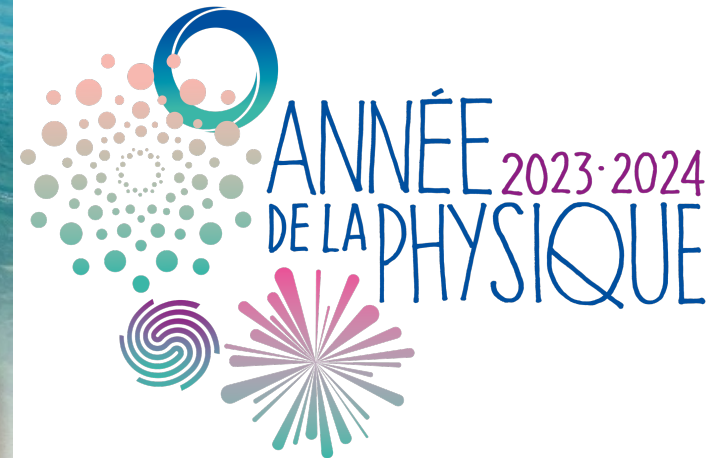
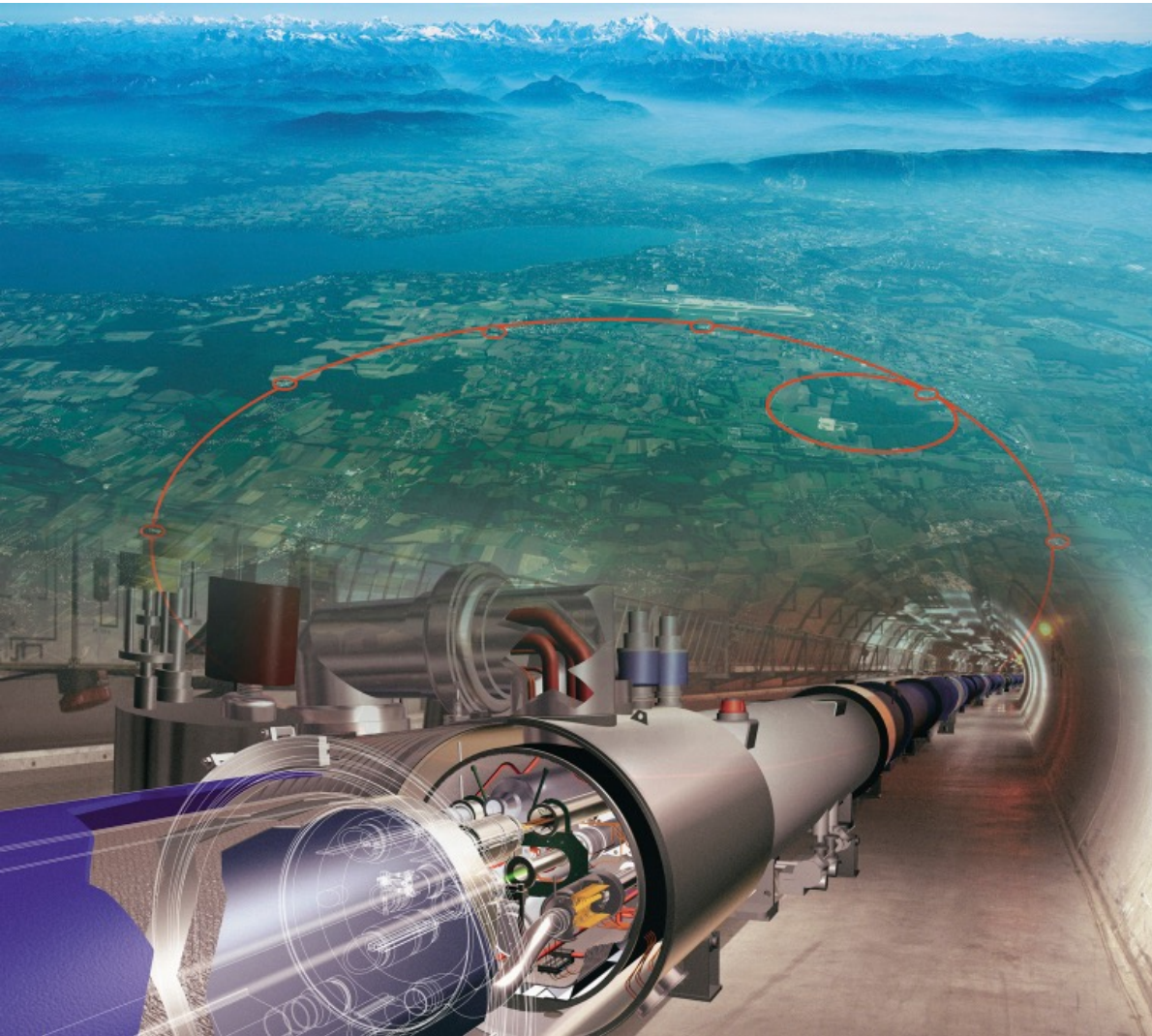


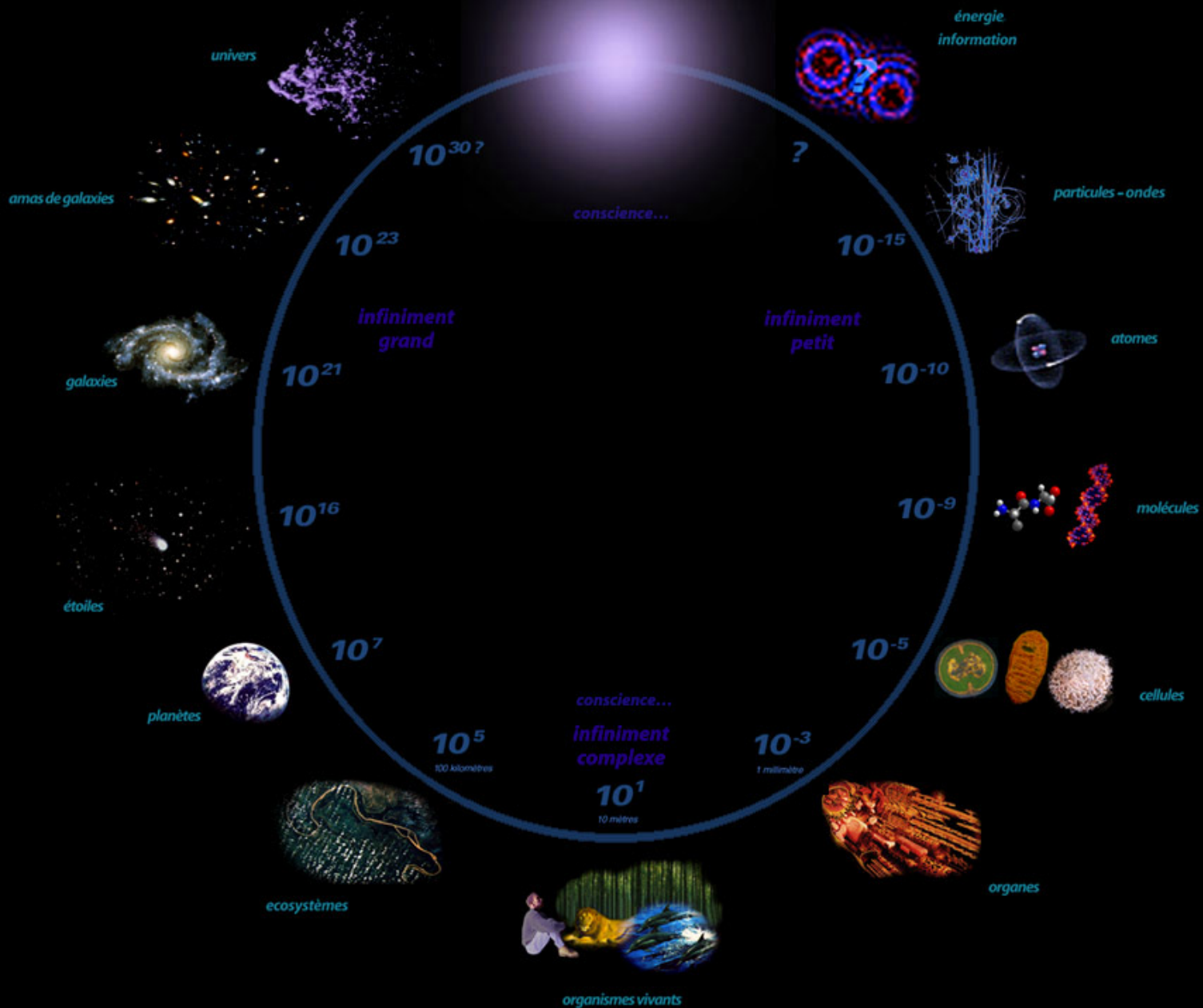
# *Master Classes 2024*

## **La physique des particules: voyage au cœur de la matière**



- De quoi le monde est-il fait ?  
de particules
- Comment tout cela tient-il ensemble ?  
les interactions (« forces »)
- Les outils pour « voir » tout ça :  
les accélérateurs et les détecteurs

# Quelques ordres de grandeur





# Quelques ordres de grandeur



La dernière image est 10 000 000 000 000 000 ( $10^{16}$ )  
de fois plus petite que la première

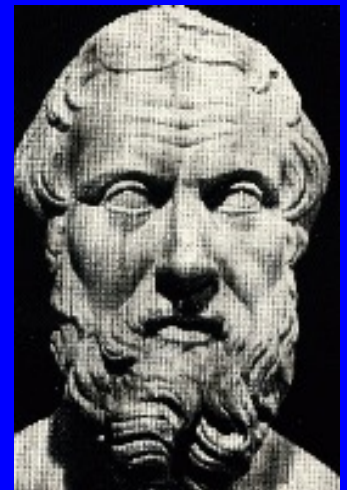


# La quête du fondamental

- Depuis la nuit des temps, l'homme a cherché à appréhender les briques fondamentales de son univers
- **Fondamental** = simple, **sans structure**

Démocrite (400 avant J.-C.)

postule l'existence d'objets sans structure interne = **atomes**



# Les premiers concepts



Aristote  
(384-322av JC)



ELEMENTS	
Hydrogen. 1	Strontian 86
Azote 5	Barytes 68
Carbon 6	Iron 50
Oxygen 7	Zinc 56
Phosphorus 9	Copper 56
Sulphur 13	Lead 90
Magnesia 20	Silver 190
Lime 28	Gold 190
Soda 28	Platina 190
Potash 42	Mercury 167

Dalton (1808)

# Le Tableau Périodique



**TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS**

http://www.kgf-split.fr/periodique/

PÉRIODE	GROUPE																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H 1,0079 HYDROGÈNE																	He 4,0026 HELIUM
2	Li 6,941 LITHIUM	Be 9,0122 BERYLLIUM											B 10,811 BORE	C 12,011 CARBONE	N 14,007 AZOTE	O 15,999 OXYGÈNE	F 18,998 FLUOR	Ne 20,180 NEON
3	Na 22,990 SODIUM	Mg 24,305 MAGNÉSIE											Al 26,982 ALUMINIUM	Si 28,086 SILICIUM	P 30,974 PHOSPHORE	S 32,065 SOUFRE	Cl 35,453 CHLORE	Ar 39,948 ARGON
4	K 39,098 POTASSIUM	Ca 40,078 CALCIUM	Sc 44,956 SCANDIUM	Ti 47,867 TITANE	V 50,942 VANADIUM	Cr 51,996 CHROME	Mn 54,938 MANGANESE	Fe 55,845 FER	Co 58,933 COBALT	Ni 58,693 NICKEL	Cu 63,546 CUIVRE	Zn 65,39 ZINC	Ga 69,723 GALLIUM	Ge 72,64 GERMANIUM	As 74,922 ARSENIC	Se 78,96 SELENIUM	Br 79,904 BROME	Kr 83,80 KRYPTON
5	Rb 85,468 RUBIDIUM	Sr 87,62 STRONTIUM	Y 88,906 YTTIRIUM	Zr 91,224 ZIRCONIUM	Nb 92,906 NIOBIUM	Mo 95,94 MOLYBDÈNE	Tc 98,906 TECHNETIUM	Ru 101,07 RUTHÈNIUM	Rh 102,91 RHODIUM	Pd 106,42 PALLADIUM	Ag 107,87 ARGENT	Cd 112,41 CADMIUM	In 114,82 INDIUM	Sn 118,71 ÉTAIN	Sb 121,76 ANTIMOINE	Te 127,60 TELLURE	I 126,90 IODE	Xe 131,29 XÉNON
6	Cs 132,91 CÉSURIUM	Ba 137,33 BARIUM	La-Lu 57-71 Lanthanides	Hf 178,49 HAFNIUM	Ta 180,95 TANTALE	W 183,84 WOLFRÈME	Re 186,21 RHÉNIUM	Os 190,23 OSMIUM	Ir 192,22 IRIDIUM	Pt 195,08 PLATINE	Au 196,97 OR	Hg 200,59 MERCURE	Tl 204,38 THALLIUM	Pb 207,2 PLOMB	Bi 208,98 BISMUTH	Po 209 POLONIUM	At 210 ASTATE	Rn 222 RADON
7	Fr 223 FRANCIUM	Ra 226 RADIUM	Ac-Lr 89-103 Actinides	Rf 261 RÉFÉRENCIÉ	Db 262 DUBNIUM	Sg 266 SEABORGIUM	Bh 264 BOHRIUM	Hs 277 HASSIUM	Mt 288 MÉTATRIUM	Uun 281 UNUNUNIUM	Uuu 282 UNUNBIUM	Uub 285 UNUNBIUM	Uuq 289 UNUNQUADIUM					

**LANTHANIDES**

57 138,91 La	58 140,12 Ce	59 140,91 Pr	60 144,24 Nd	61 (145) Pm	62 150,36 Sm	63 151,96 Eu	64 157,25 Gd	65 158,93 Tb	66 162,50 Dy	67 164,93 Ho	68 167,26 Er	69 168,93 Tm	70 173,04 Yb	71 174,97 Lu
--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

**ACTINIDES**

89 (227) Ac	90 232,04 Th	91 231,04 Pa	92 238,03 U	93 (237) Np	94 (244) Pu	95 (243) Am	96 (247) Cm	97 (247) Bk	98 (251) Cf	99 (252) Es	100 (257) Fm	101 (258) Md	102 (259) No	103 (262) Lr
-------------	--------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------

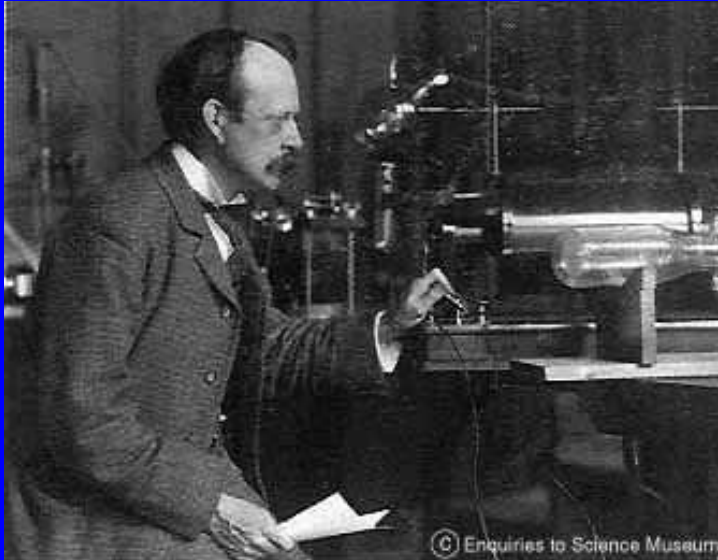
Editor: Michel Denis

Mendeleev (1869)

le rangement en colonne se fait par propriétés chimiques identiques à l'époque il y avait des trous dans le tableau !



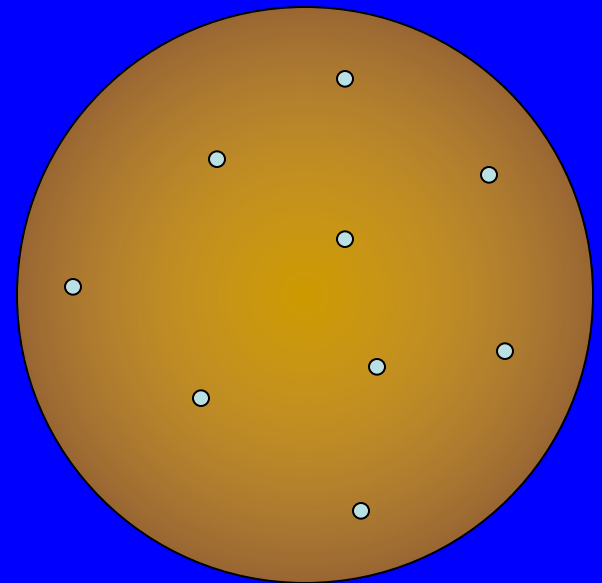
# Modèle atomique de Thomson



1897: découverte des électrons

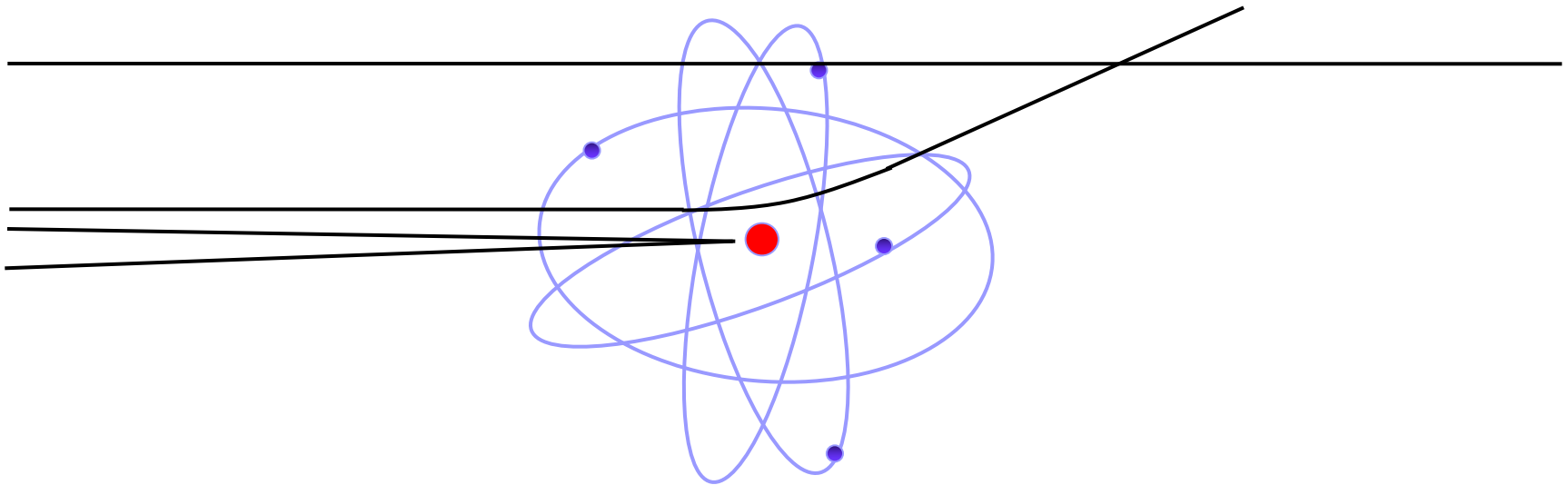
Début de la physique des  
particules!

Il imagine l'atome comme « un  
pudding aux pruneaux »

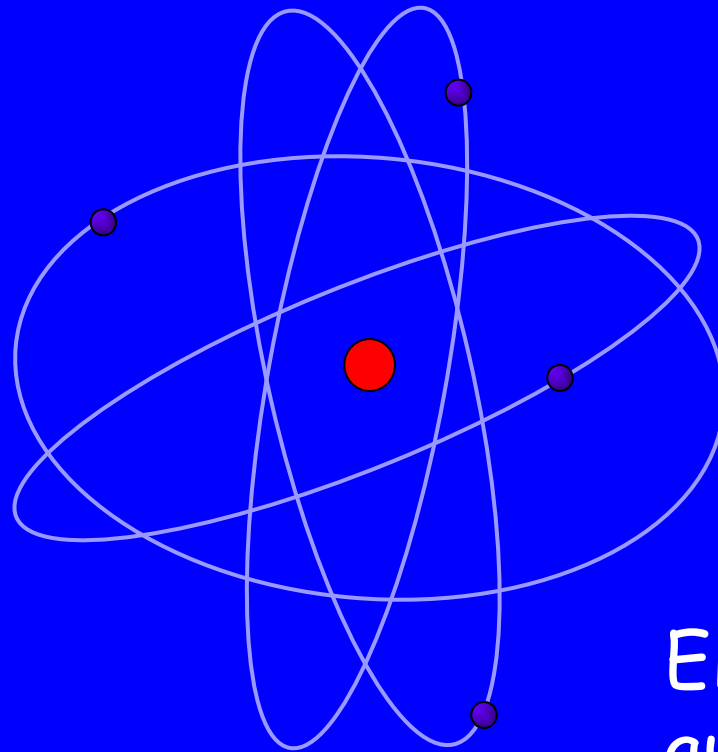
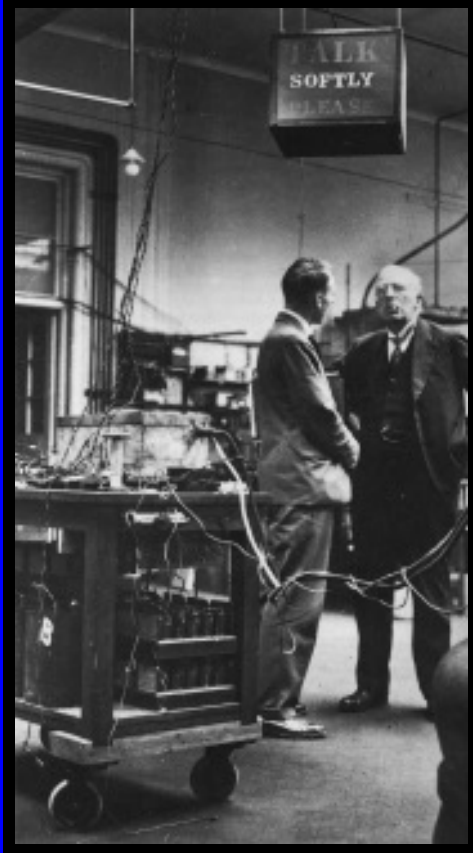


# L'expérience de Rutherford

Rutherford en 1912 bombarde des atomes d'or avec des noyaux d'hélium : matière faite de grands vides + points durs chargés positivement...



# C'est la découverte du noyau !



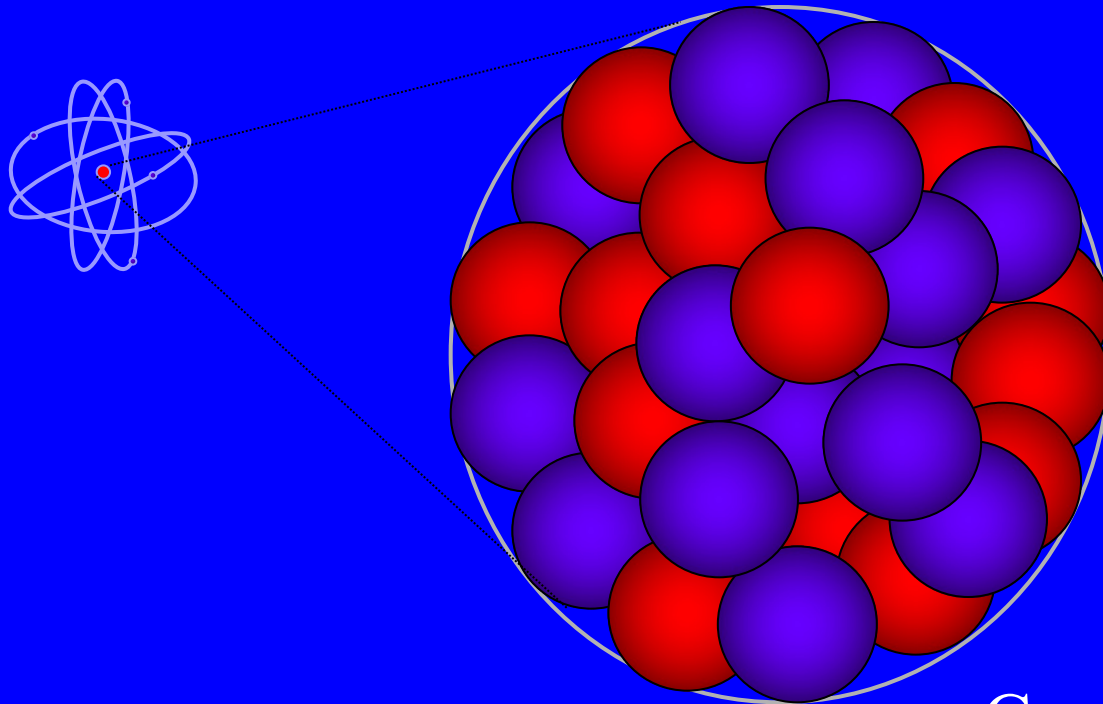
Rutherford  
(1912)

Electrons tournent  
autour du noyau

$10^{-10}$  m



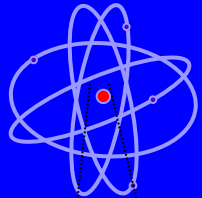
# La structure du noyau



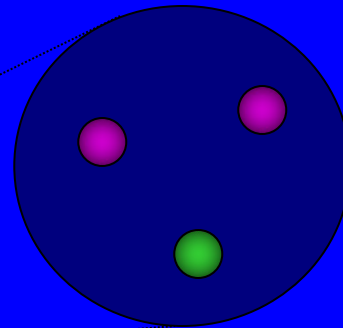
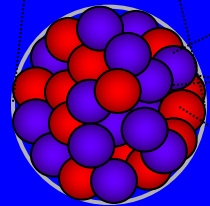
$10^{-14}$  m

Contient des protons  
et des neutrons

# La sous-structure des protons et neutrons (1960-1970)

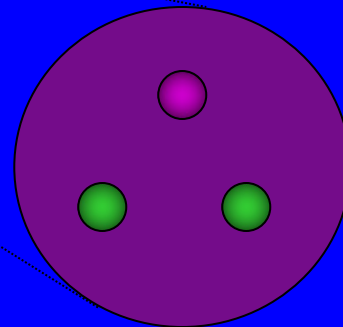


Les neutrons et protons sont faits de quarks



**Proton :**  
2 quarks up  
1 quark down

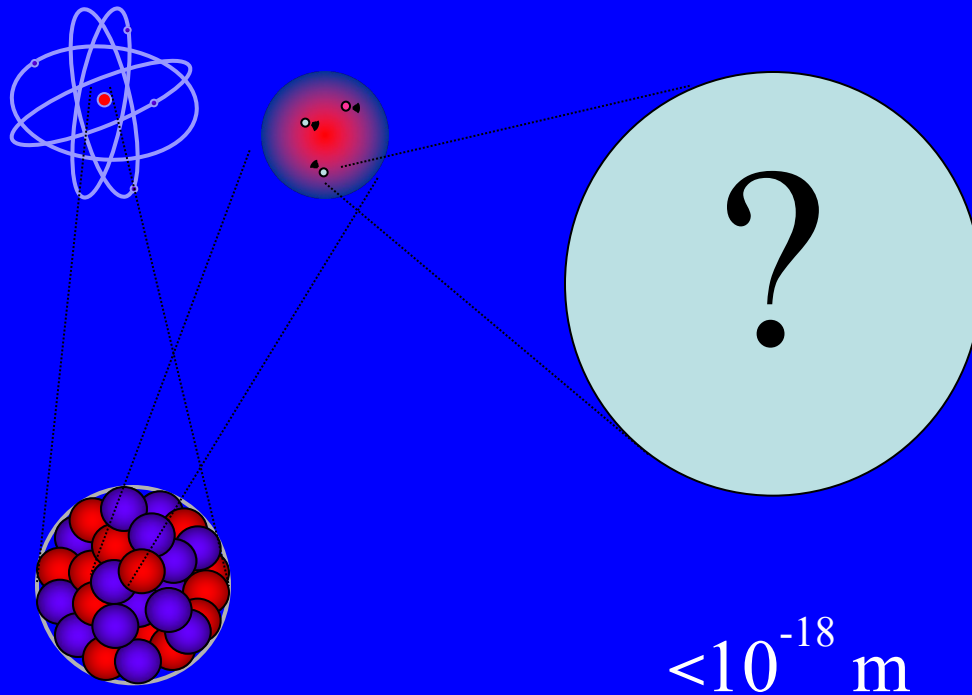
$10^{-15}$  m



**Neutron :**  
1 quark up  
2 quarks down

La sous-structure des protons et des neutrons est montrée en utilisant des électrons comme projectiles

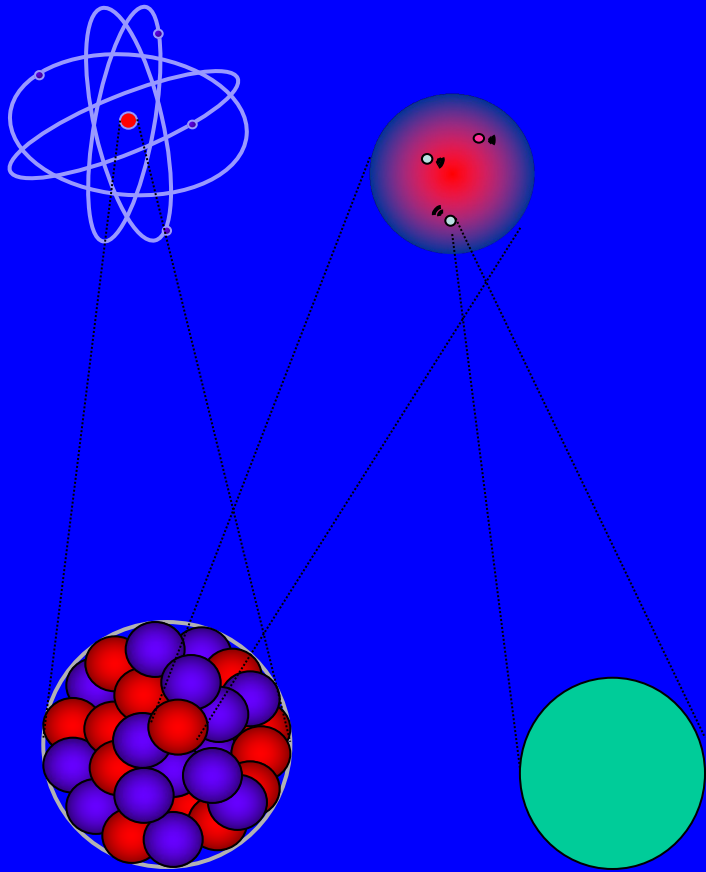
# Et la structure des quarks?



Aucune indication  
pour une structure  
des quarks

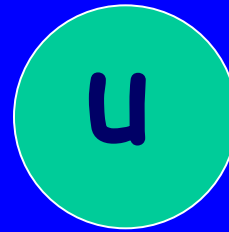


# Les constituants de la matière ordinaire



charge

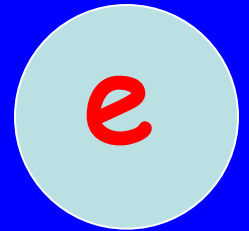
$+ 2/3 e$



$- 1/3 e$



$-e$

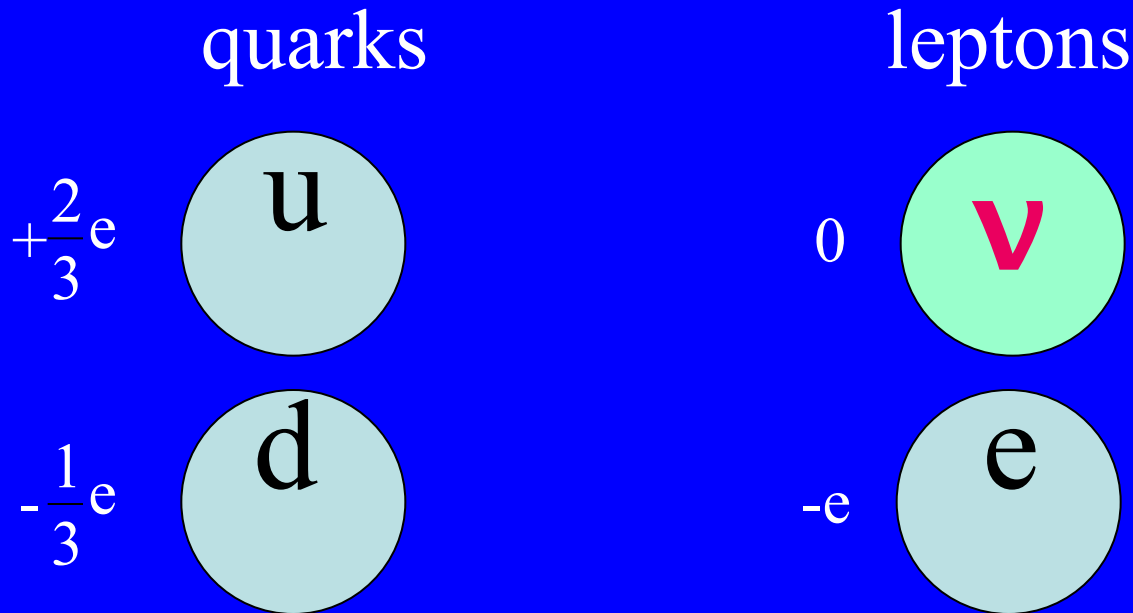


quark  
s

électron

# Le neutrino $\nu$

Neutrinos: particules « fantômes » qui interagissent très peu et qui ont une masse très faible



Idée de son existence : Pauli (1928). Son nom : Fermi (1933)

Découvert par Reines & Cowan (1956)

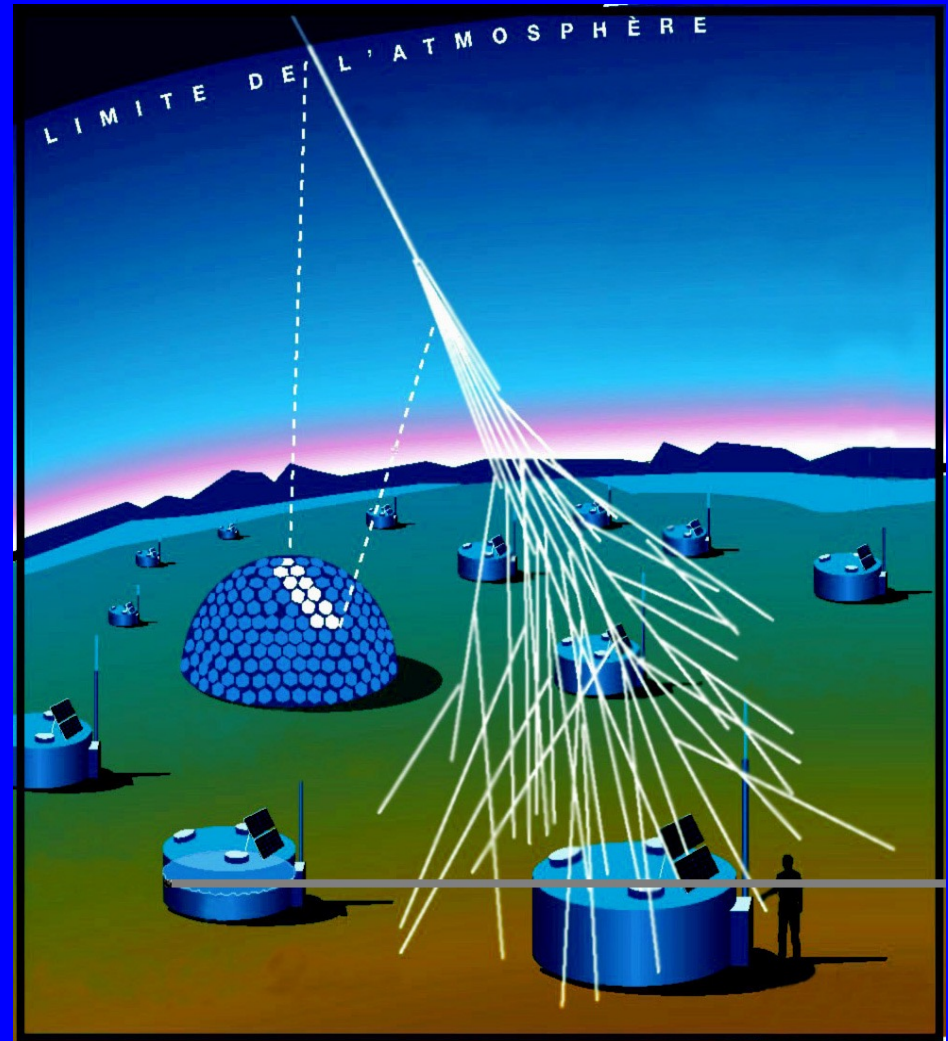
# D'autres particules...

## Le Muon ( $\mu$ ) :

Découvert dans les rayons cosmiques.  $1 \mu / (\text{min cm}^2)$

Semble identique à l'électron mais est 200 fois plus massif: il n'est pas stable, il se désintègre

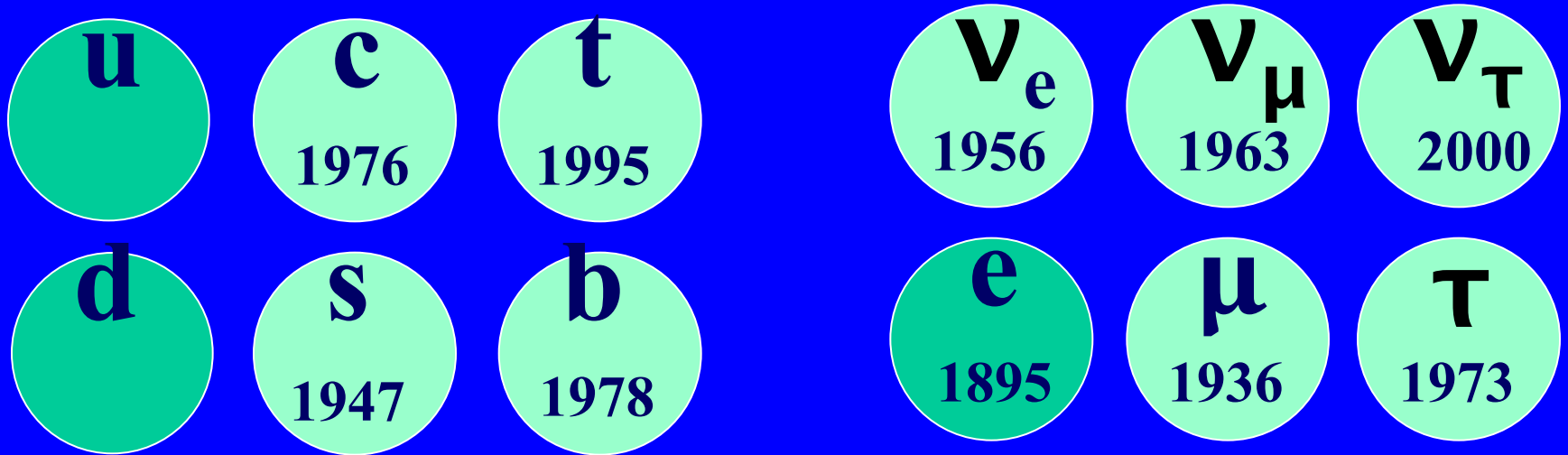
Beaucoup d'autres particules découvertes dans 1960-1970



Rayon cosmique rentrant dans l'atmosphère



# Particules élémentaires



six quarks

six leptons

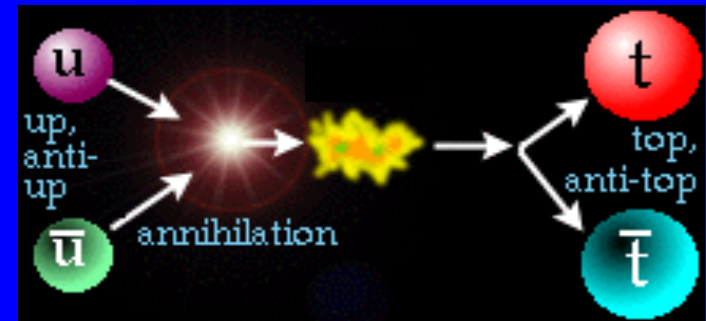
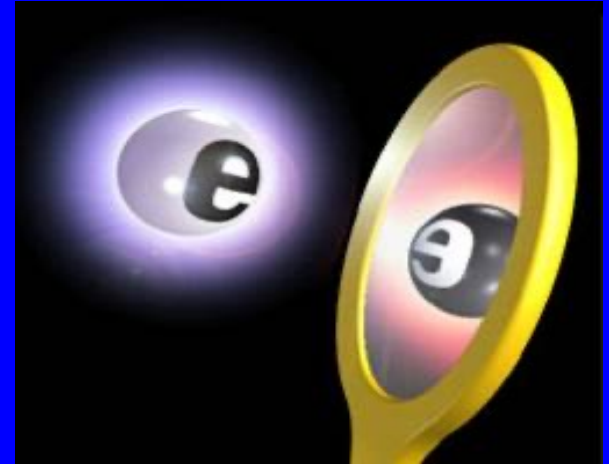
Trois générations

# L'antimatière

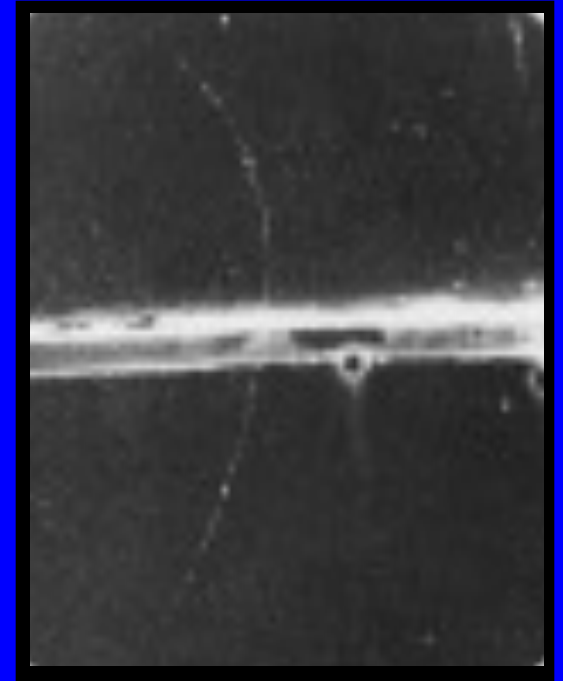
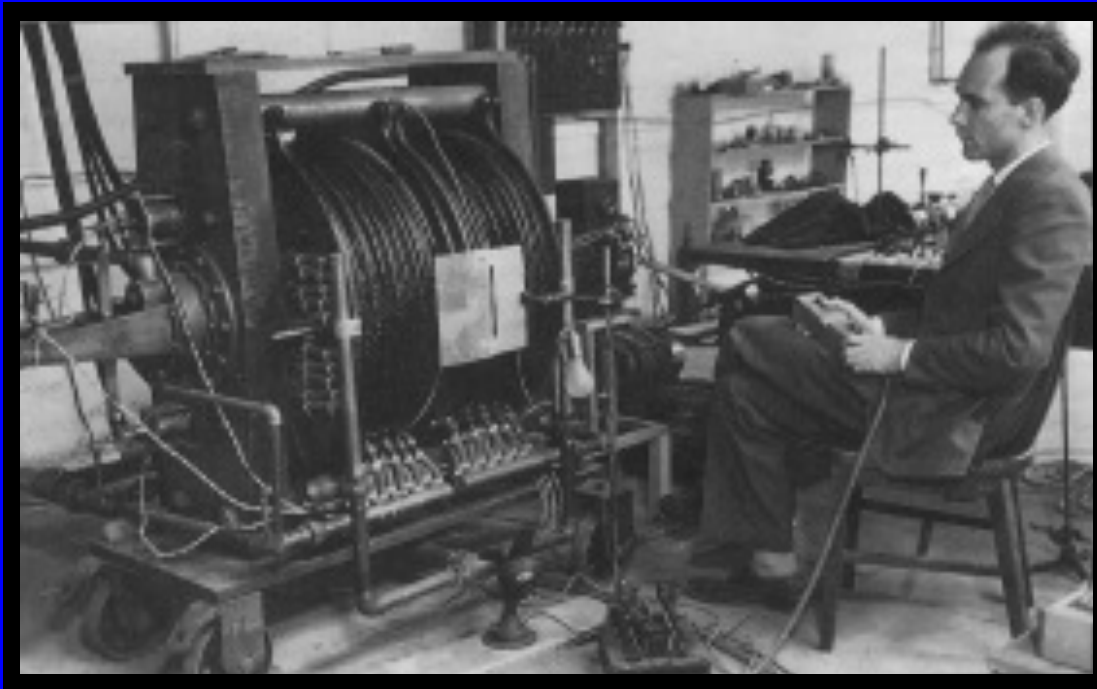
- Chaque particule de matière possède un double de charge opposée: c'est l'antimatière
- Lorsqu'une particule rencontre son antiparticule, elles s'annihilent en pure énergie
- De cette énergie peuvent à nouveau émerger d'autres particules grâce à

$$E=mc^2$$

(équivalence entre l'énergie au repos et la masse d'une particule)



# Découverte de l'antimatière



Anderson (1932) découvre le positron (anti – électron)  
qui était prédit par Dirac

# Les 4 interactions fondamentales de la Nature

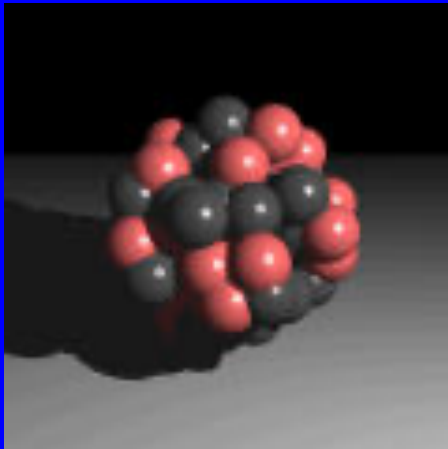
- La gravitation



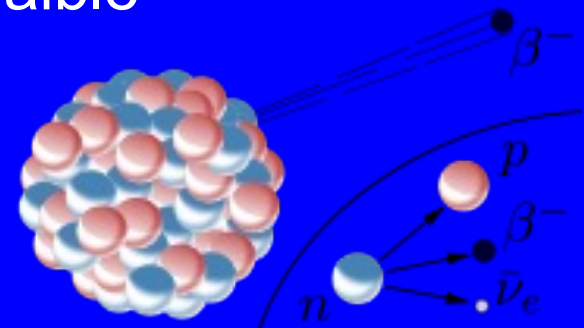
- L' électromagnétisme



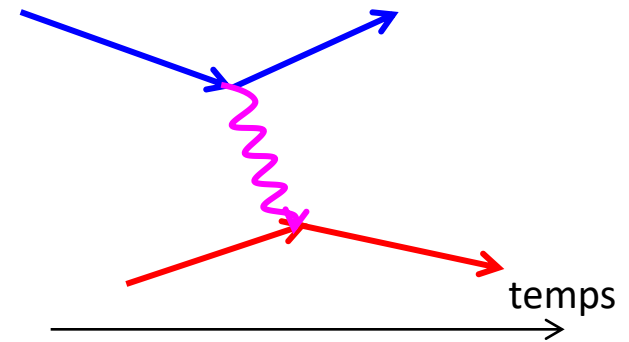
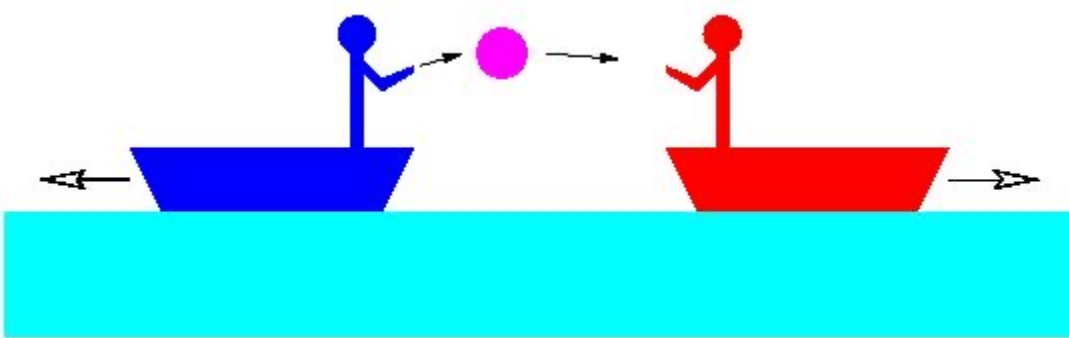
- L'interaction (force) nucléaire forte



- L'interaction nucléaire faible



Dans la physique de l'infiniment petit les **interactions** se font via l'échange de particules appelées les **bosons d'interaction** ou « **messagers** »



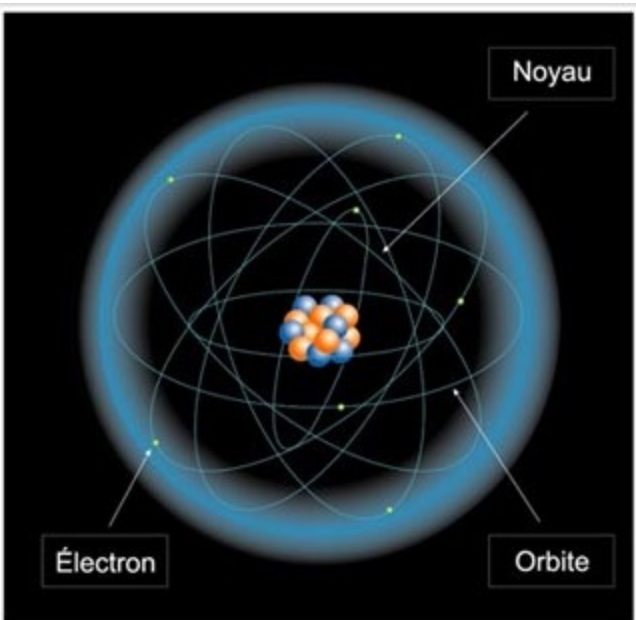
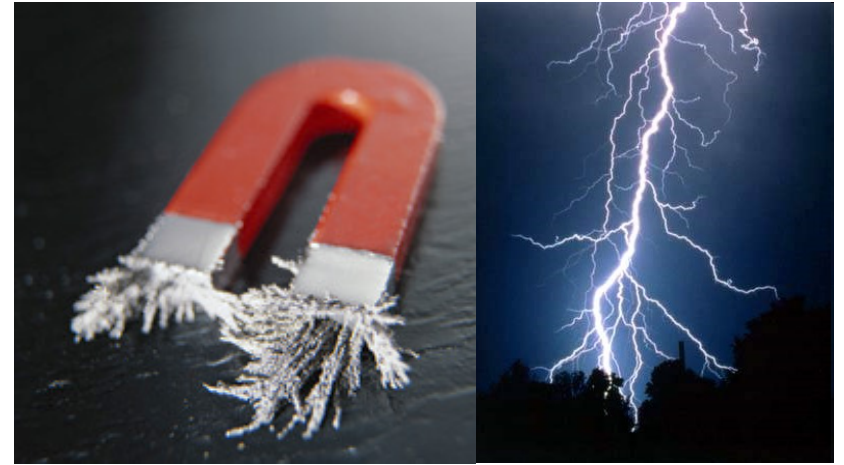
Représentation d'une interaction  
Graphe de Feynman



# L'interaction électromagnétique

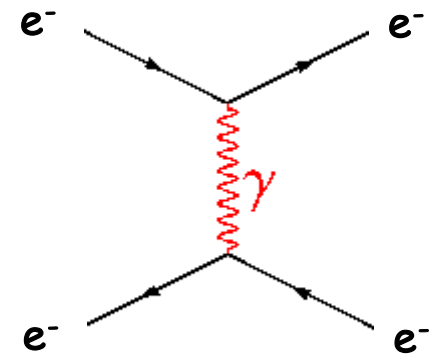
Responsable des phénomènes électriques et magnétiques : aimantation, lumière, cohésion des atomes,...

Répulsion entre objets de charges électriques identiques (attraction si charges opposées)



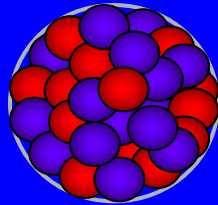
Messageur : **photon**

$m=0$  (vitesse= $c$ )  
portée infinie

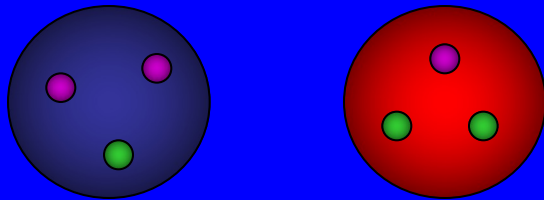


# Interaction forte

- Elle est responsable de la cohésion
  - des nucléons dans le noyau atomique



- des quarks et anti-quarks dans les hadrons

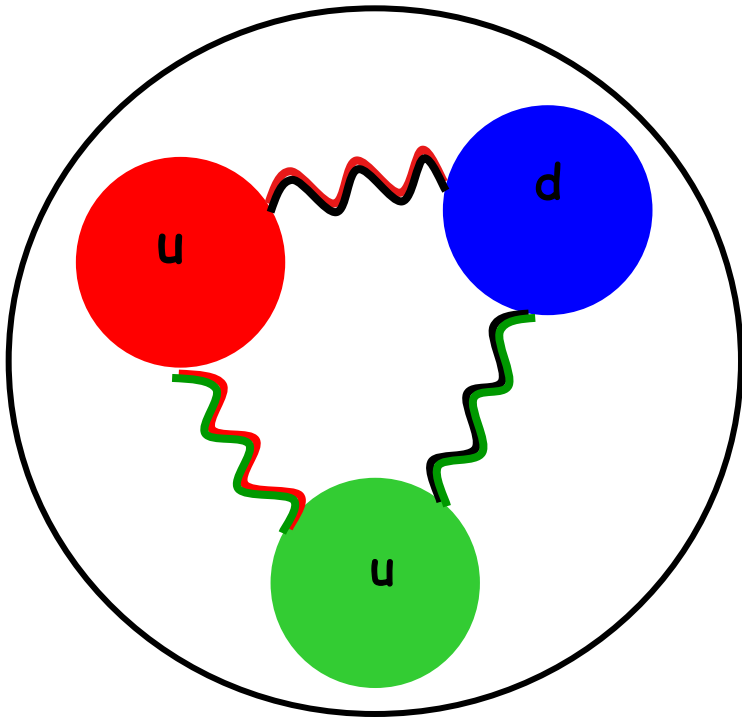


Elle est si forte entre les quarks... qu'ils ne peuvent jamais sortir des protons/neutrons

Messageur : **gluon**

Les gluons « collent » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des proton/neutron

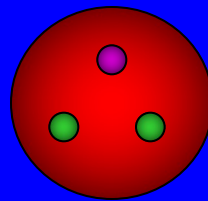
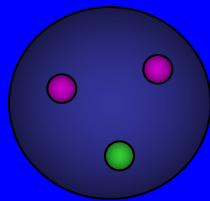
En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de « couleur » : **Bleu vert rouge**



Ainsi le proton est « incolore »

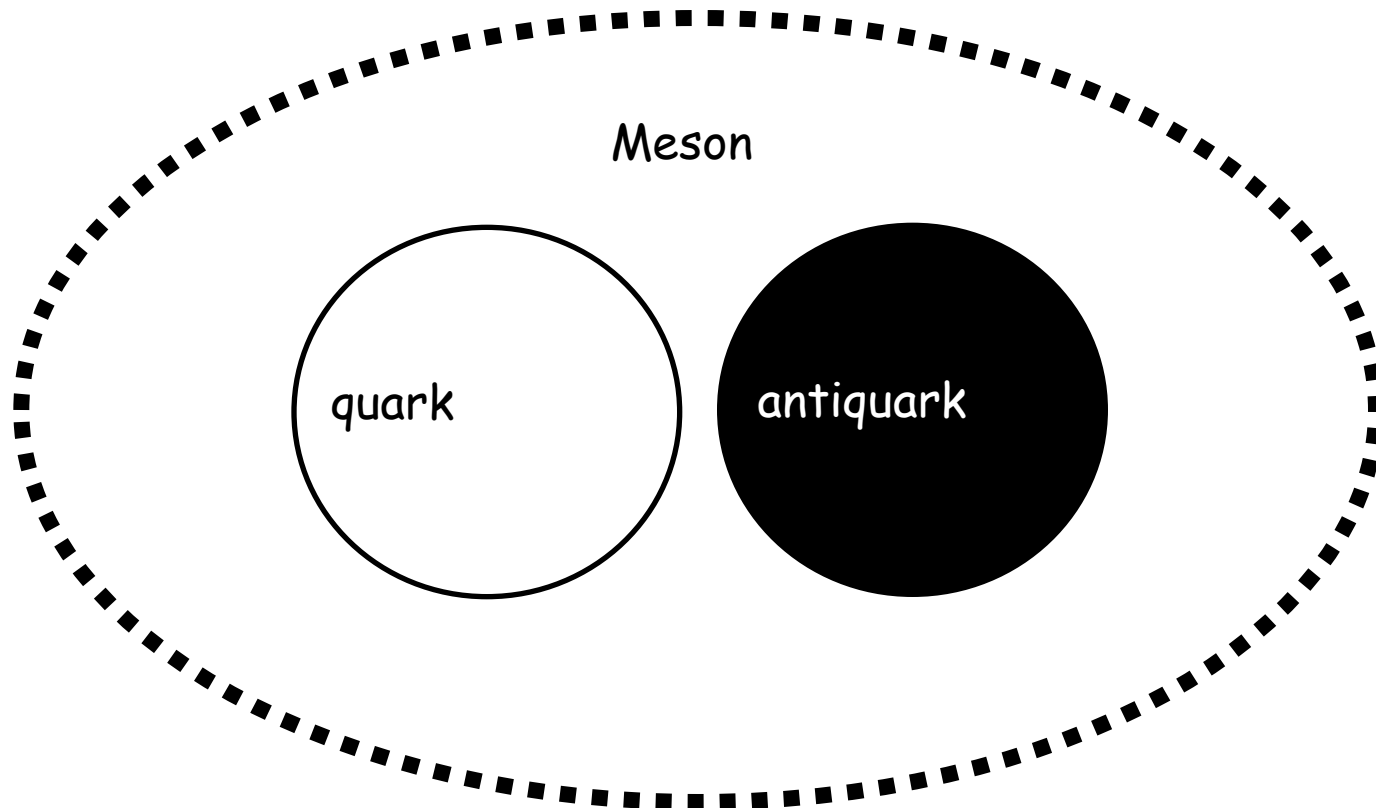
Les quarks forment toujours des particules incolores : les hadrons

- Baryon = association de trois quarks (exemples : neutron, proton)



- Méson = association d'un quark et d'un anti-quark.

- Exemples de mésons
- méson  $\pi$  ou pion ( $\pi^- = \bar{u}d$ )
- méson K ou kaon ( $K^+ = \bar{s}u$ )
- **méson  $D^0 = c\bar{u}$**

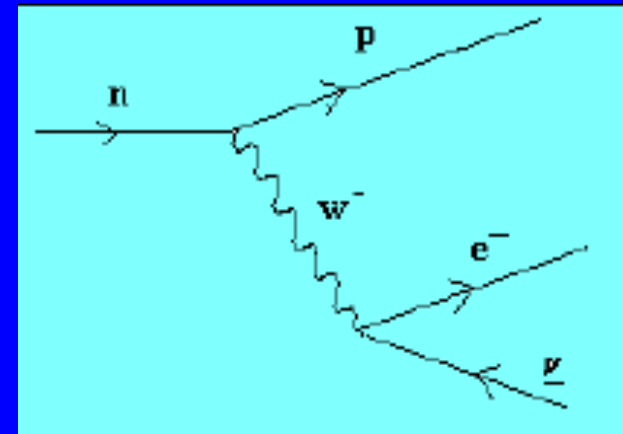




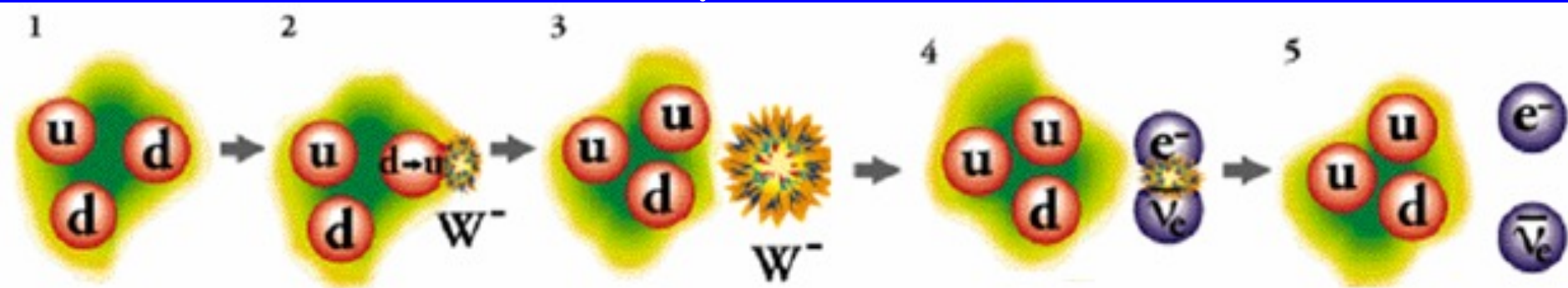
# Interaction Faible

- Responsable de la radioactivité  $\beta$  (désintégration du neutron)

- Messagers :  
les particules  $Z^0$ ,  $W^+$  et  $W^-$   
très massives ( $\sim 80$  protons)



On regardera un processus  
similaire cet après midi!



# Résumé des interactions

## Forte

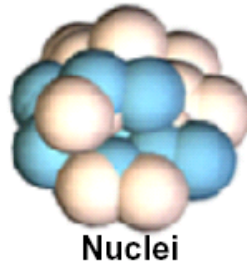
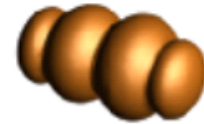
1

Gluons (8)

Quarks



Mesons  
Baryons

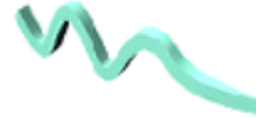


Nuclei

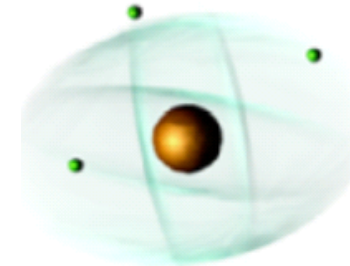
## Electromagnétique

$10^{-2}$

Photon



Atomes  
Lumière  
Chimie  
Électronique



## Gravitationnelle

$10^{-38}$

Graviton ?



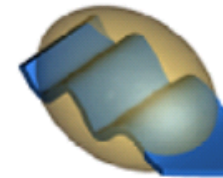
Système solaire  
Galaxies



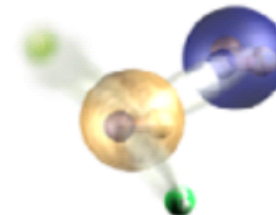
## Faible

$10^{-5}$

Bosons (W,Z)



Radioactivité  $\beta$



# Les Unités d'énergie

**Electron Volt – énergie qu'acquiert un électron accéléré dans un champ E sous une différence de potentiel (ddp) de 1 volt**

**1 eV = 1 electron Volt**

*Energie d'ionisation de l'hydrogène = 13.6 eV*

**1 keV(kilo) = 1,000 eV =  $10^3$  eV**

*Rayons X médicaux ~ 200 keV*

**1 MeV(Mega) = 1,000,000 eV =  $10^6$  eV**

*Particules alpha rayonnées de l'uranium 4.2 MeV*

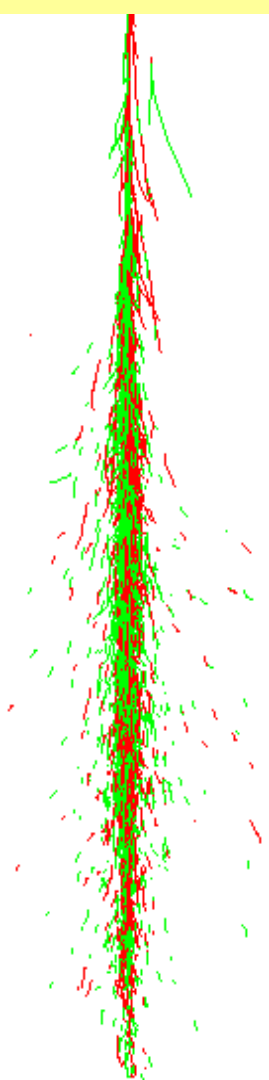
**1 GeV(Giga) = 1,000,000,000 eV =  $10^9$  eV**

*Faisceau du collisionneur LEP (1989-200) = 45 GeV*

**1 TeV(Tera) = 1,000,000,000,000 eV =  $10^{12}$  eV**

*et de l'accélérateur le plus puissant du monde (LHC) = 7TeV*

***Les énergies les plus grandes dans les rayons cosmiques ( $>10^{20}$  eV)***



$$E = m c^2$$

équivalence entre l'énergie au repos et la masse d'une particule

1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Joules : unité d'énergie

**Masses des particules élémentaires:**

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 938,3 \text{ MeV}/c^2$$

On exprime les masses en unités d'énergie, et en multiples des eV : keV, MeV, GeV ...

# Résumé: les particules

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

*La matière*

*Les Interactions*

Bosons (Forces)



# Petite question...

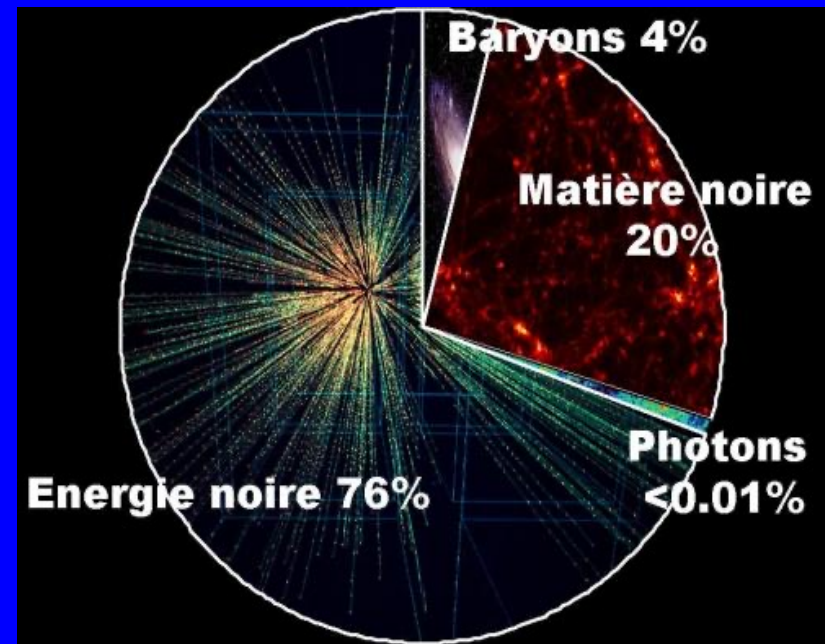
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

Quelle est la particule élémentaire la plus commune dans votre corps ?

# Mais est-ce que c'est tout ce qui existe ?

Les propriétés mécaniques des galaxies et les observations du cosmos montrent que ces particules ne constituent que 4% de l'univers.

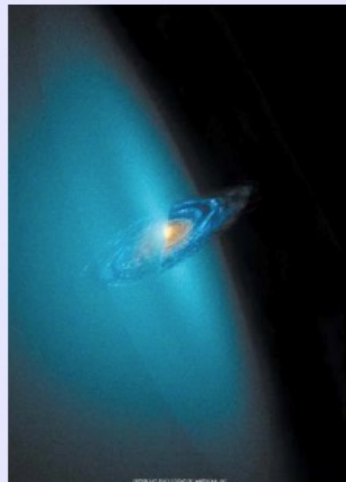
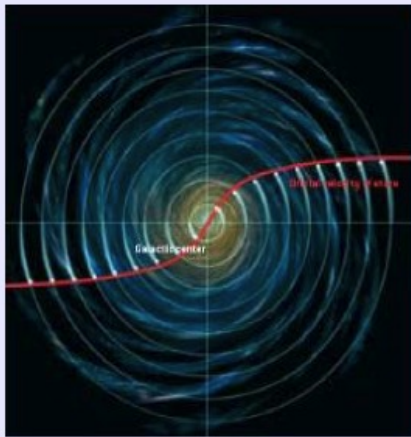
Les 96% restants sont formées de « matière noire » et de « énergie noire » dont nous ignorons presque tout



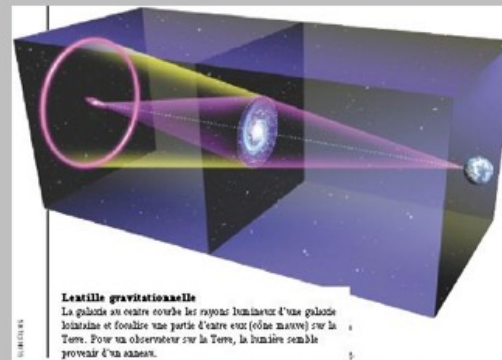


# Matière Noire

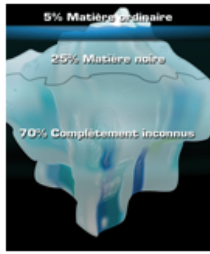
- Matière noire = invisible
  - ☒ mais détectable grâce à ses **effets gravitationnels**:
    - dispersion amas galaxies, rotation des galaxies, lentilles gravitationnelles, ...
  - ☒ **composée de matière « exotique »** (WIMP: Particule Massive Interagissant Faiblement) qui reste à découvrir !



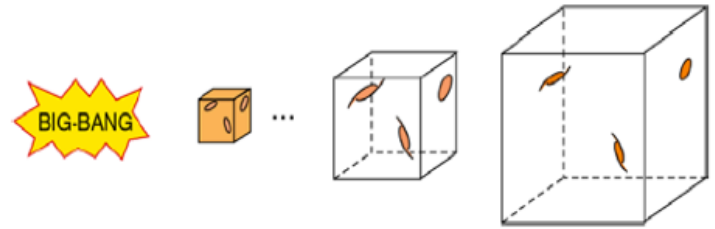
*Vitesse de rotation des galaxies*



*Lentilles gravitationnelles*

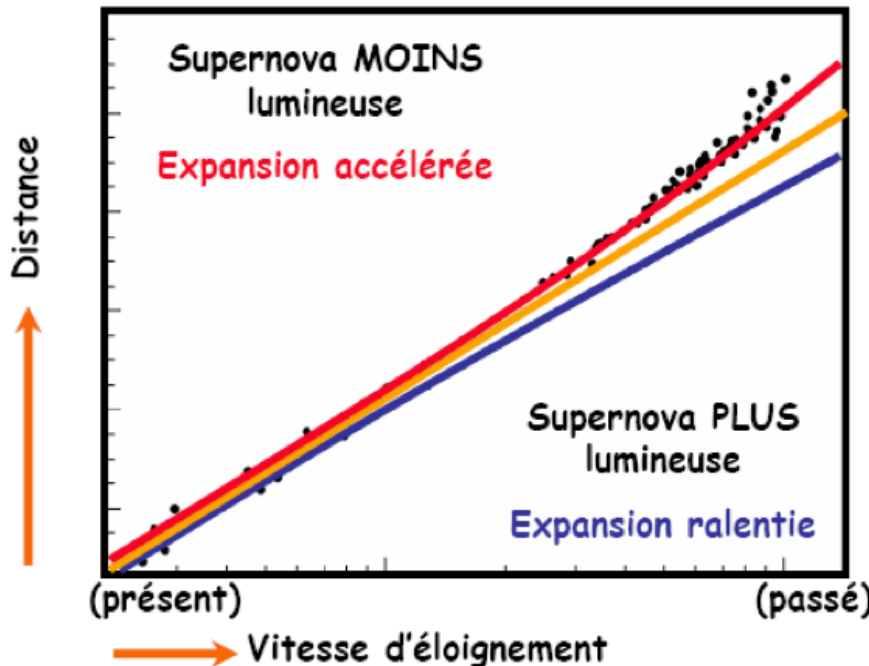


# Énergie Noire



- Expansion de l'univers:

- ☒ Devrait ralentir à cause de l'effet de la gravité entre objets massifs
- ☒ Observations montrent que **l'expansion de l'univers accélère !**
- ☒ **Nouvelle forme d'énergie** de « pression négative »... compose 70% de notre univers !



Taux d'expansion constant



Qu'est-ce qu'une expérience  
de physique des particules?

Qu'est-ce qu'une mesure ?

Qu'est-ce qu'un accélérateur ?

Comment « voit »-on une particule ?



# Le principe du réveil-matin

Question n° 1 :

Comment savoir de quoi est composée la matière qui nous entoure ?

Réponse :

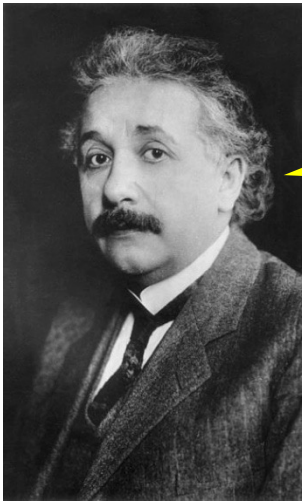
On casse...



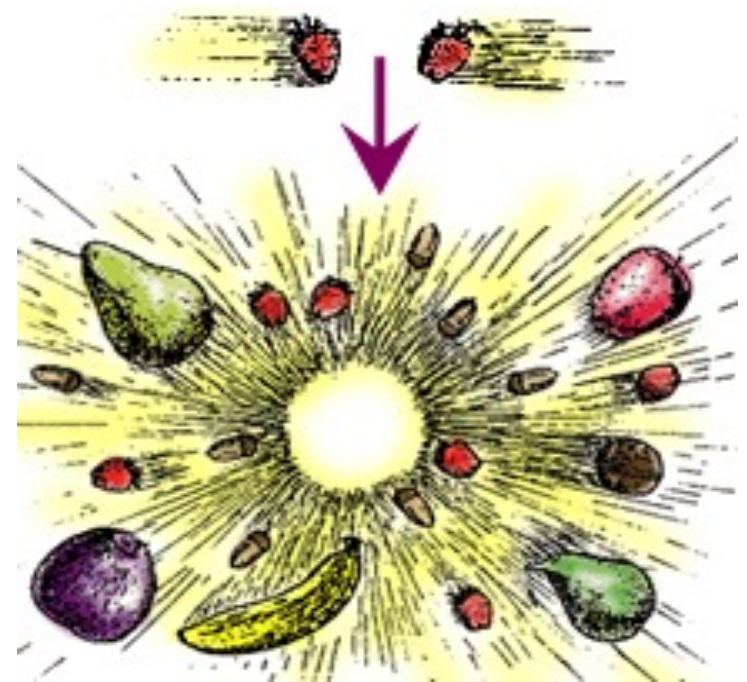
C'est-à-dire : on projette à très grande vitesse la « victime » contre un objet fixe ou une autre « victime » !

Mais ce n'est pas **vraiment** ce qu'on fait. De façon plus réaliste...

# Produire des particules avec des accélérateurs




La masse est  
juste une forme  
d'énergie



Copyright 1996 Particle Data Group.

$$E=Mc^2$$

**collision** de particules  
avec **une haute énergie**  **création** de nouvelles particules  
**plus massives**

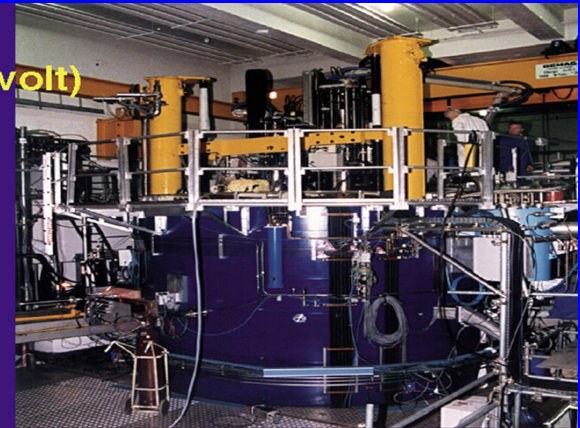
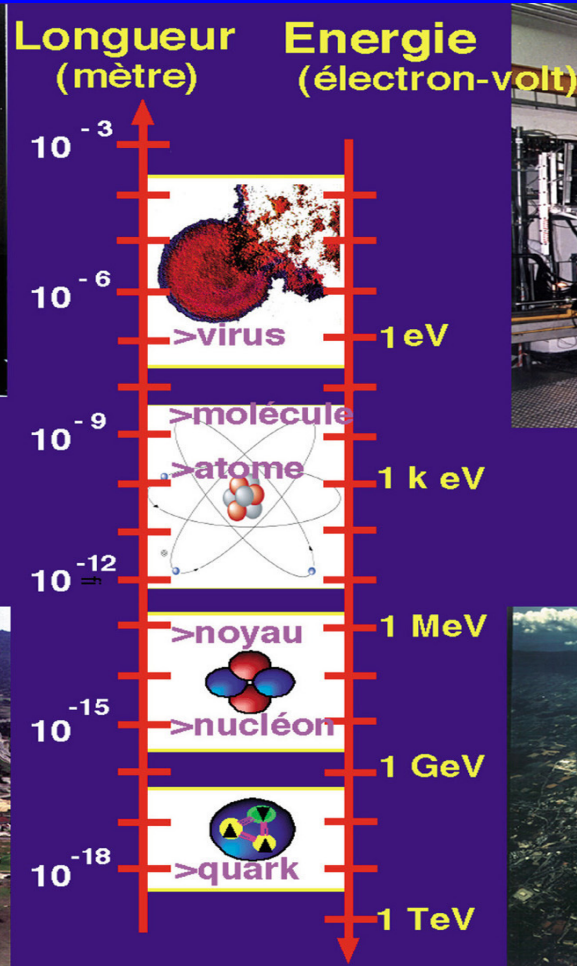
Plus l'objet à étudier est petit, plus l'énergie du projectile-sonde doit être élevée



Microscope électronique



Accélérateur linéaire



Cyclotron



Synchrotron

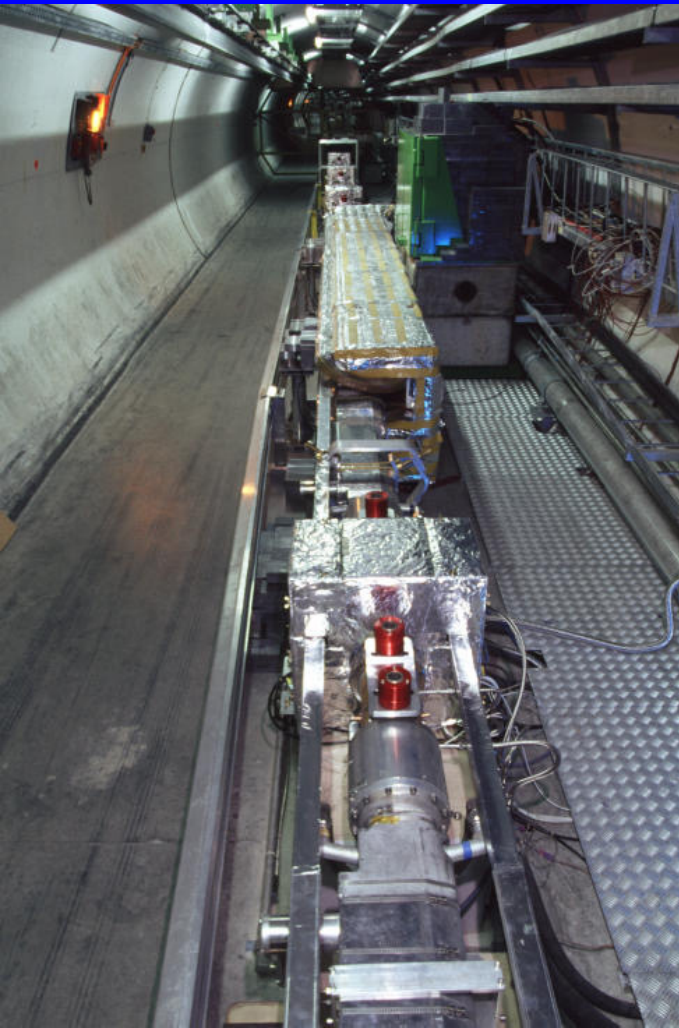
Et plus plus l'appareil d'observation est grand....



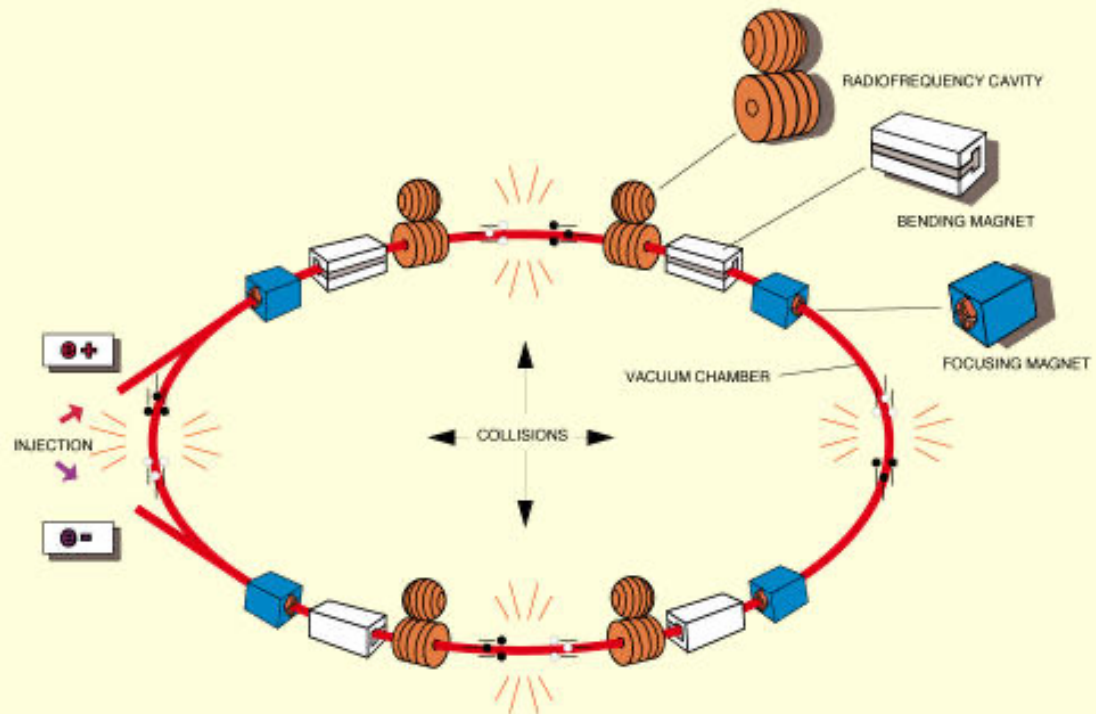
# Les accélérateurs

Le champ électrique accélère les particules chargées

Le champ magnétique fait tourner les particules chargées



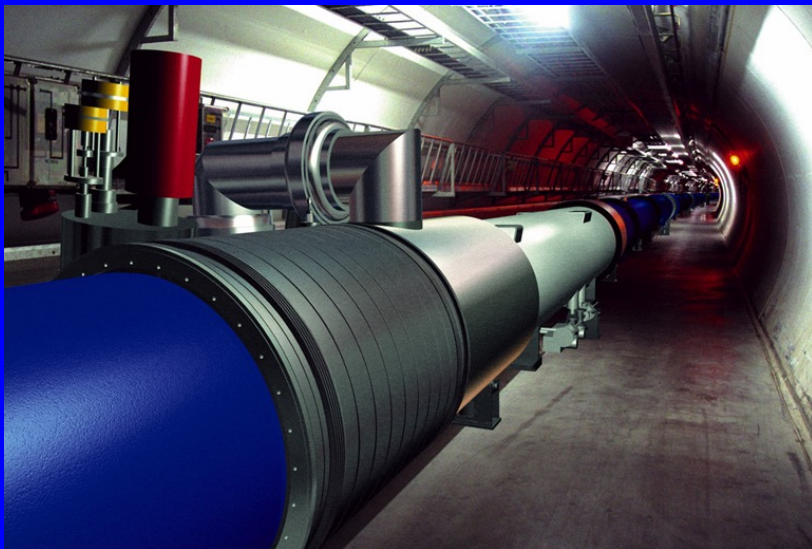
THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.



# Exemple : le LHC

C'est un accélérateur circulaire de protons, au CERN, à Genève. **LHC** = **L**arge **H**adron **C**ollider

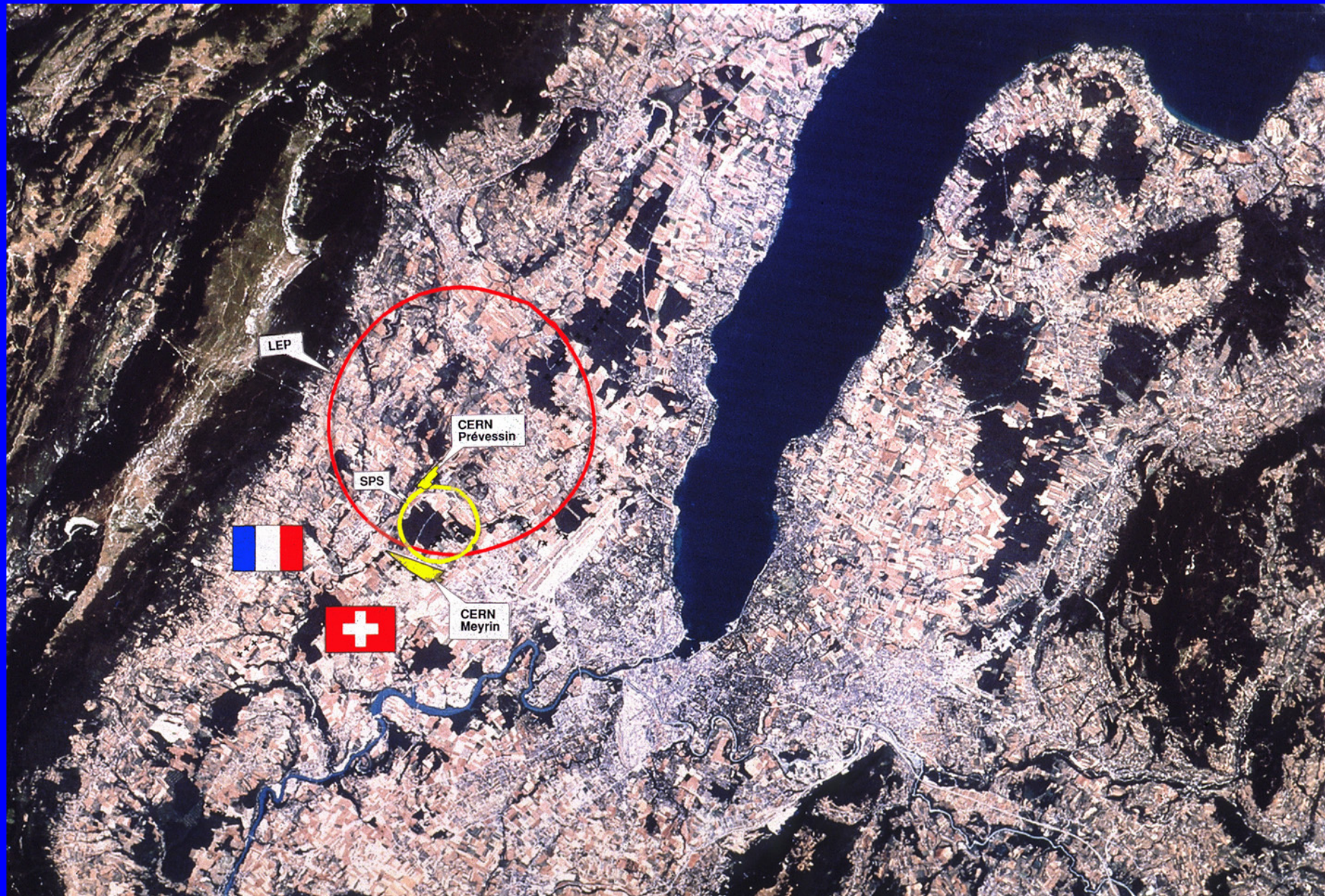
- 100 m sous terre
- 27 km de circonférence
- 20 ans de fonctionnement prévus



*C'est le plus grand au monde...*



# Vu du ciel





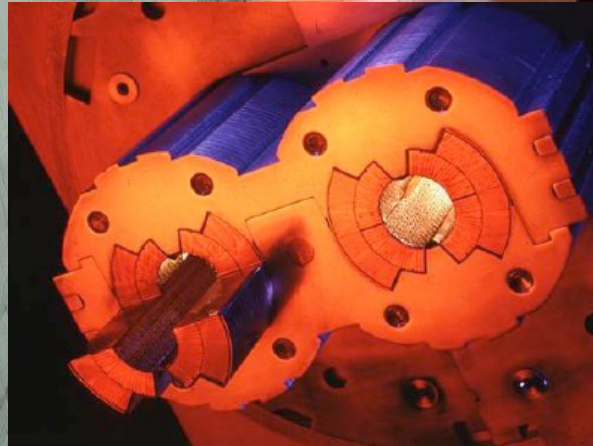
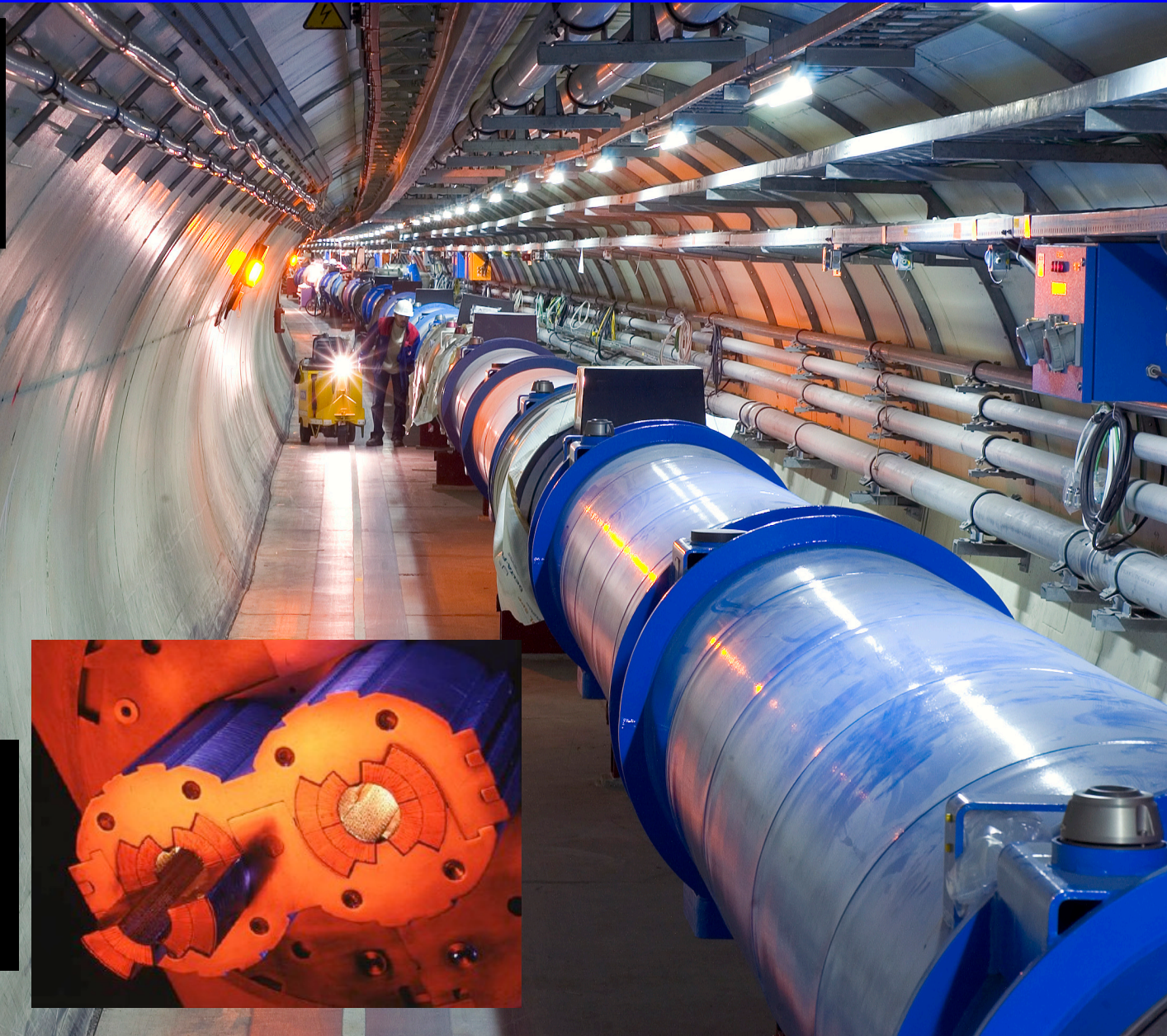
# .. et sous terre !

Aimants supraconducteurs pour courber les protons

Température  $\sim 2\text{K}$  : plus froid que l'espace intergalactique

700 000 litres Hélium liquide

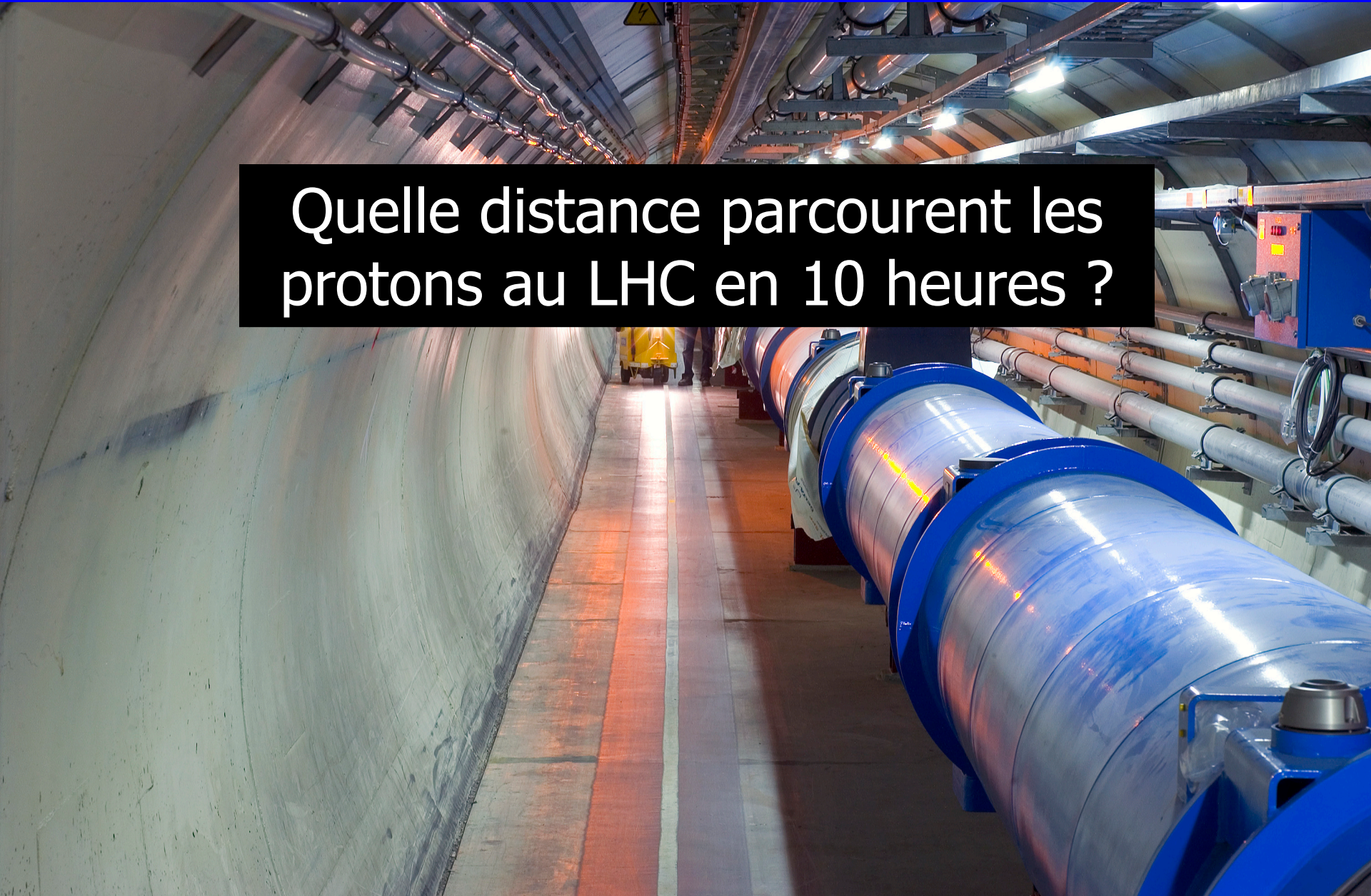
Les protons y circulent à une vitesse proche de celle de la lumière





# Petite question...

Quelle distance parcourent les protons au LHC en 10 heures ?



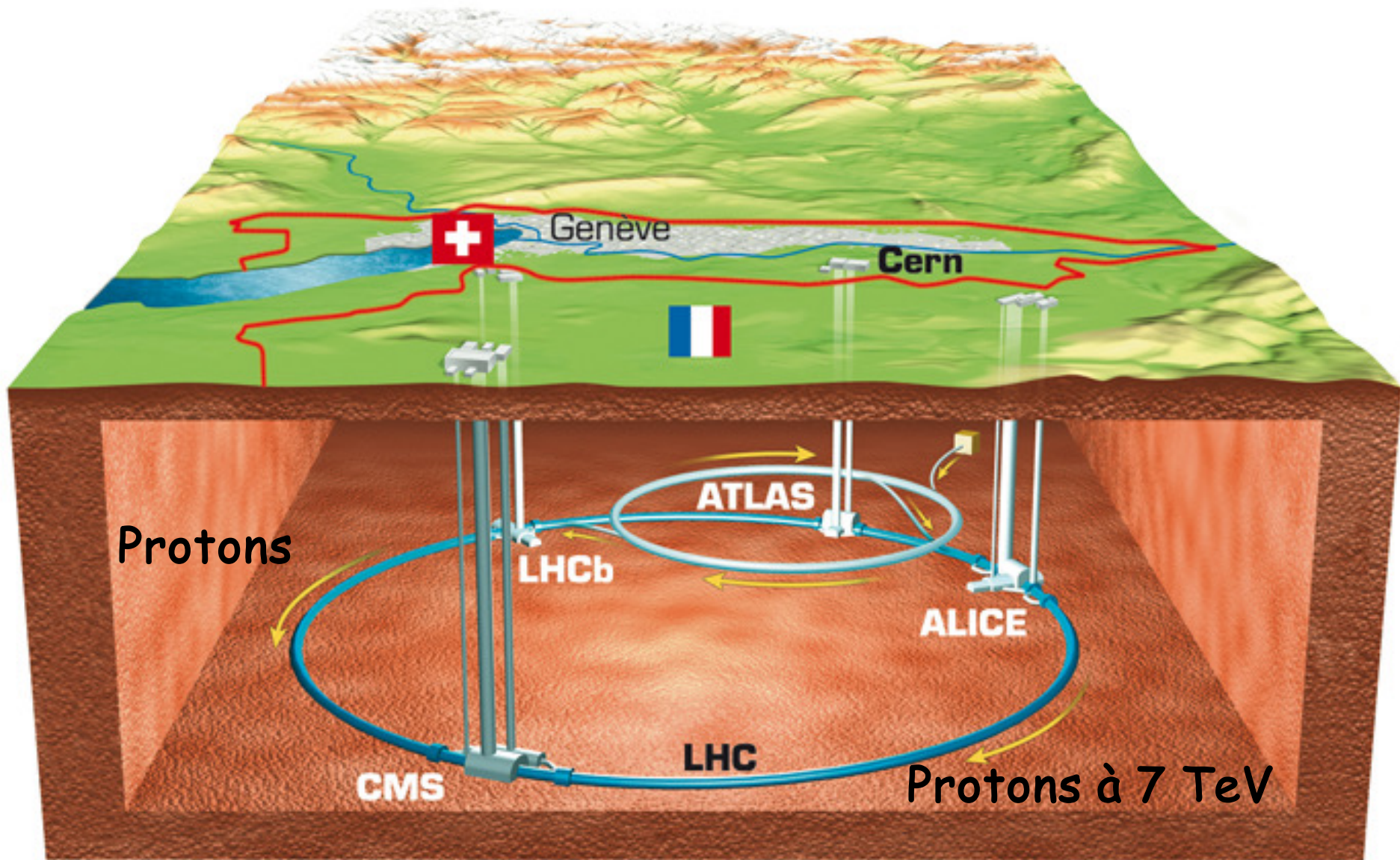


# Petite question...

Quelle distance parcourent les protons au LHC en 10 heures ?

Aller-retour Terre-Neptune !

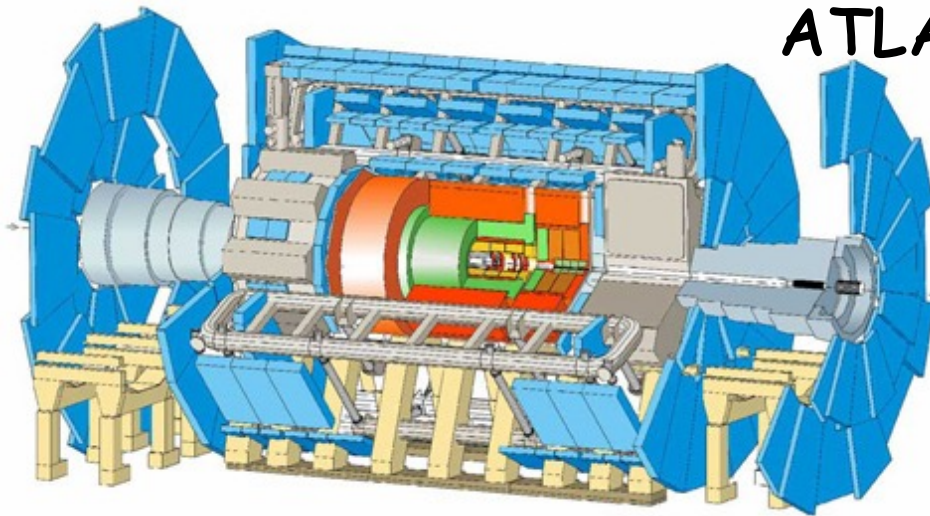




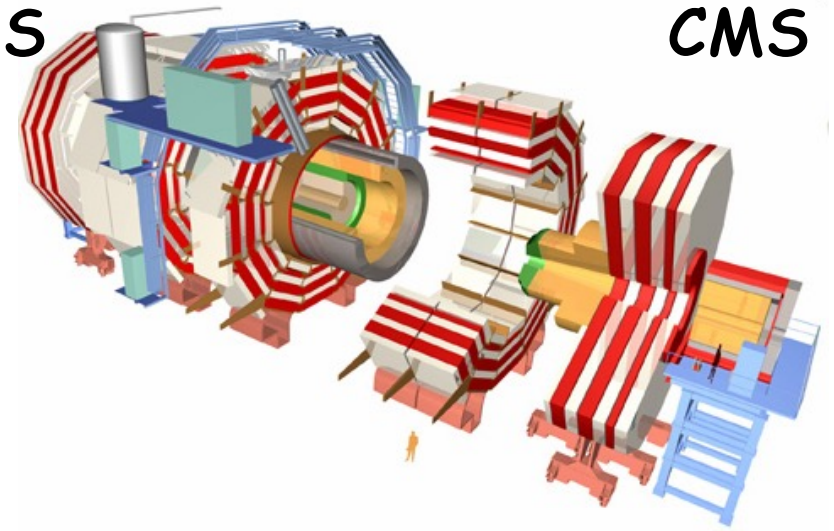
4 détecteurs sous terre



# Des géants pour traquer l'infiniment petit

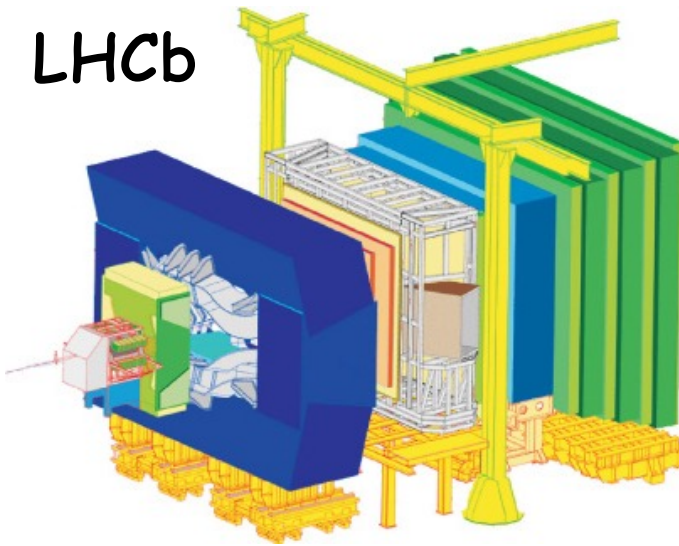


ATLAS

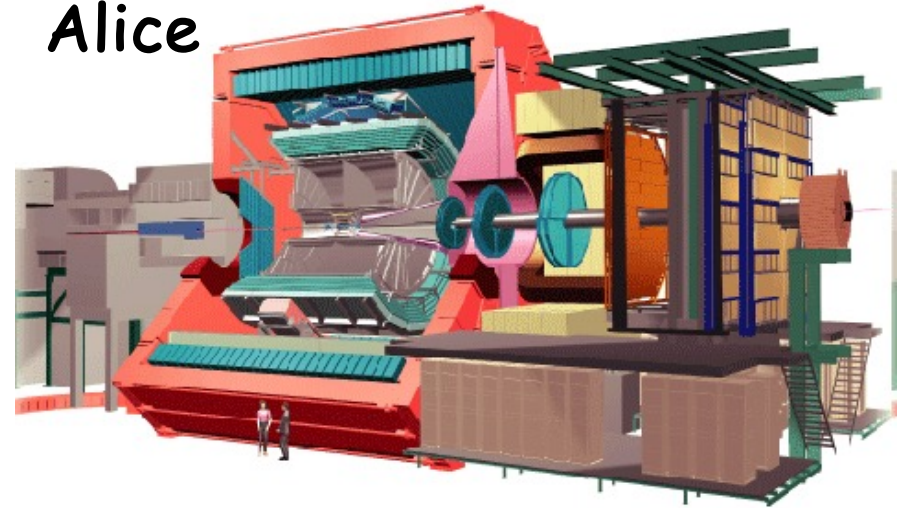


CMS

LHCb



Alice



Mais il y a bien d'autres choses utiles  
qui ont été inventées au CERN...

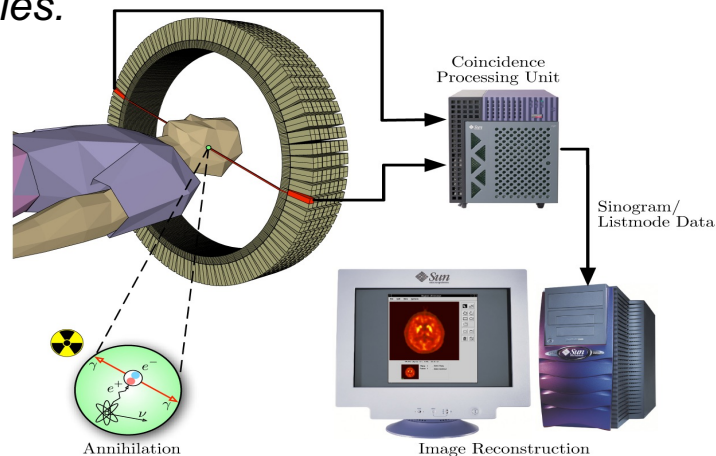
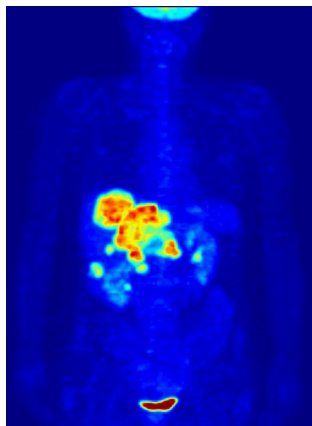
# Les apports pour la société

Les découvertes en sciences fondamentales permettent les grandes avancées

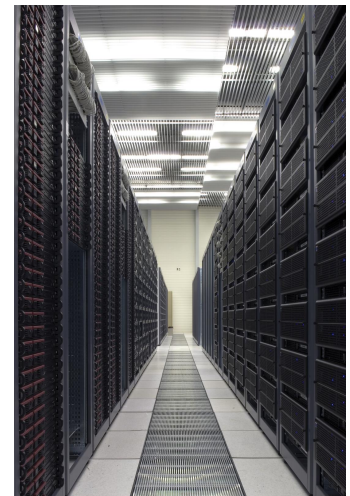
- *Les transistors ont été inventés parce qu'on avait découvert la mécanique quantique*
- *Le système de positionnement GPS utilise la relativité générale*

La recherche a des besoins spécifiques : elle développe de nouvelles technologies

- Le **“world wide web”** inventé au CERN
- *Actuellement, plus de 7000 physiciens analysent les données du LHC. Elles occuperaient un pile de CD de 20km de hauteur chaque année. De nouveaux moyens de stockage et de calcul ont donc été mis au point :  
→ la grille de calcul*
- *L'imagerie médicale utilise les technologies de détection de la physique des particules.*



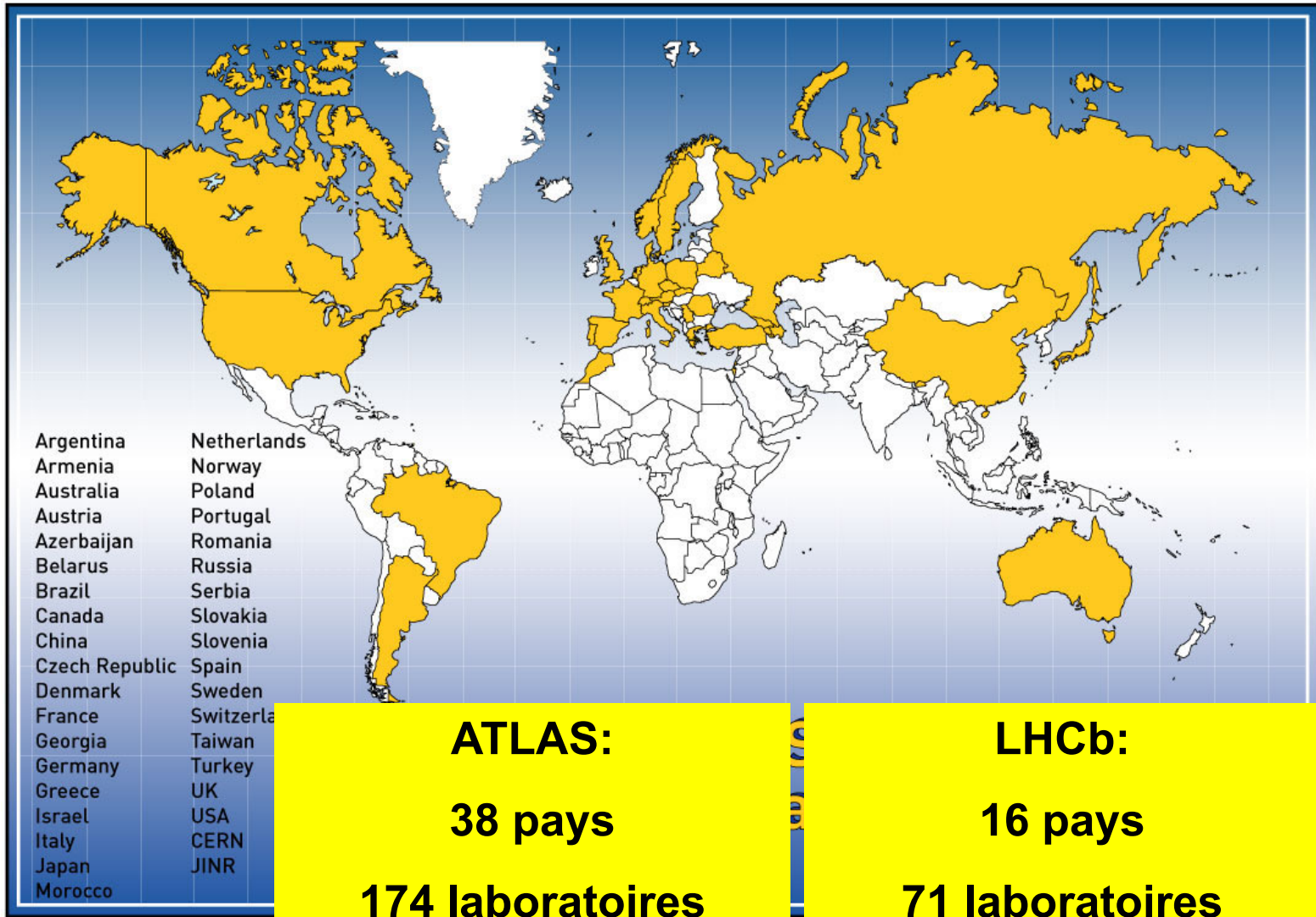
Système de tomographie à émission de positons



“ferme” de PC au CERN (2006)



# Les collaborations ATLAS et LHCb



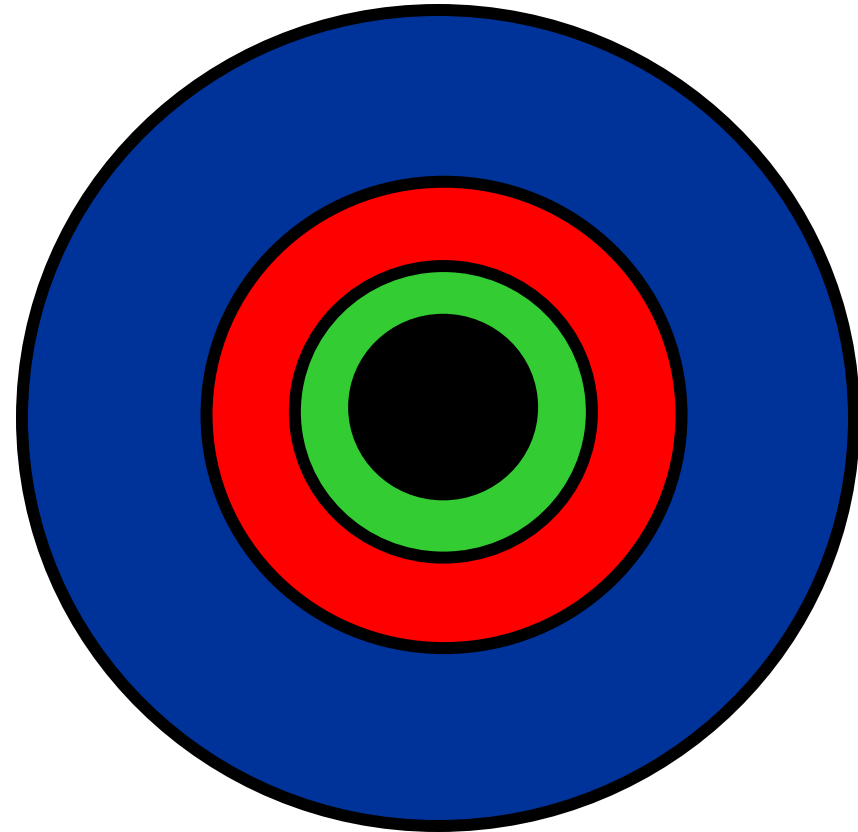
# Les détecteurs

Le pistage, ou comment savoir qu'une particule est passée par là...



# Structure d'un détecteur

- Structure en poupée russe
- Chaque couche a une fonction précise
  - Trajectographe(s)
    - Sui(ven)t les particules chargées
  - Calorimètre(s)
    - Mesure(nt) les énergies des particules (sauf muons et neutrinos)
  - Détecteurs de muons

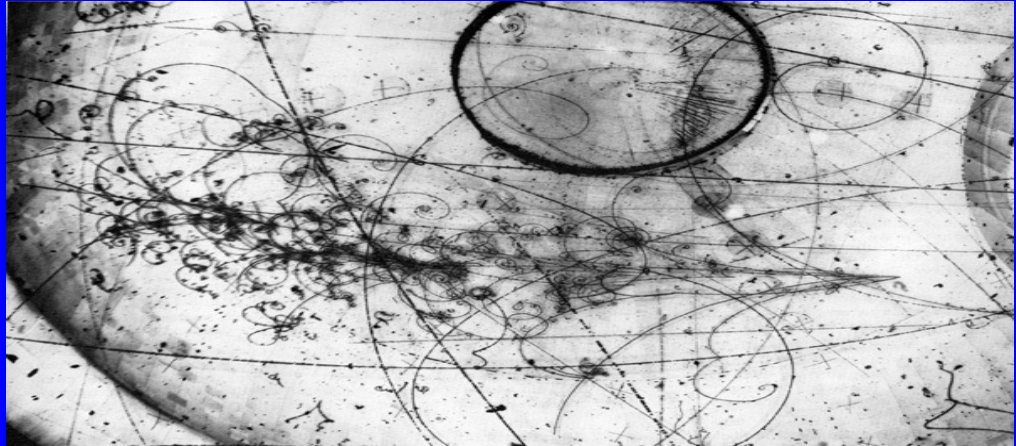


# Trajectographes

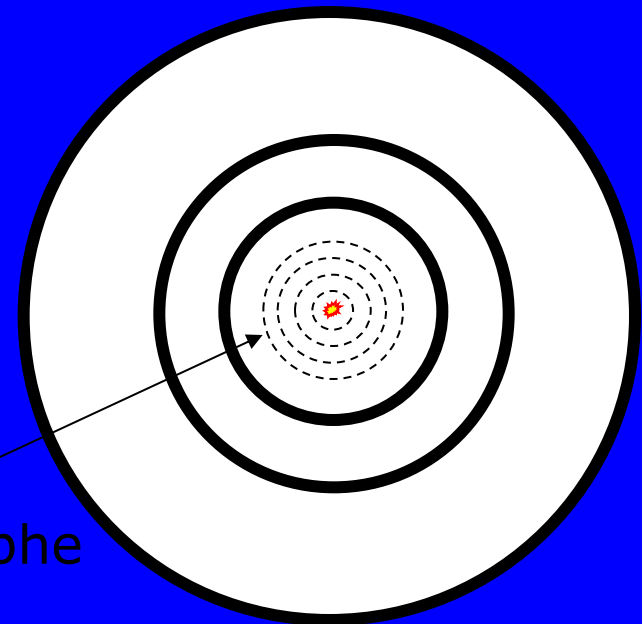
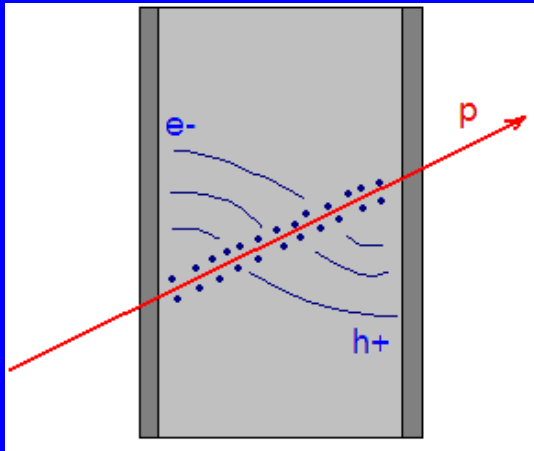
tout l'art de regarder sans se faire voir

Rôle : détecter les traces des particules chargées

Un outil merveilleux :  
les chambres à bulles

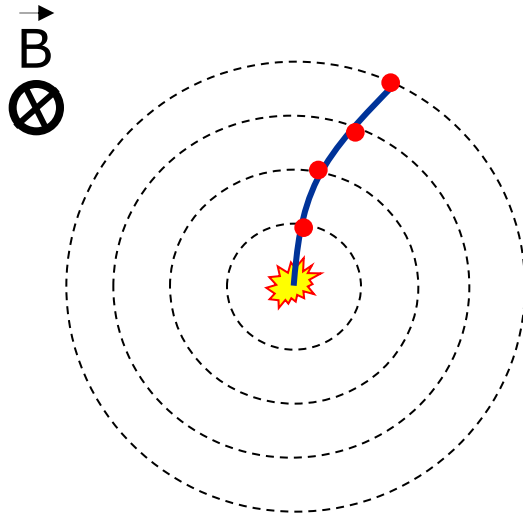


La méthode moderne :  
le détecteur électronique

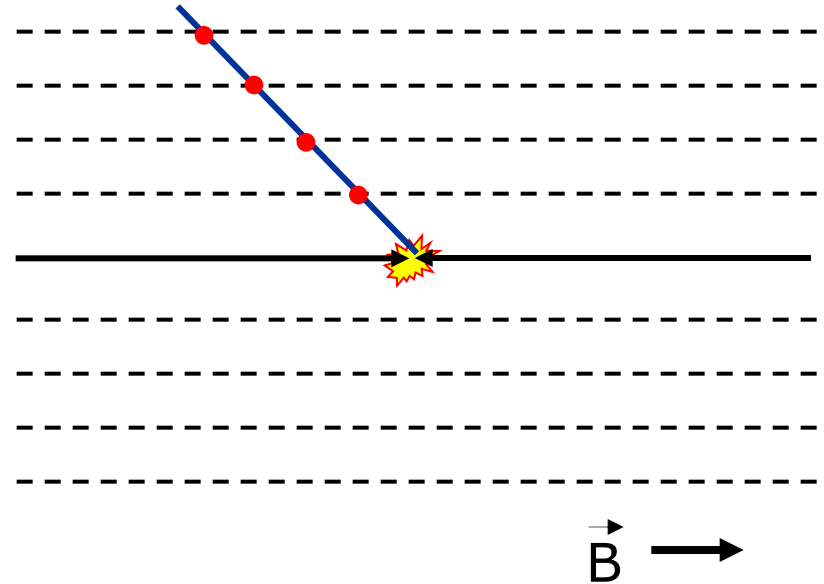


Le trajectographe

# Le trajectographe



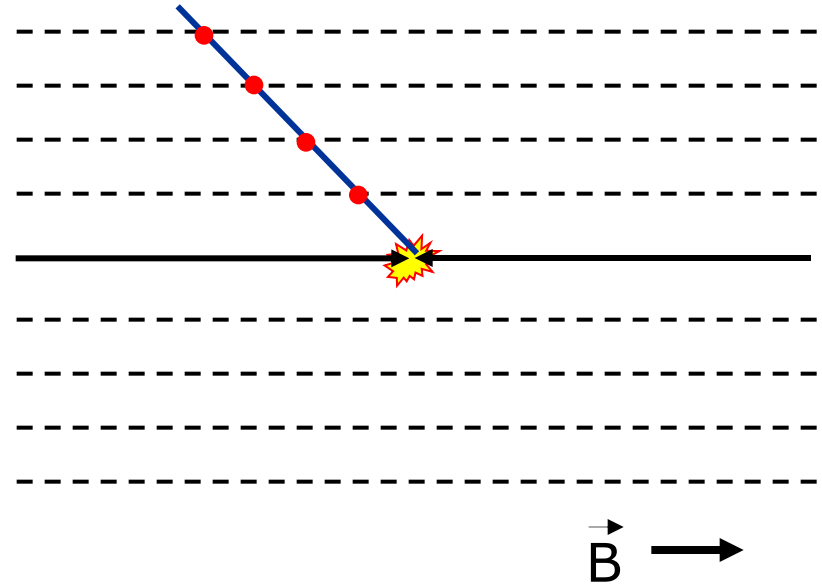
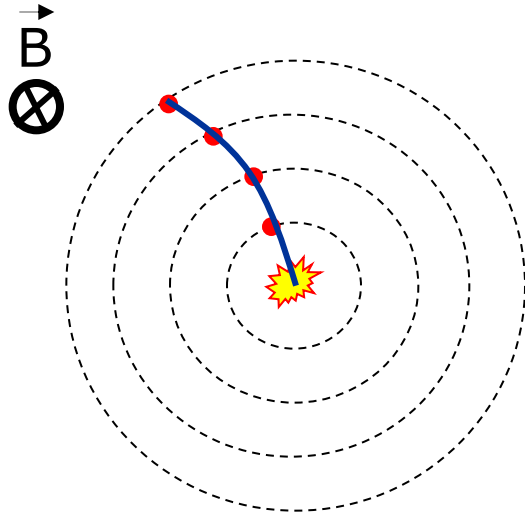
Un électron



- Pour mesurer la charge et la vitesse, on va utiliser un aimant
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
- Rayon de courbure  $R = mv/qB$



# Le trajectographe



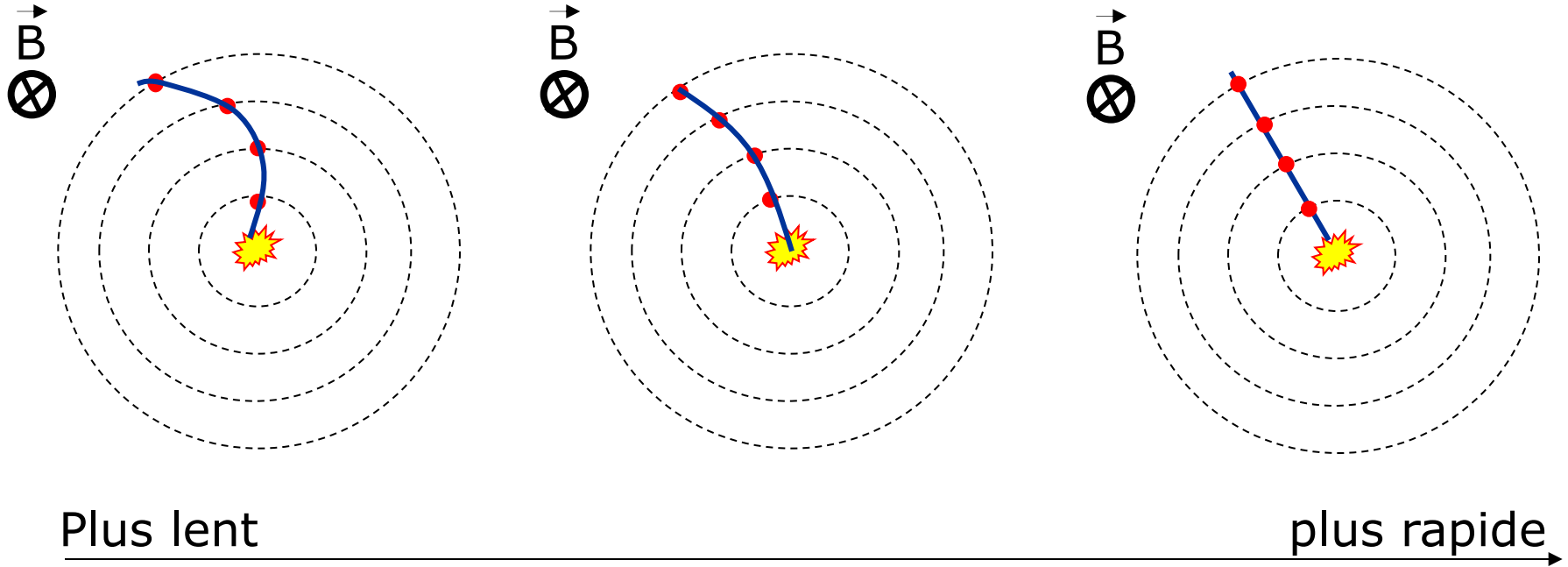
Un anti-électron=positron

C'est le même principe avec les pions ( $\pi^\pm$ ) et les kaons ( $K^\pm$ )

- Pour mesurer la charge et la vitesse, on va utiliser un aimant
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
- Rayon de courbure  $R=mv/qB$



# Le trajectographe



- Pour mesurer la charge et la vitesse, on va utiliser un aimant
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
- Rayon de courbure  $R = mv/qB$



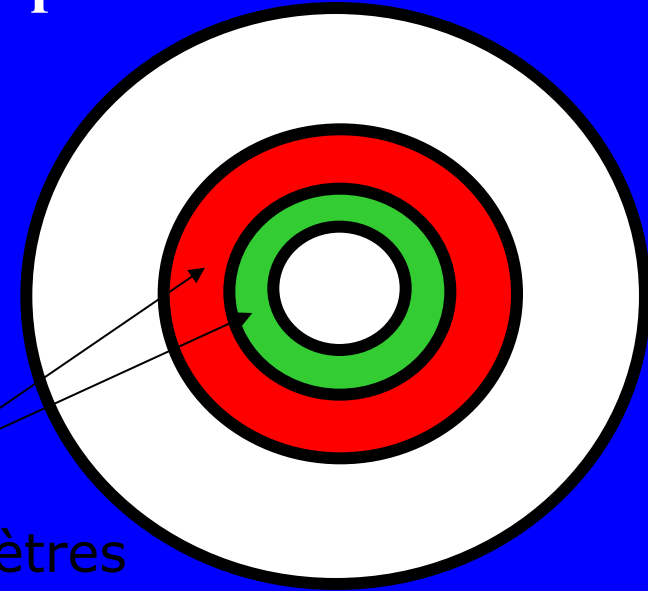
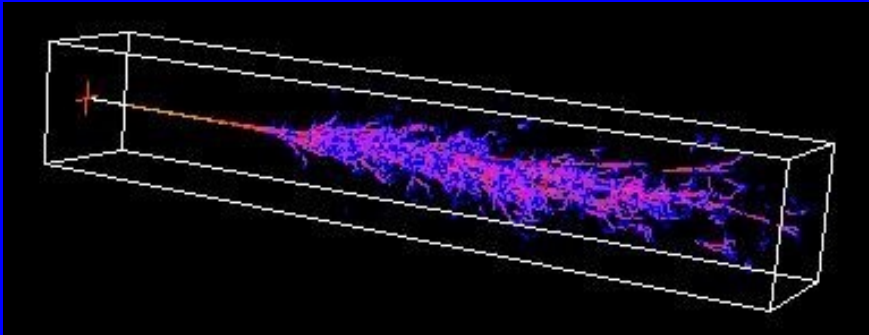


# Calorimétrie

prendre la proie dans un filet

Rôle : récolter un maximum de l'énergie de la particule

Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière → détecteur dense

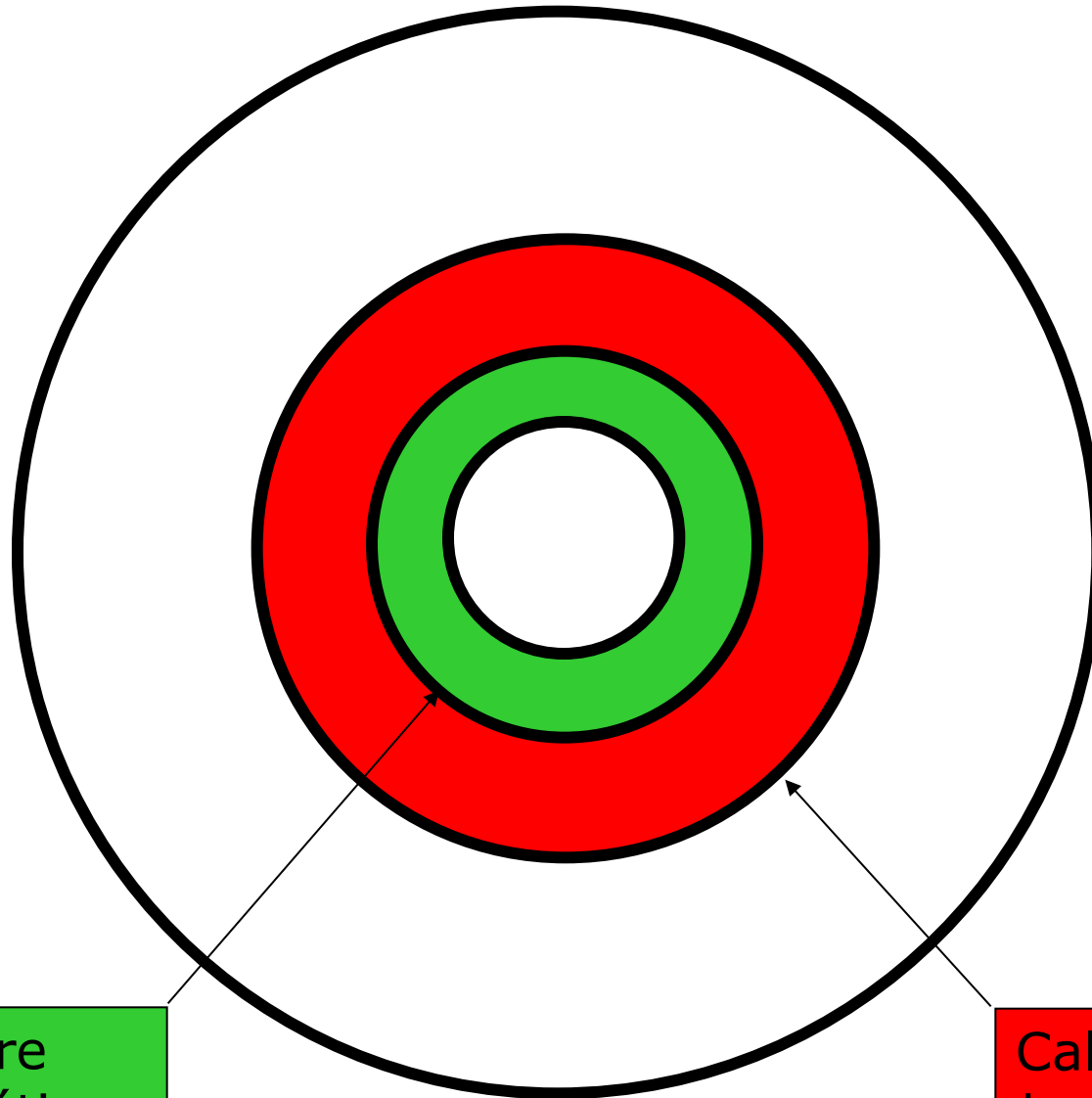


Les calorimètres

Facile pour un électron, mais difficile pour un proton !



# Les calorimètres

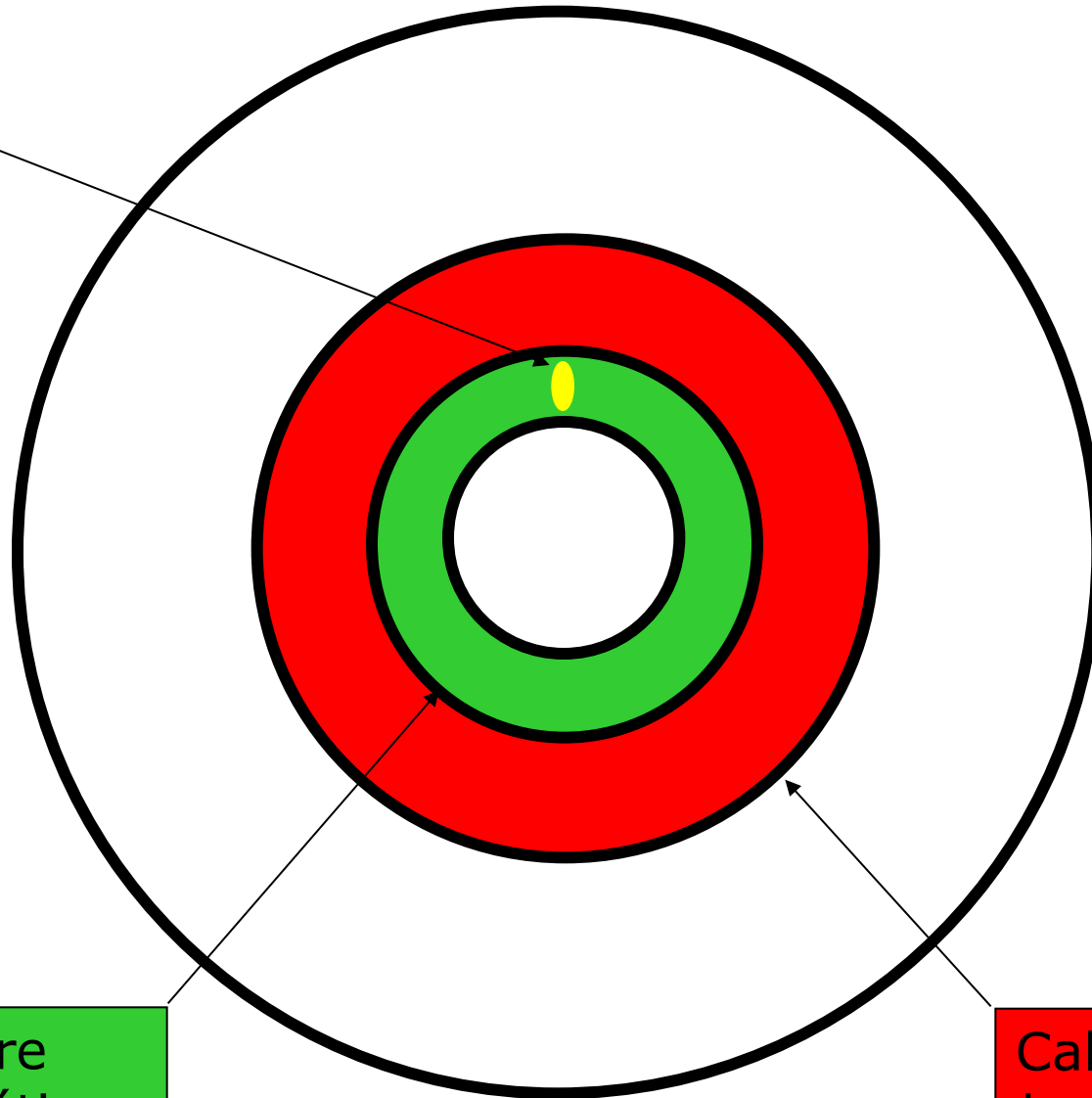


Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

# Les calorimètres

Electron  
ou photon

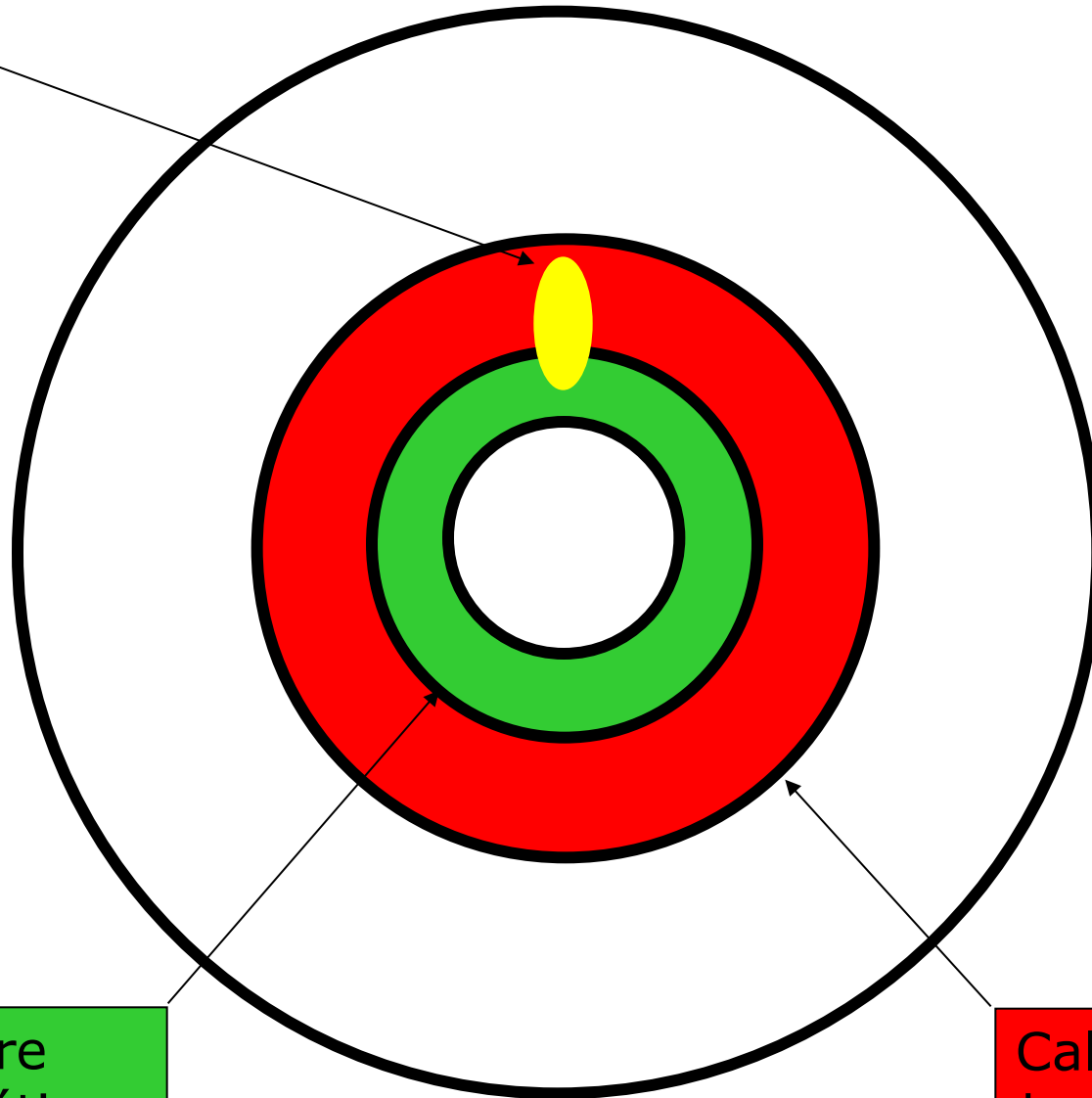


Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

# Les calorimètres

Hadron

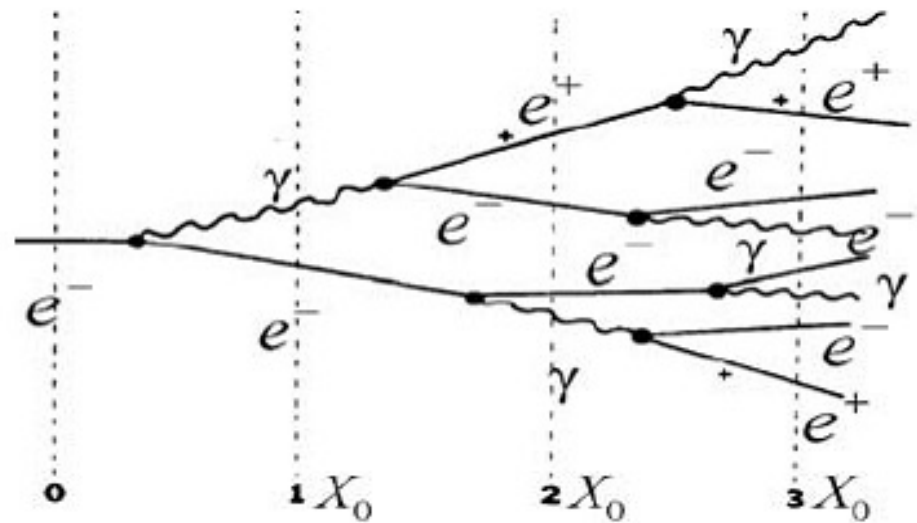


Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

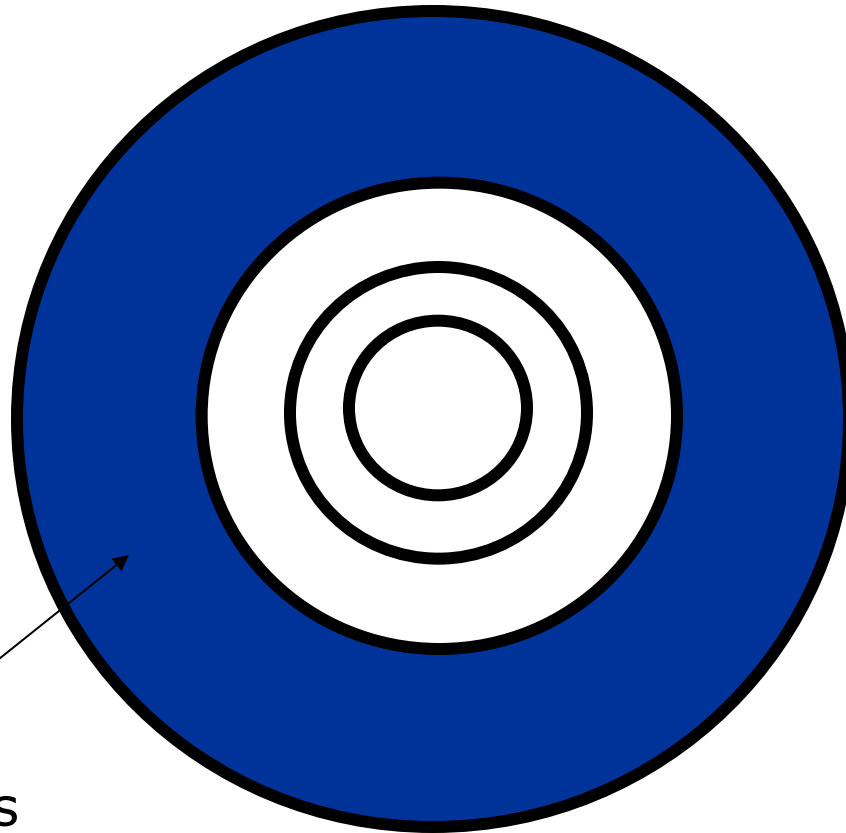
# Fonctionnement d'un calorimètre

Un exemple avec le calorimètre électromagnétique  
La particule qui déclenche la « gerbe » peut être un électron ou un photon



- Les particules “filles” ainsi produites vont laisser un signal dans les parties actives du calorimètre
  - par ionisation par exemple
- Les particules neutres, photons et neutrons, ne laissent pas de traces dans le trajectographe. Le calorimètre est le seul moyen pour les détecter

# Détecter les muons



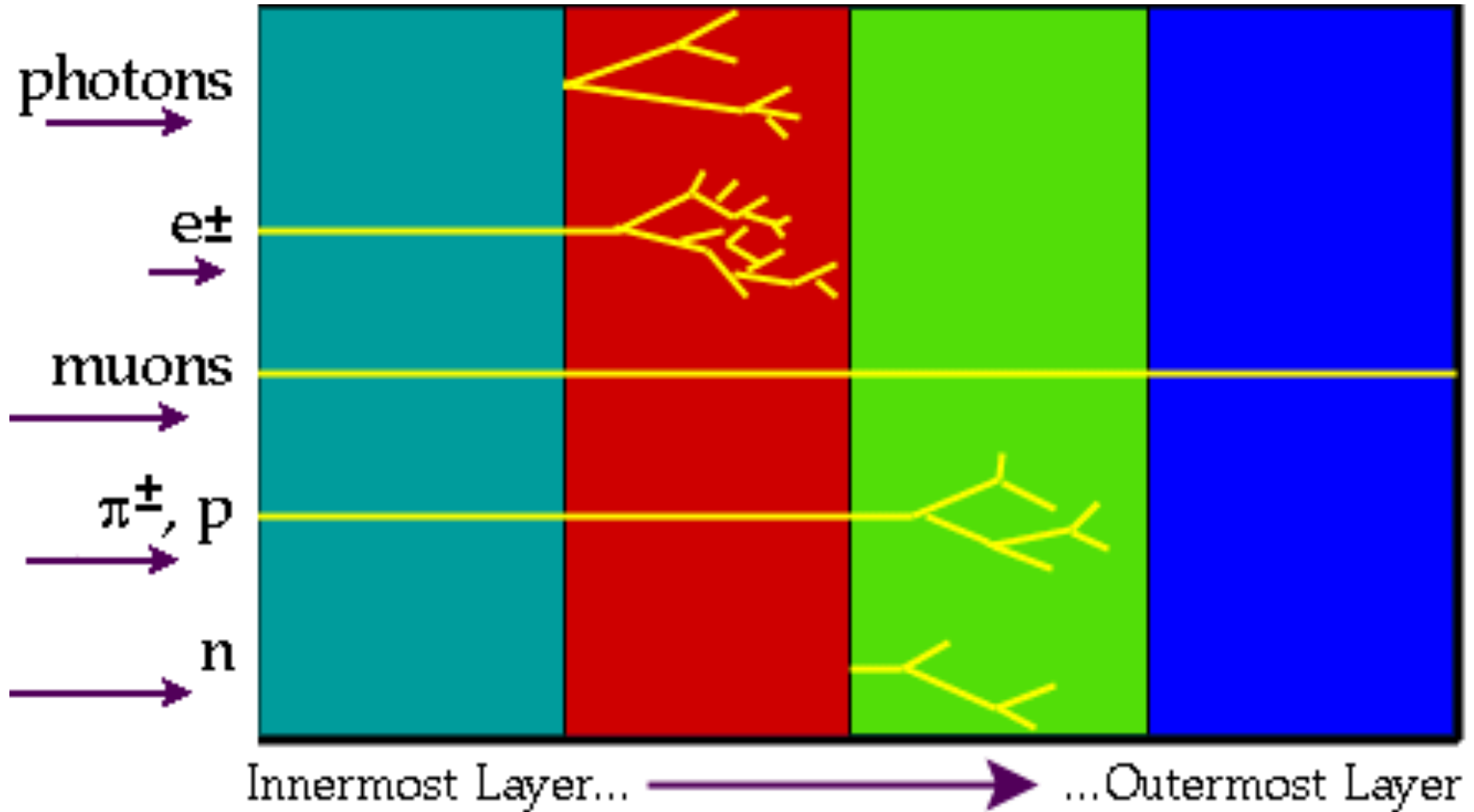
Détecteur à muons



# Détecter les muons

- Les muons sont des particules importantes car elles font souvent partie des signatures des événements intéressants.
- Ce sont des particules chargées, on les voit dans le détecteur de traces (variété d'électron, plus massifs)
- Mais ne s'arrêtent dans aucun des deux calorimètres
- On construit des chambres à muons qui mesurent de façon très précise la vitesse et la trajectoire de ces particules (précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu !!)

# Trajectographe CALO EM CALO had Détecteur Muons



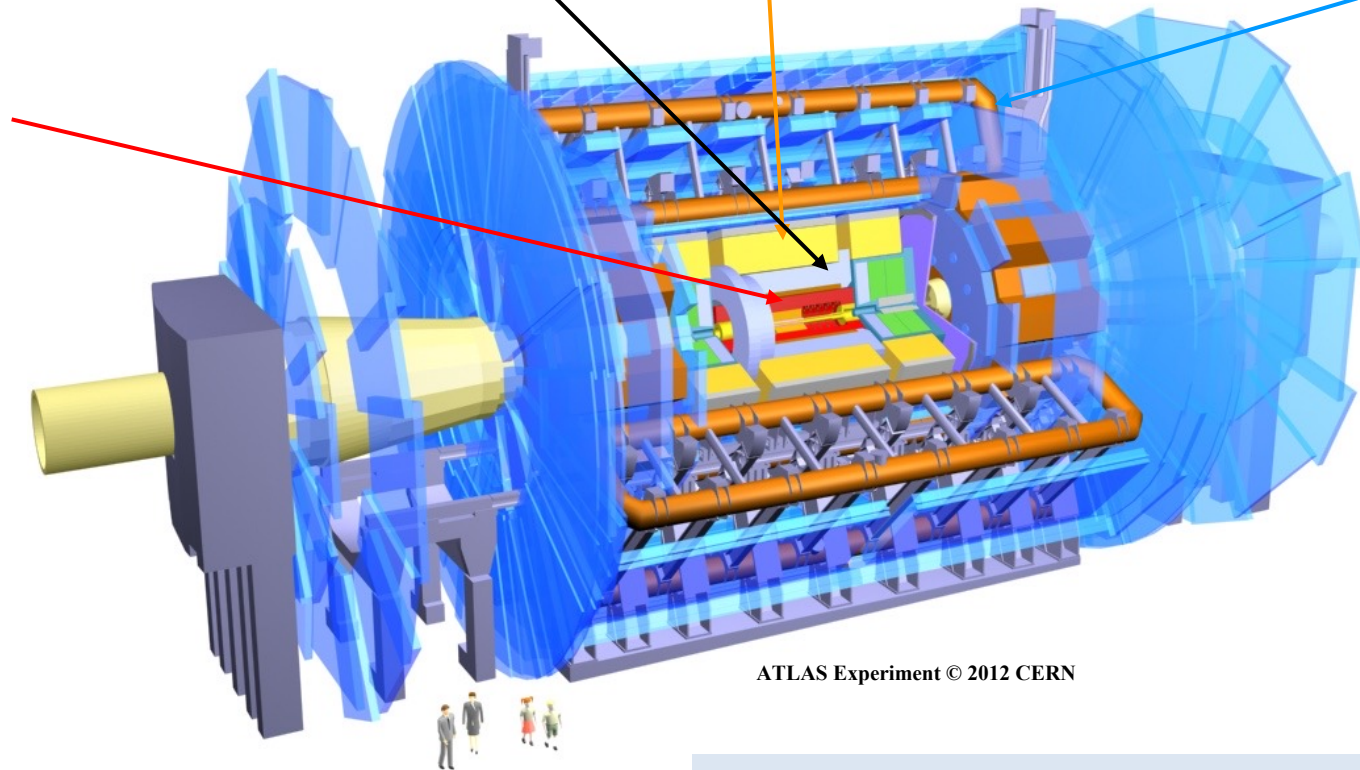
# Le détecteur ATLAS

Calorimètre  
électromagnétique

Calorimètre  
hadronique

Chambres à  
muons et toroïde  
supraconducteur

Détecteur  
interne de  
traces



ATLAS Experiment © 2012 CERN

Câbles : 3000 km

Voies électronique :  $10^8$

Haut comme un immeuble de 6 étages

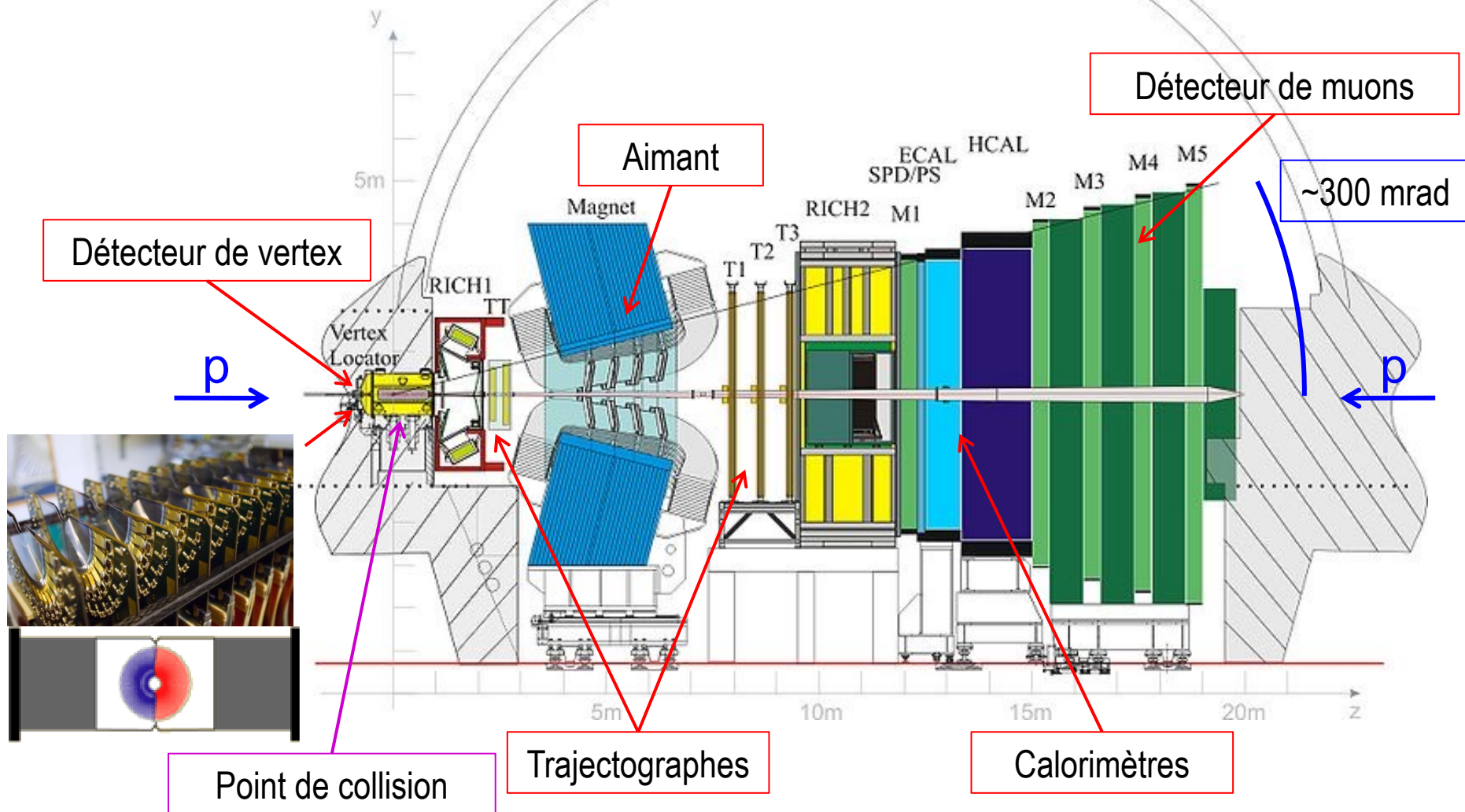
Longueur : ~ 46 m

Diamètre : ~ 25 m

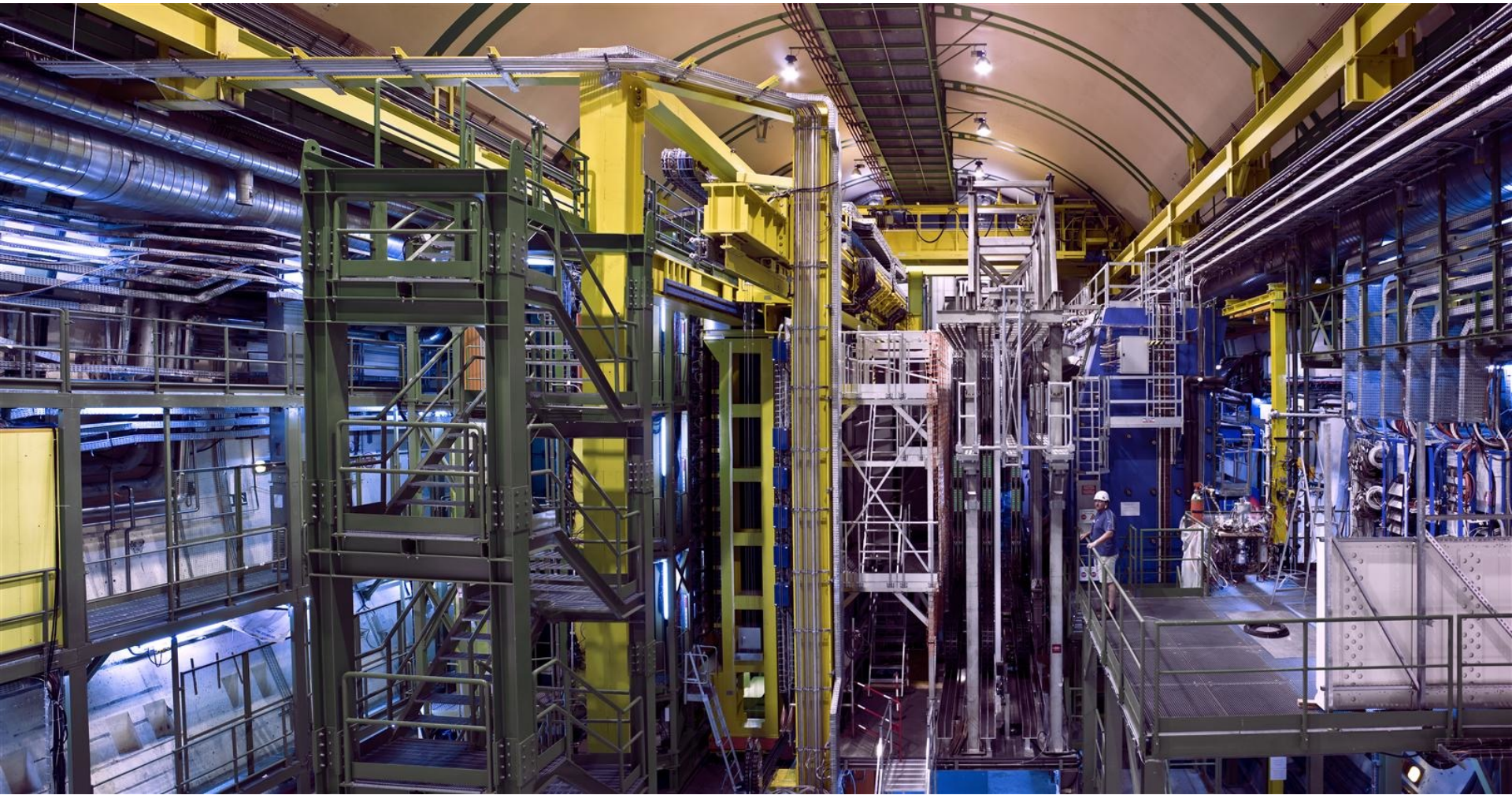
Poids : ~ 7000 tonnes

# Le détecteur *LHCb*

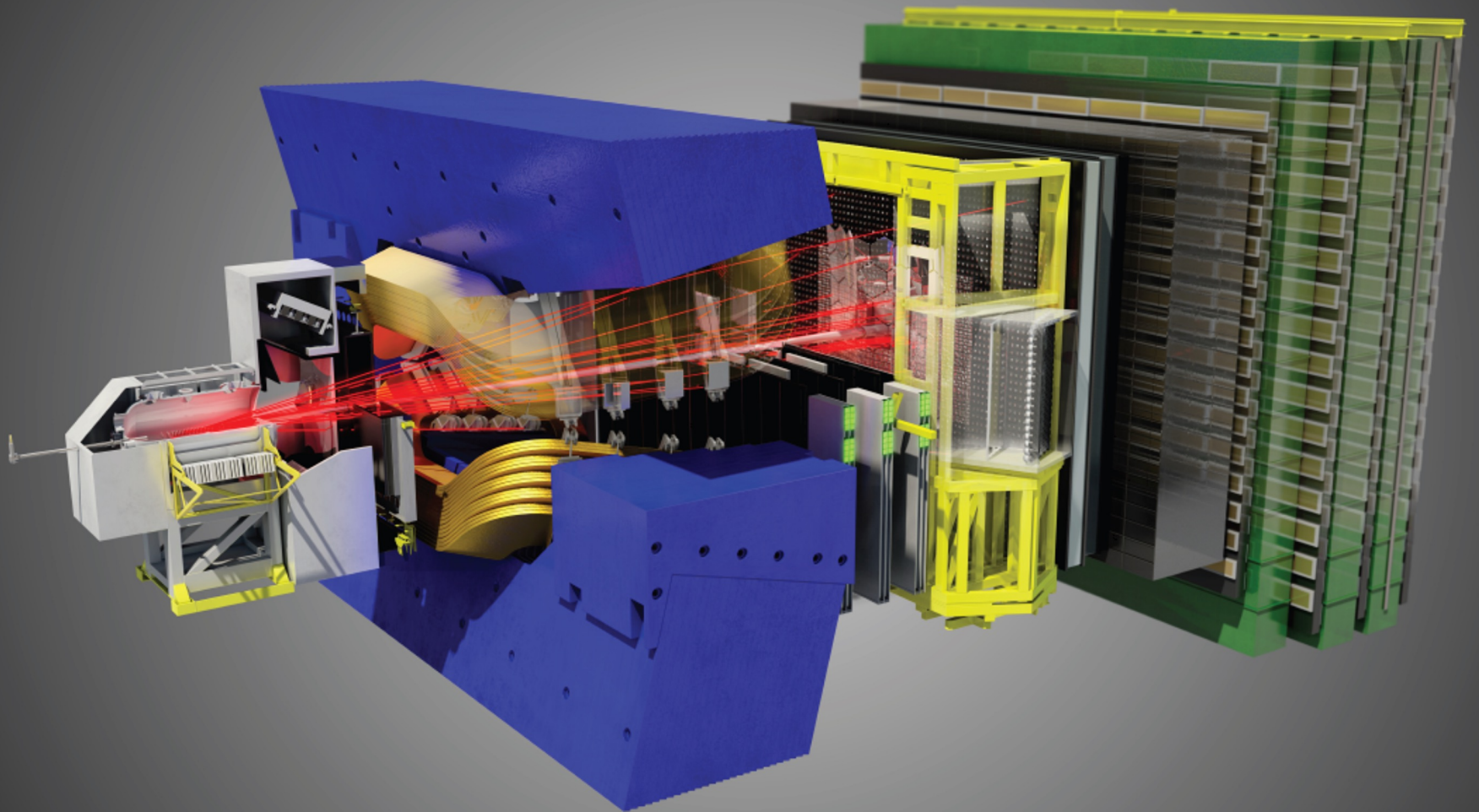
- Spécialisé pour l'étude des hadrons beaux et charmés (une longue durée de vie :  $\sim 10^{-12}$  sec)

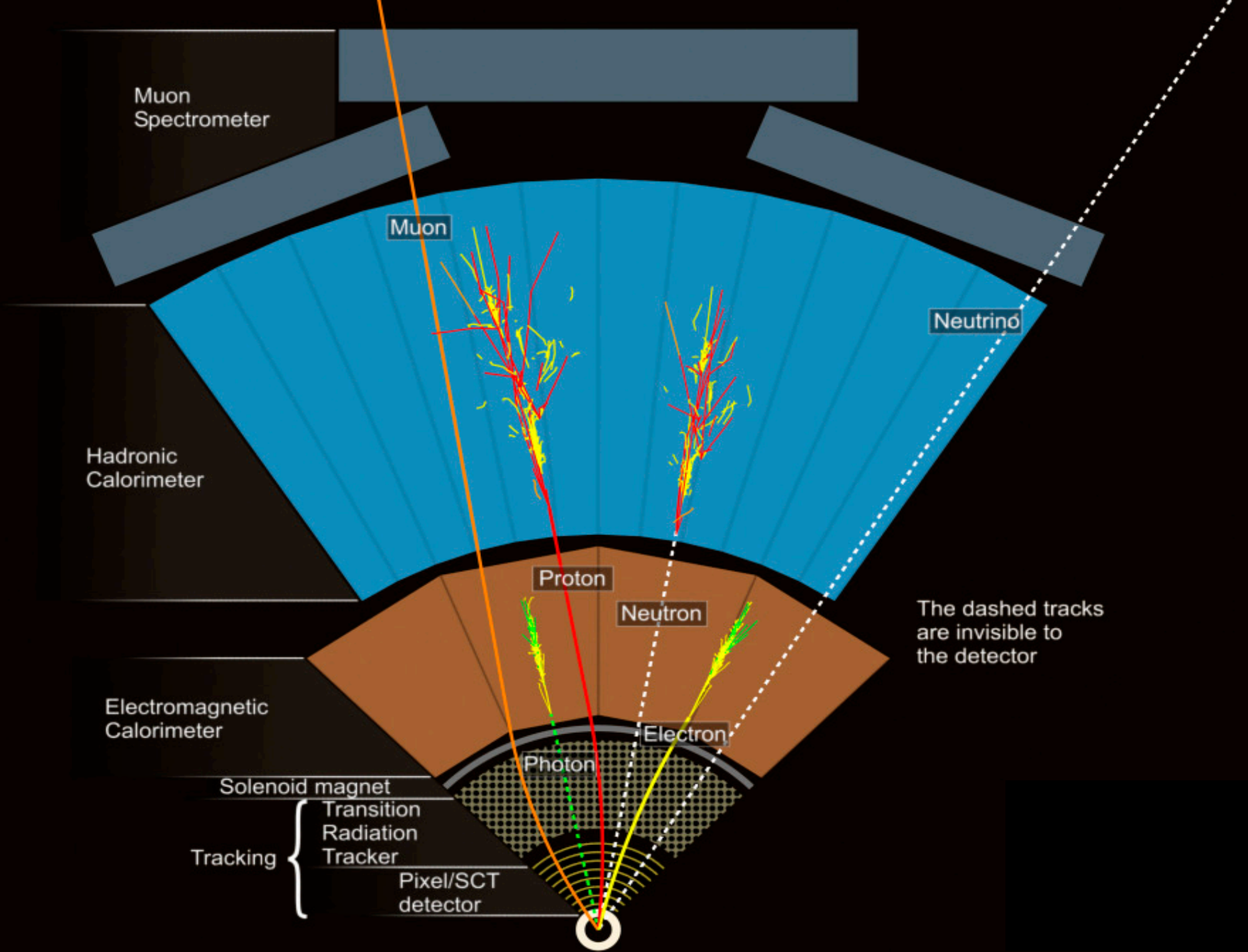








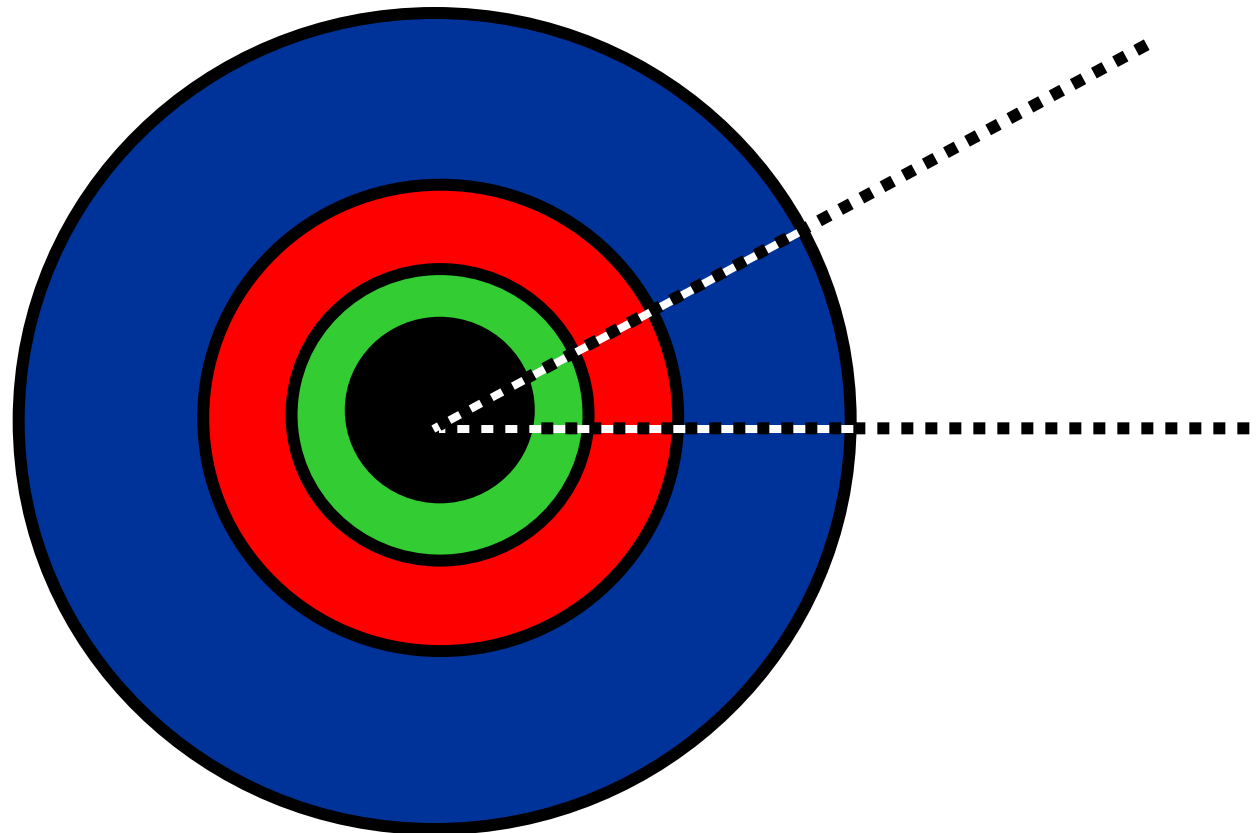




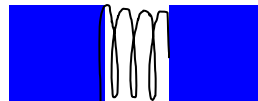


# Comment « voir » les particules qui se désintègrent très vite ?

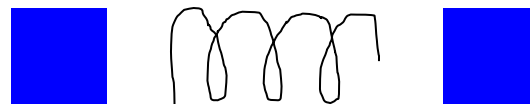
(avant même d'interagir avec le détecteur...)



**Pour comprendre on  
commence avec un petit jeu**

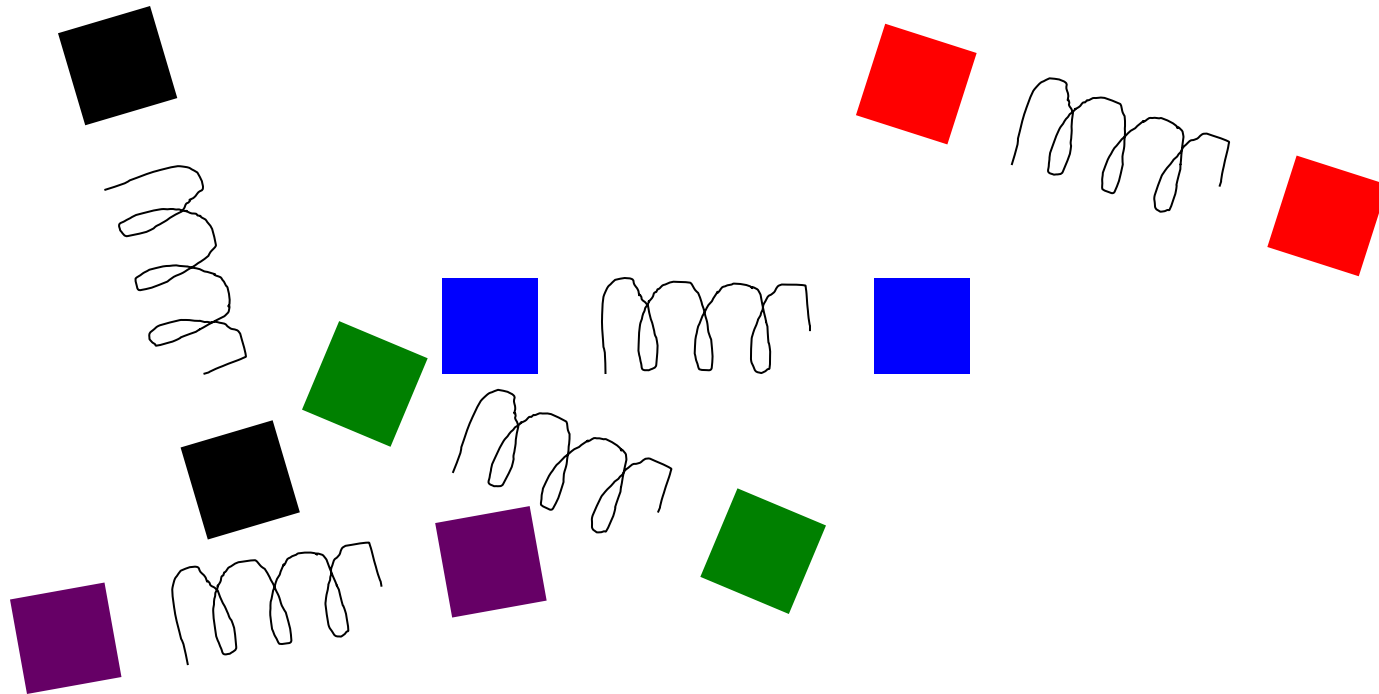


Deux cubes identiques de la même couleur sont reliés par un ressort et sont posés sur une table



Quand le ressort se détend les cubes s'éloignent et s'arrêtent à une certaine distance.

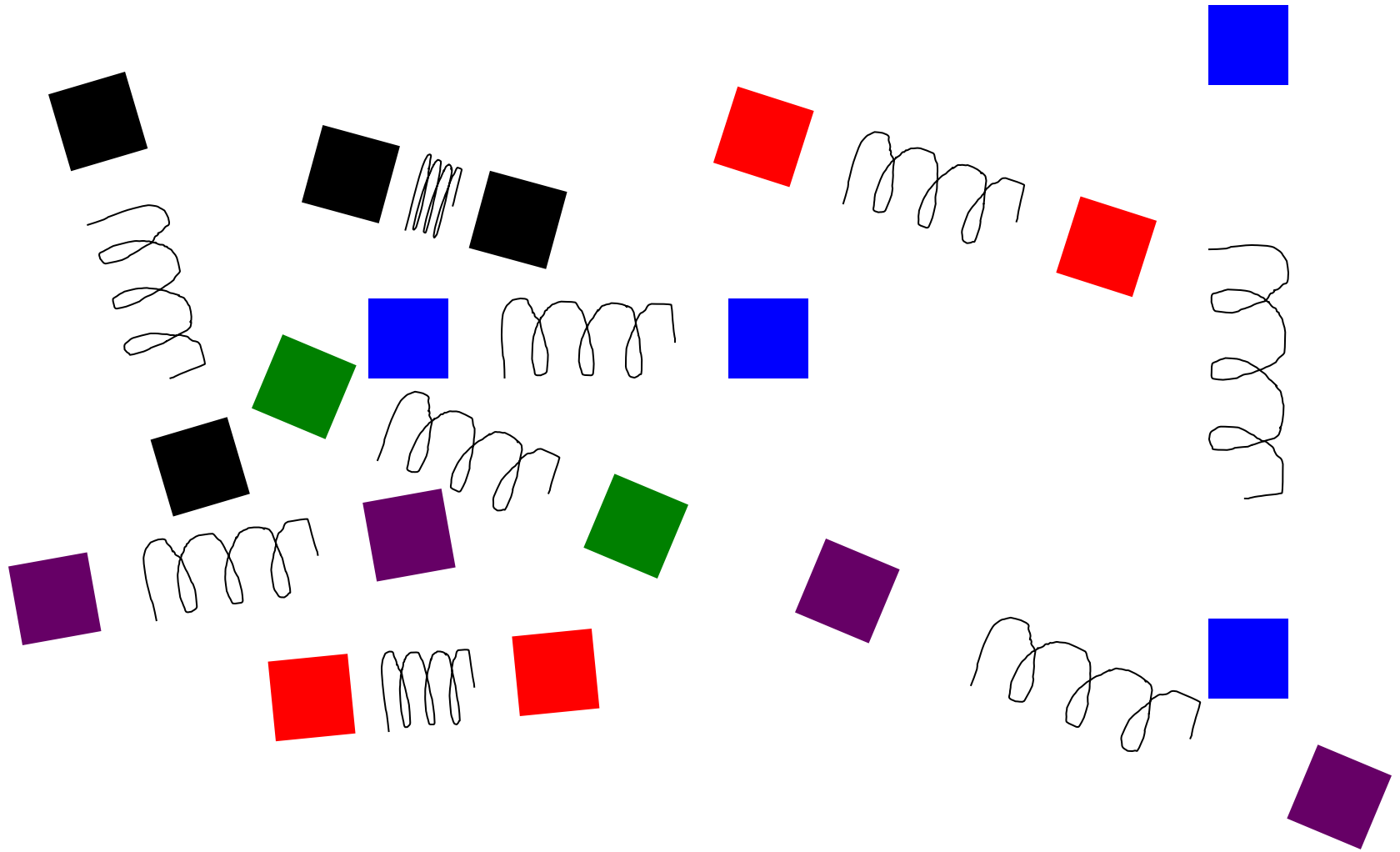
En mesurant cette distance on peut déduire l'énergie emmagasinée dans le ressort



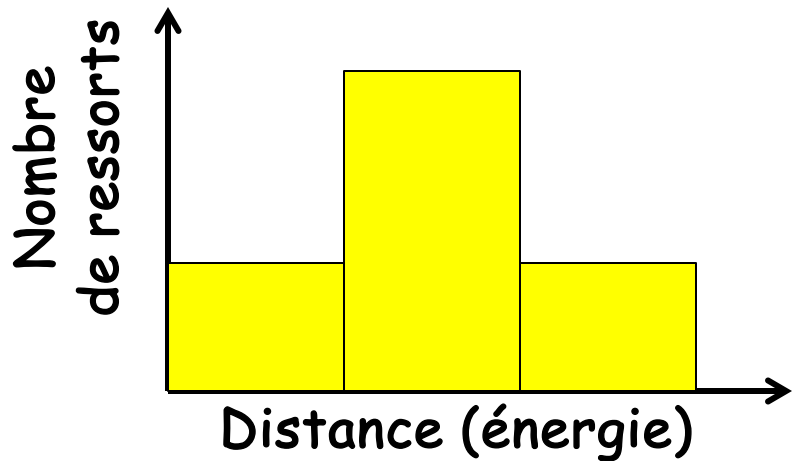
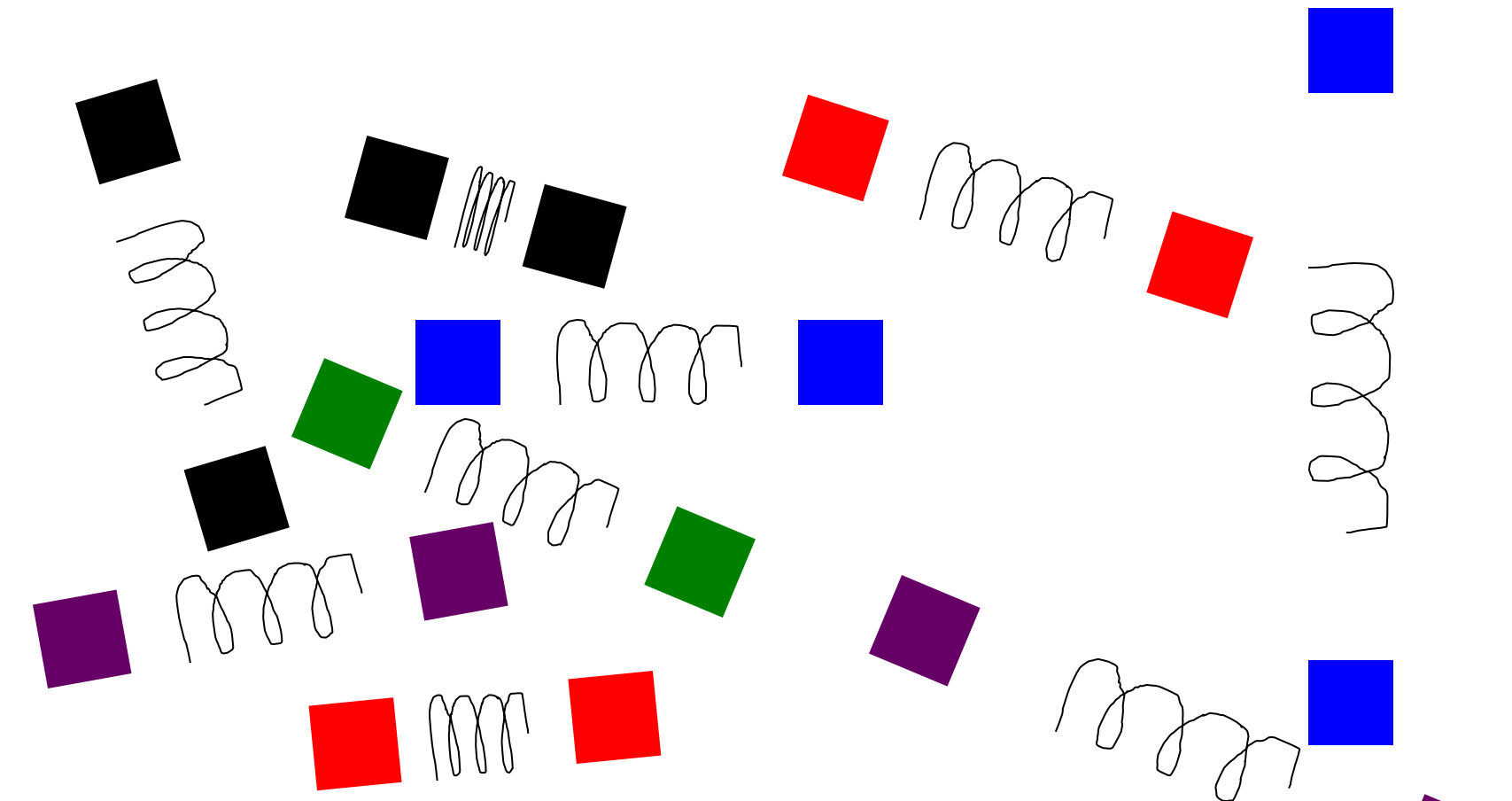
S'il y a plusieurs systèmes avec des ressorts identiques, on doit associer les cubes deux par deux en respectant deux règles:

→ Les deux doivent être d'une même couleur, et doivent être face à face.

On déduit de la même manière l'énergie du ressort



Même situation avec quelques ressorts défectueux.  
Façon pratique pour s'en sortir : un histogramme



On voit l'effet des ressorts défectueux et aussi le fait que de temps en temps on se trompe dans les combinaisons



Méthode similaire pour détecter une particule A qui se désintègre avant d'interagir avec le détecteur



combinaison,  
mesure de  
distance



petit calcul  
de mécanique

énergie  
emmagasinée  
dans le  
ressort

combinaison,  
mesure des  
impulsions et  
énergies de  
B et C



formule de  
« masse  
invariante »

énergie emmagasinée  
dans A : sa masse  
(encore  $E=mc^2...$ )

# Calcul de masse invariante: la théorie (pas besoin de tout comprendre)

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2}$$

Énergie d'un système de  
particules en mouvement

$$(m_0^{(Z)})^2 = \left( \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{c^2} \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \frac{\vec{p}_i}{c} \right)^2$$

Ayant E et P, on peut en  
déduire la masse

$$(m_0^{(Z)})^2 = \left( \frac{E_1}{c^2} + \frac{E_2}{c^2} \right)^2 - \left( \frac{\vec{p}_1}{c} + \frac{\vec{p}_2}{c} \right)^2$$

Cas pour 2  
particules dans  
l'état final

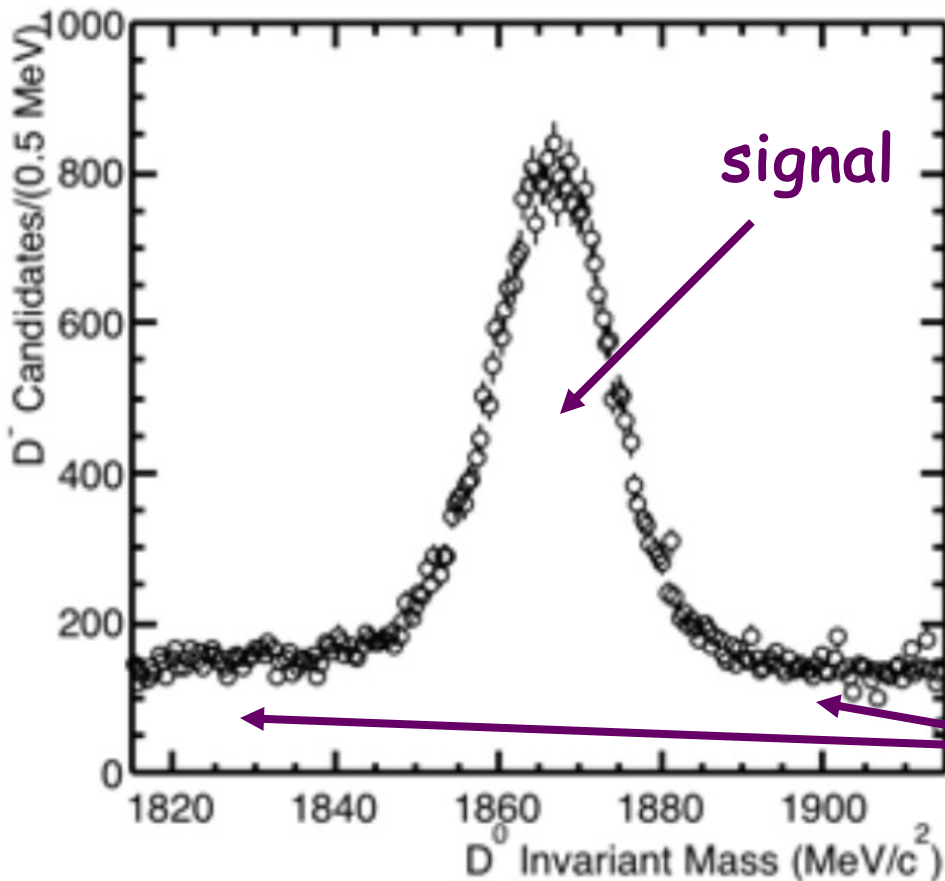
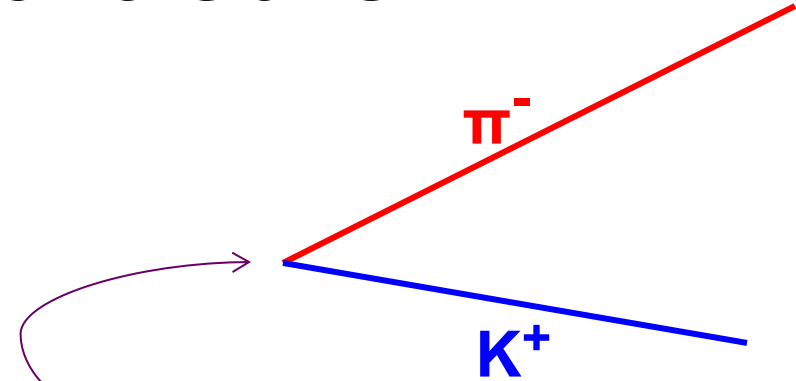
Pas de panique: Hypathia fait le calcul de m pour nous.

Il suffit de choisir les particules 1 et 2 qu'on suppose provenir de la même  
particule mère.

# Exemple de la particule $D^0$



On combine 2 traces de charge opposée et on calcule la masse invariante

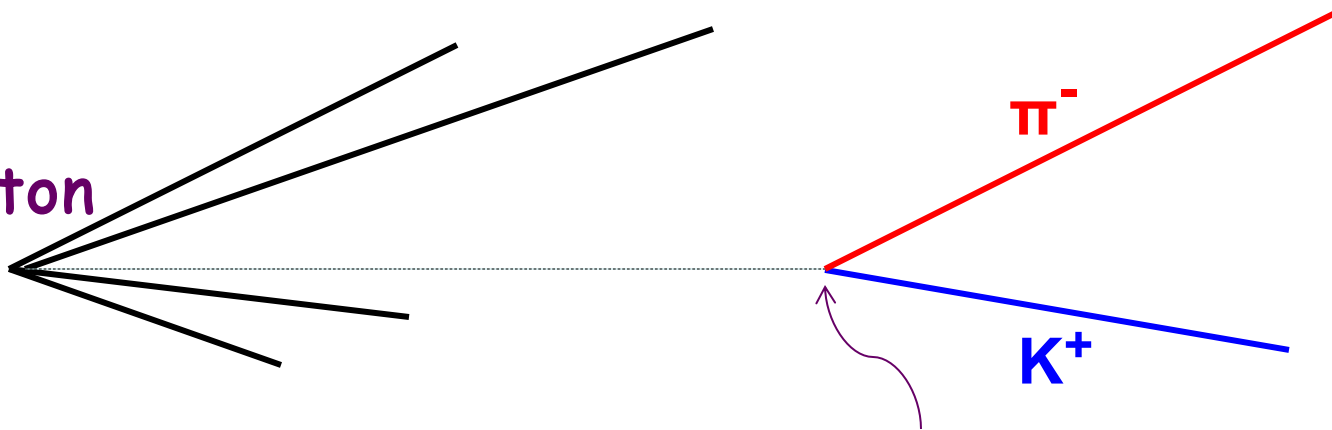


Bruit de fond

# $D^0$ est une particule avec un temps de vie « long »

Long... pour les physiciens des particules c'est  $10^{-12}s$  !  
(comme  $D^0$  se déplace à la vitesse de la lumière elle peut avoir une distance de vol mesurable)

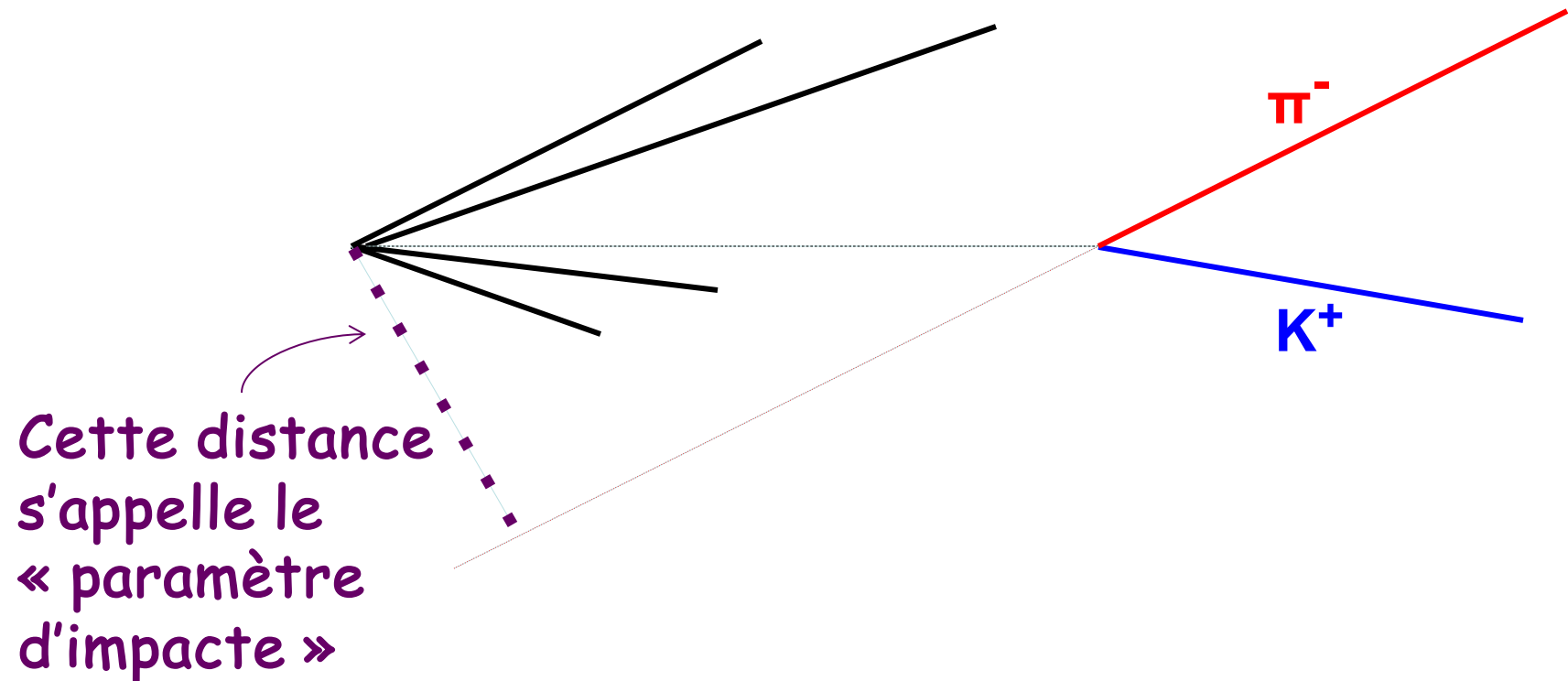
Point de collision  
proton-proton  
(vertex  
primaire)



Vertex du  $D^0$   
(secondaire)

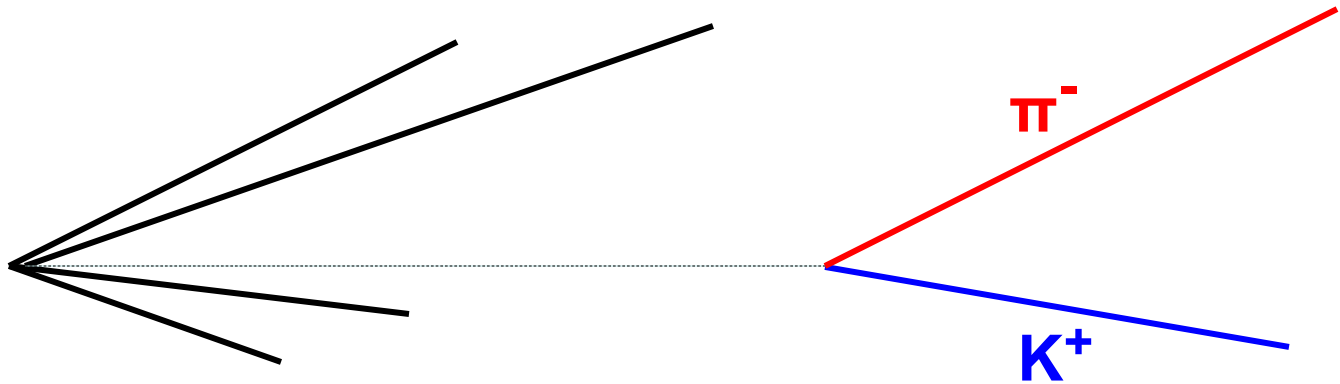
# $D^0$ est une particule avec un temps de vie « long »

Long... pour les physiciens des particules c'est  $10^{-12}s$  !  
(comme  $D^0$  se déplace à la vitesse de la lumière elle peut avoir une distance de vol mesurable)



# $D^0$ est une particule avec un temps de vie « long »

Long... pour les physiciens des particules c'est  $10^{-12}s$  !  
(comme  $D^0$  se déplace à la vitesse de la lumière elle peut avoir une distance de vol mesurable)



On peut facilement « traduire » la distance de vol du  $D^0$  en temps



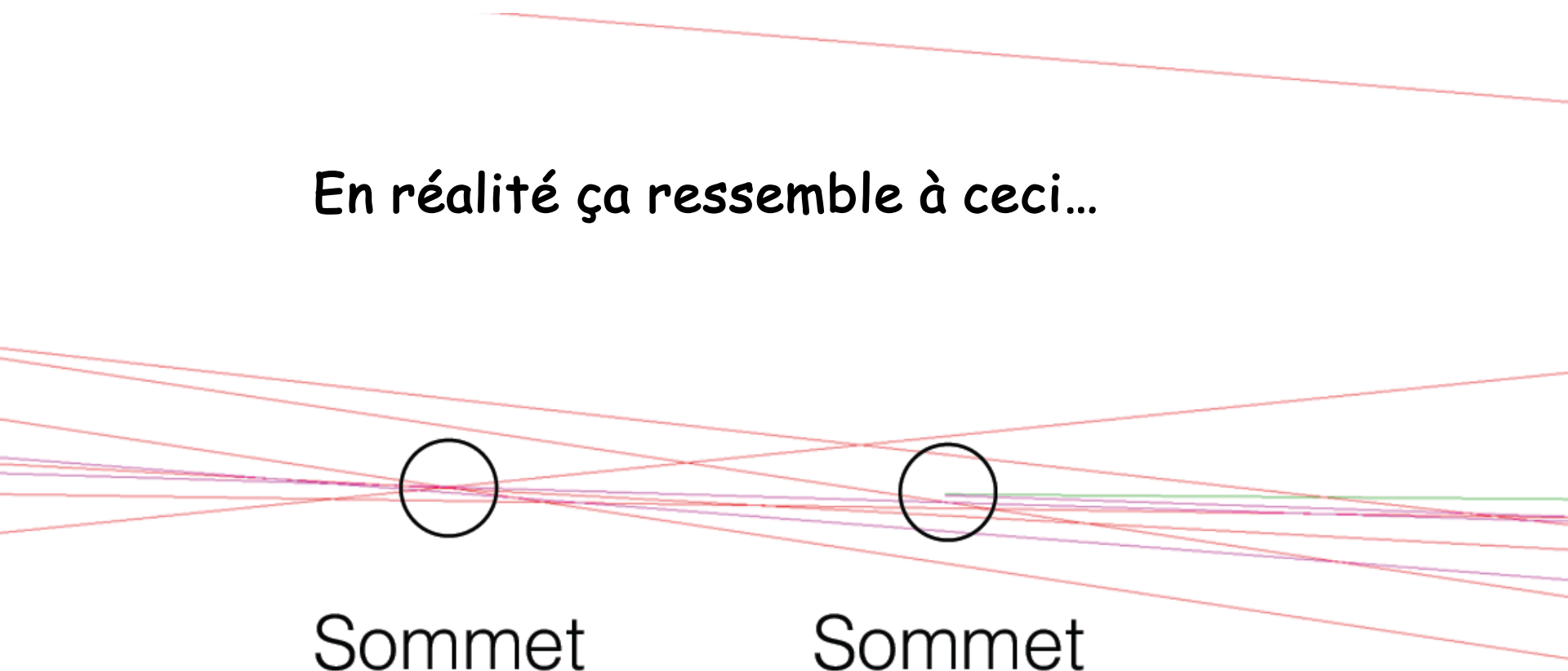
En réalité ça ressemble à ceci...



Sommet  
principal



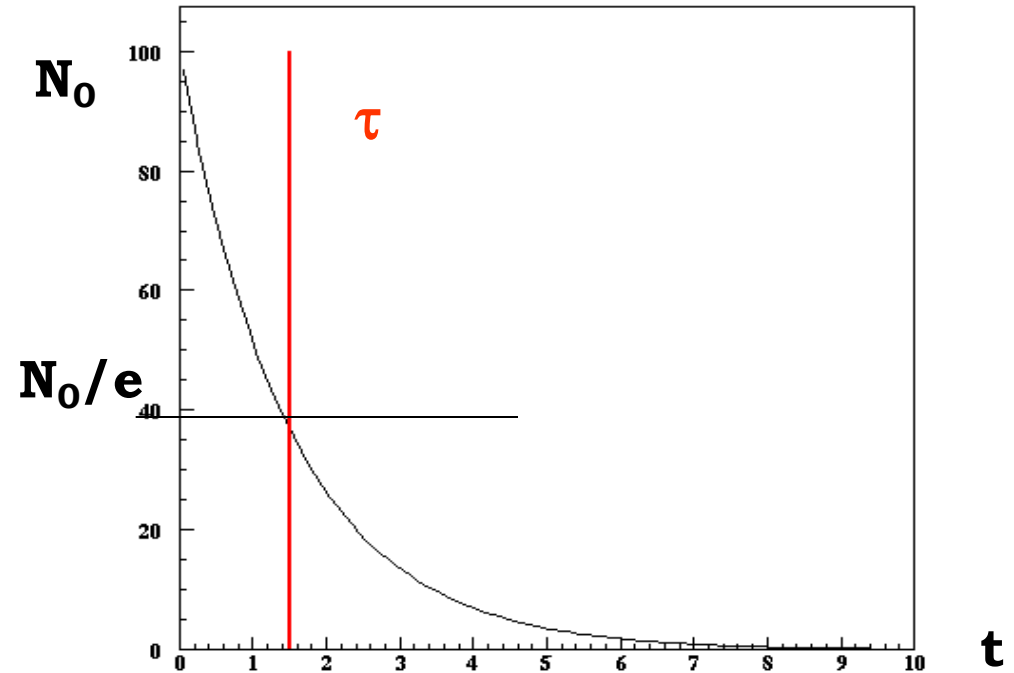
Sommet  
secondaire



# Le temps de vie d'une particule obéît à une loi de probabilité

$$\Delta N = -\lambda \times N \times \Delta t \Rightarrow \text{loi exponentielle}$$

↳ Constante de désintégration  
 $\propto$  proba. de désintégration par u. de temps



$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

Temps de vie moyen (défini dans le référentiel où la particule est au repos)

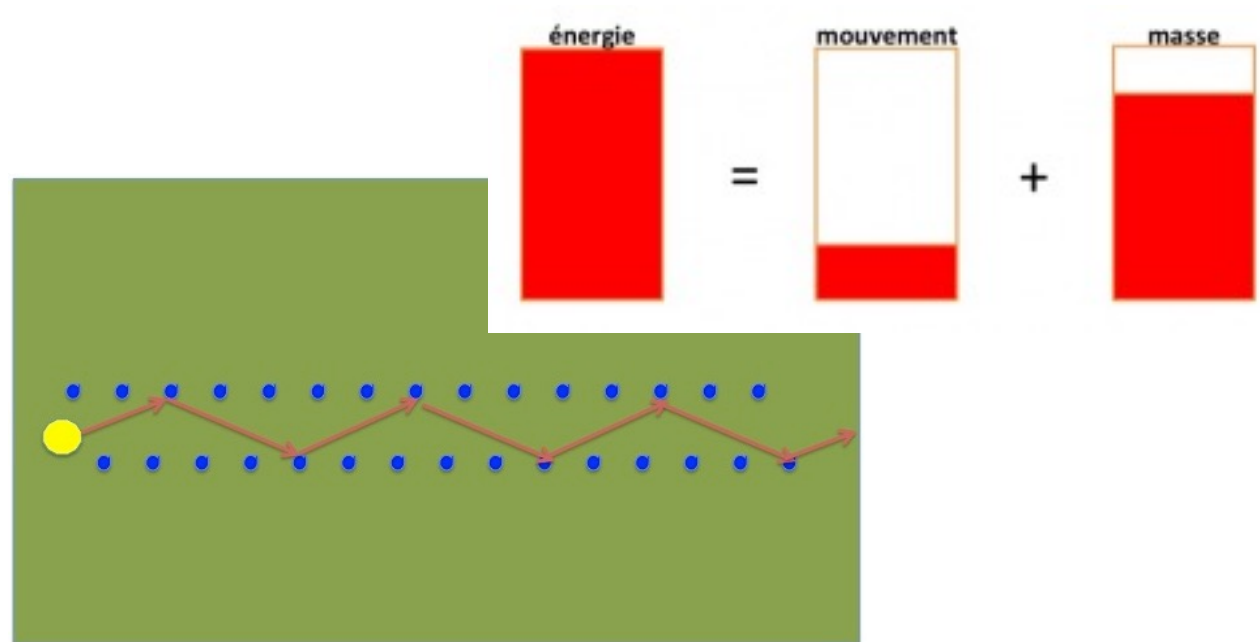
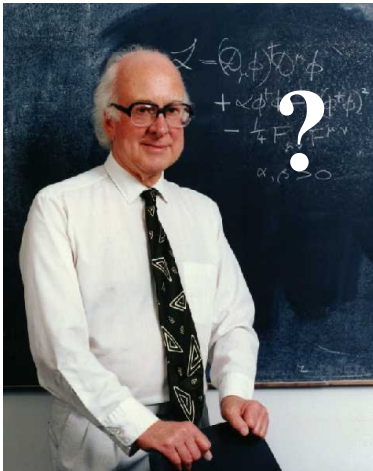
# Le boson de Higgs

## La problématique de la masse des particules

- ✓ Sans le mécanisme de Higgs dans le modèle standard, pas de masses
- ✓ Avec ce modèle (1964) :

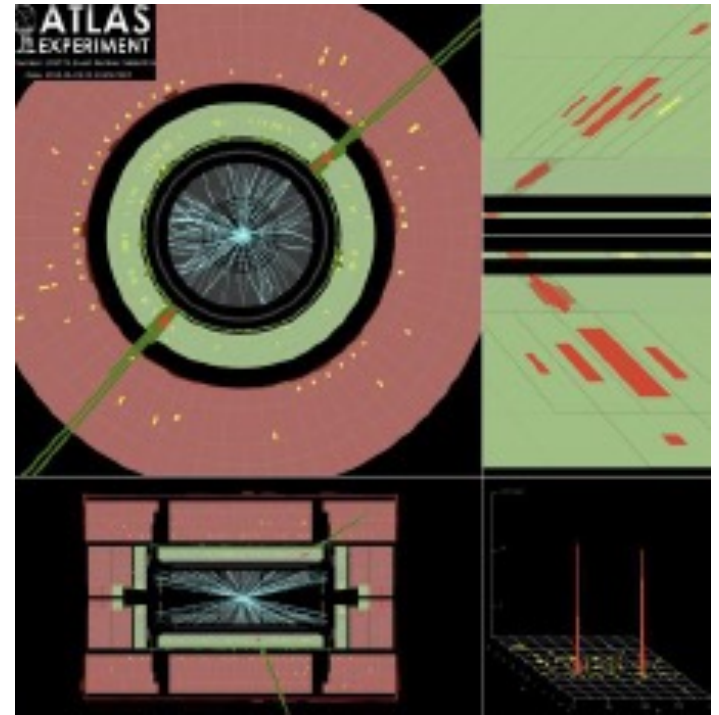
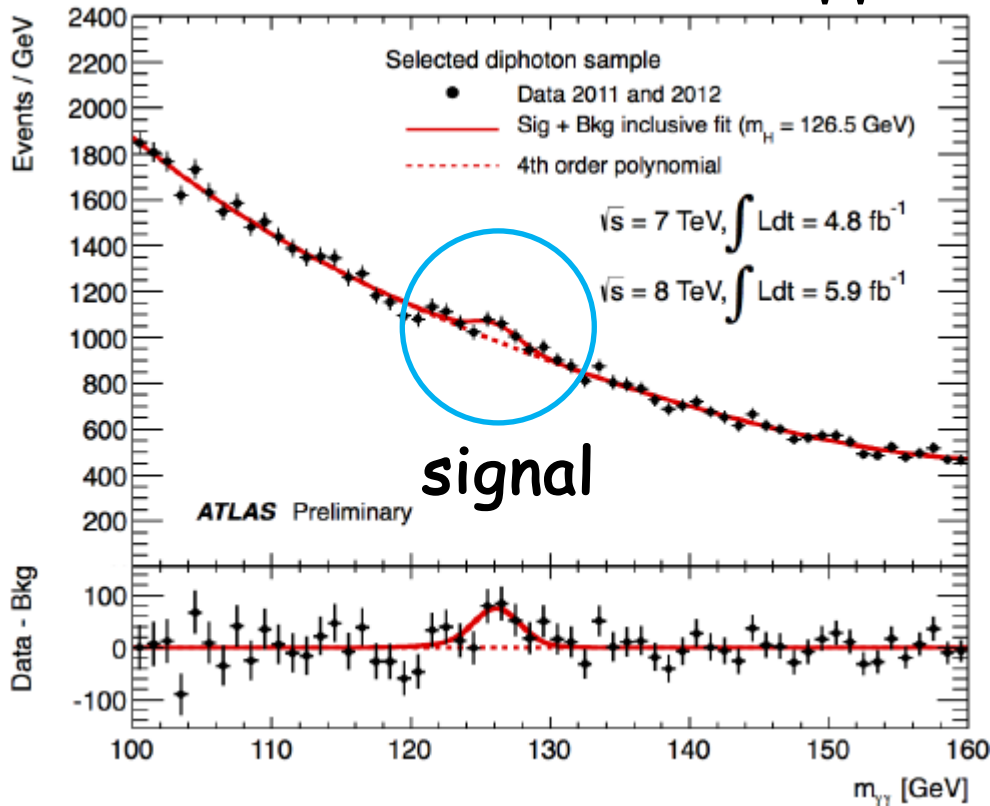
les particules acquièrent leur masse en interagissant avec le « champs de Higgs »

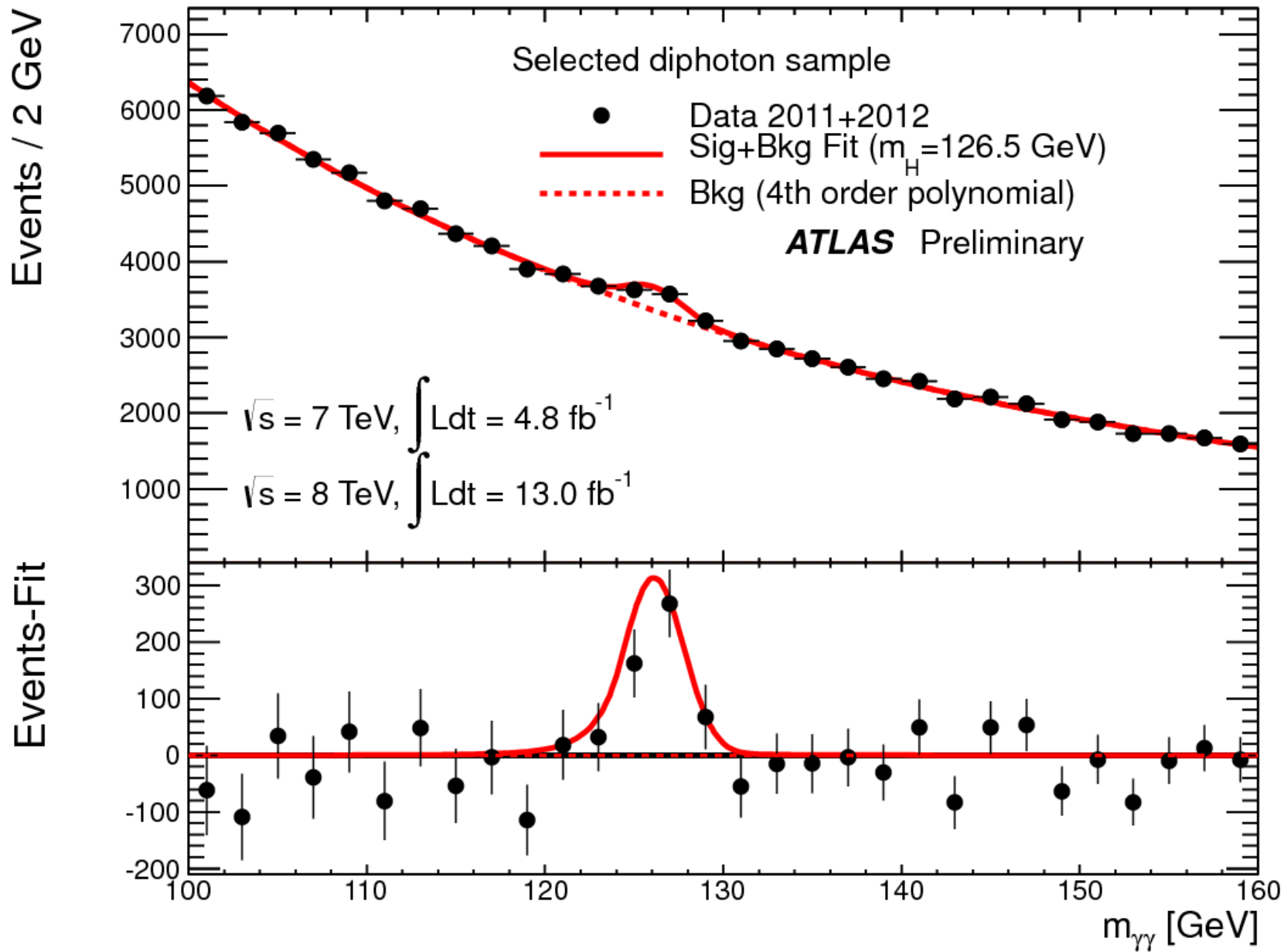
Intensité de l'interaction proportionnelle à la masse

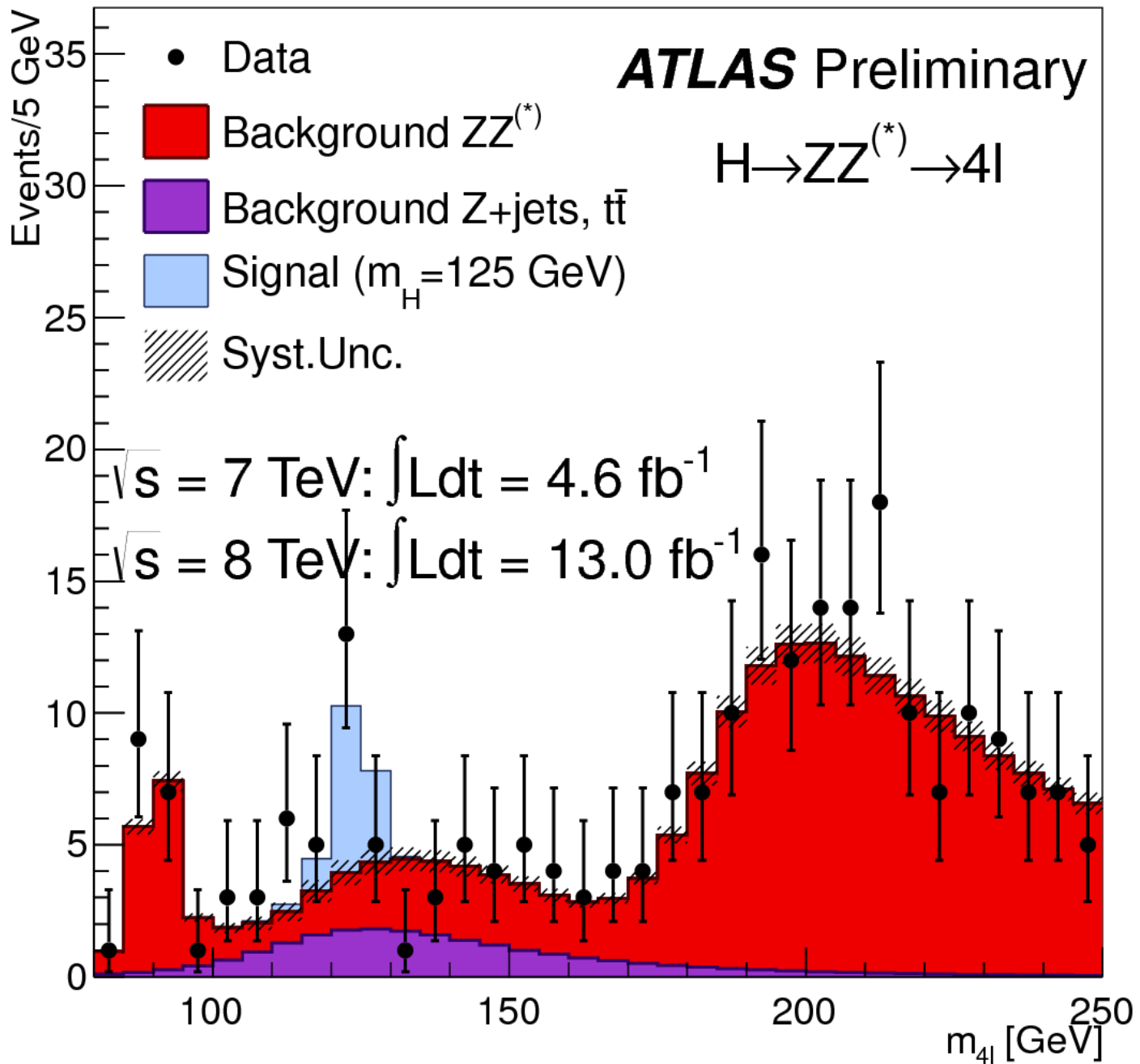


# Sa découverte a été annoncée par ATLAS et CMS le 4 juillet 2012

## Masse invariante $H \rightarrow \gamma\gamma$







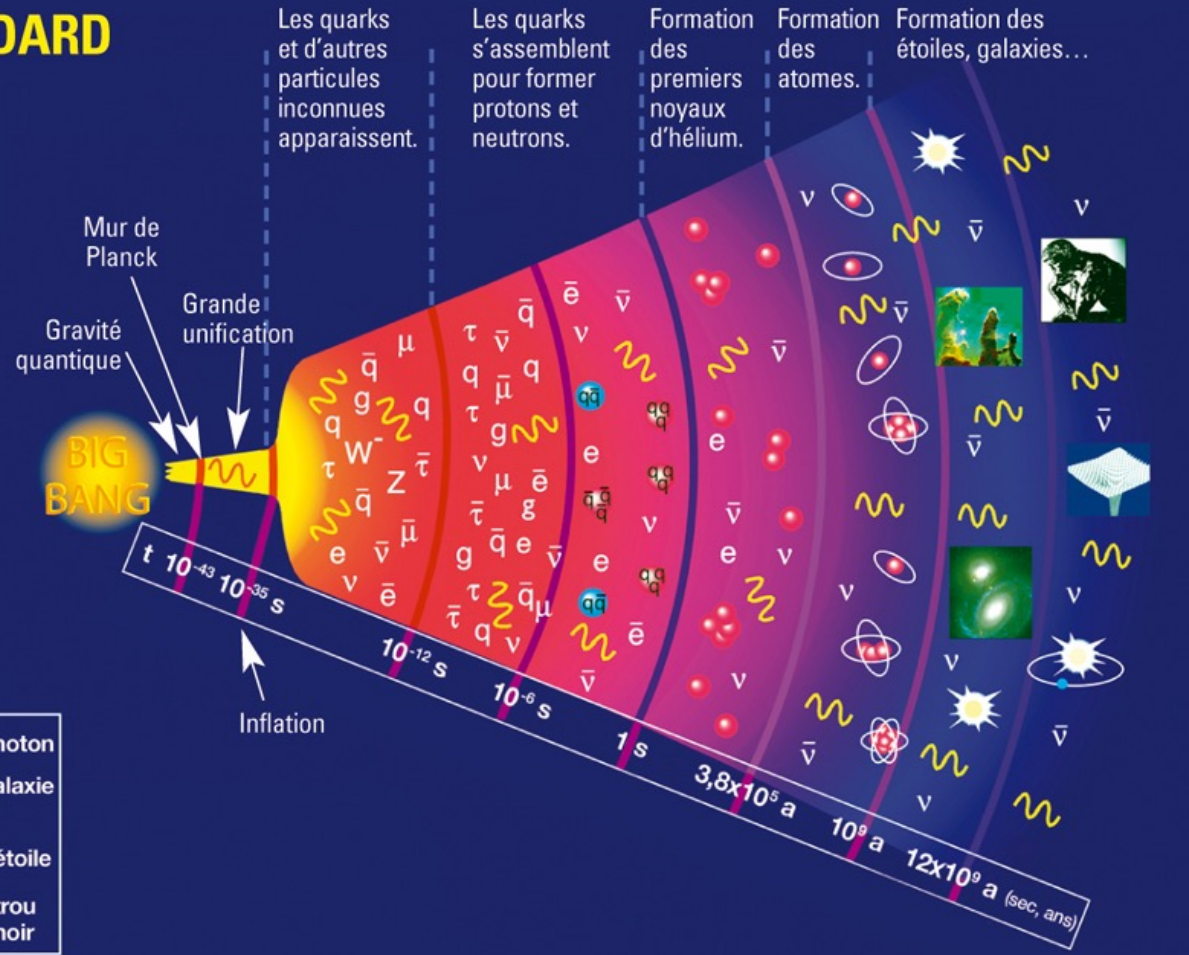


# Lien entre l'infiniment petit et l'infiniment grand... Le « big bang »

## L'UNIVERS SELON LE MODÈLE STANDARD

Depuis le Big Bang, l'Univers primordial a franchi de nombreuses étapes durant lesquelles les particules puis les atomes et la lumière ont peu à peu émergé avant qu'étoiles et galaxies ne prennent corps. C'est cette histoire que raconte la théorie du « modèle standard » en vigueur aujourd'hui.

L'Univers devient transparent.

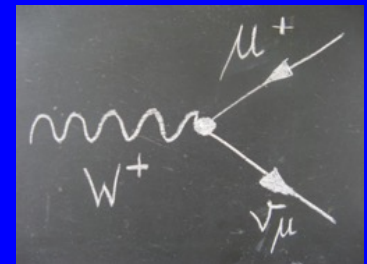
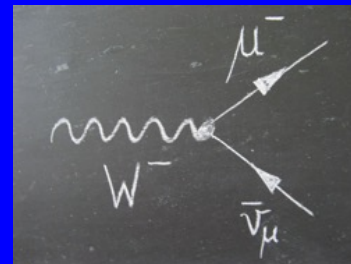
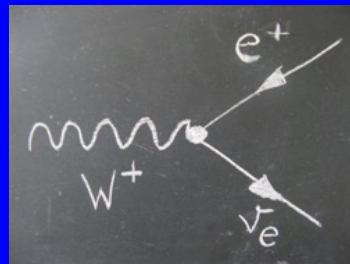
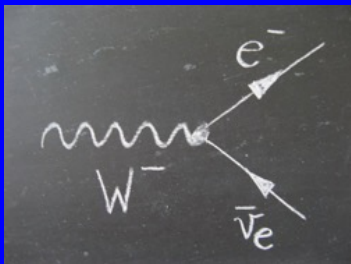
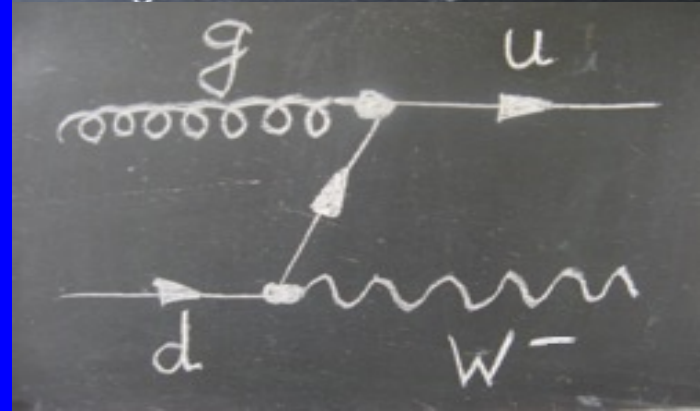
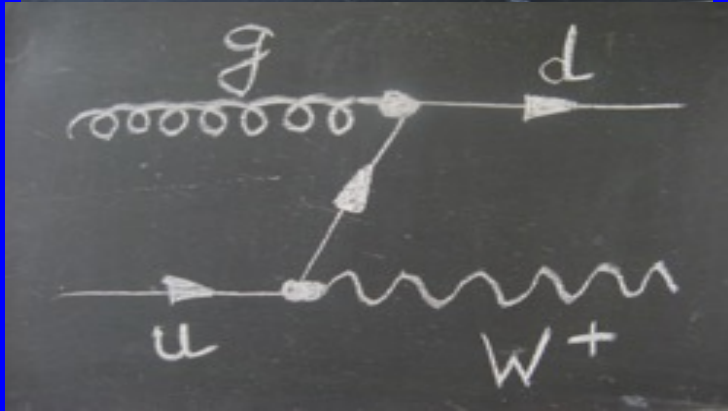
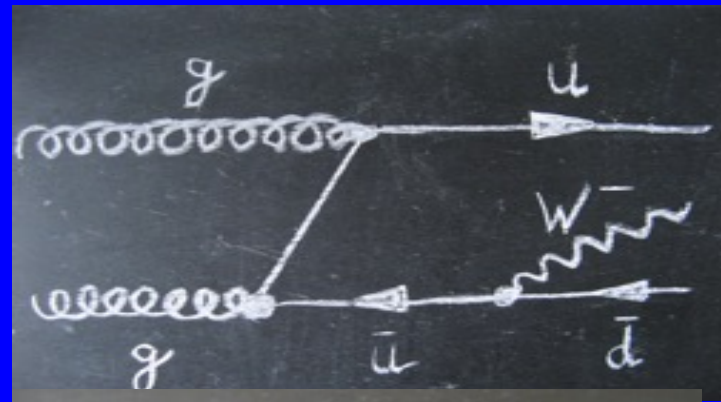
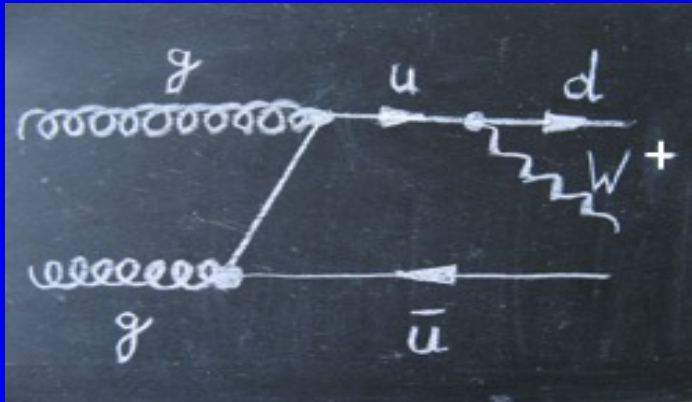


Légendes		
W, Z bosons	$q\bar{q}$ meson	photon
q quark	$q\bar{q}$ baryons	galaxie
g gluon	ions	étoile
e électron	atome	trou noir
$\mu$ muon		
$\tau$ tau		
$\nu$ neutrino		

96% de l'univers composé de matière/énergie noire...

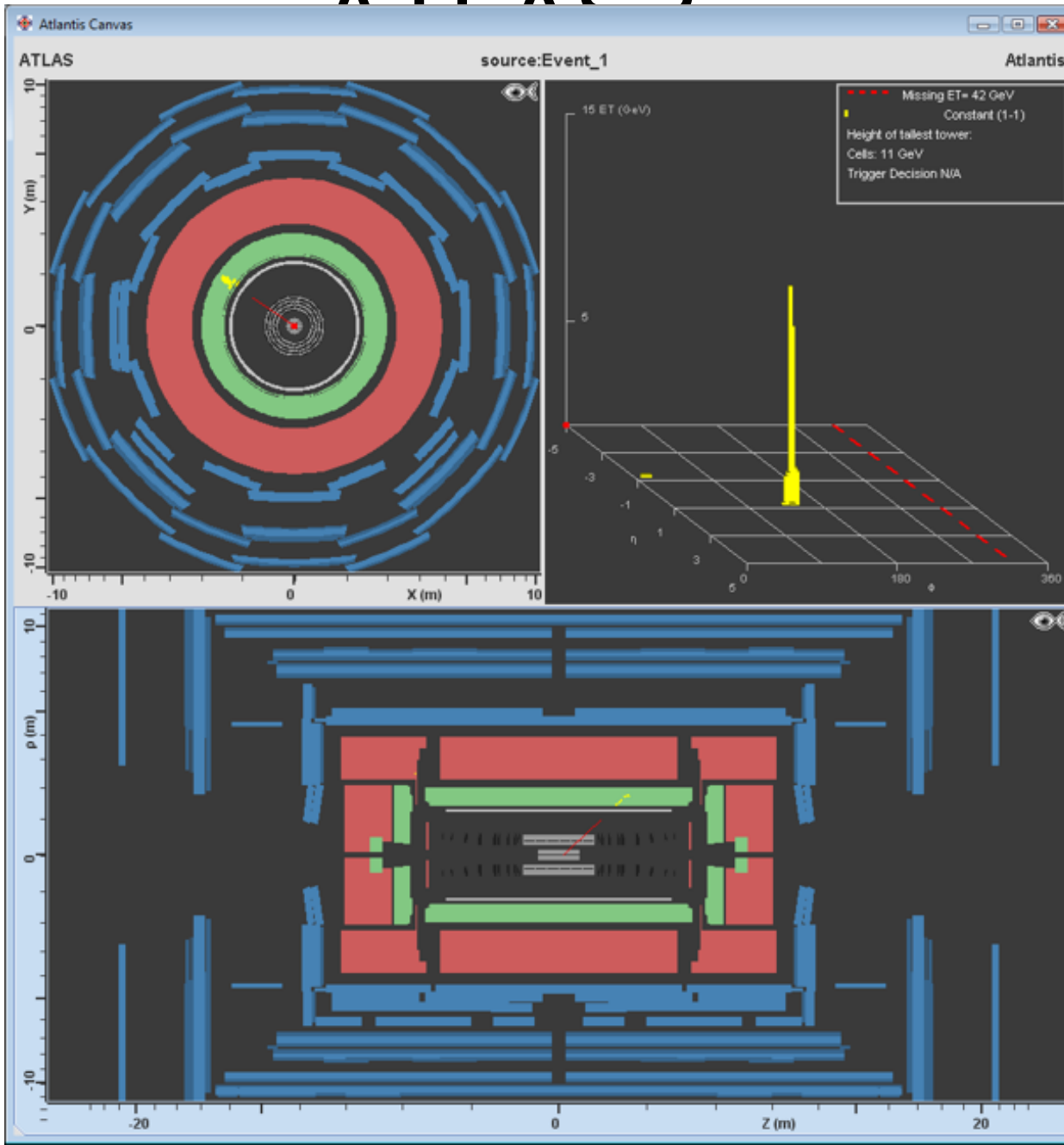
réserve

# Production et désintégrations de W

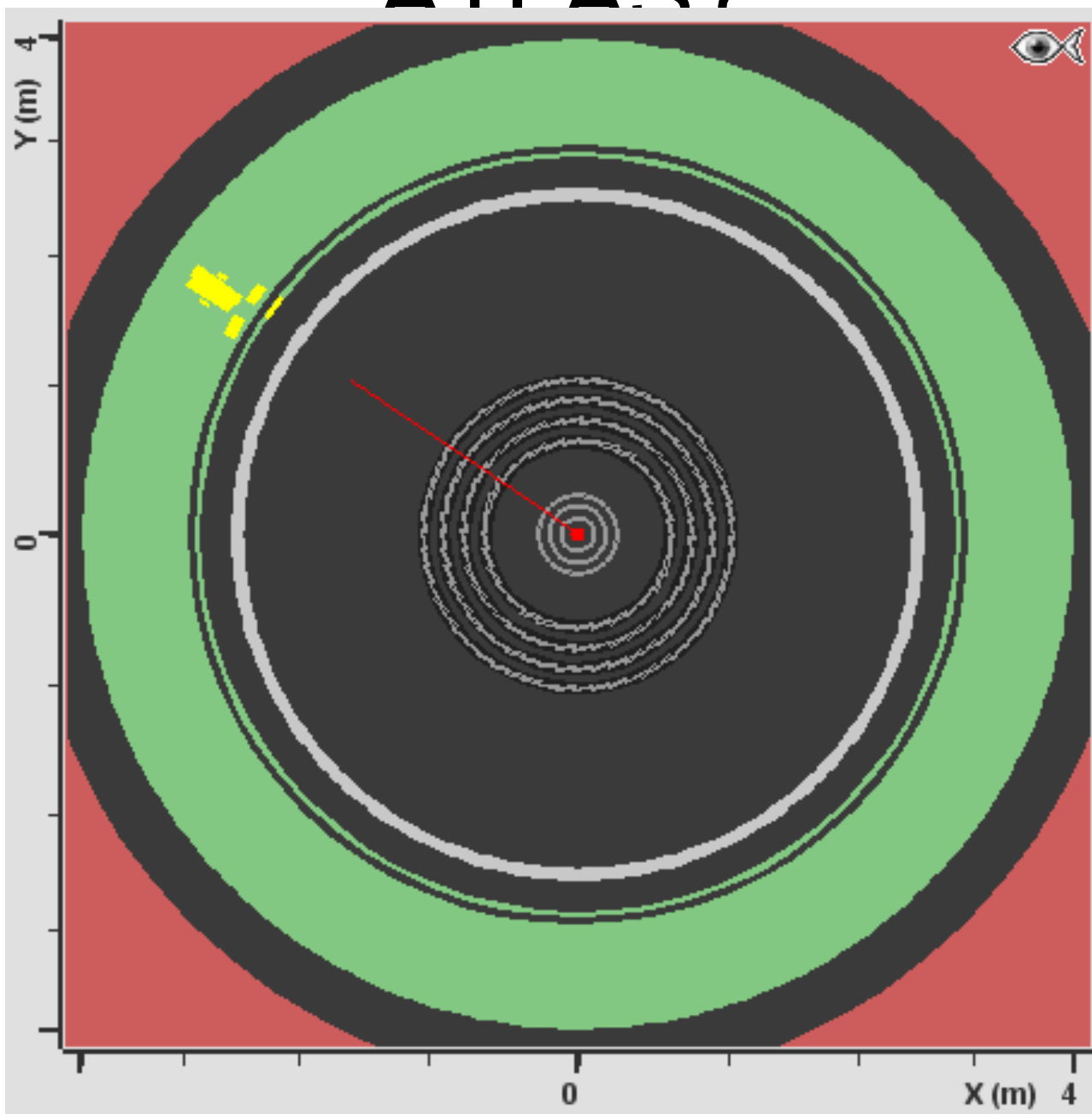


# Commitment volt-on-fires traces a

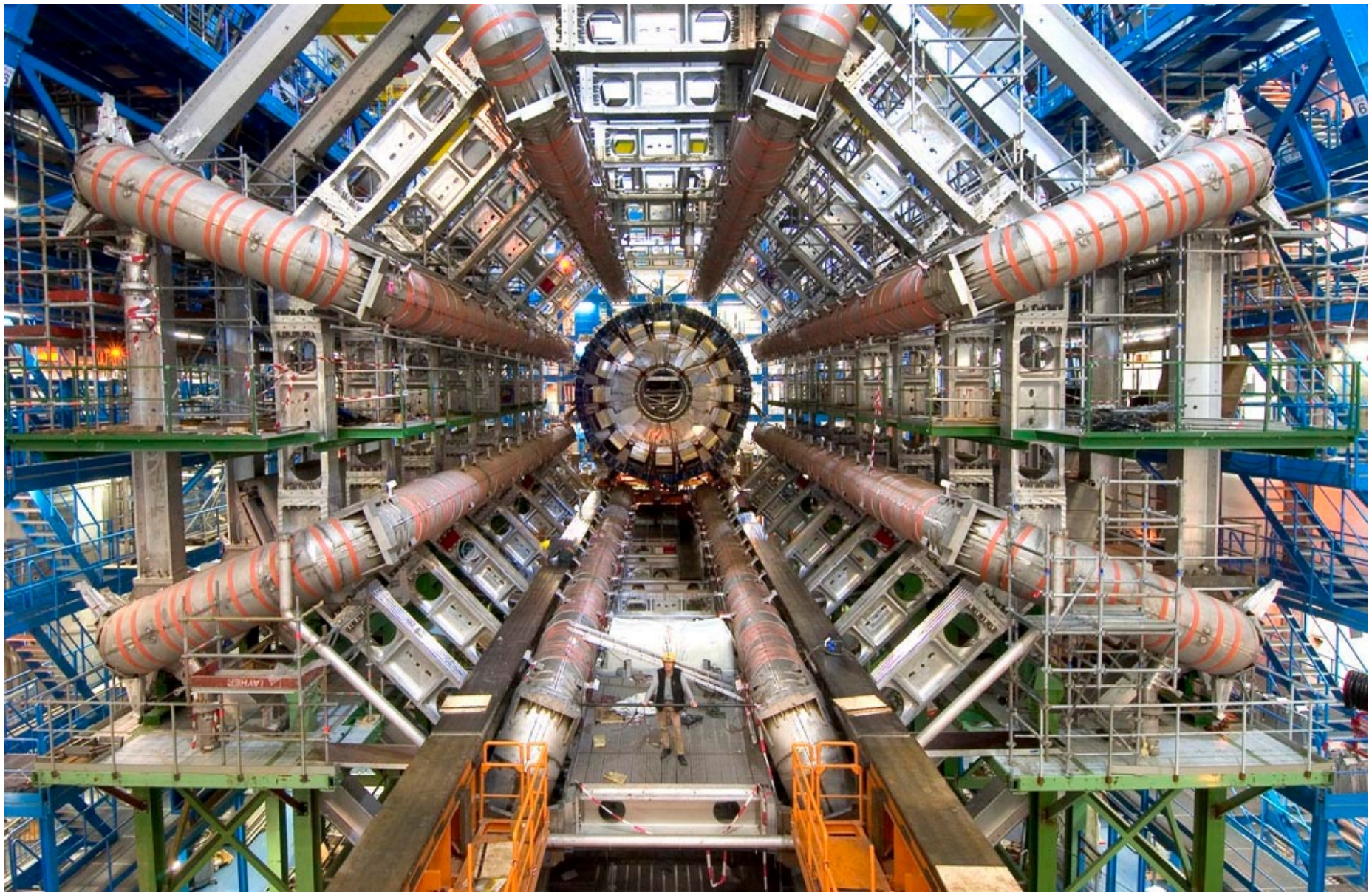
## ATLAS



# $\Delta T$ $\Delta S$ ?

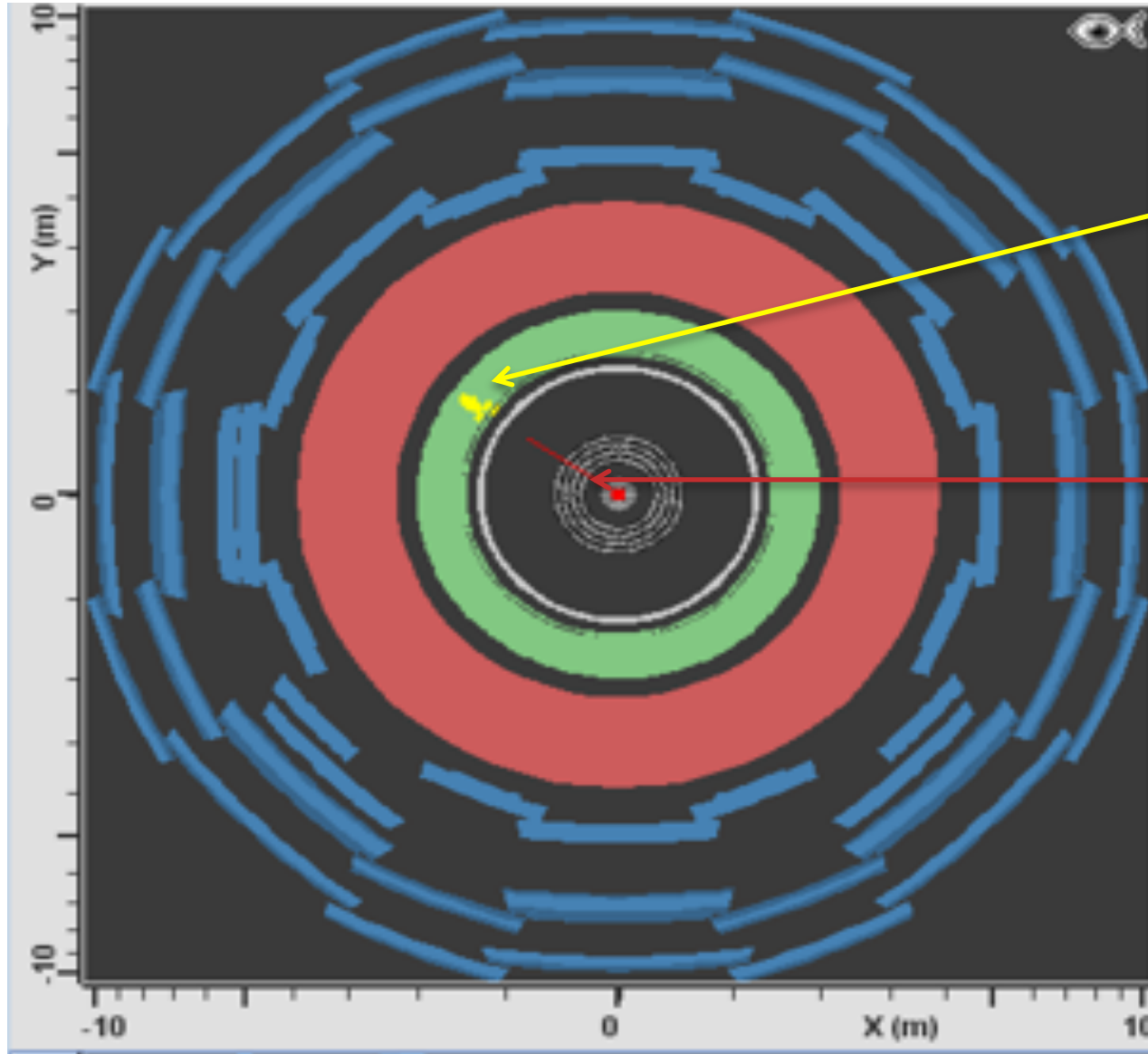








# Comment voit-on un électron dans ATLAS?



Dépot d'énergie dans le calorimètre électromagnétique

Une seule trace visible dans le détecteur aligné avec l'énergie mesurée dans le calorimètre

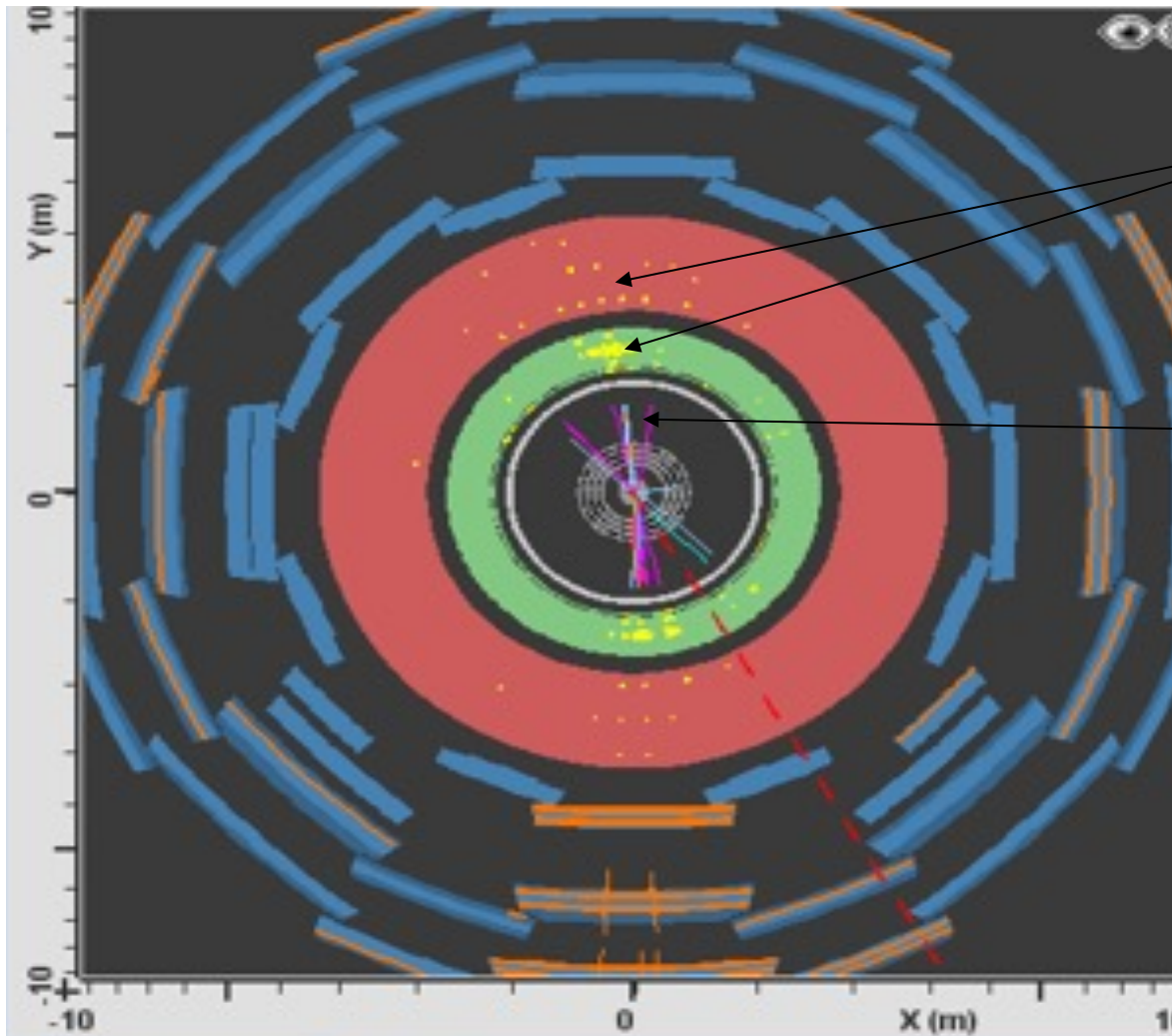
Et le photon ?

Et d'autres particules chargées ?

# Comment voit-on un quark dans ATLAS?

# Comment voit-on un ~~quark~~ jet dans ATLAS?

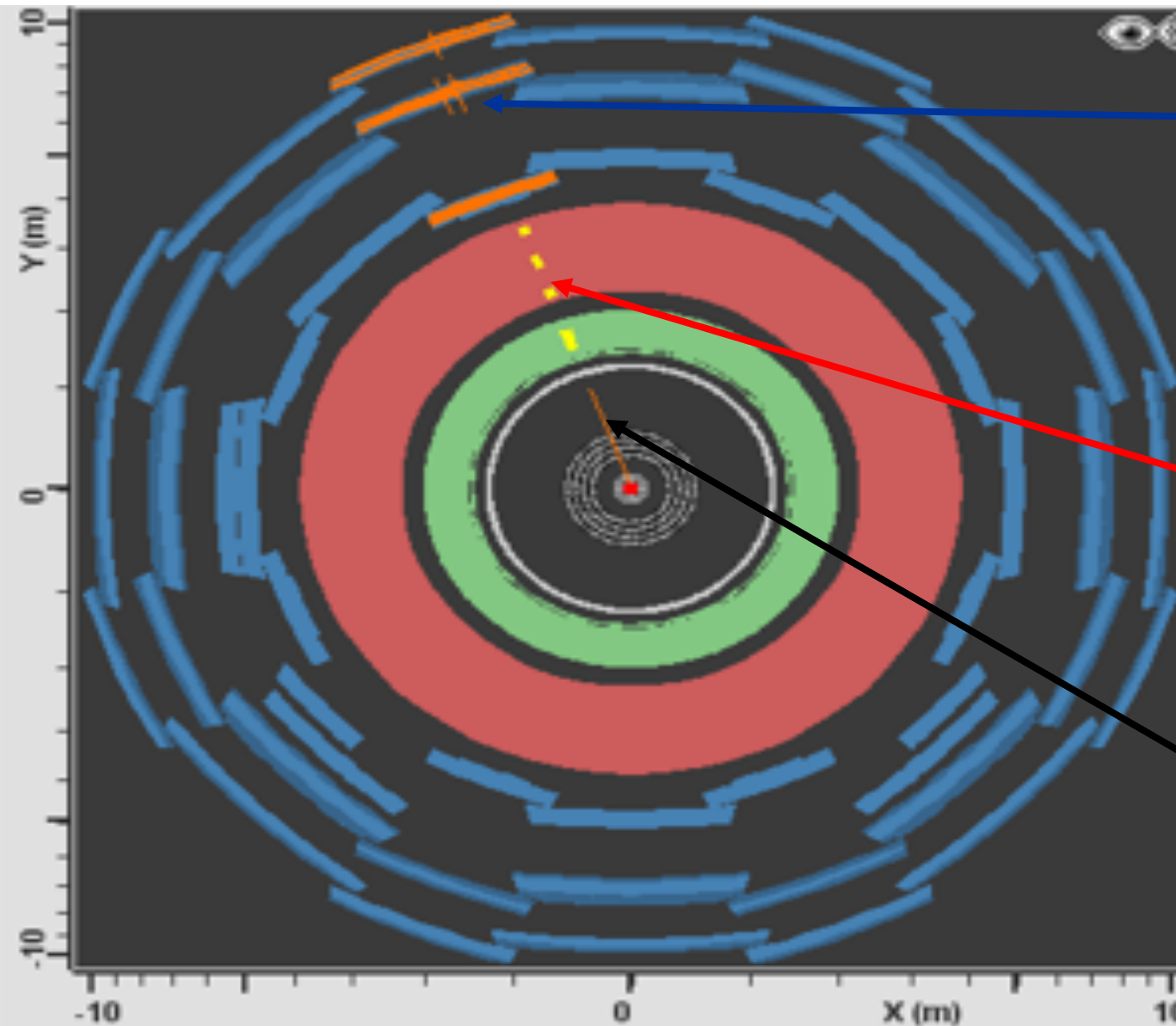
- Les quarks n'existent pas à l'état libre!  
→ Jet: groupe de hadrons allant dans la même direction que le quark initial



Dépot d'énergie dans les deux calorimètres

Plusieurs traces

# Comment voit-on un muon dans ATLAS?



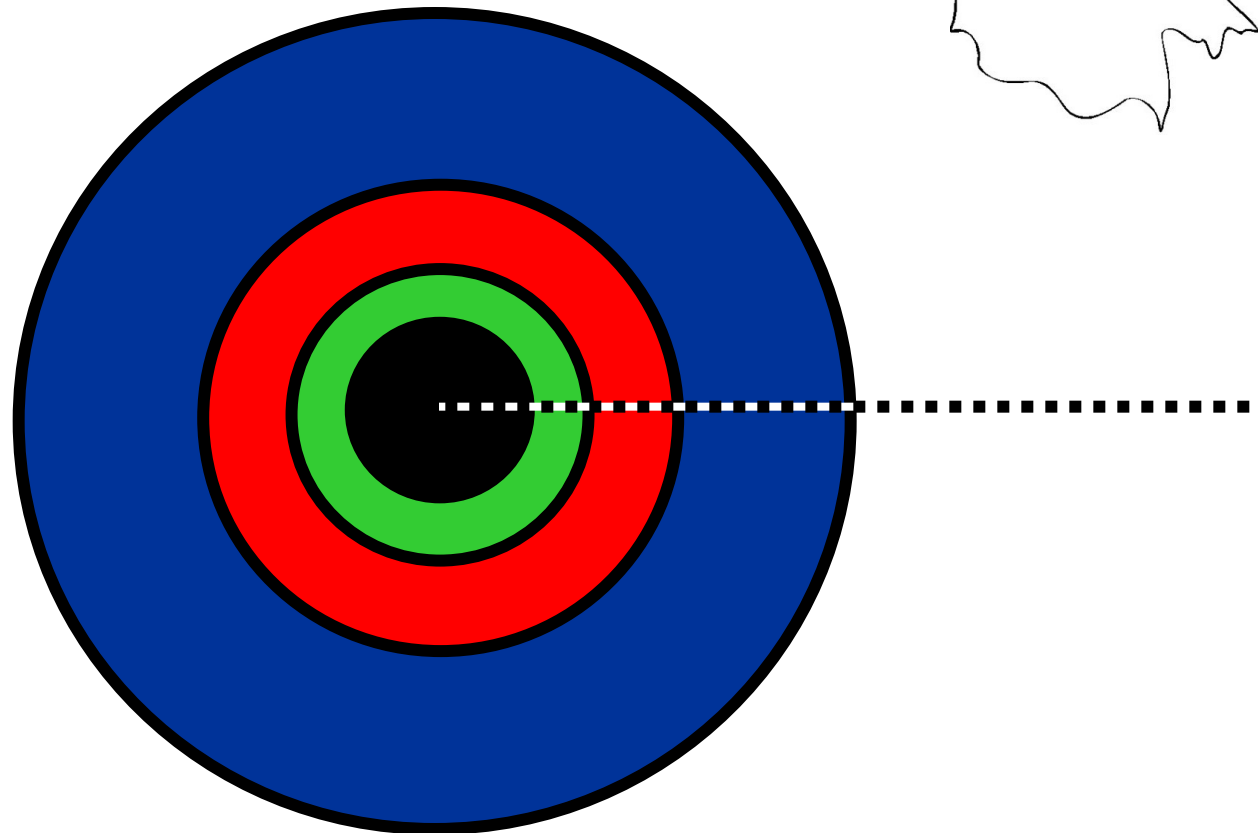
Chambres à muons touchées

Faibles dépôts d'énergie dans les calorimètres électromagnétique et hadronique

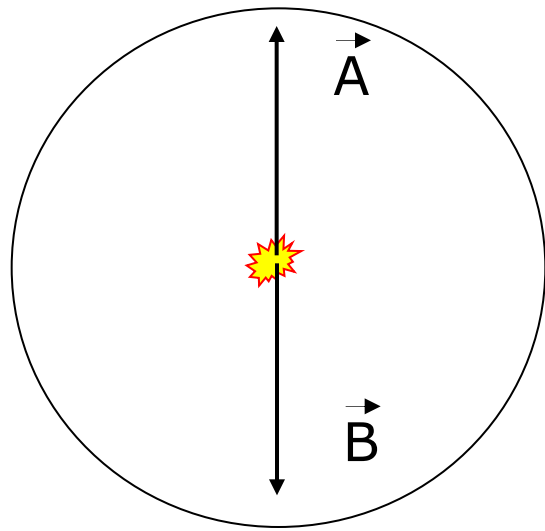
Trace visible dans le détecteur de traces



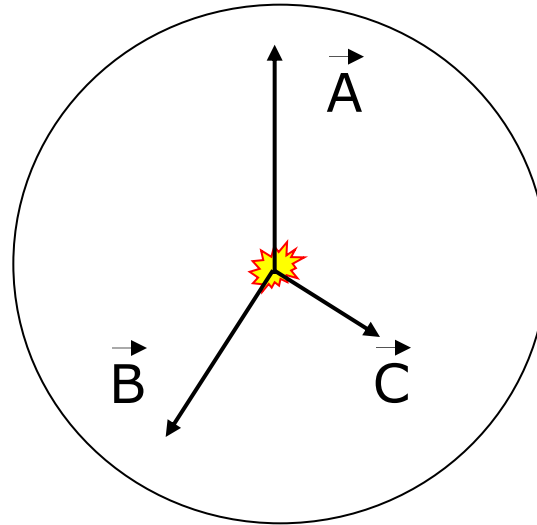
**Et le neutrino?**



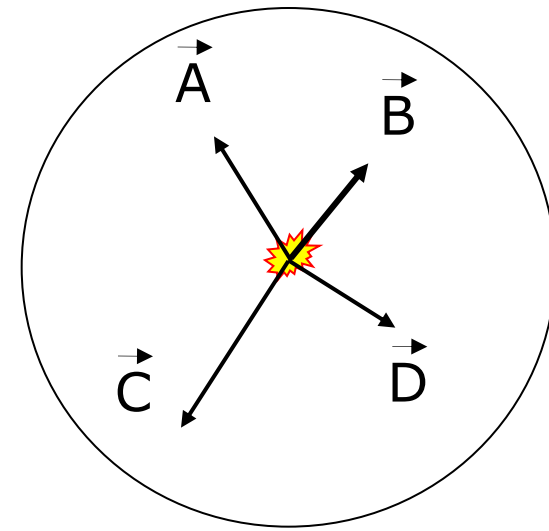
# L' énergie transverse manquante



$$\vec{A} + \vec{B} = \vec{0}$$



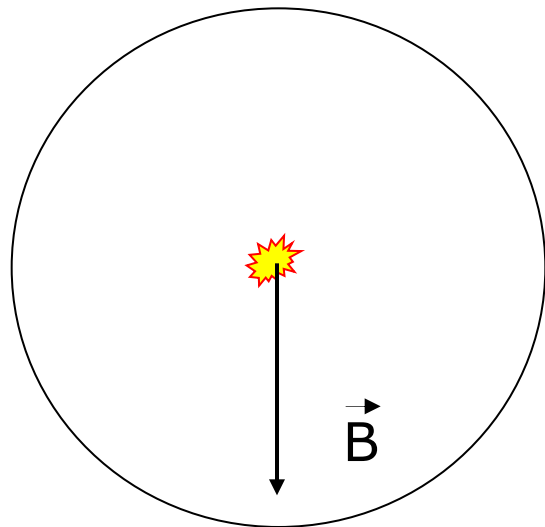
$$\vec{A} + \vec{B} + \vec{C} = \vec{0}$$



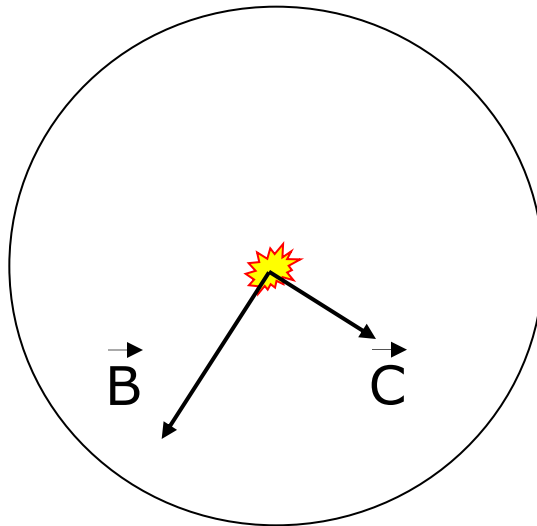
$$\vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = \vec{0}$$

- Conservation de l'impulsion dans le plan transverse au faisceau

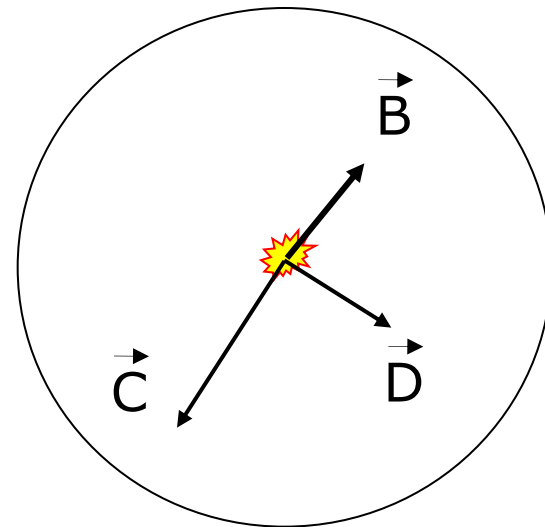
# L' énergie transverse manquante



$$\vec{B} \neq 0$$



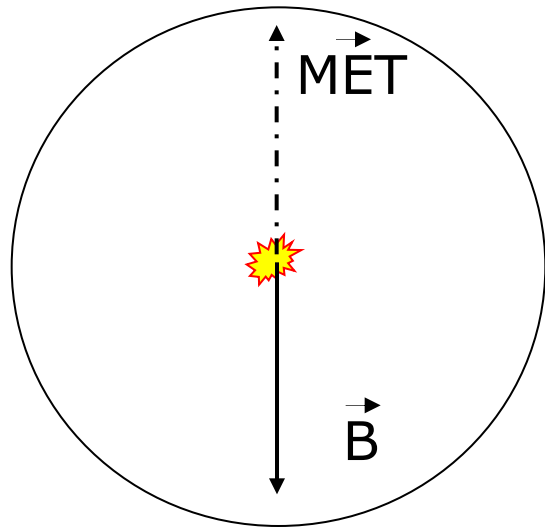
$$\vec{B} + \vec{C} \neq 0$$



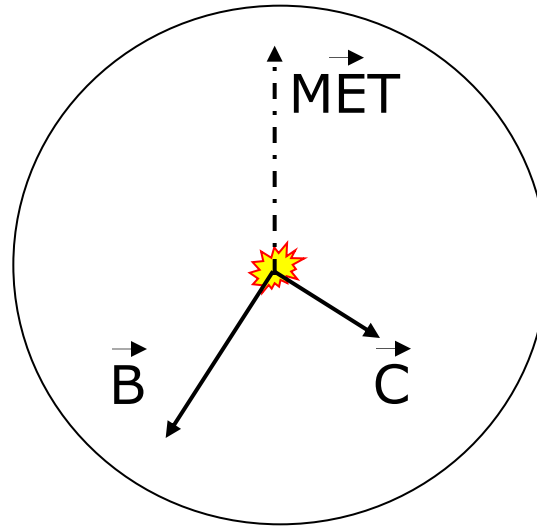
$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} \neq 0$$

- Le neutrino ne laisse pas de trace dans le détecteur interne (neutre) et ne dépose pas d'énergie dans le calorimètre (interagit très faiblement avec la matière)
- Si la particule A est un neutrino l'impulsion dans le plan transverse au faisceau ne semble plus être conservée

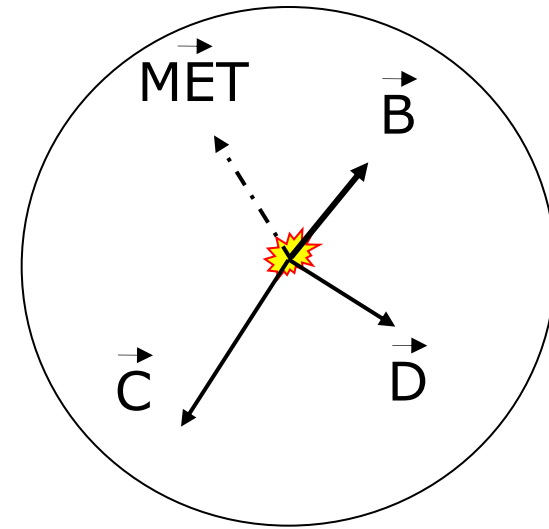
# L' énergie transverse manquante (MET)



$$\vec{B} = -\vec{MET}$$



$$\vec{B} + \vec{C} = -\vec{MET}$$

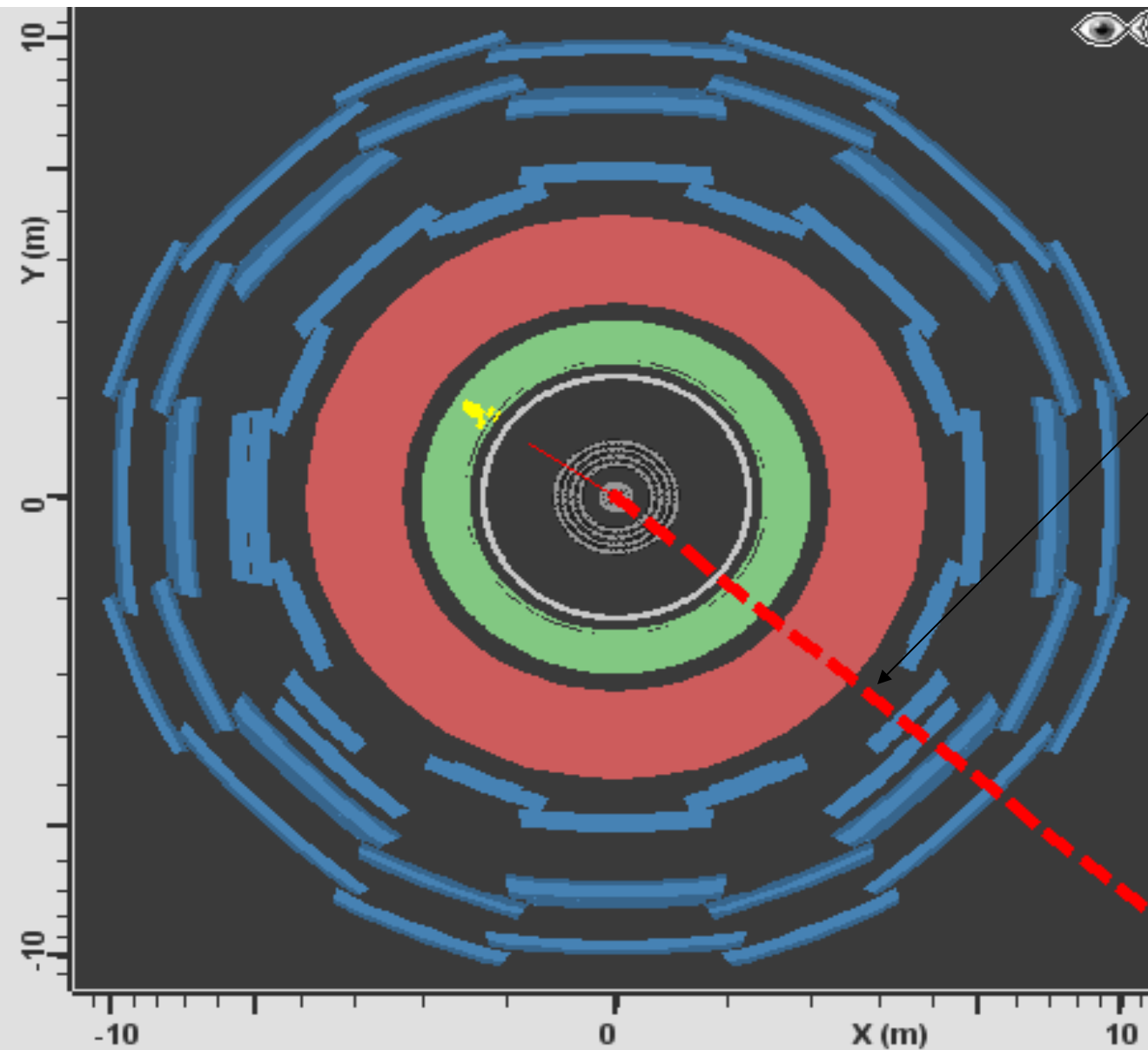


$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = -\vec{MET}$$

- La non-conservation de l'impulsion dans le plan transverse au faisceau est une indication de la présence d'un neutrino

$$\vec{MET} \neq 0 \rightarrow \text{Presence d'un neutrino}$$

# L' énergie transverse manquante



Direction de l'énergie transverse manquante peut indiquer la direction du neutrino !

*Dans cet exemple, le neutrino est dos à dos avec la particule chargée*

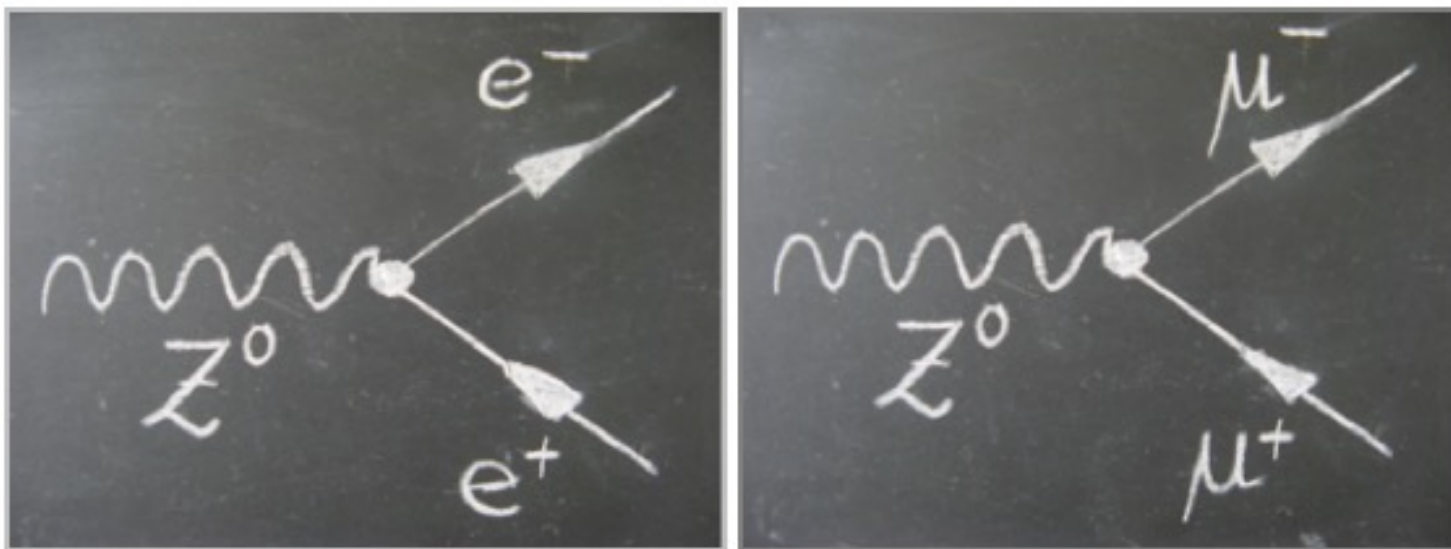


# Les désintégrations du $Z^0$

Le  $Z^0$  se désintègre immédiatement (après  $10^{-25}$  secondes) en

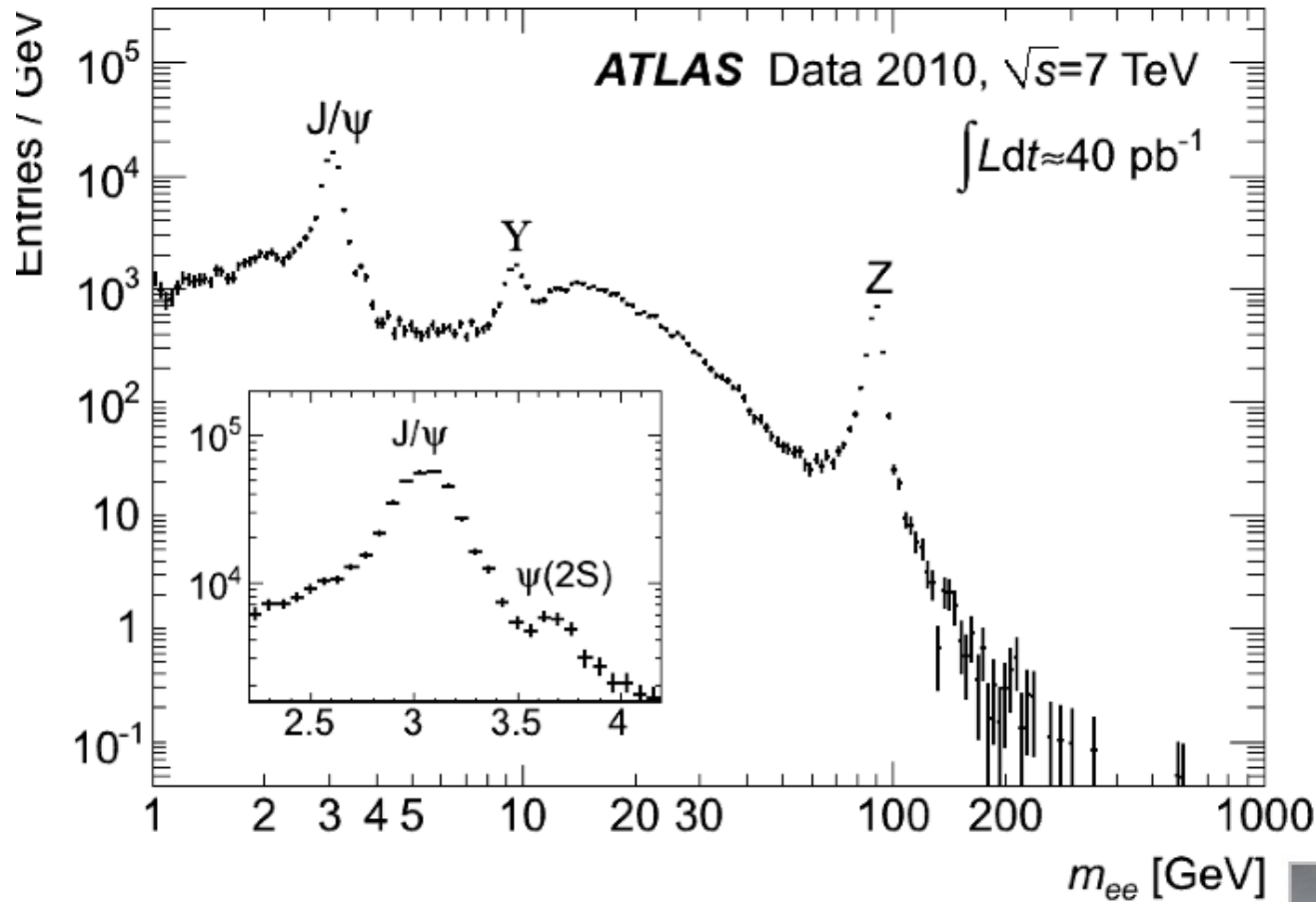
- une paire quark – anti quark (70 % des cas), non considérées ici
- une paire neutrino – anti neutrino (20 % des cas), non considérées
- une **paire lepton chargé – anti lepton, de la même famille**, dans les cas 10% des restants.

Ce sont ses désintégrations que nous étudions aujourd'hui.



Quelles sont les règles à respecter dans la combinaison ?

# Combinaison d'électrons et de positrons



Une petite partie du « bruit de fond »  
est constituée de « photons convertis »

