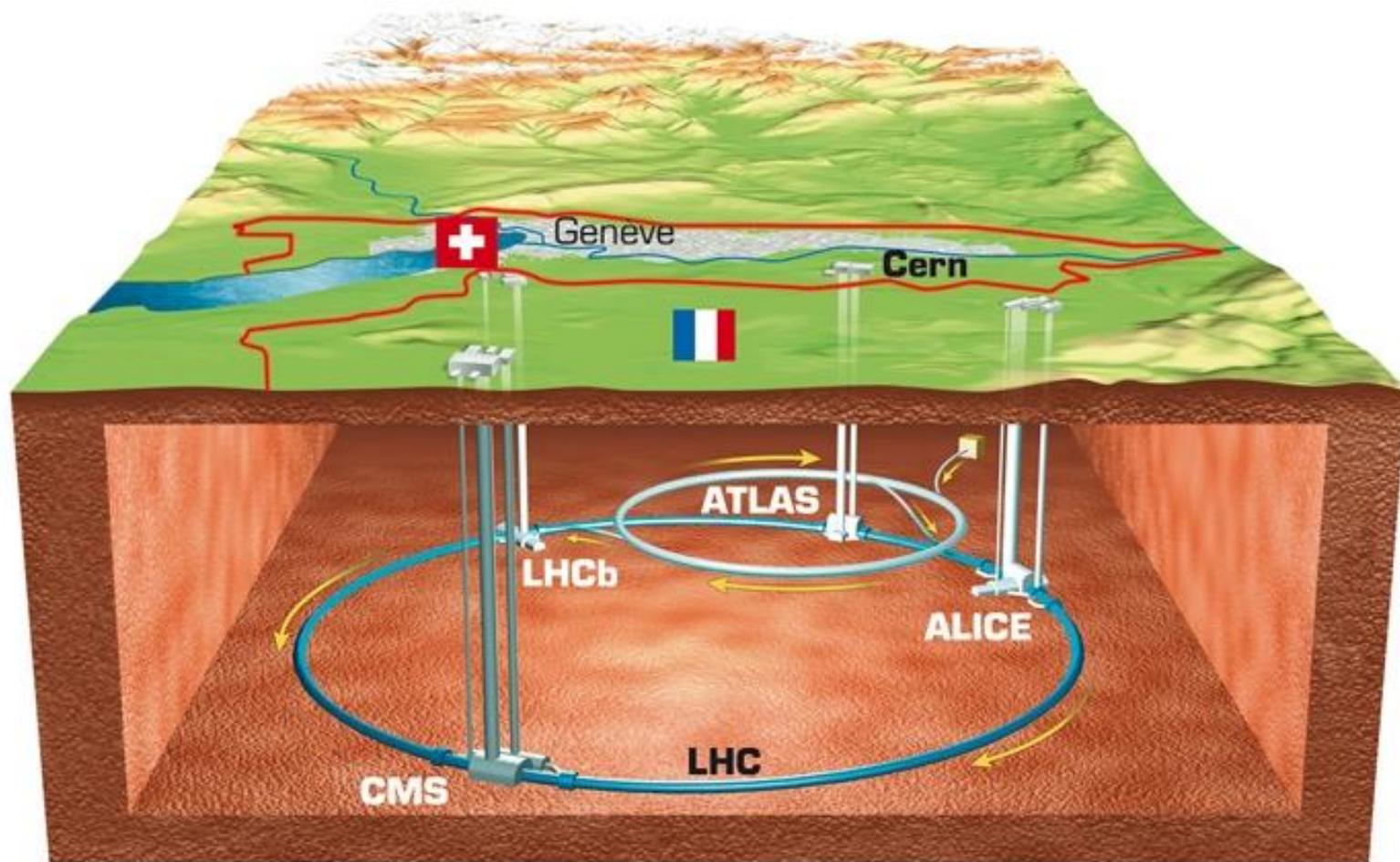
- 100 nationalités.
- 10 000 scientifiques.

Plus de 50 ans de recherches et d'innovations, conduisant à de nombreux succès scientifiques: découvertes , prix Nobel, ...

... et des applications importantes : www, hadronthérapie, ...



# Le LHC



**L**arge : tunnel de 27 km de circonférence à 100 m sous terre

**H**adron : i.e. des protons (=noyaux de l'atome d'hydrogène)

**C**ollider : production de collisions frontales proton-proton

# Une machine à records

## Energie emmagasinée

362 MJ/faisceau  $\approx$  TGV à 150 km/h

## Energie

4 TeV/proton

$V = 99.9999993\% c$

## Puissance électrique

120 MW

$\approx$  foyers du canton de Genève

LHC: 9300 aimants  
dont 1232 dipôles  
- Longueur 14 mètres  
- Masse 35 tonnes

## Courant électrique

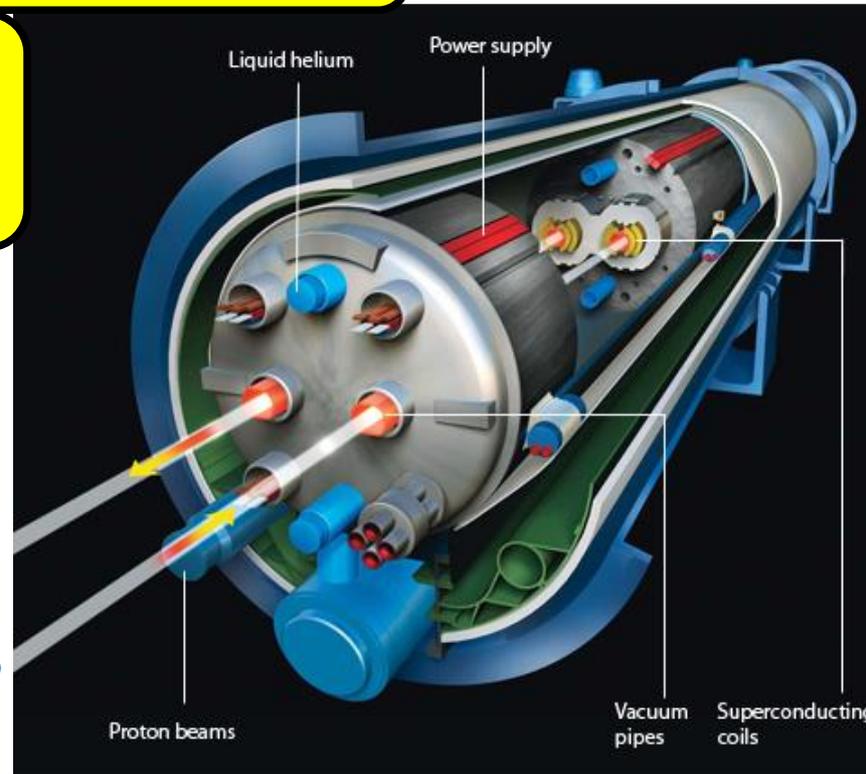
LHC : 12 000 A

Maison : 100 A

## Température

LHC : 1.9 k (-271.1° C)

R. fossile : 2.7 k (-270.4° C)



## Aimants supraconducteurs

## Le vide

$10^{-13}$  bar

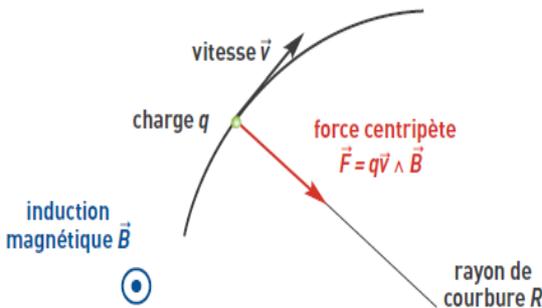
10 x moins que la pression sur la Lune !

## Champ magnétique

$B_{LHC} = 8.4$  Tesla

$B_{terre} = 4.7 \times 10^{-5}$  Tesla

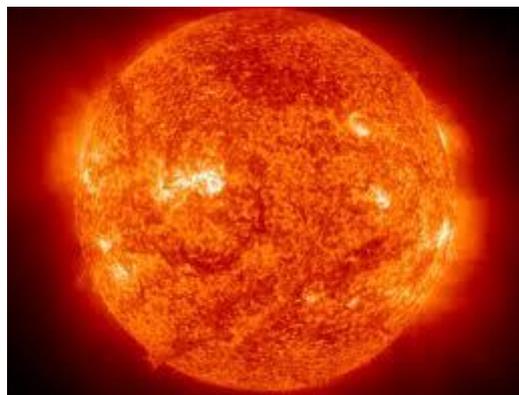
Nobium-Titane



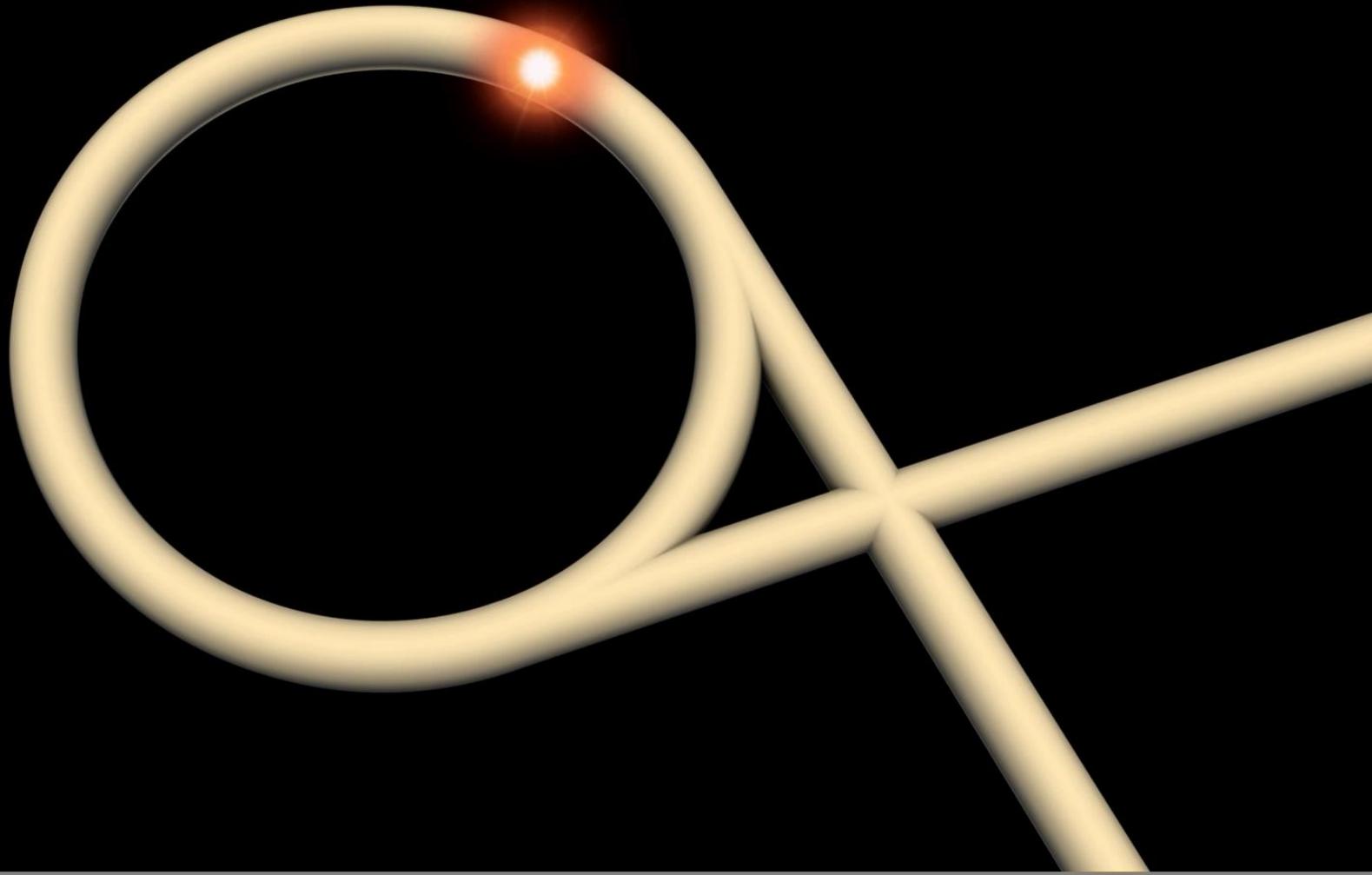
# Une machine à records



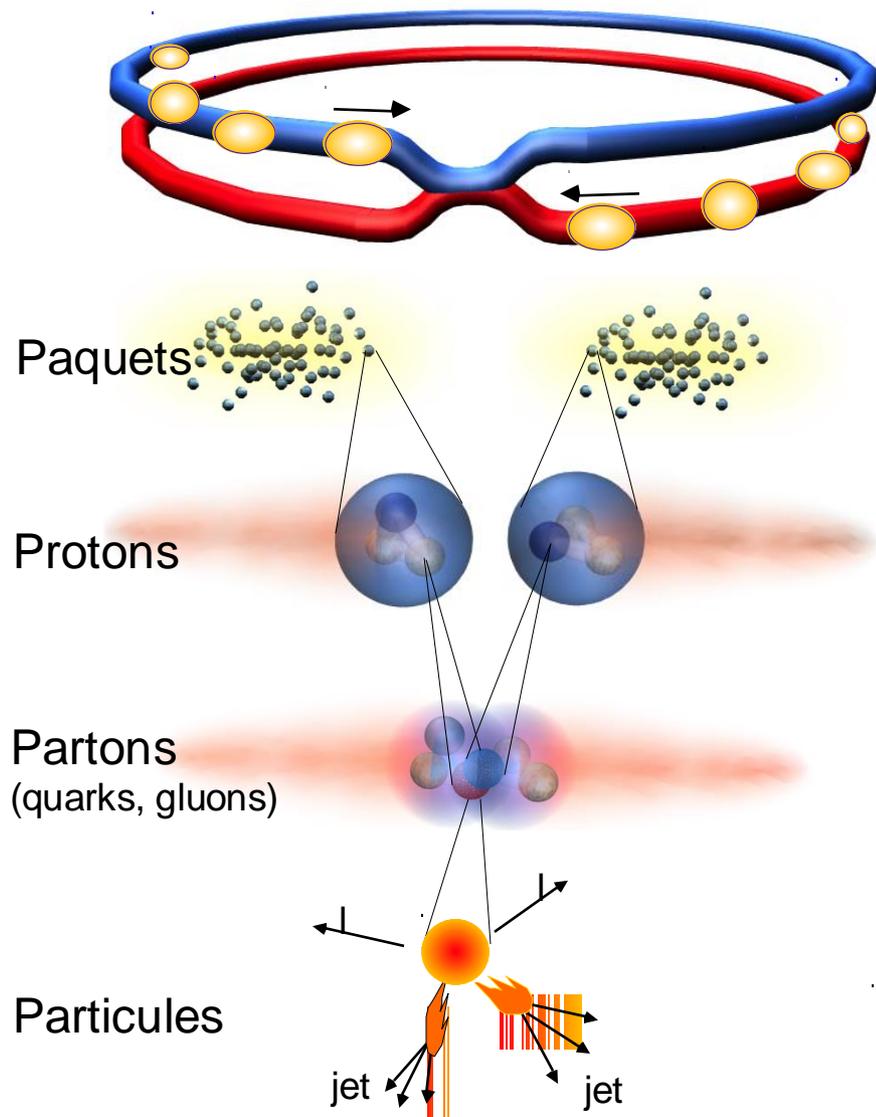
**Une énergie de collision équivalente a une température  
100 000 x celle du centre des étoiles les plus chaudes ...**



# Le LHC



# Les collisions proton-proton



Proton - Proton  $\sim 2500 + \sim 2500$  paquets

Protons par paquet  $\sim 10^{11}$

Energie des faisceaux: **6.8 + 6.8 Tera eV**

Luminosité  $\sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Croisements de faisceaux: 40 MHz,  
(25 ns)

**$\sim 40$  collisions de protons** par  
croisement de faisceaux

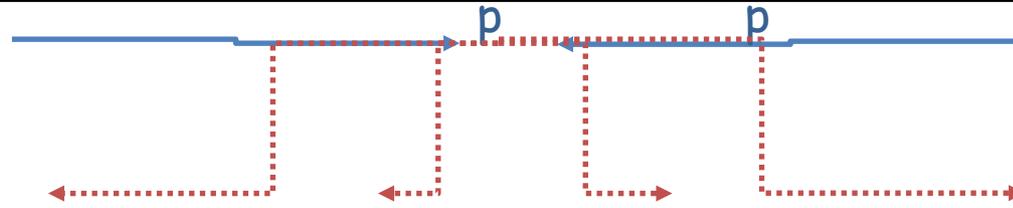
Collisions de protons  $> 10^9$  Hz

**Physique intéressante  $\approx 10^{-5}$  Hz**  
(bosons W, Z, quark Top, Higgs, ...)

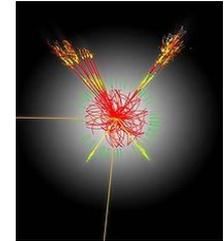
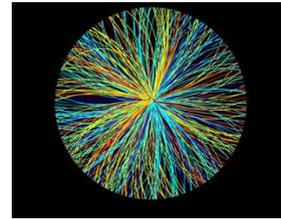
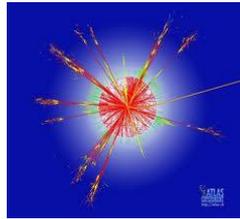
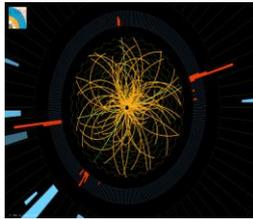
**Sélection d'événements:**  
**1 / 10,000,000,000,000**

# L'univers quantique : le royaume des probabilités !

Un type de collision



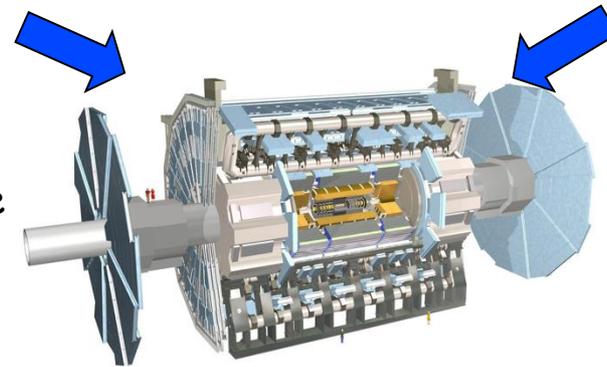
Plusieurs types d'événements



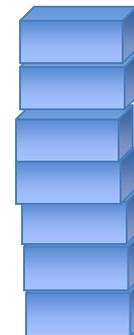
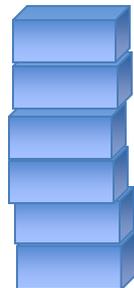
Processus connus

Processus nouveau et rare

Détecteur :  
Tri/comptage



Nbre événements observés



$10^2$  collisions  
 $10^3$  collisions  
 $10^6$  collisions  
 $10^9$  collisions

# Un travail de détective ...

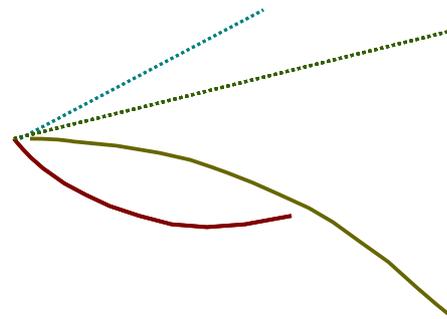
**Objectifs des chercheurs** : Comprendre ce qui a été produit dans le détecteur

- Mesurer des grandeurs physiques (masses, « forces » ...)
- Rechercher de nouvelles particules (souvent très massives)
- Etudier les phénomènes rares

bosons (forces)			
2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 $\gamma$ photon
4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_e$ neutrino électronique	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\mu$ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\tau$ neutrino taupique	91.2 GeV 0 1 $Z^0$ boson Z <sup>0</sup>
0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e électron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ $\mu$ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ $\tau$ tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 W <sup>±</sup> boson W

■ Sont directement détectables :

les particules stables : électrons, muons, photons



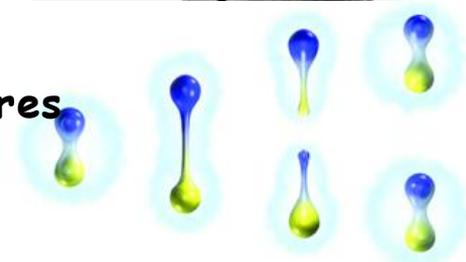
■ Sont indirectement observables :

1) les particules instables : taus, tops, W...  
→ détection des particules filles

2) les particules qui n'existent pas à l'état libre :  
les quarks et gluons s'hadronisent !

→ détection des objets composés : hadrons chargés et neutres  
→ expérimentalement on détecte des "jets" (de particules)

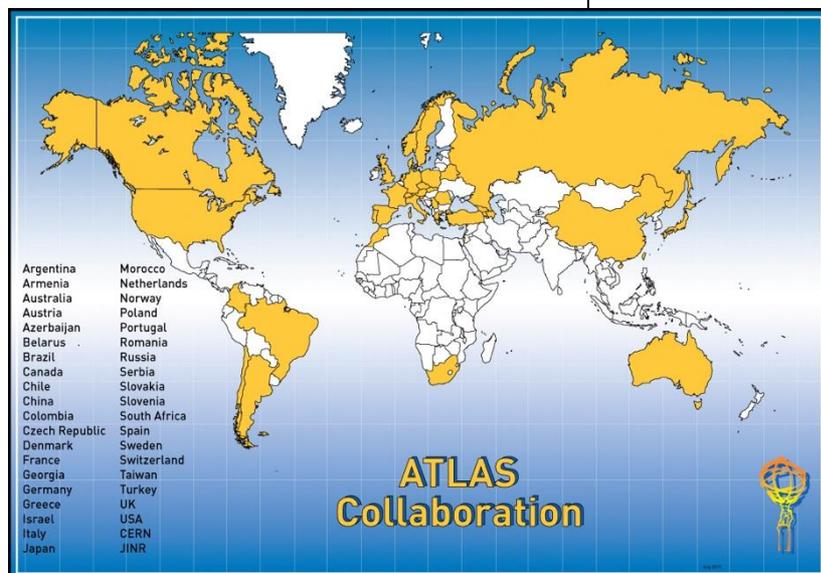
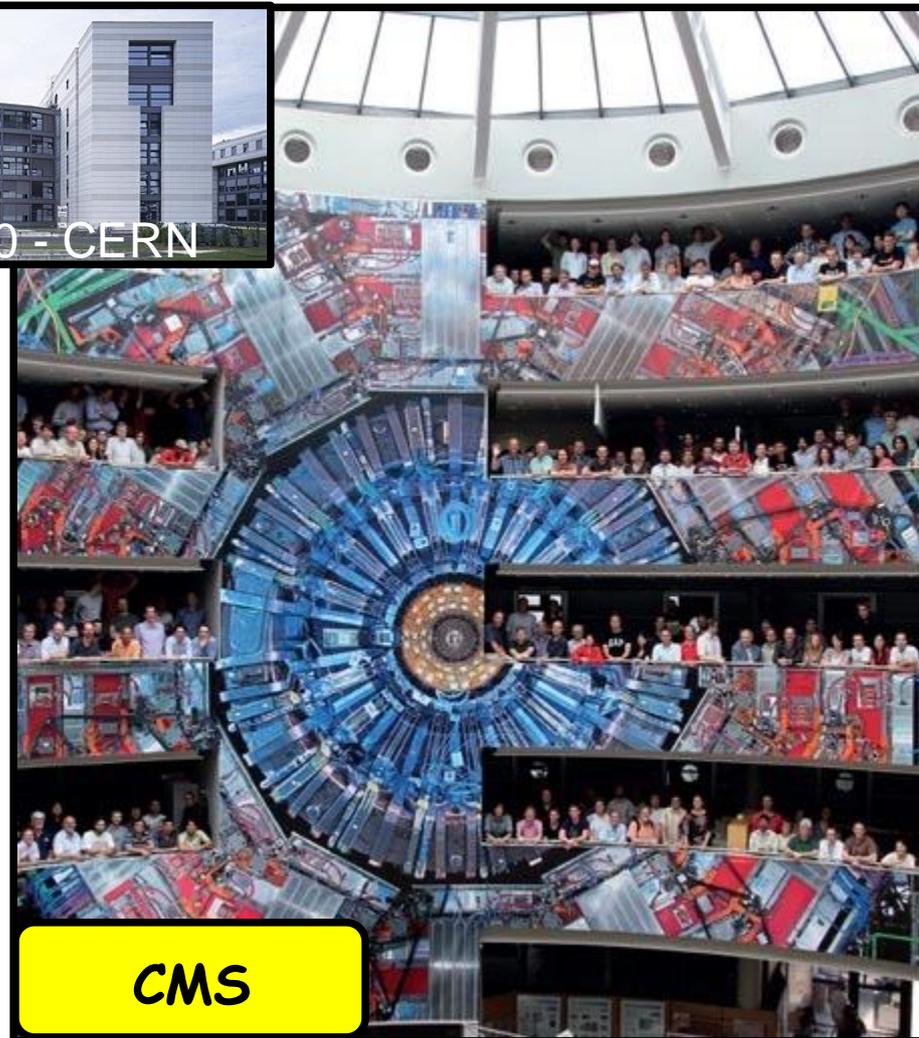
3) les neutrinos sont "invisibles" - n'interagissent pas avec le détecteur



q

$\bar{q}$

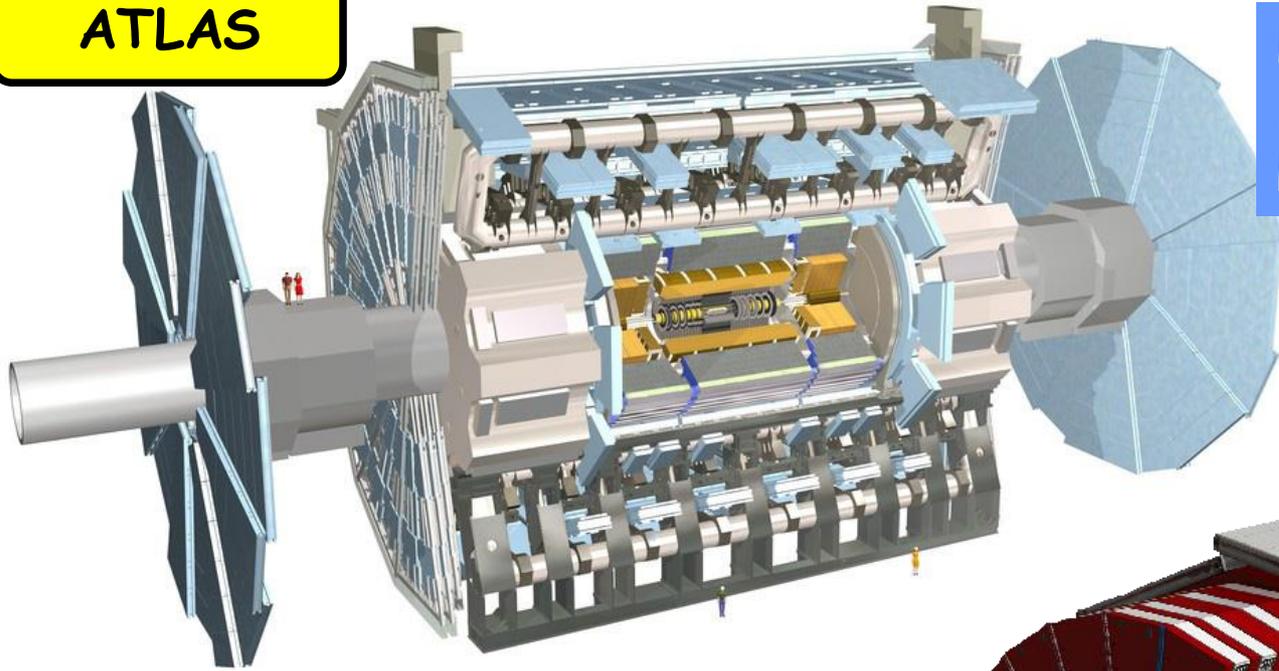
# Collaborations internationales



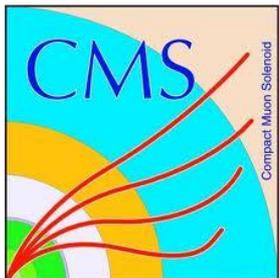
Par collaboration : > 40 pays impliqués  
> 170 instituts  
> 3200 physiciens dont 1500 doctorants  
> 800 ingénieurs & techniciens

# Des détecteurs impressionnants

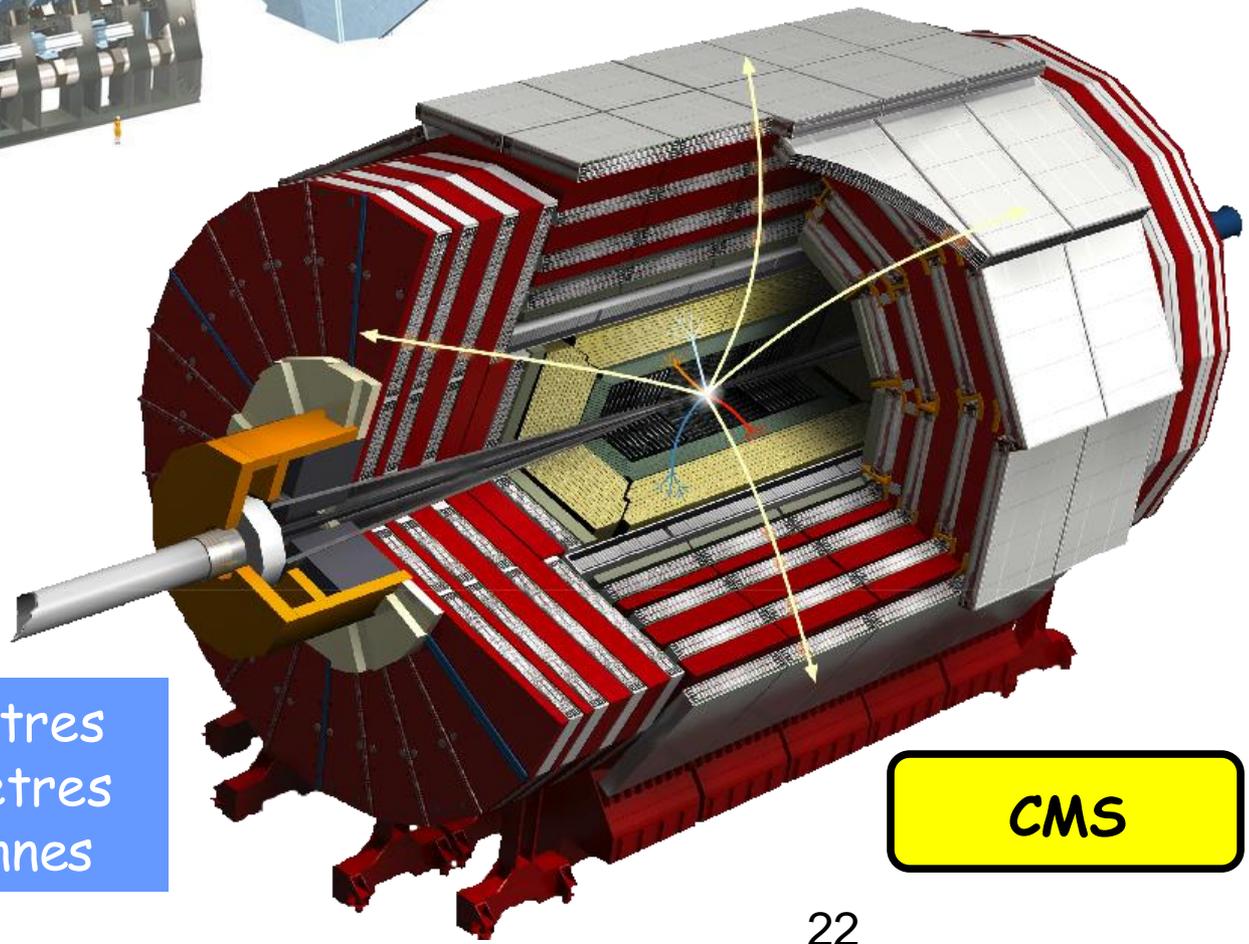
ATLAS



Longueur : 44 mètres  
Diamètre : 25 mètres  
Poids : 7000 tonnes

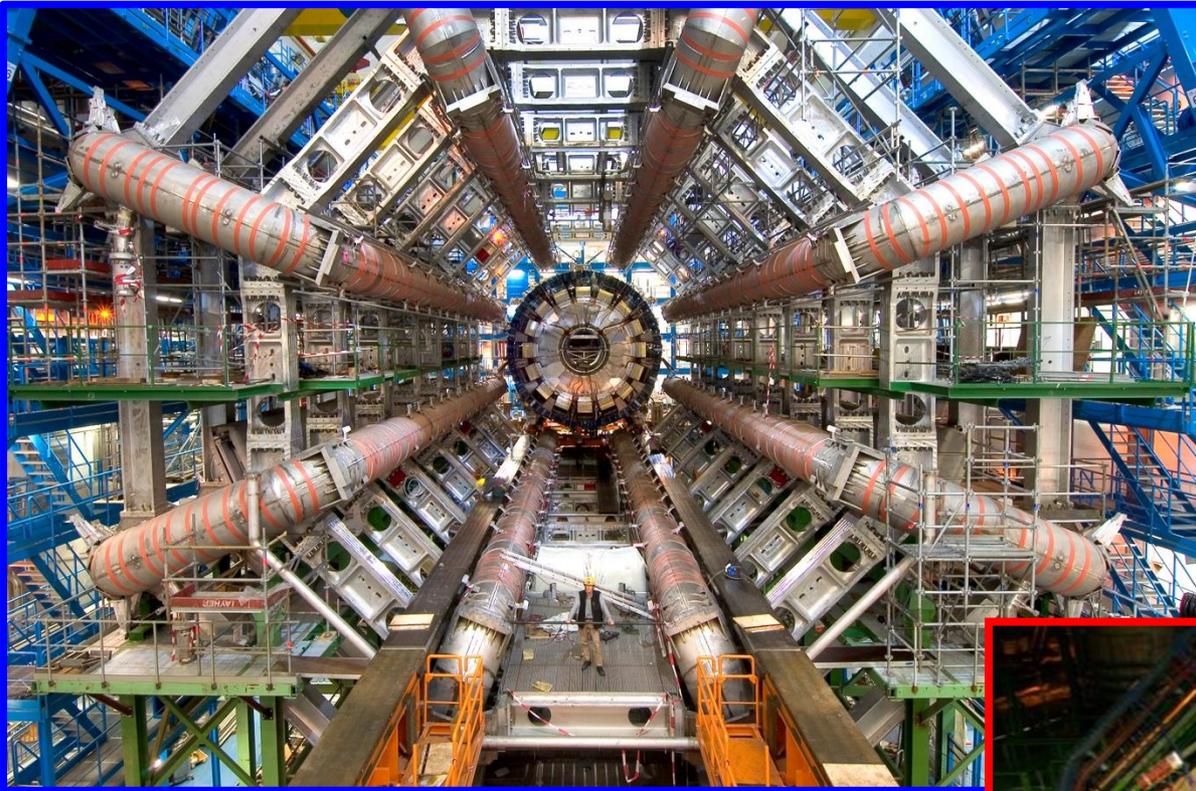


Longueur : 21 mètres  
Diamètre : 15 mètres  
Poids : 12500 tonnes

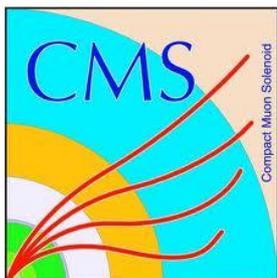
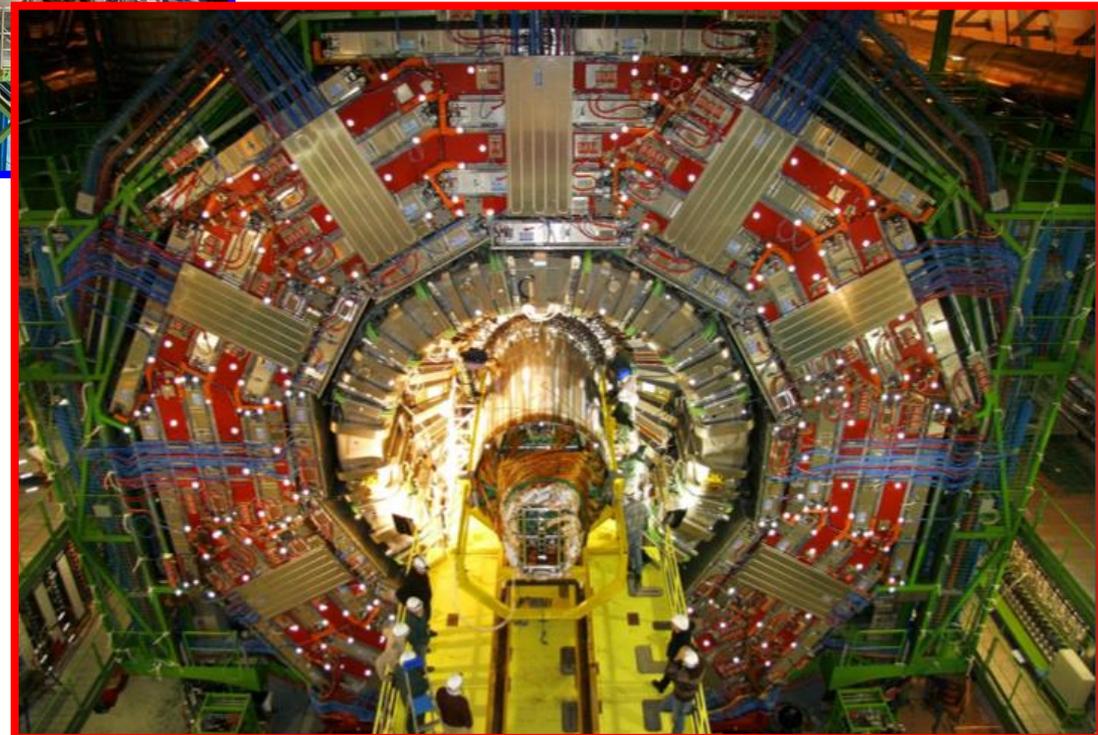


CMS

# Des détecteurs impressionnants



Longueur : 44 mètres  
Diamètre : 25 mètres  
Poids : 7000 tonnes



Longueur : 21 mètres  
Diamètre : 15 mètres  
Poids : 12500 tonnes

# Principe de détection de particules

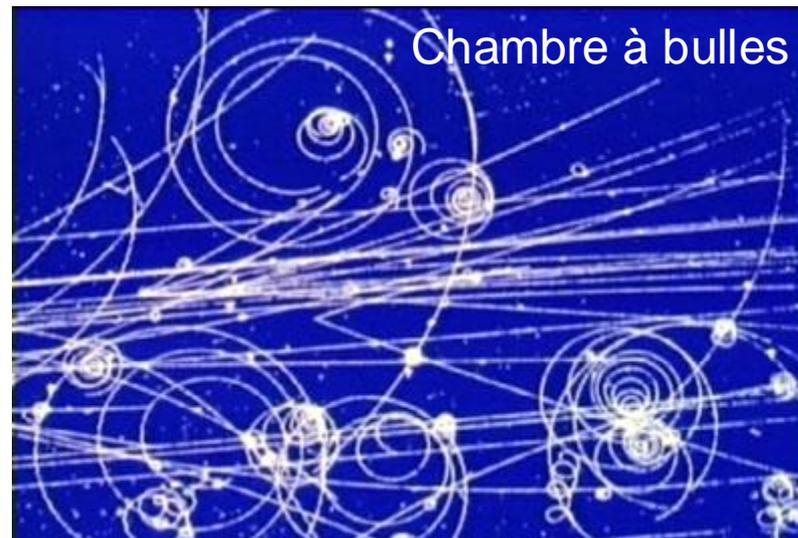
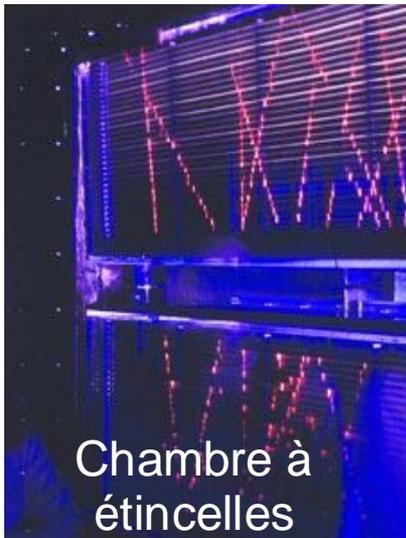
Les particules élémentaires **ne peuvent pas être « vues » directement** comme une cellule pourrait l'être avec un microscope ...

On signe la présence des particules par l'**observation de leurs interactions avec le milieu** qu'elles traversent, *ie* les systèmes de détection

**avion**  
=  
**particule**

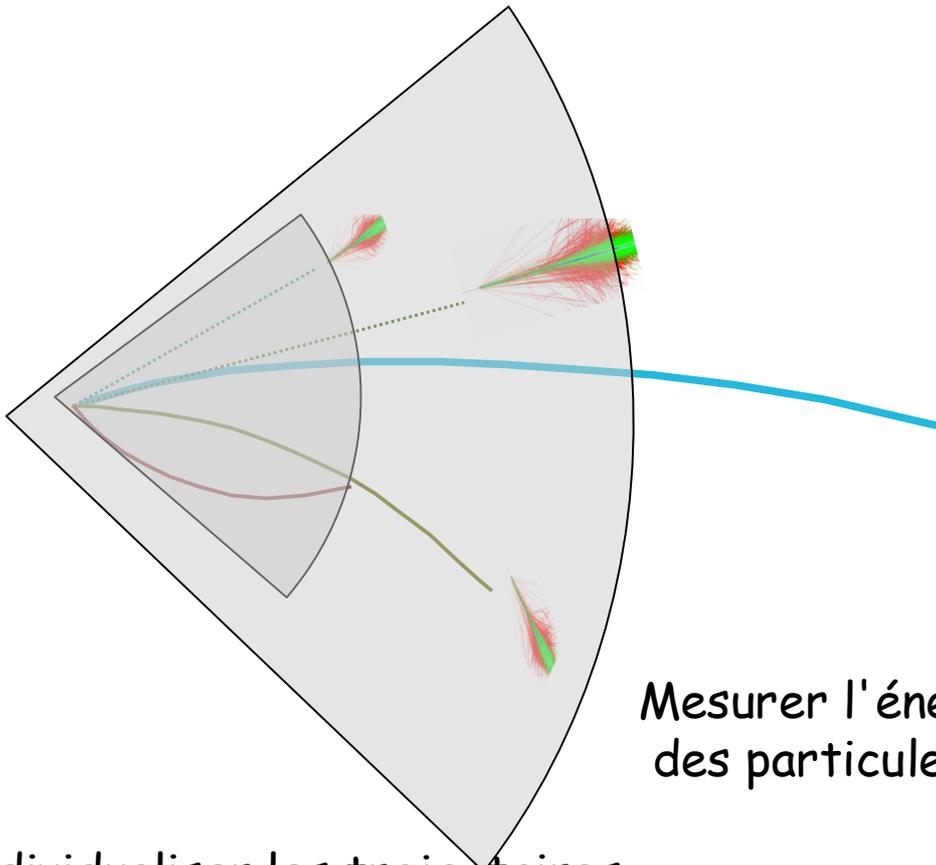


**air**  
=  
**détecteur**



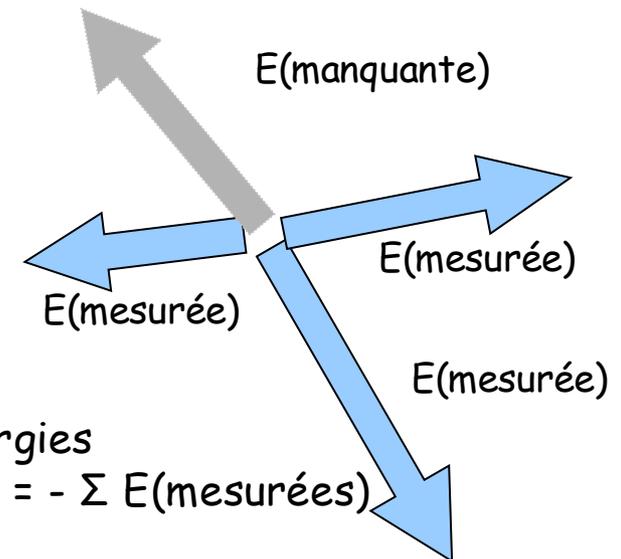
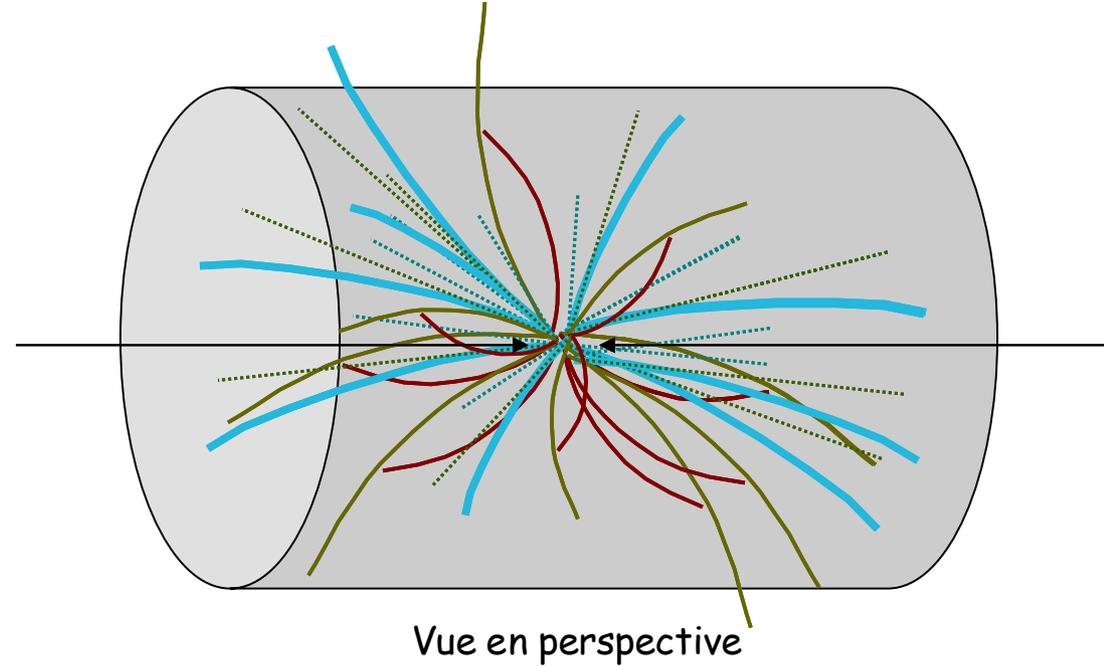
# Rôles du détecteur

Observer toutes les particules :  
→ géométrie **hermétique**



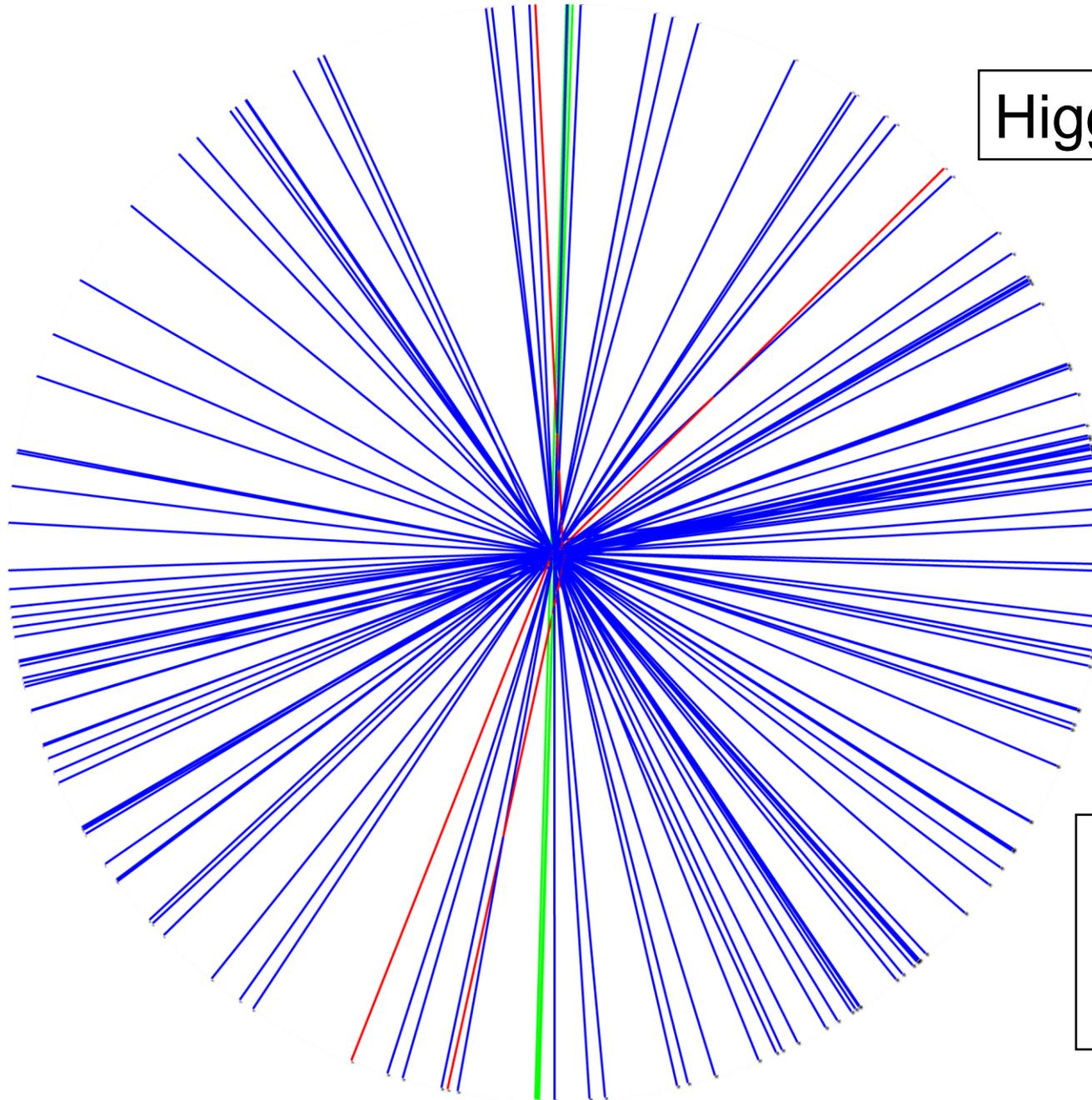
Mesurer l'énergie  
des particules = **calorimètre**

Individualiser les trajectoires  
des particules = **trajectographe**



Bilan :  $0 = \square$  énergies  
→  $E(\text{manquante}) = - \sum E(\text{mesurées})$

# Exemple d'événement simulé au LHC

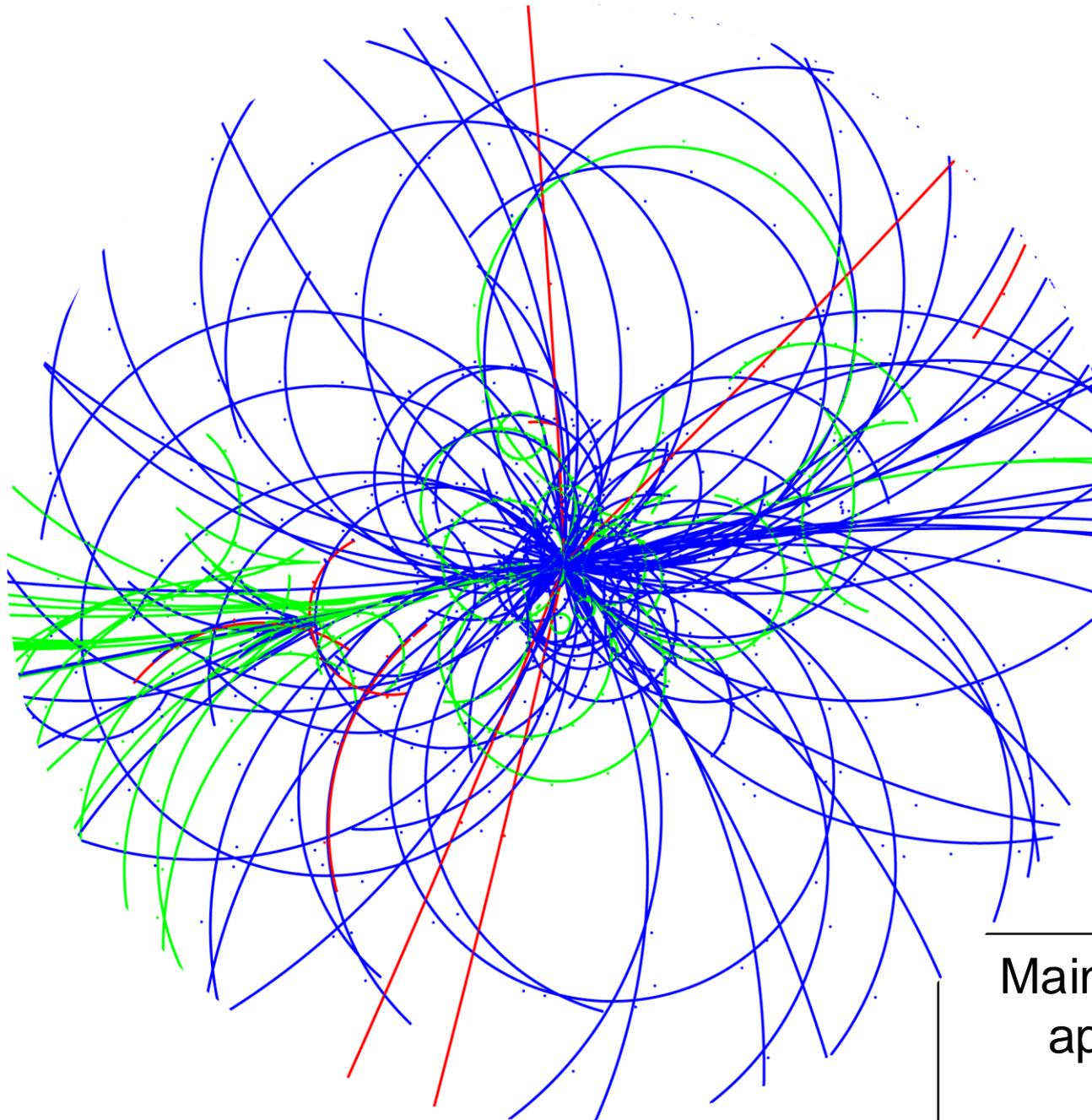


Higgs  $\rightarrow$  4 muons

Où sont les  
muons ?

Les lignes  
rouges sont  
les muons ...

# Ajoutons un champ magnétique ...

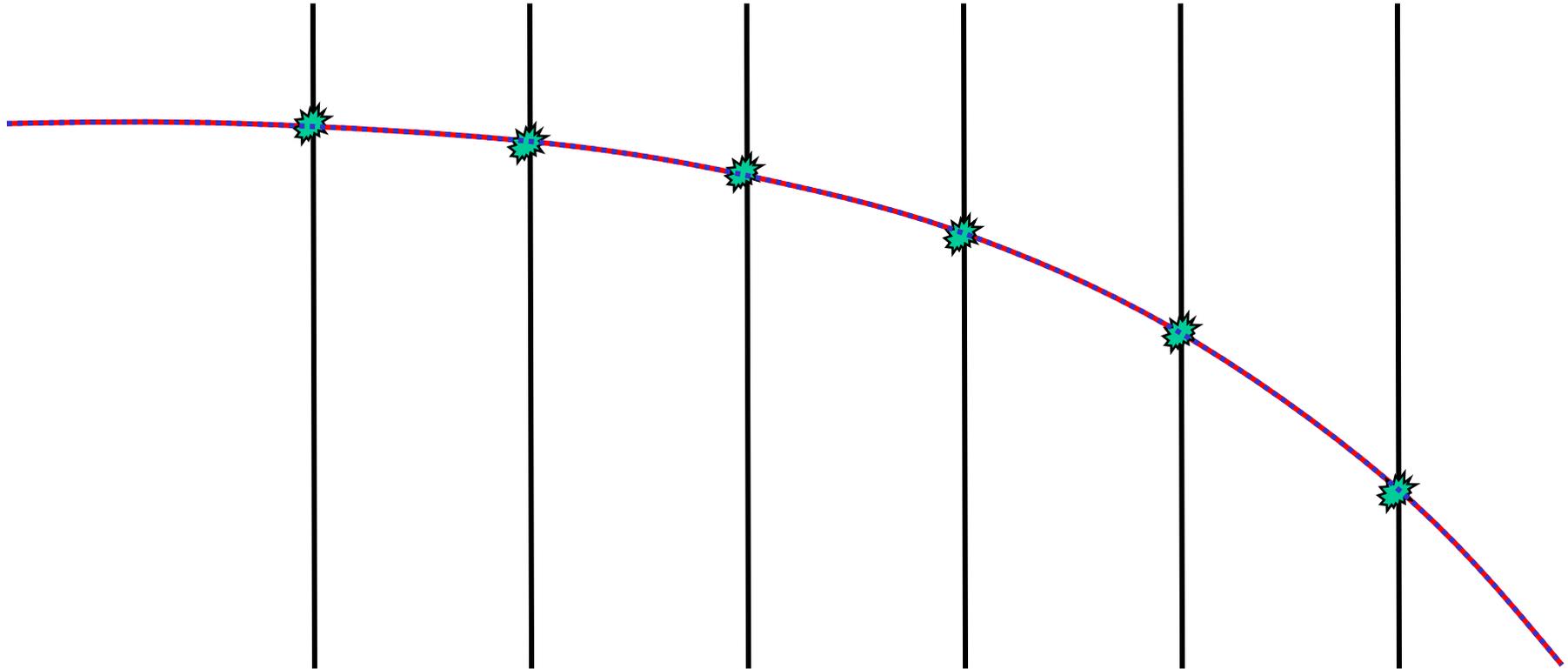


Les particules chargées sont **courbées** en présence du **champ magnétique**

Plus les particules ont une faible impulsion ( $\sim$ vitesse) plus elles sont courbées.

Maintenant les muons apparaissent plus clairement !

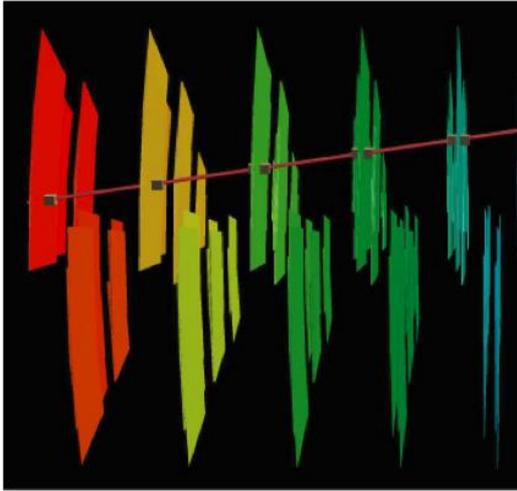
# Principe de la « trajectographie »



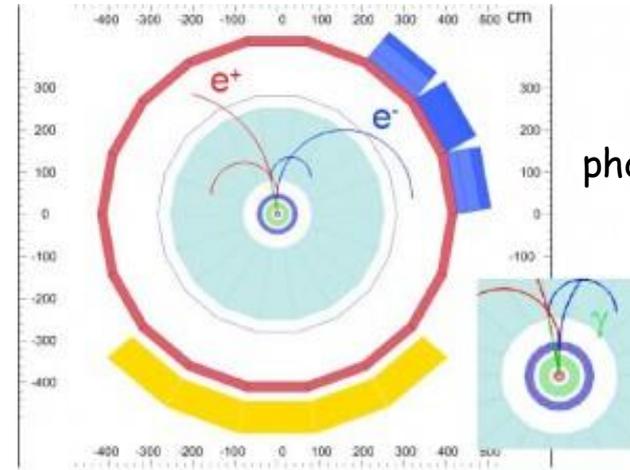
Exemple de trajectographe comprenant plusieurs couches de détection

# Principe de la « trajectographie »

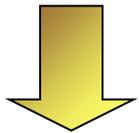
Le principe de base



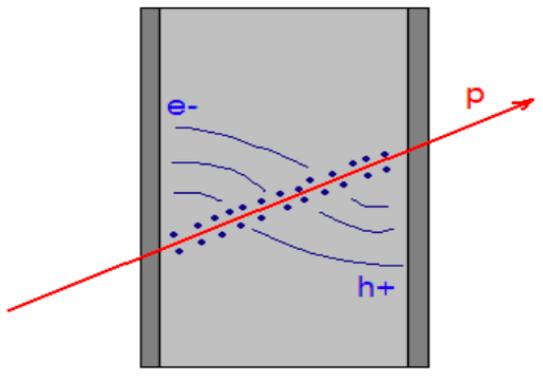
Mesurer la charge des particules  
→ nécessite un **champ magnétique**  
qui courbe les trajectoires suivant la charge



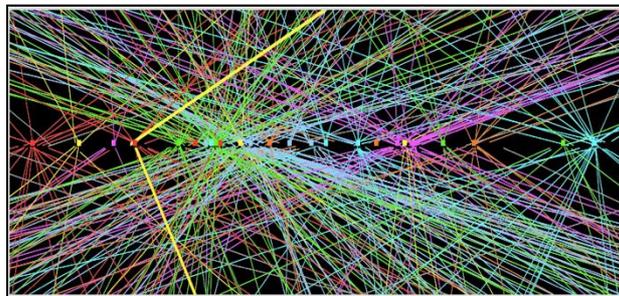
photon( $\gamma$ )  $\rightarrow$   $e^+$  +  $e^-$



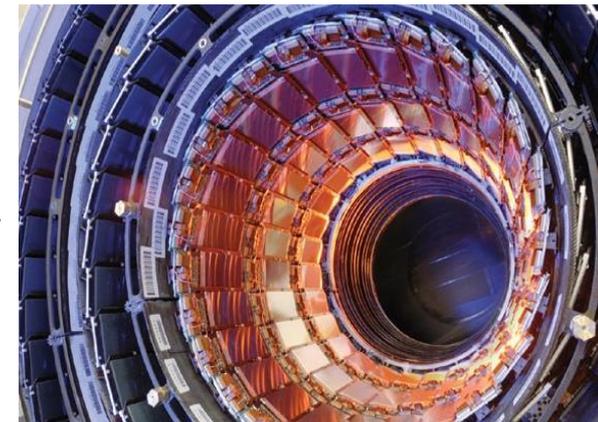
Ionisation des atomes



La « vraie » vie

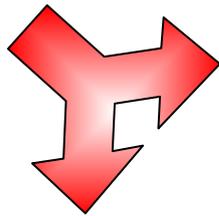


Détecteurs très segmentés  
(→ très nombreux pixels)

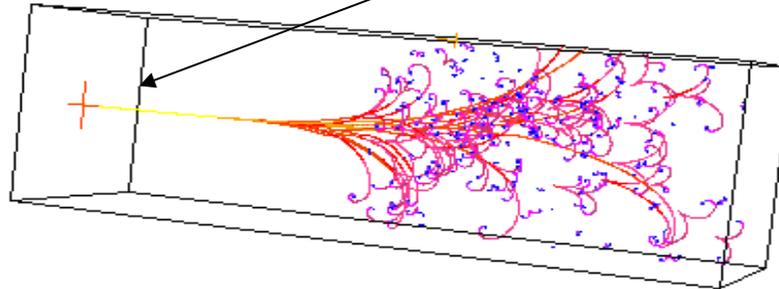


# Le calorimètre

Le principe de base :  
arrêter la particule  
ET mesurer un signal

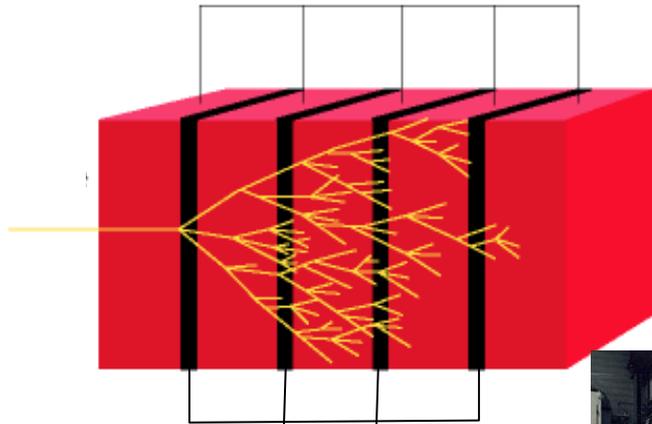


Milieu dense ET transparent = cristal dopé au plomb



Adapté aux  
particules légères :  
électrons, photons

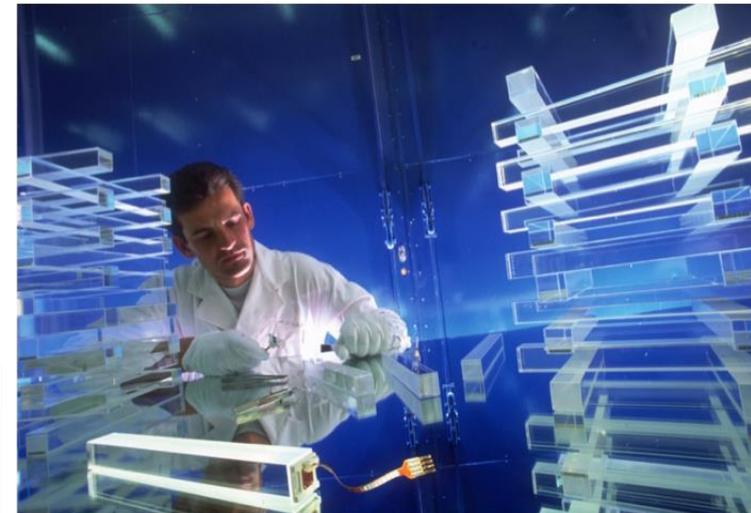
Plaques de métal



Milieu scintillant  
et transparent

Les muons échappent  
aux 2 pièges !

Adapté aux  
particules lourdes:  
hadrons neutres ou chargés



**Segmentation** obligatoire  
pour séparer les particules

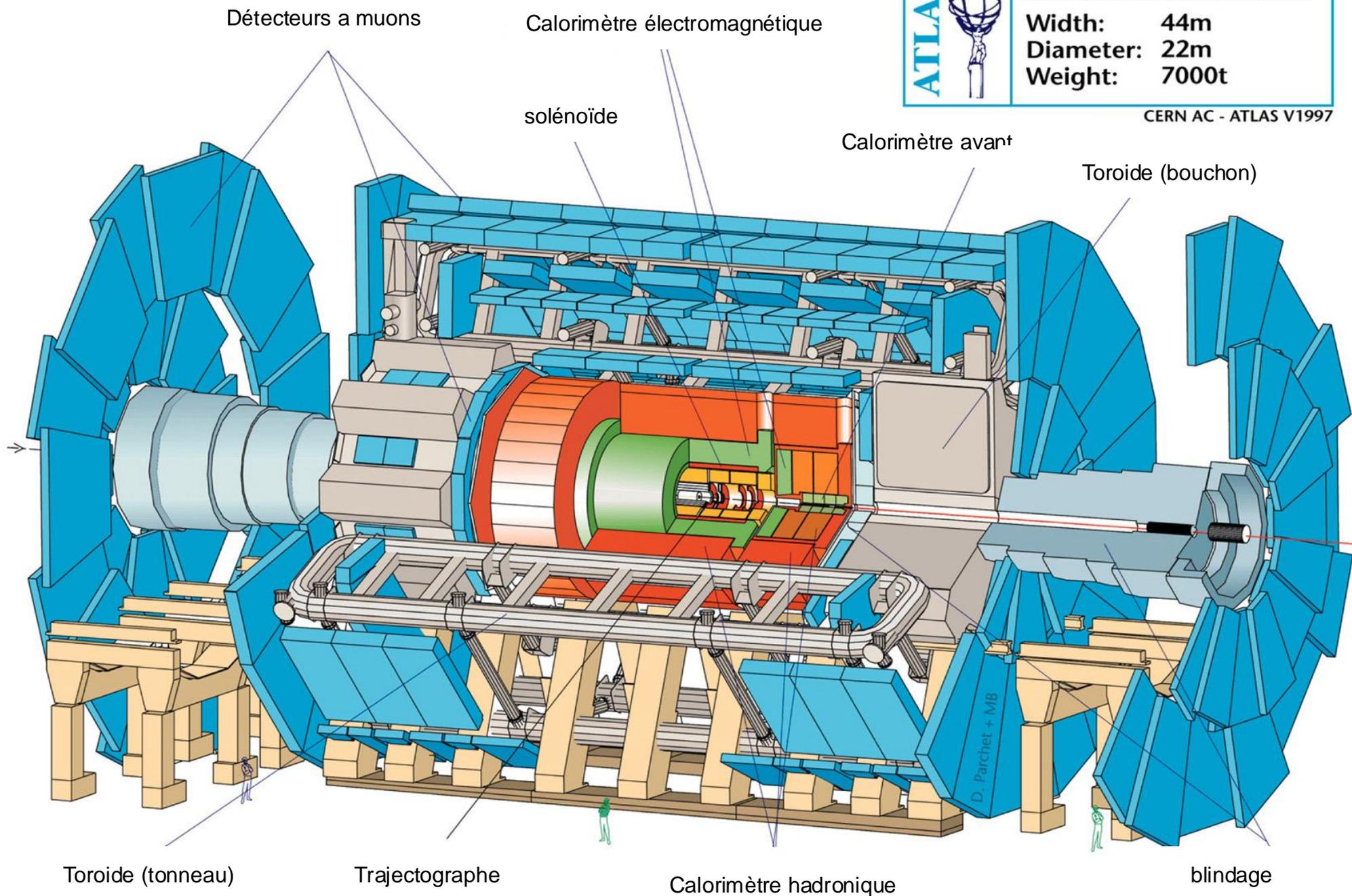
# Des détecteurs impressionnants



## Detector characteristics

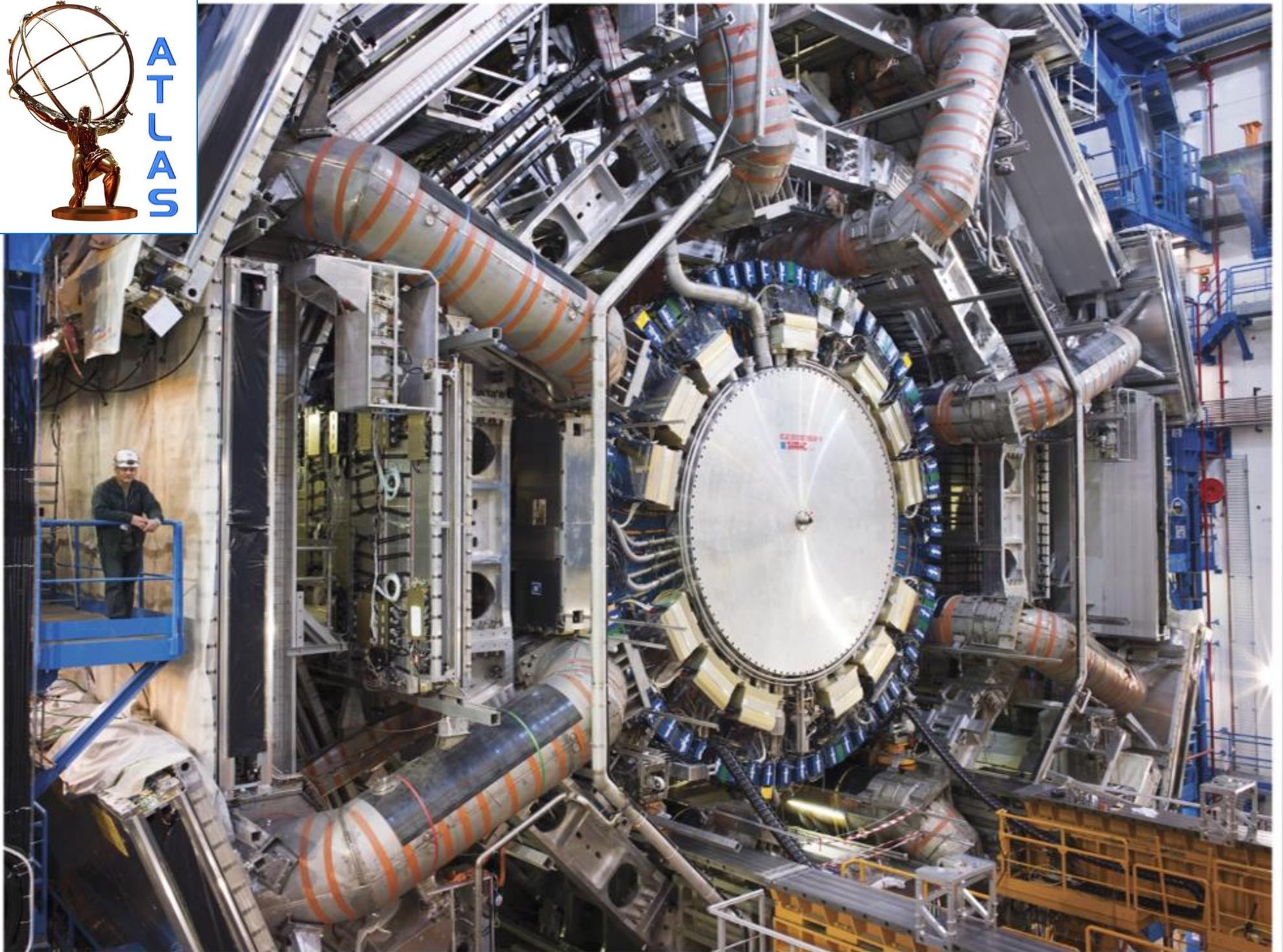
Width: 44m  
Diameter: 22m  
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

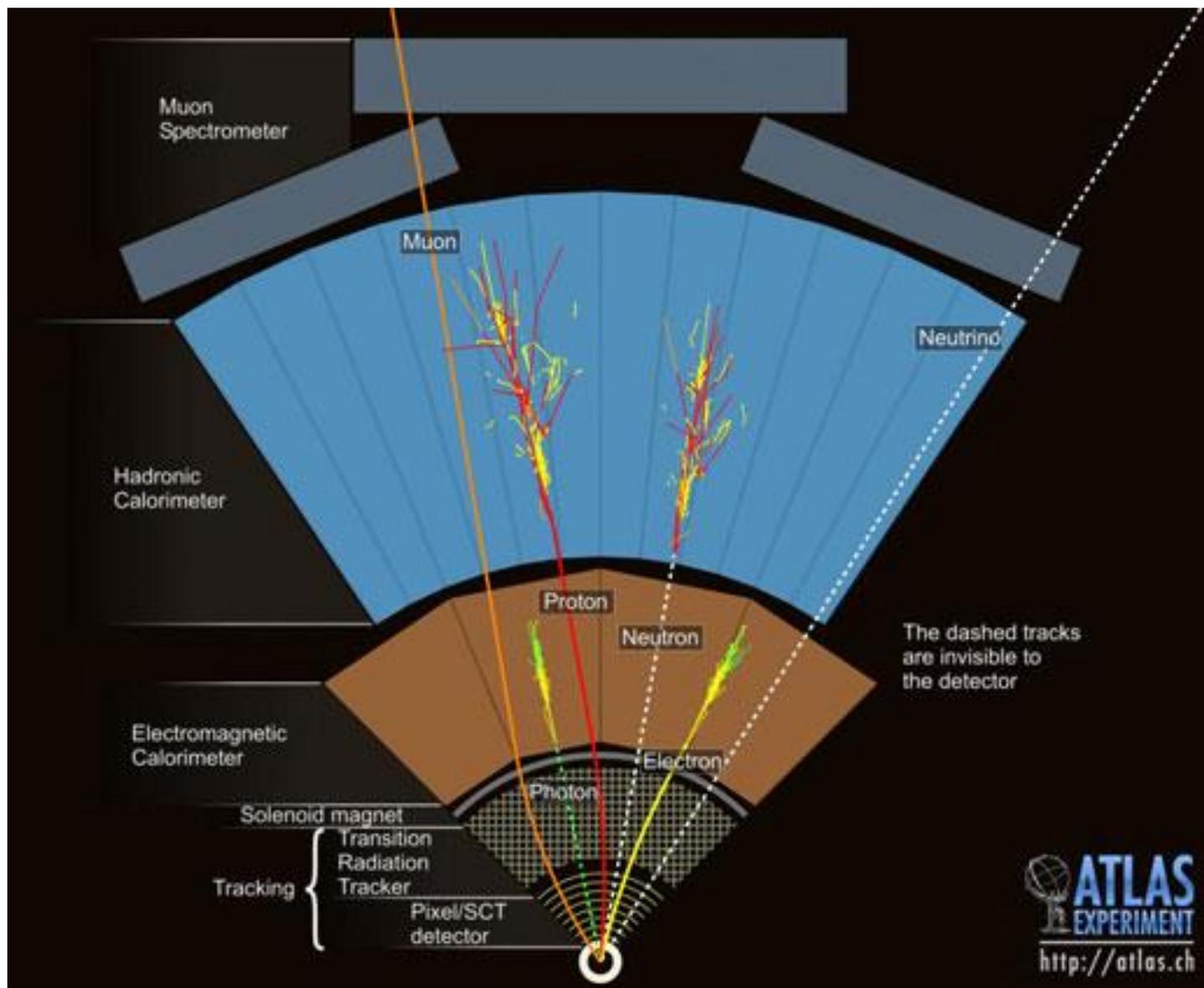




ATLAS



# Reconstruction des particules : ATLAS



A vous de jouer ...



# A vous de jouer ...

