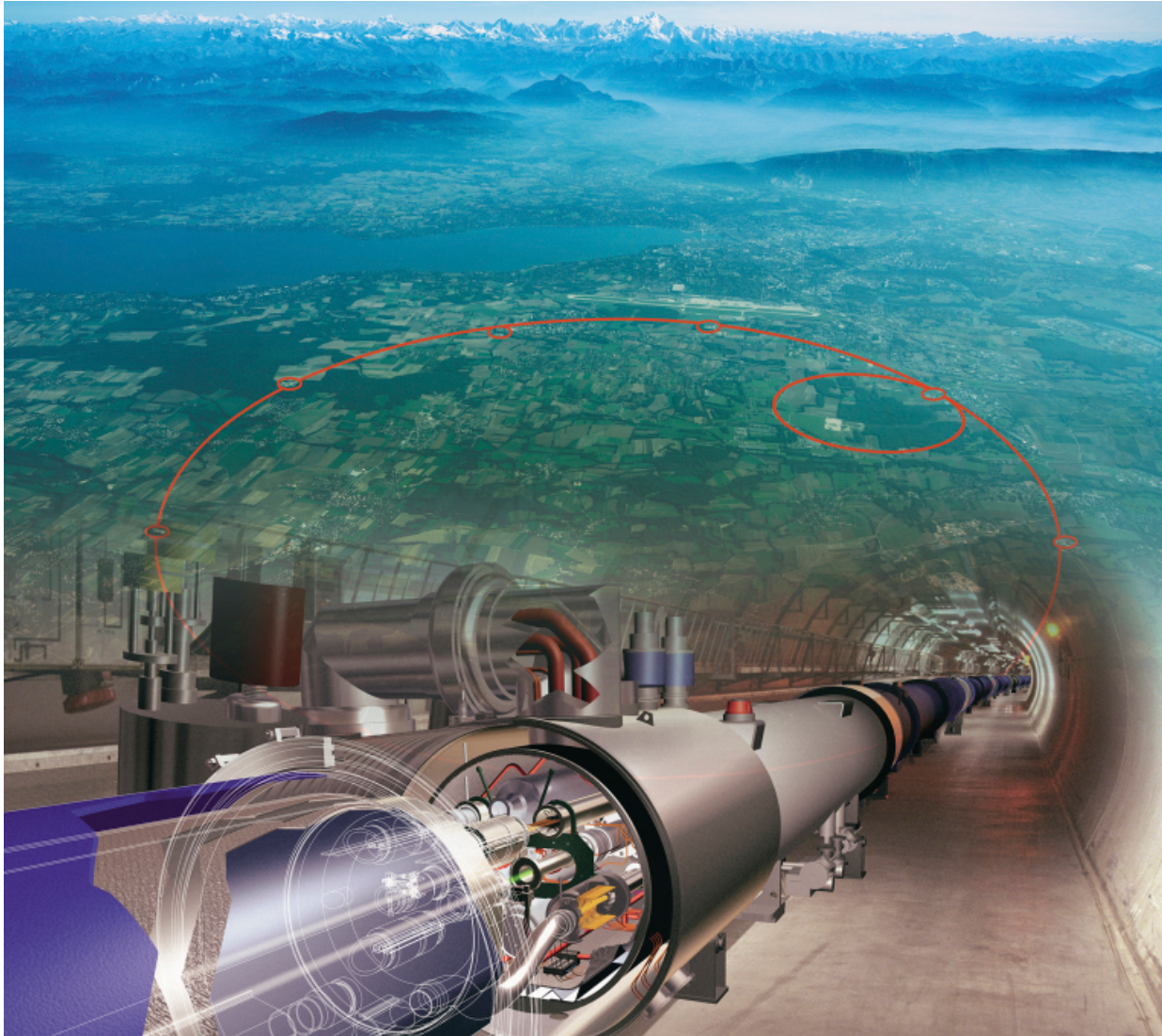


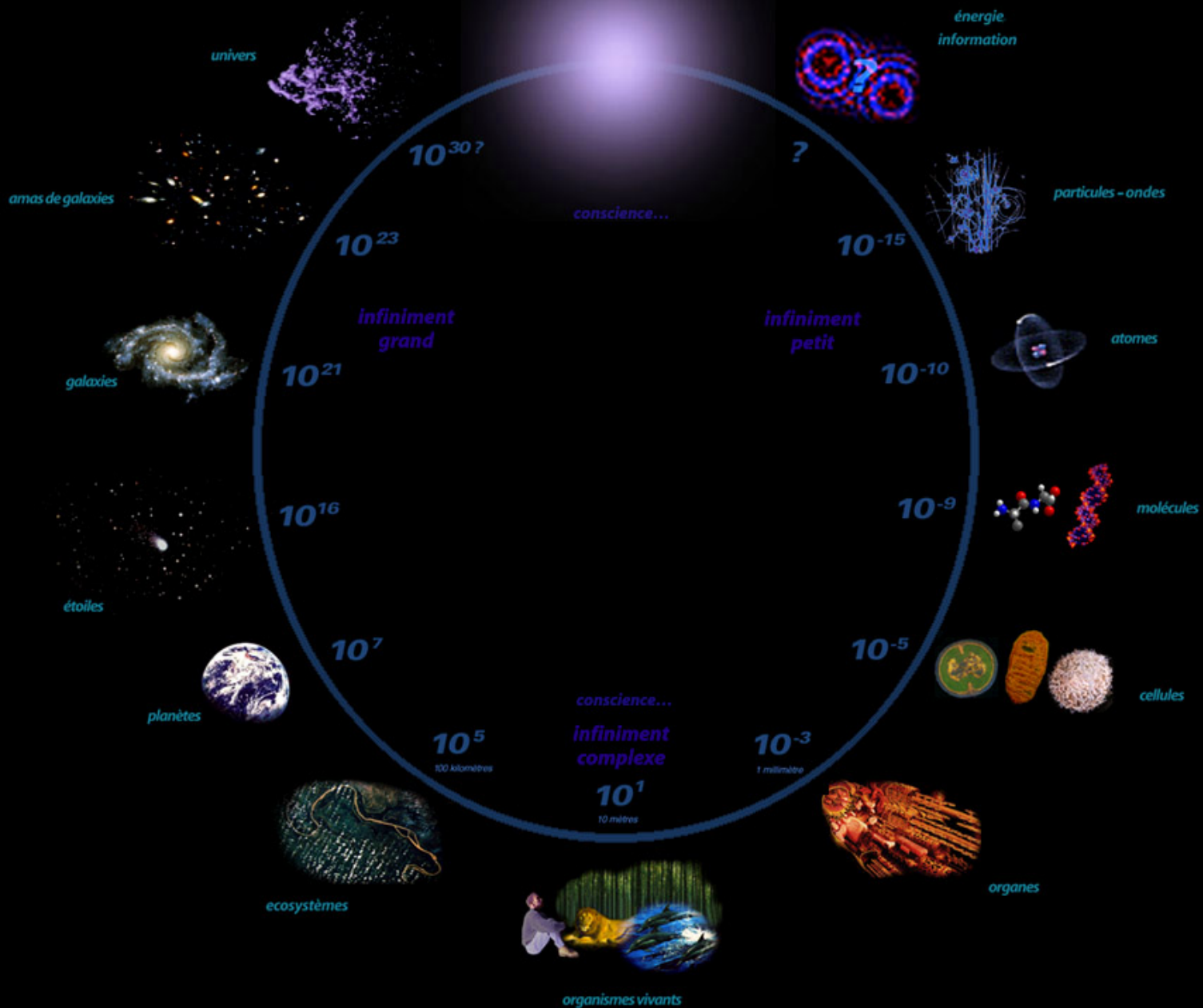
Master Classes 2016

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



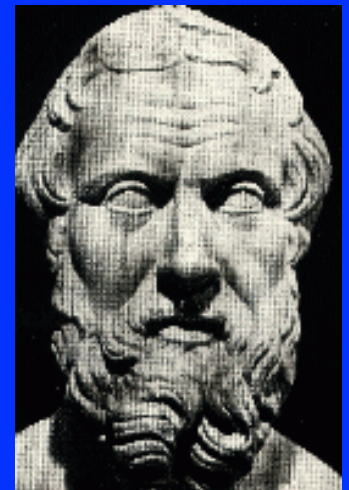
La dernière image est 10 000 000 000 000 000 (10^{16})
de fois plus petite que la première

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 7	Strontian 86
Azote 5	Barytes 68
Carbon 6	Iron 50
Oxygen 7	Zinc 56
Phosphorus 9	Copper 56
Sulphur 16	Lead 90
Magnesia 20	Silver 190
Lime 28	Gold 190
Soda 28	Platina 190
Potash 42	Mercury 167

Dalton (1808)

Le Tableau Périodique



TABEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

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

GROUPE		MAISSE ATOMIQUE RELATIVE (1)																18 - VIIA																			
1 - IA		2 - IIA		3 - IIIA										4 - IVA		5 - VA		6 - VIA		7 - VIIA		8 - VIIIA															
PERIODE		1		2		3										4		5		6		7		8													
1		H 1,0079 HYDROGENE												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 OXYGENE		F 18,998 FLUOR		Ne 20,180 NEON											
3		Na 22,990 SODIUM		Mg 24,305 MAGNESIUM												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 YTTORIUM		Zr 91,224 ZIRCONIUM		Nb 92,906 NIOBIUM		Mo 95,94 MOLYBDENE		Tc 98,906 TECHNETIUM		Ru 101,07 RUTHENIUM		Rh 102,91 RHODIUM		Pd 106,42 PALLADIUM		Ag 107,87 ARGENT		Cd 112,41 CADMIUM		In 114,82 INDIUM		Sn 118,71 ETAIN		Sb 121,76 ANTIMOINE		Te 127,60 TELLURE		I 126,90 IODE		Xe 131,29 XENON	
6		Cs 132,91 CESIUM		Ba 137,33 BARIUM		La-Lu 57-71 Lanthanides		Hf 178,49 HAFNIUM		Ta 180,95 TANTALE		W 183,84 TUNGSTENE		Re 186,21 RHENIUM		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 RUFERFORDIUM		Db 262 DUBNIUM		Sg 266 SEABORGIUM		Bh 264 BOHRIUM		Hs 277 HASSIUM		Mt 288 MOSCOVIUM		Uun 281 UNUNUNIUM		Uuu 272 UNUNVIUM		Uub 285 UNUNBIUM		Uuq 289 UNUNQUADIUM											

LANTHANIDES

57 138,91	58 140,12	59 140,91	60 144,24	61 (145)	62 150,36	63 151,96	64 157,25	65 158,93	66 162,50	67 164,93	68 167,26	69 168,93	70 173,04	71 174,97
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
LANTHANE	CERIUM	PRASEODYME	NEODYME	PROMETHIUM	SAMARIUM	EUROPIUM	GADOLINIUM	TERBIUM	DYSPROSIUM	HOLMIUM	ERBIUM	THULIUM	YTTERIUM	LUTETIUM

ACTINIDES

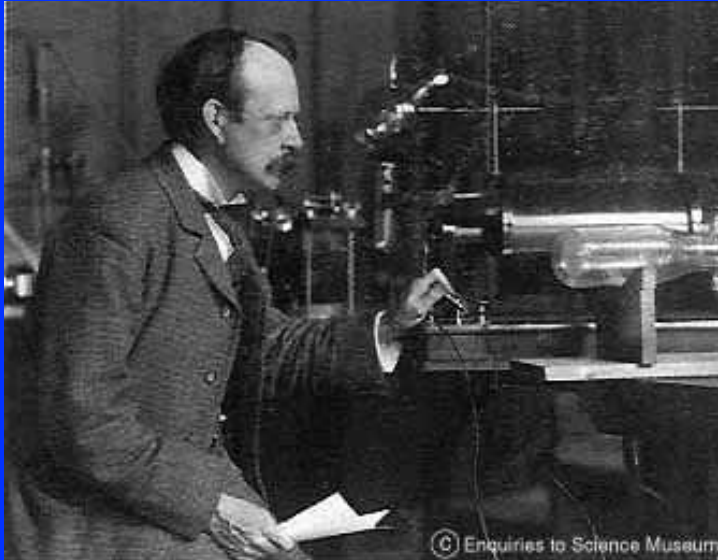
89 (227)	90 232,04	91 231,04	92 238,03	93 (237)	94 (244)	95 (243)	96 (247)	97 (247)	98 (251)	99 (252)	100 (257)	101 (258)	102 (259)	103 (262)
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
ACTINIUM	THORIUM	PROTACTINIUM	URANIUM	NEPTUNIUM	PLUTONIUM	AMERICIUM	CURIUM	BERKELIUM	CALIFORNIUM	ENSTENIUM	FERMIUM	MOSKOVICIUM	NOBELIUM	LAWRENCIUM

Copyright © 1990-2000 EricG (www.kgf-split.fr)

Mendeleev (1869)

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

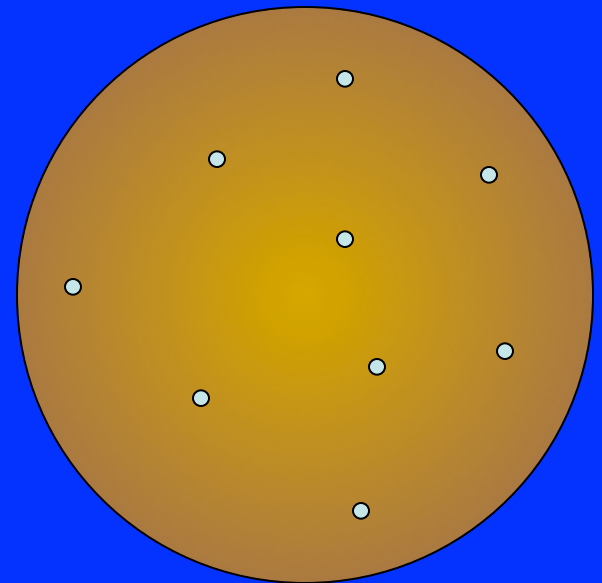
Modèle atomique de Thomson



1897: découverte des électrons

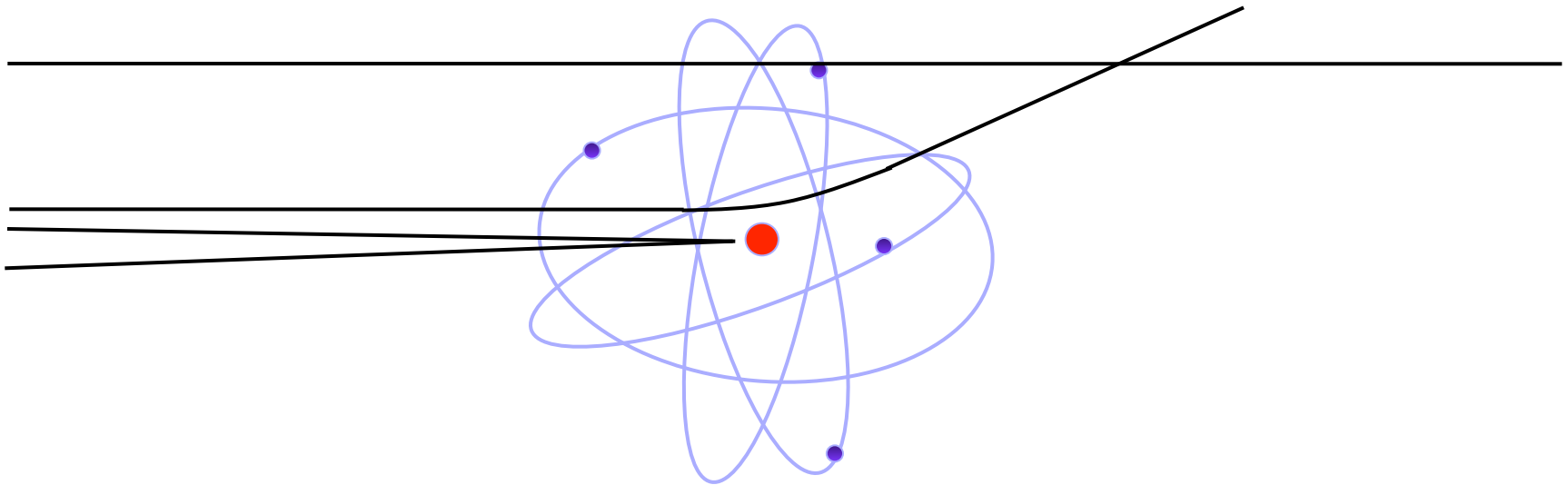
Début de la physique des particules!

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

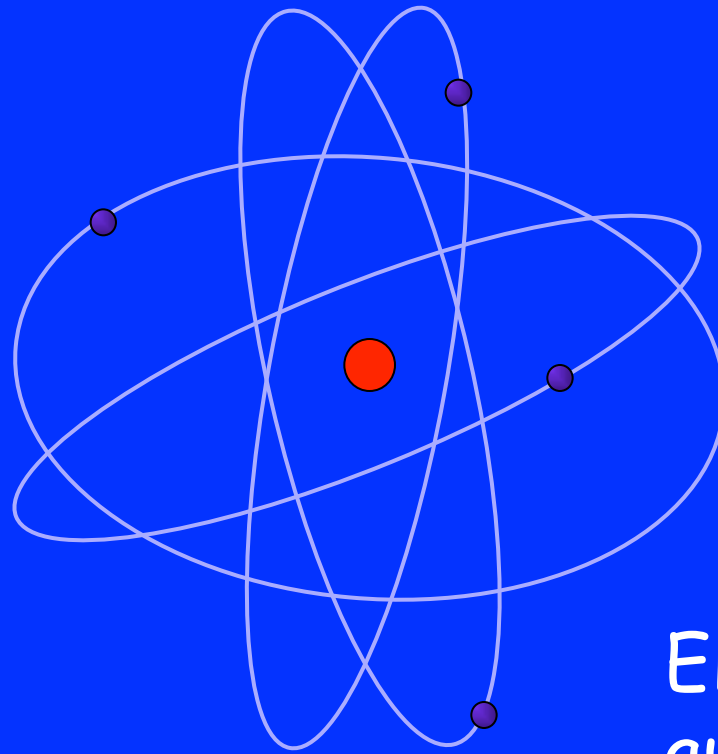
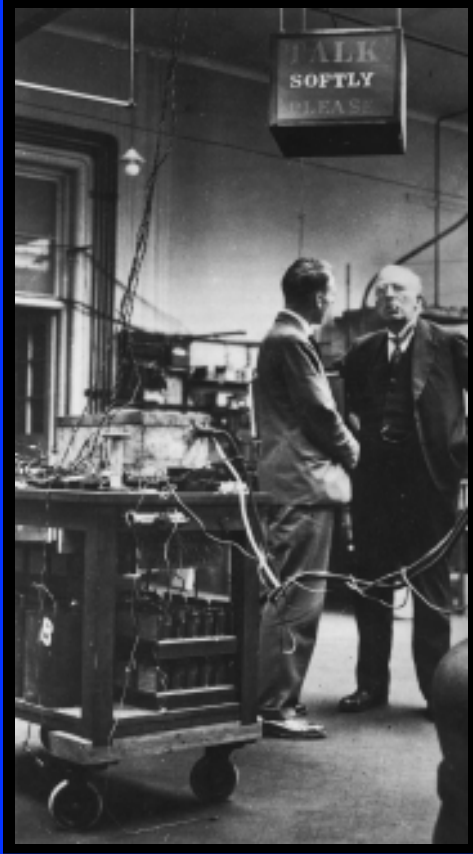


L'expérience de Rutherford

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 !

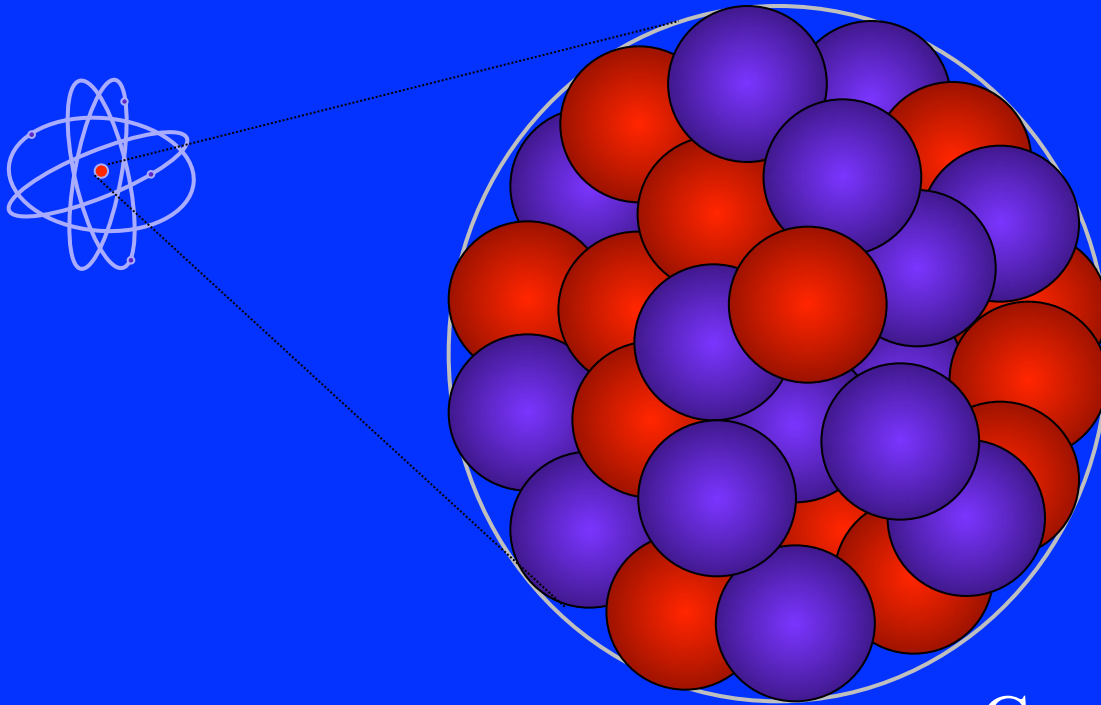


Rutherford
(1912)

Electrons tournent
autour du noyau

10^{-10} m

La structure du noyau



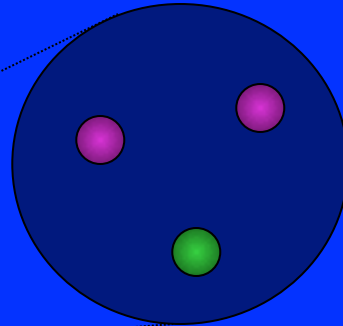
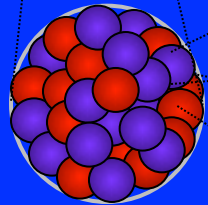
10^{-14} m

Contient des protons
et des neutrons

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

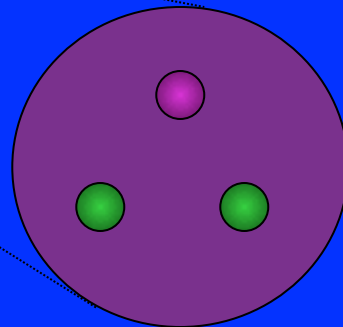


Les neutrons et protons sont faits de quarks



Proton :
2 quarks up
1 quark down

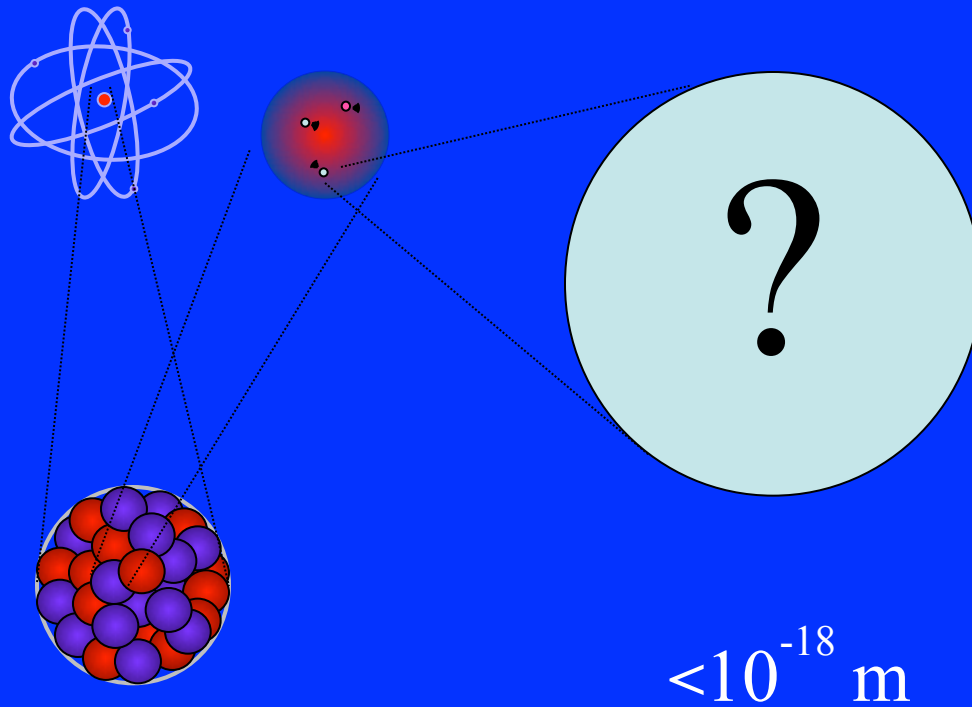
10^{-15} m



Neutron :
1 quark up
2 quarks down

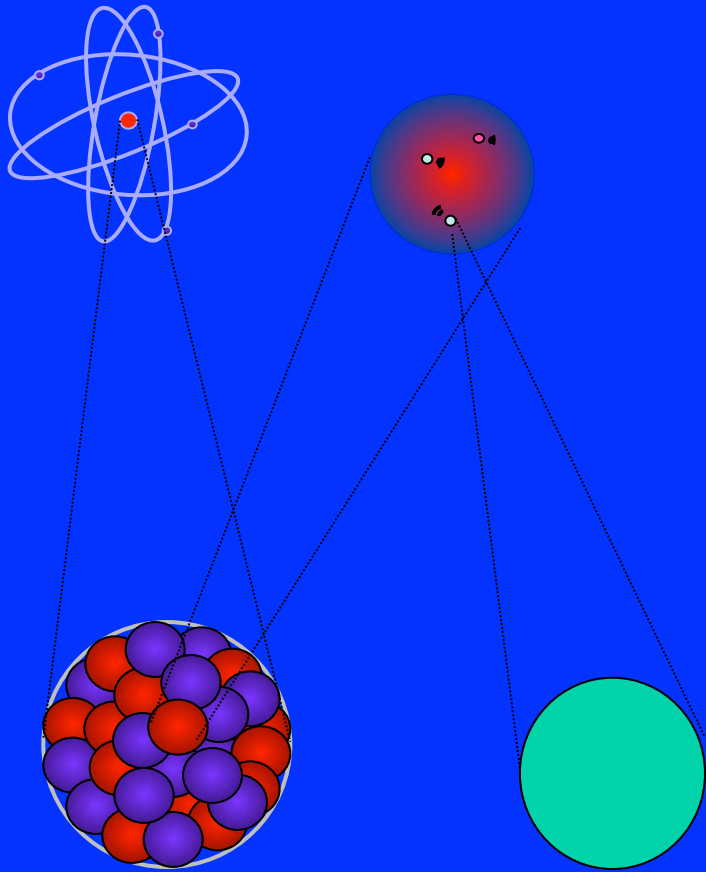
La sous-structure des protons et des neutrons est montrée en utilisant des électrons comme projectiles

Et la structure des quarks?



Aucune indication
pour une structure
des quarks

Les constituants de la matière ordinaire



charge

$+ \frac{2}{3} e$



$- \frac{1}{3} e$



$-e$

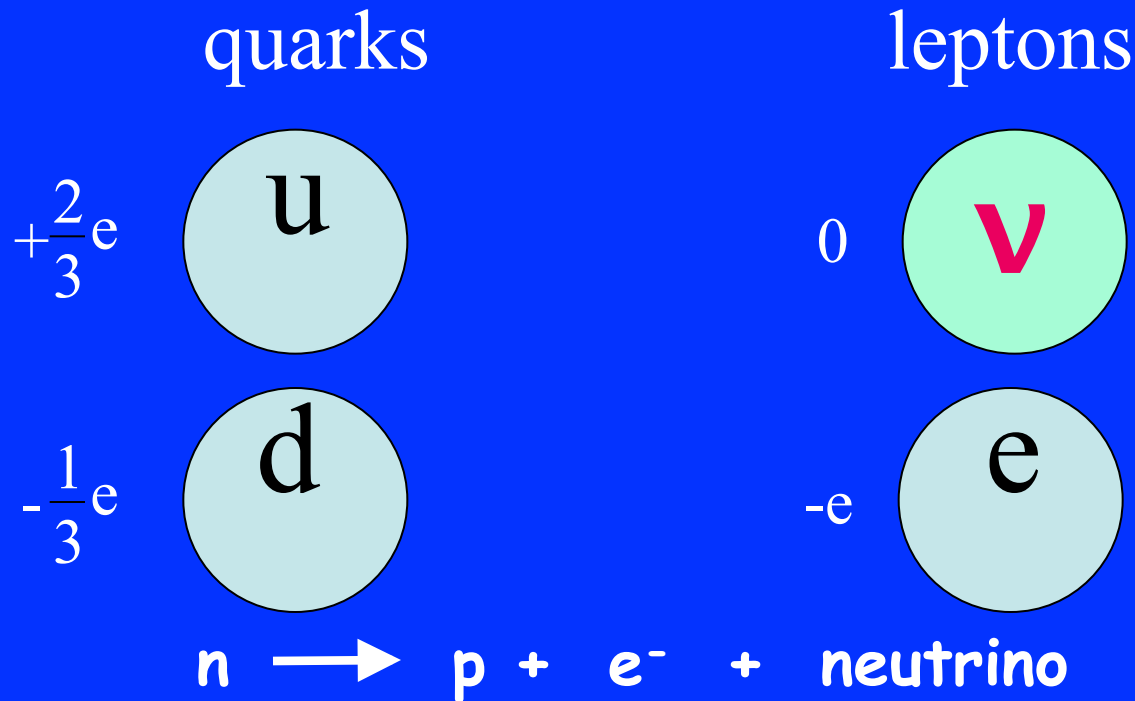


quarks

électron

Le neutrino ν

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)

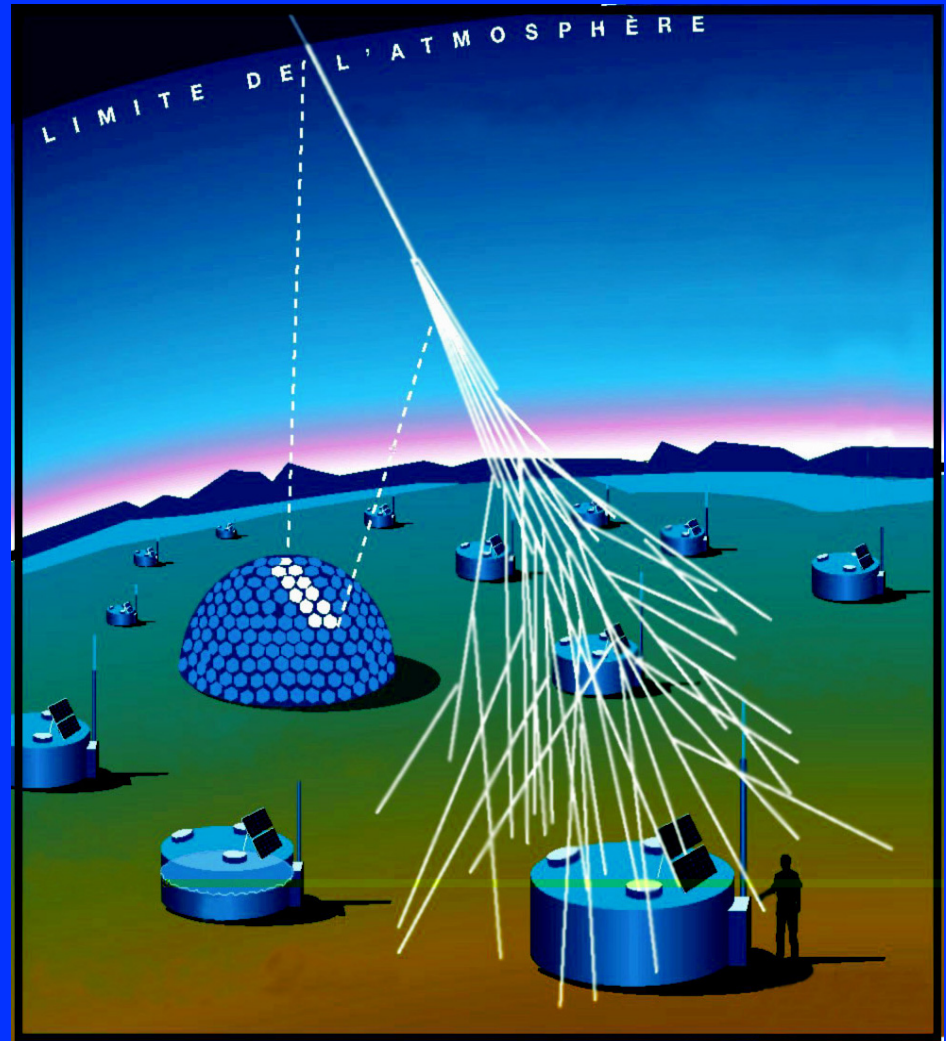
D'autres particules...

Le Muon (μ) :

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

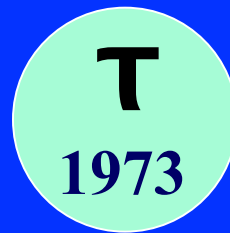
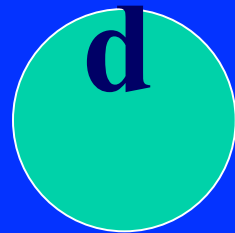
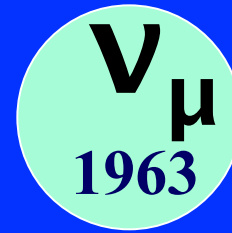
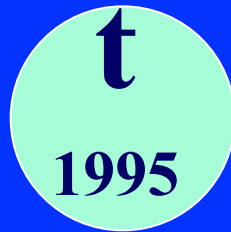
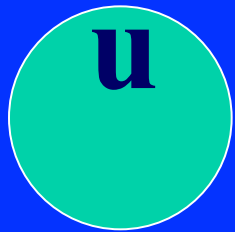
Semble identique à l'électron mais est 200 fois plus massif: il n'est pas stable, il se désintègre

Beaucoup d'autres particules découvertes dans 1960-1970



Rayon cosmique rentrant dans l'atmosphère

Particules élémentaires



six quarks

six leptons

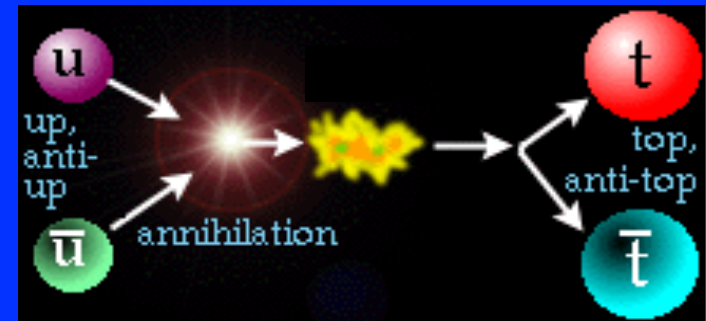
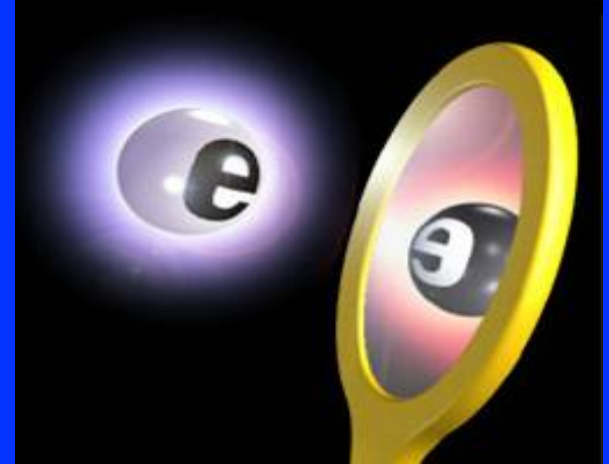
Trois générations

L'antimatière

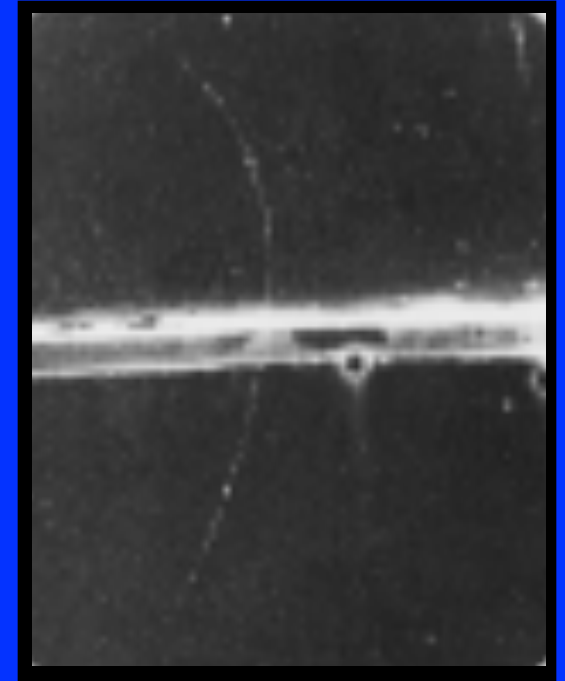
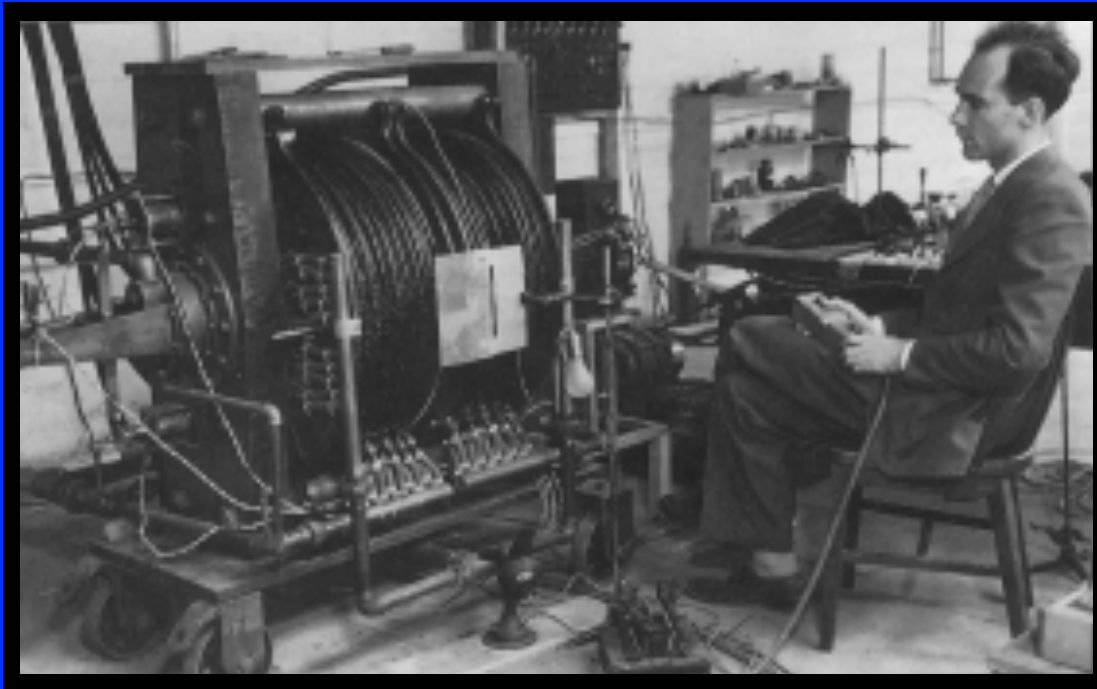
- Chaque particule de matière possède un double de charge opposée: c'est l'antimatière
- Lorsqu'une particule rencontre son antiparticule, elles s'*annihilent* en pure énergie
- De cette énergie peuvent à nouveau émerger d'autres particules grâce à

$$E=mc^2$$

(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

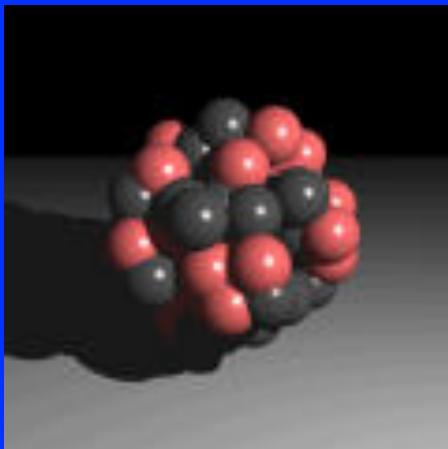
- La gravitation



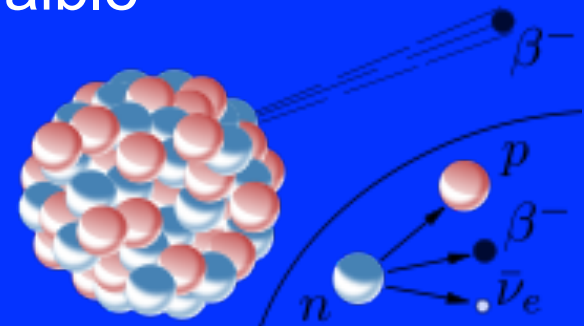
- L' électromagnétisme



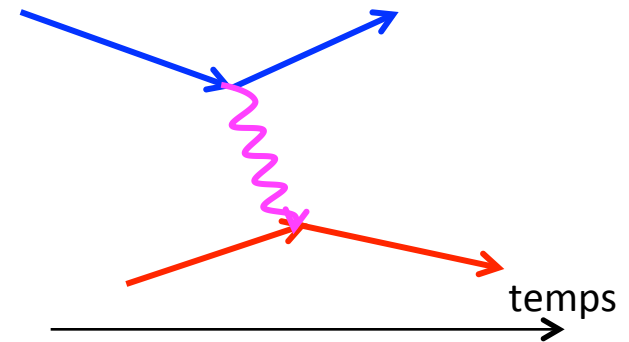
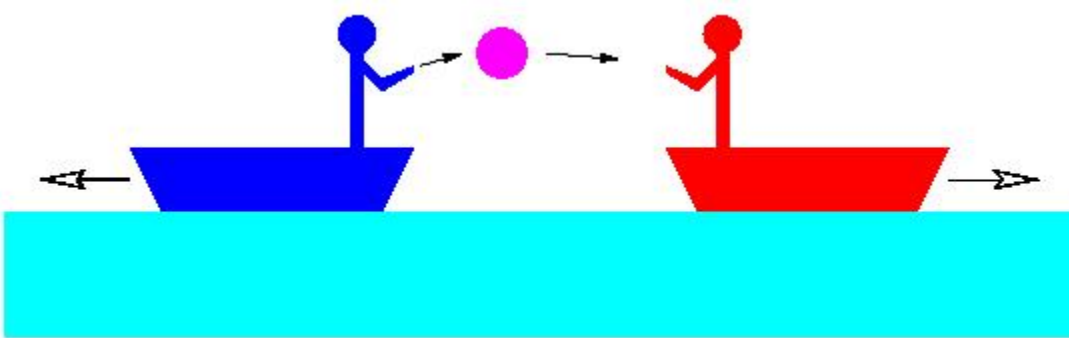
- L'interaction (force) nucléaire forte



- 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** »

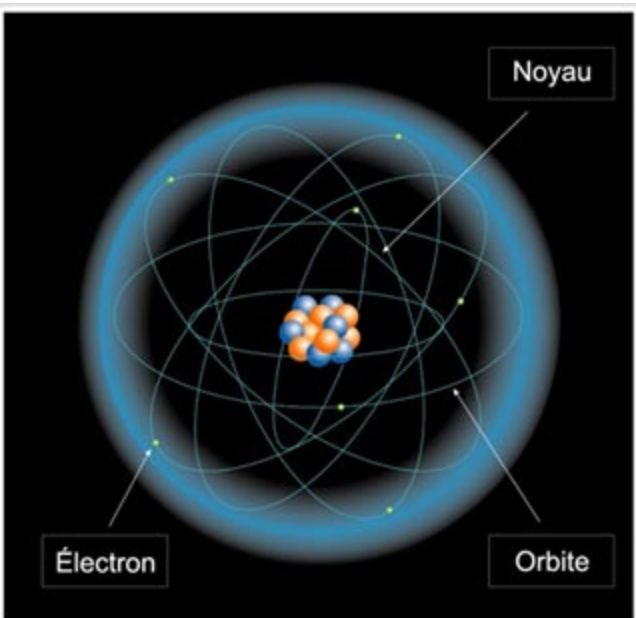
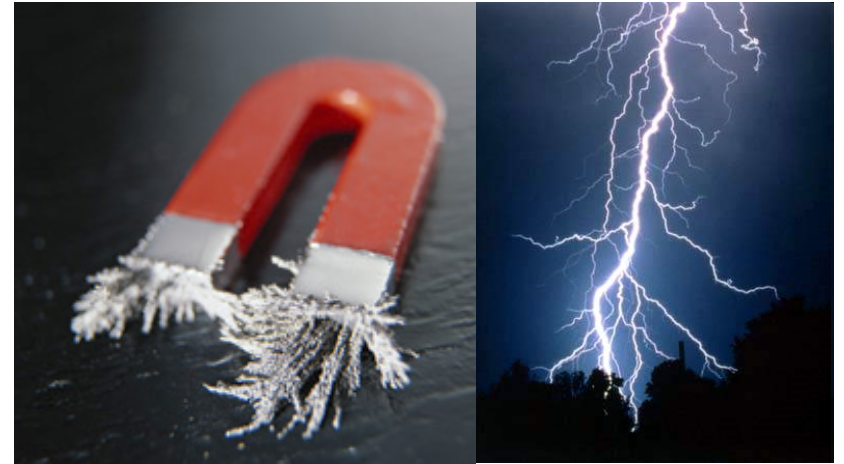


Représentation d'une interaction
Graphe de Feynman

L'interaction électromagnétique

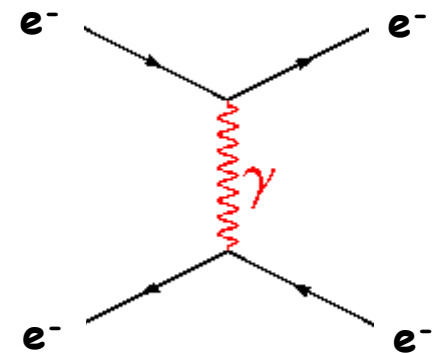
Responsable des phénomènes électriques et magnétiques : aimantation, lumière, cohésion des atomes,...

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



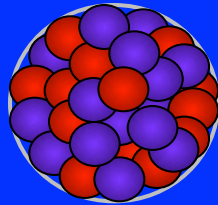
Messageur : **photon**

$m=0$ (vitesse= c)
portée infinie

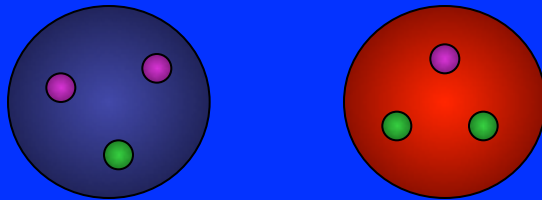


Interaction forte

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



- des quarks et anti-quarks dans les hadrons

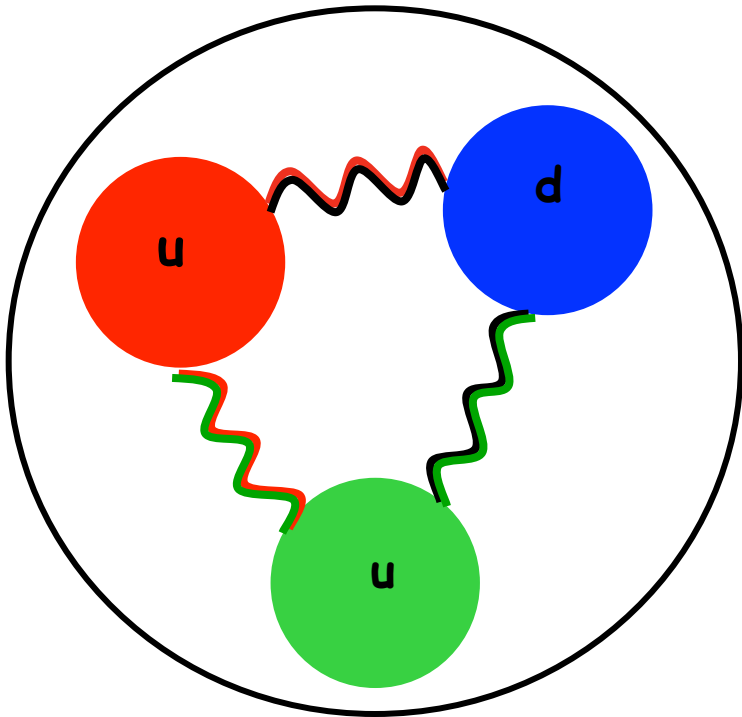


Elle est si forte entre les quarks... qu'ils ne peuvent jamais sortir des protons/neutrons

Messageur : **gluon**

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

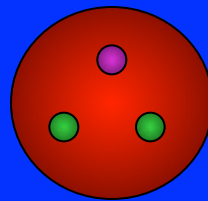
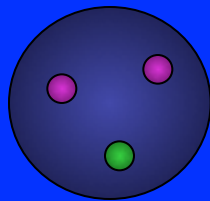
En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de « couleur » : **Bleu vert rouge**



Ainsi le proton est « incolore »

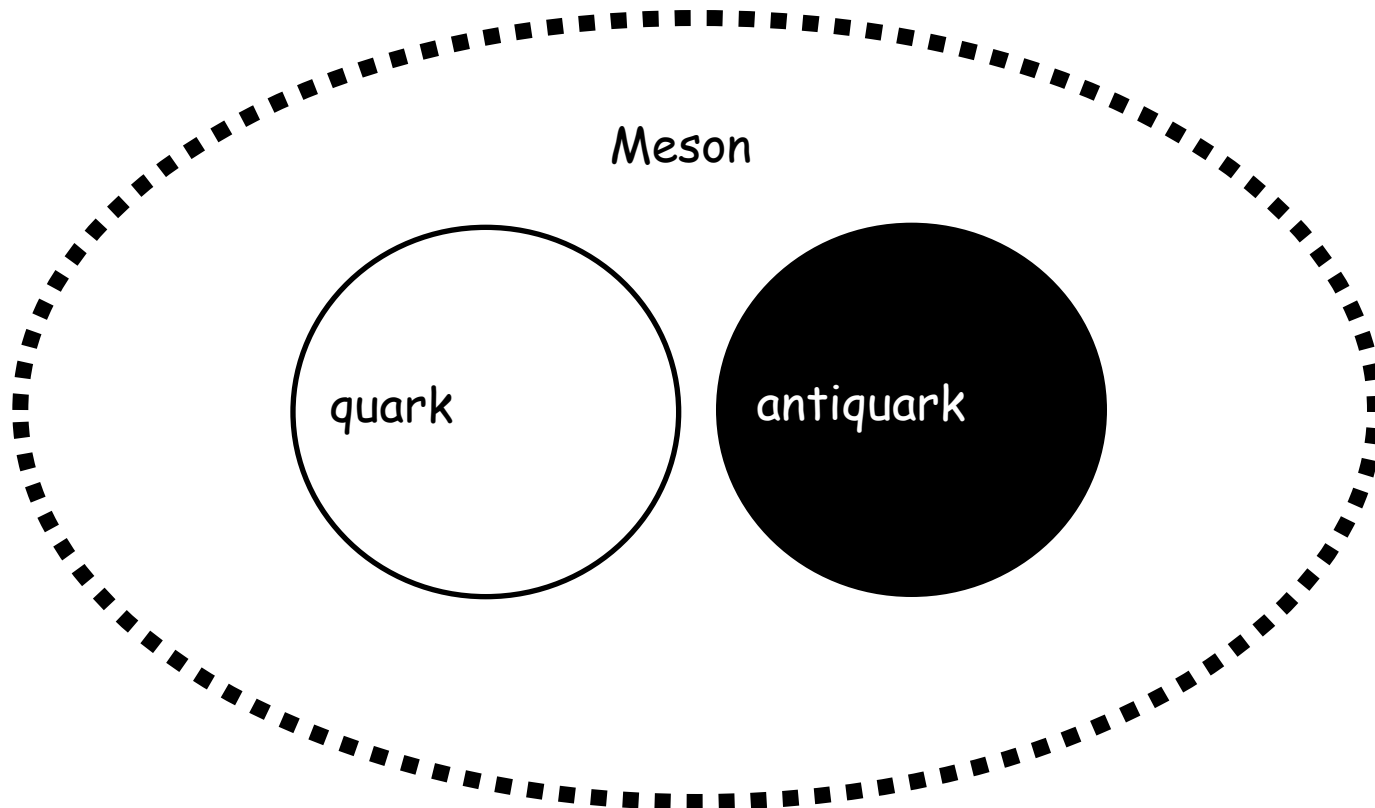
Les quarks forment toujours des particules incolores : les hadrons

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



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

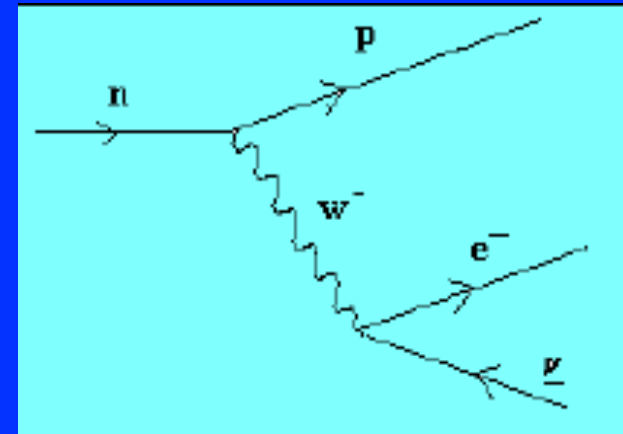
- Exemples de mésons
- méson π ou pion ($\pi^- = \bar{u}d$)
- méson K ou kaon ($K^+ = \bar{s}u$)
- **méson $D^0 = c\bar{u}$**



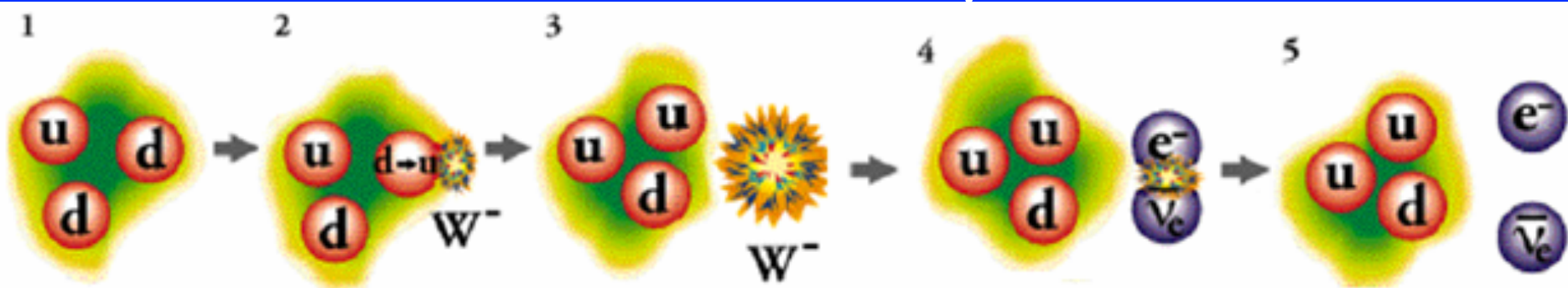
Interaction Faible

- Responsable de la radioactivité β (désintégration du neutron)

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



On regardera un processus
similaire cet après midi!

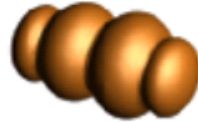


Résumé des interactions

Forte

1

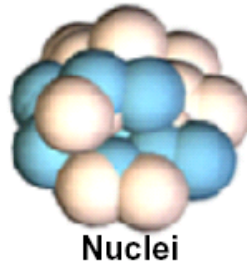
Gluons (8)



Quarks



Mesons
Baryons

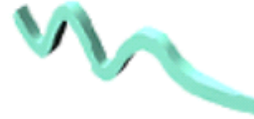


Nuclei

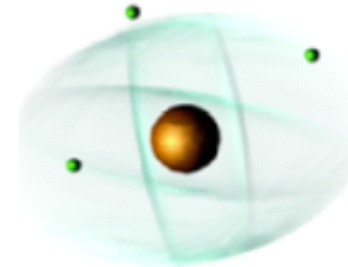
Electromagnétique

10^{-2}

Photon



Atomes
Lumière
Chimie
Électronique



Gravitationnelle

10^{-38}

Graviton ?



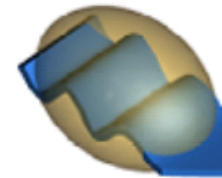
Système solaire
Galaxies



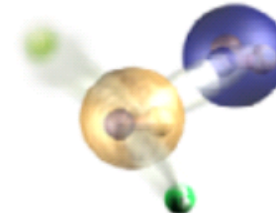
Faible

10^{-5}

Bosons (W,Z)

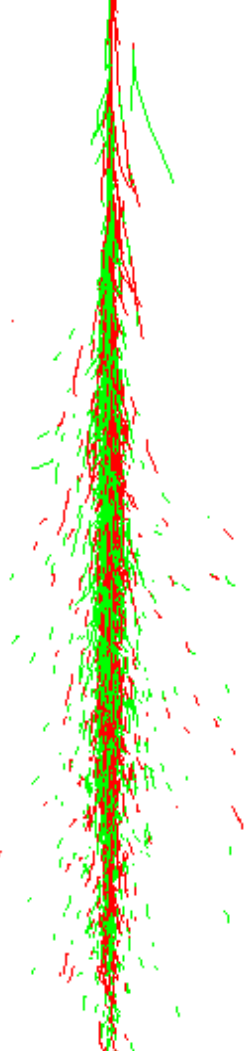


Radioactivité β



Les Unités d'énergie

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



1 eV	= 1 electron Volt	
	<i>Energie d'ionisation de l'hydrogène = 13.6 eV</i>	
1 keV(kilo)	= 1,000 eV	= 10³ eV
	<i>Rayons X médicaux ~ 200 keV</i>	
1 MeV(Mega)	= 1,000,000 eV	= 10⁶ eV
	<i>Particules alpha rayonnées de l'uranium 4.2 MeV</i>	
1 GeV(Giga)	= 1,000,000,000 eV	= 10⁹ eV
	<i>Faisceau du collisionneur LEP (1989-200) = 45 GeV</i>	
1 TeV(Tera)	= 1,000,000,000,000 eV	= 10¹² eV
	<i>et de l'accélérateur le plus puissant du monde (LHC) = 7TeV</i>	

Les énergies les plus grandes dans les rayons cosmiques (>10²⁰ 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:

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,551 \text{ MeV}/c^2$$

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

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→	u up	c charm	t top	γ 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
	d down	s strange	b bottom	g 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
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ 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
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

La matière

Les Interactions

Petite question...

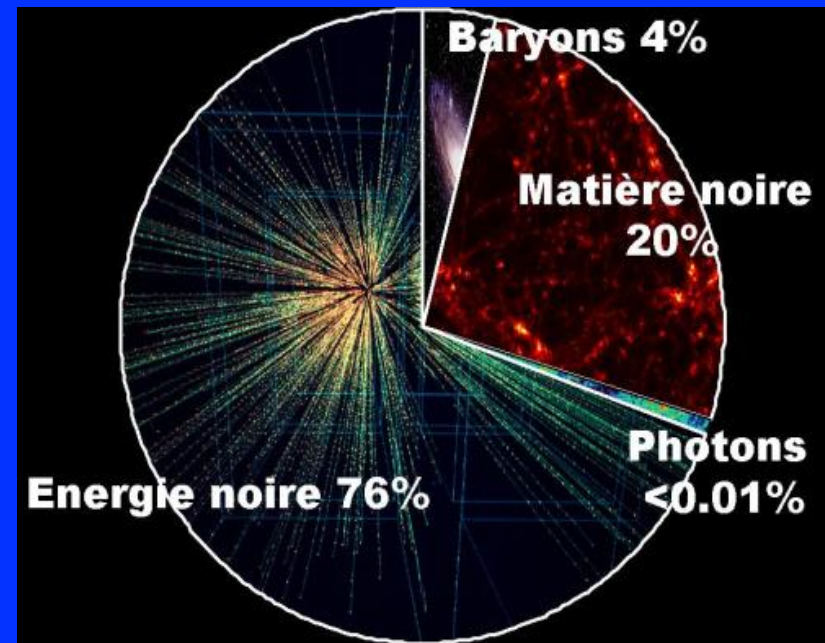
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$	104 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$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

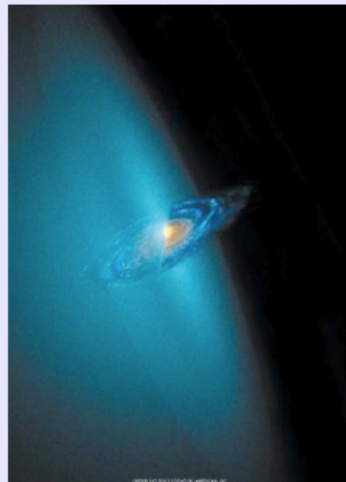
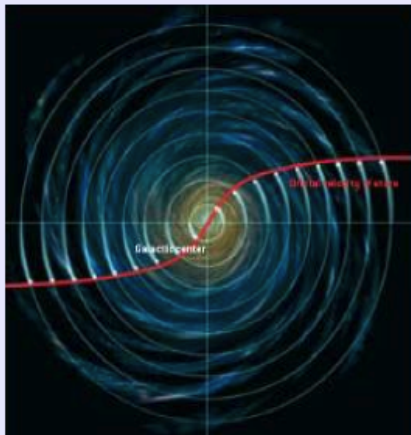
Les 96% restants sont formées de « matière noire » et de « énergie noire » dont nous ignorons presque tout



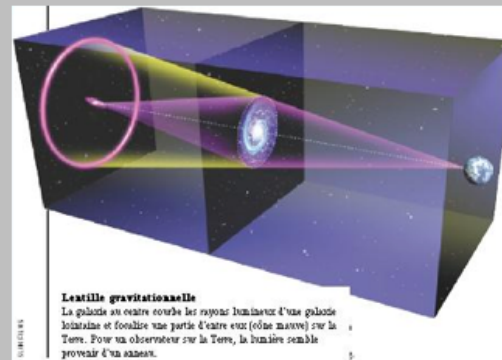


Matière Noire

- 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 !



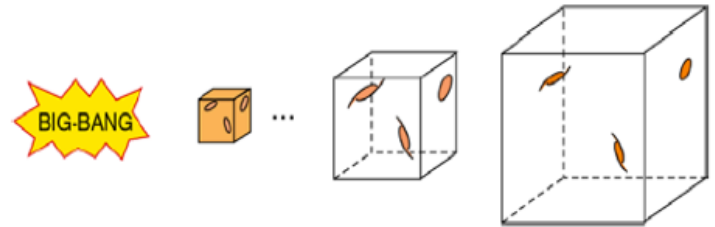
Vitesse de rotation des galaxies



Lentilles gravitationnelles

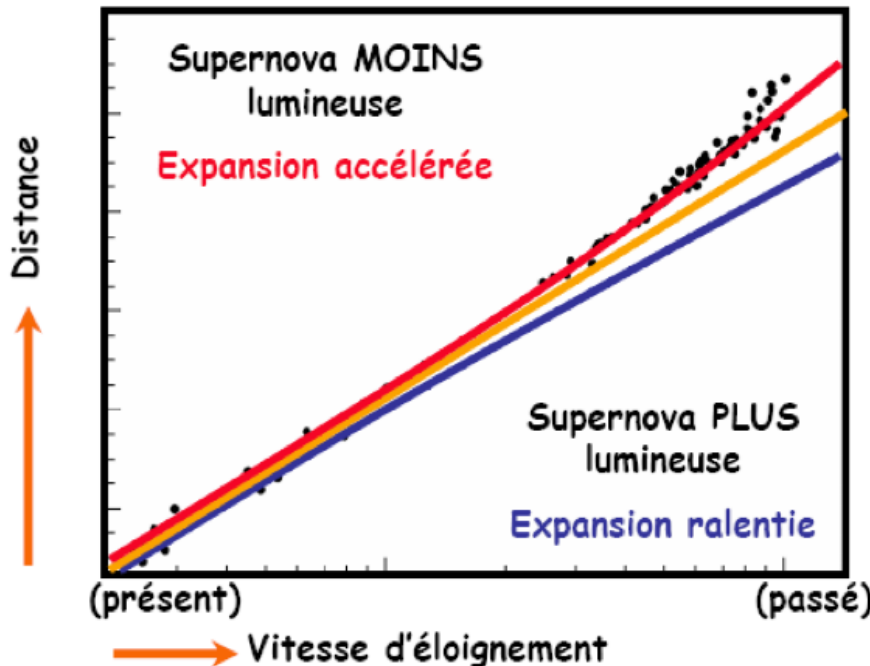


Énergie Noire



- 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 :

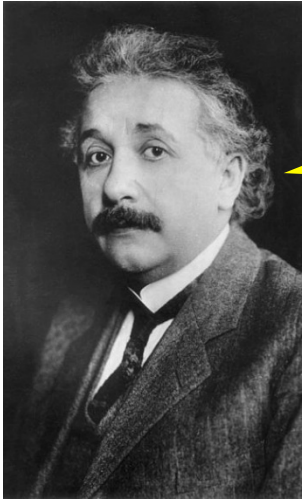
On casse...



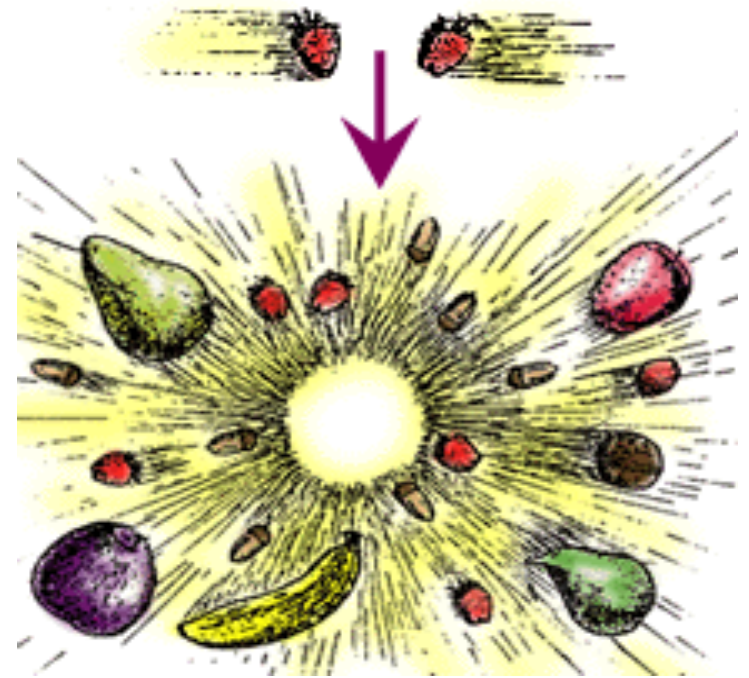
C'est-à-dire : on projette à très grande vitesse la “victime” contre un objet fixe ou une autre “victime” !

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

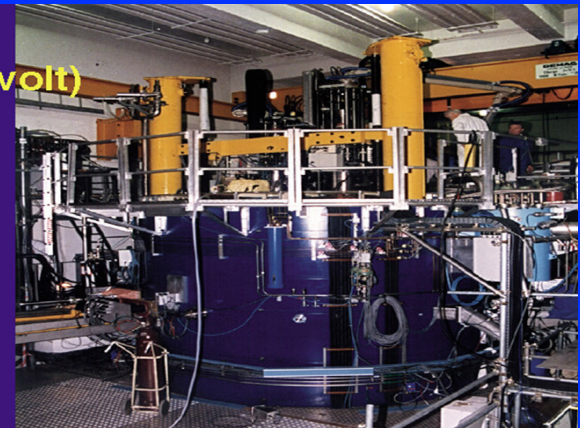
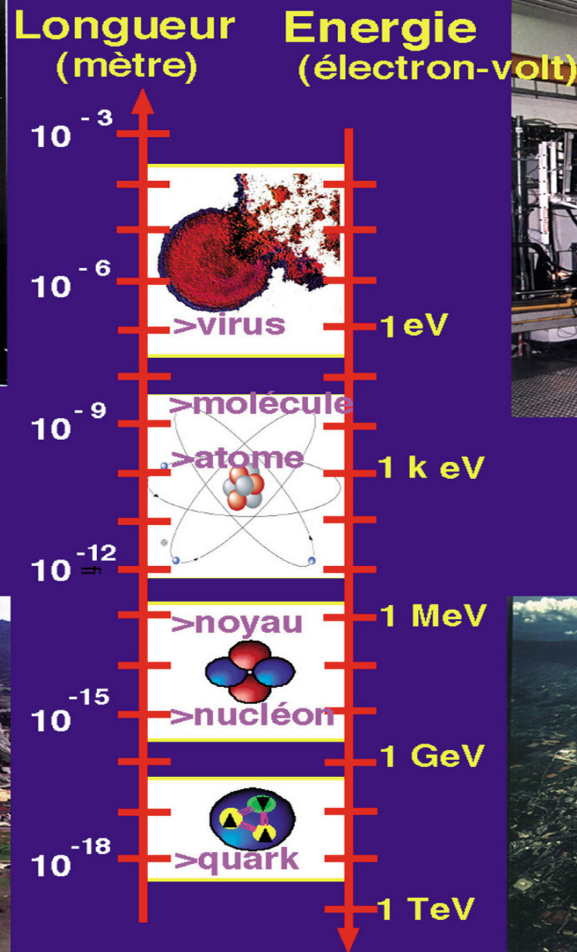
Plus l'objet à étudier est petit, plus l'énergie du projectile-sonde doit être élevée



Microscope électronique



Accélérateur linéaire



Cyclotron



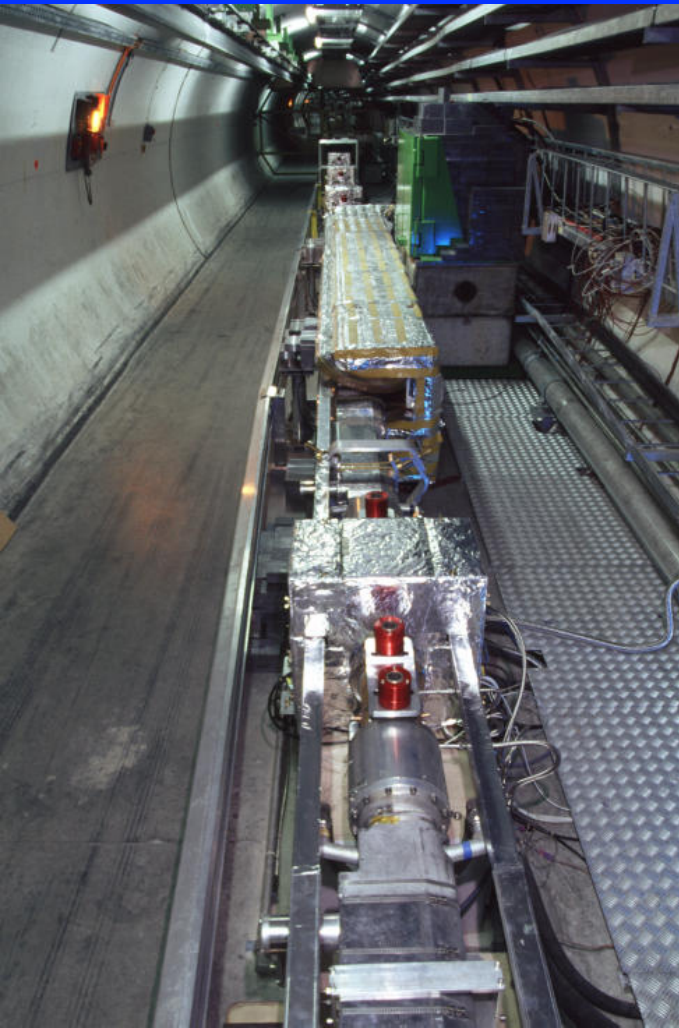
Synchrotron

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

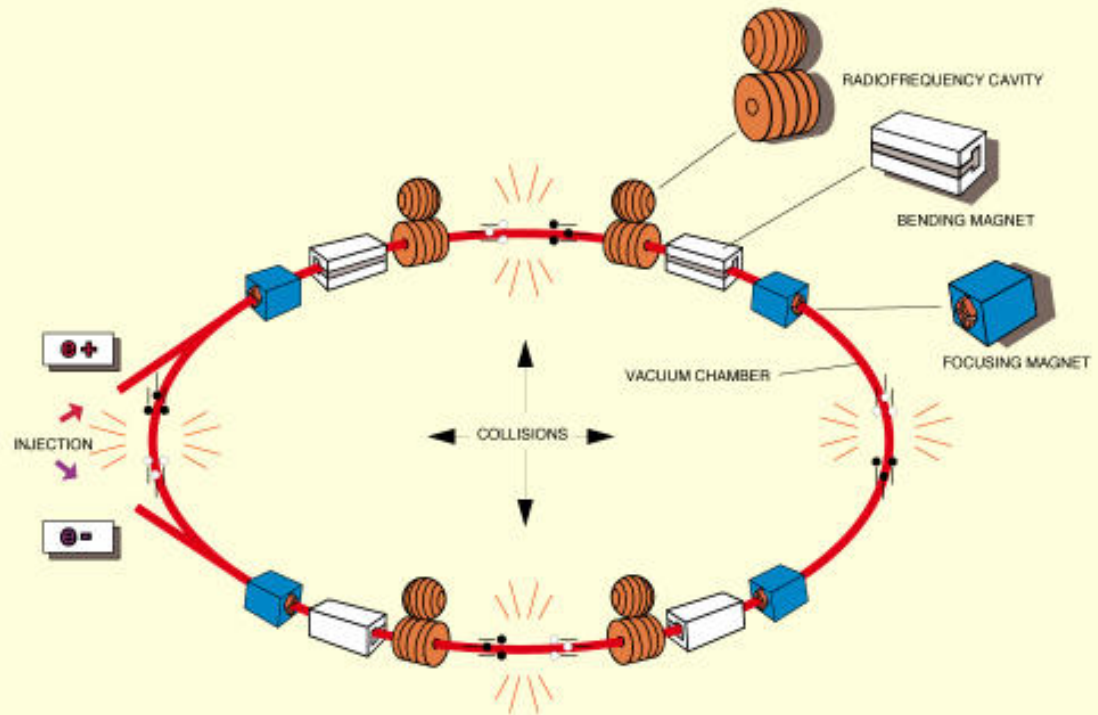
Les accélérateurs

Le champ électrique accélère les particules chargées

Le champ magnétique fait tourner les particules chargées



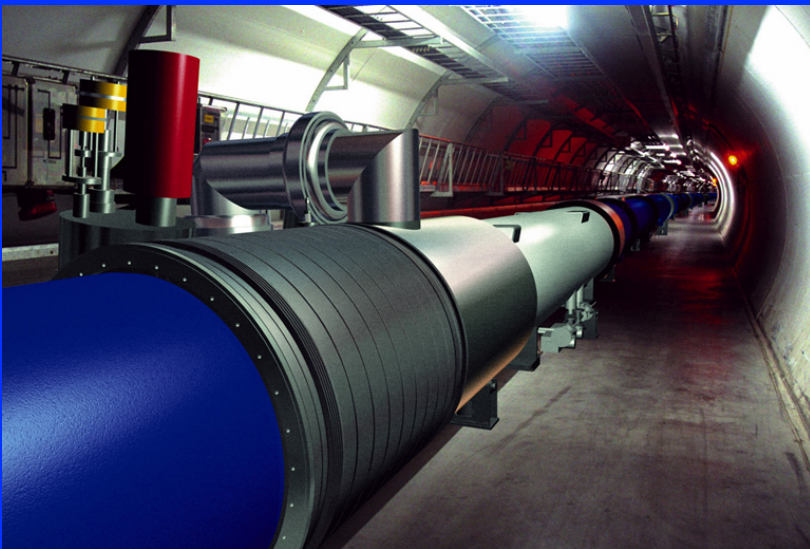
THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.



Exemple : le LHC

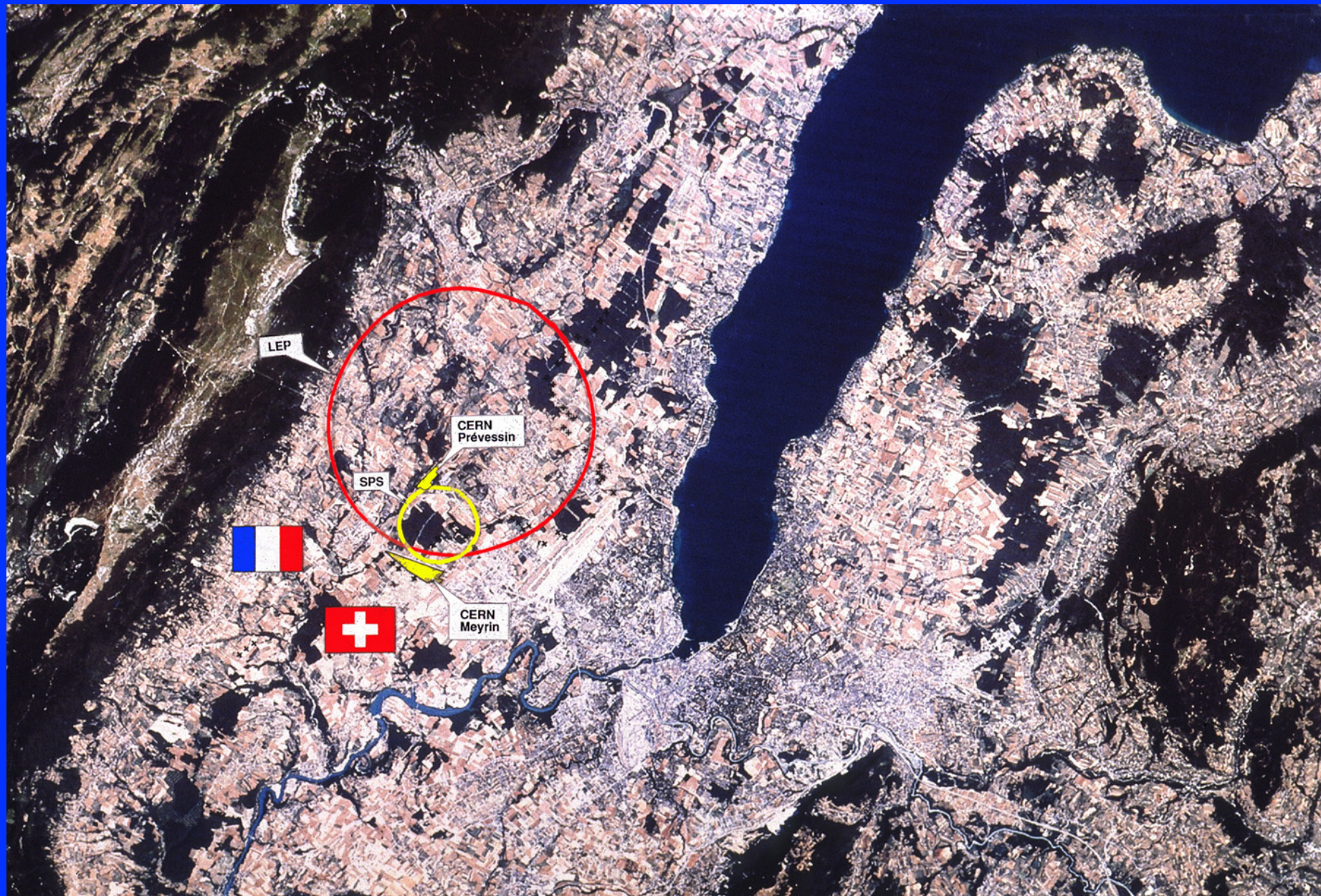
C'est un accélérateur circulaire de protons, au CERN, à Genève. **LHC** = **L**arge **H**adron **C**ollider

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



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

Vu du ciel



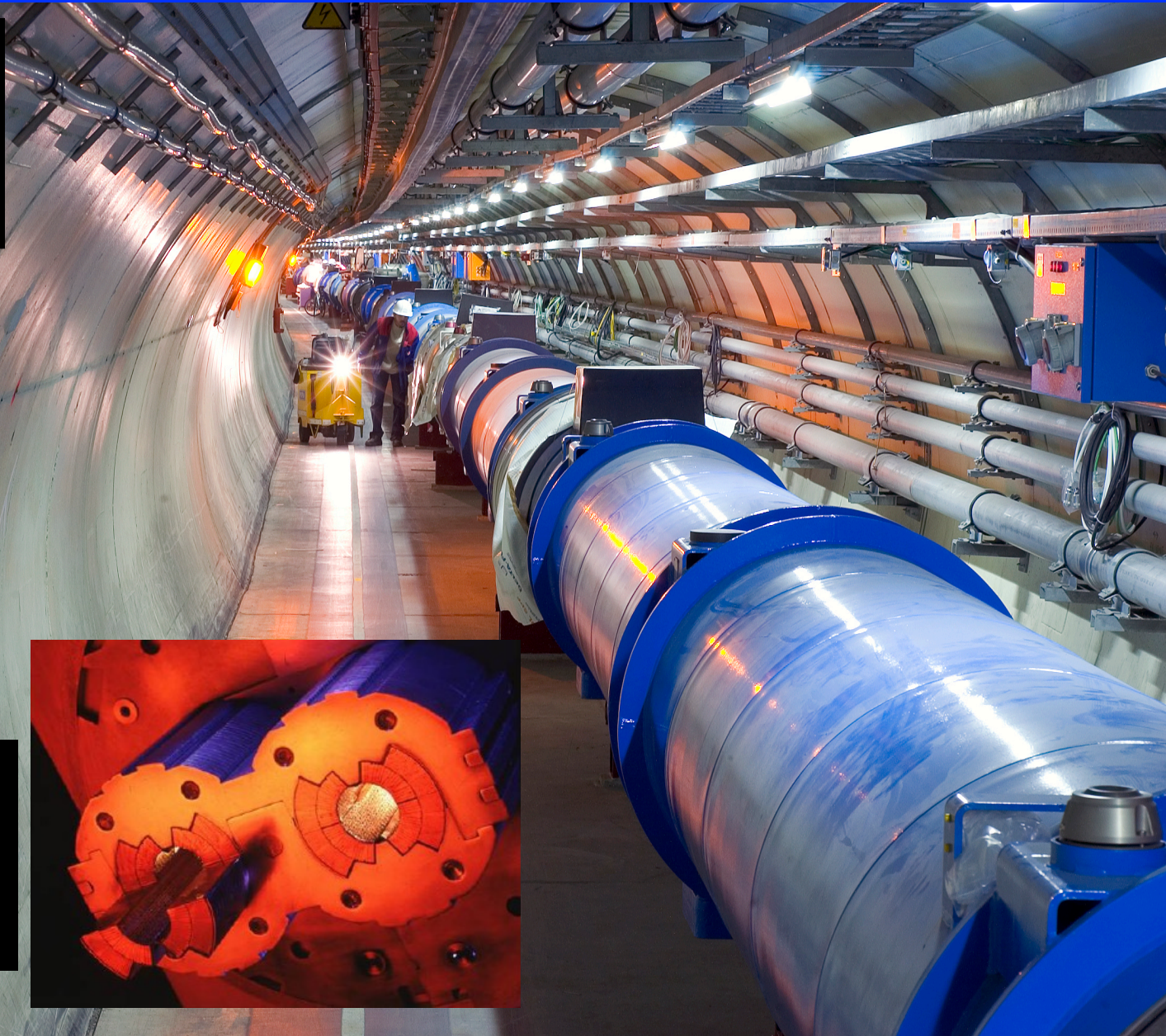
.. et sous terre !

Aimants
supraconducteurs
pour courber les
protons

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

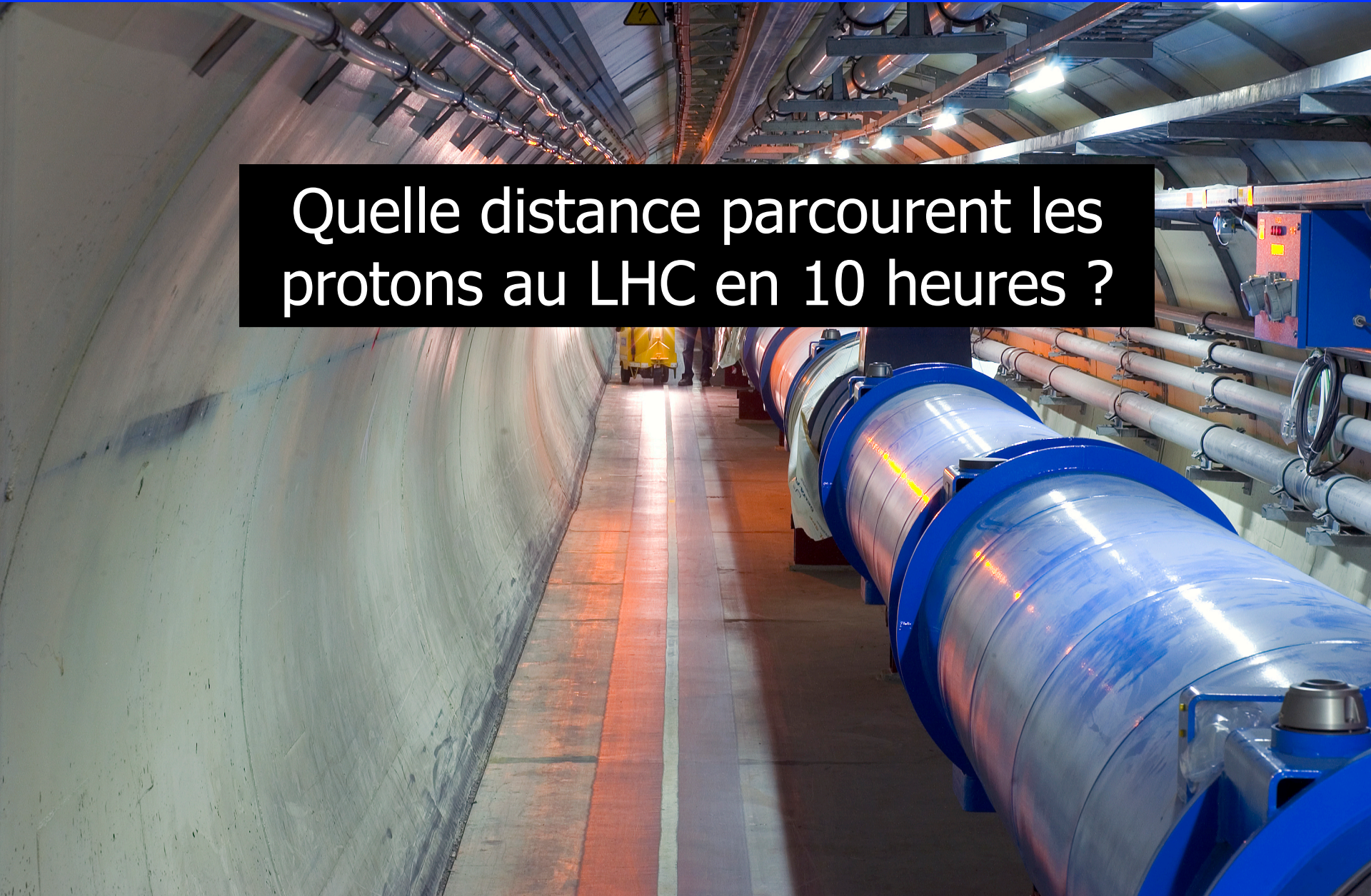
700 000 litres
Hélium liquide

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 ?

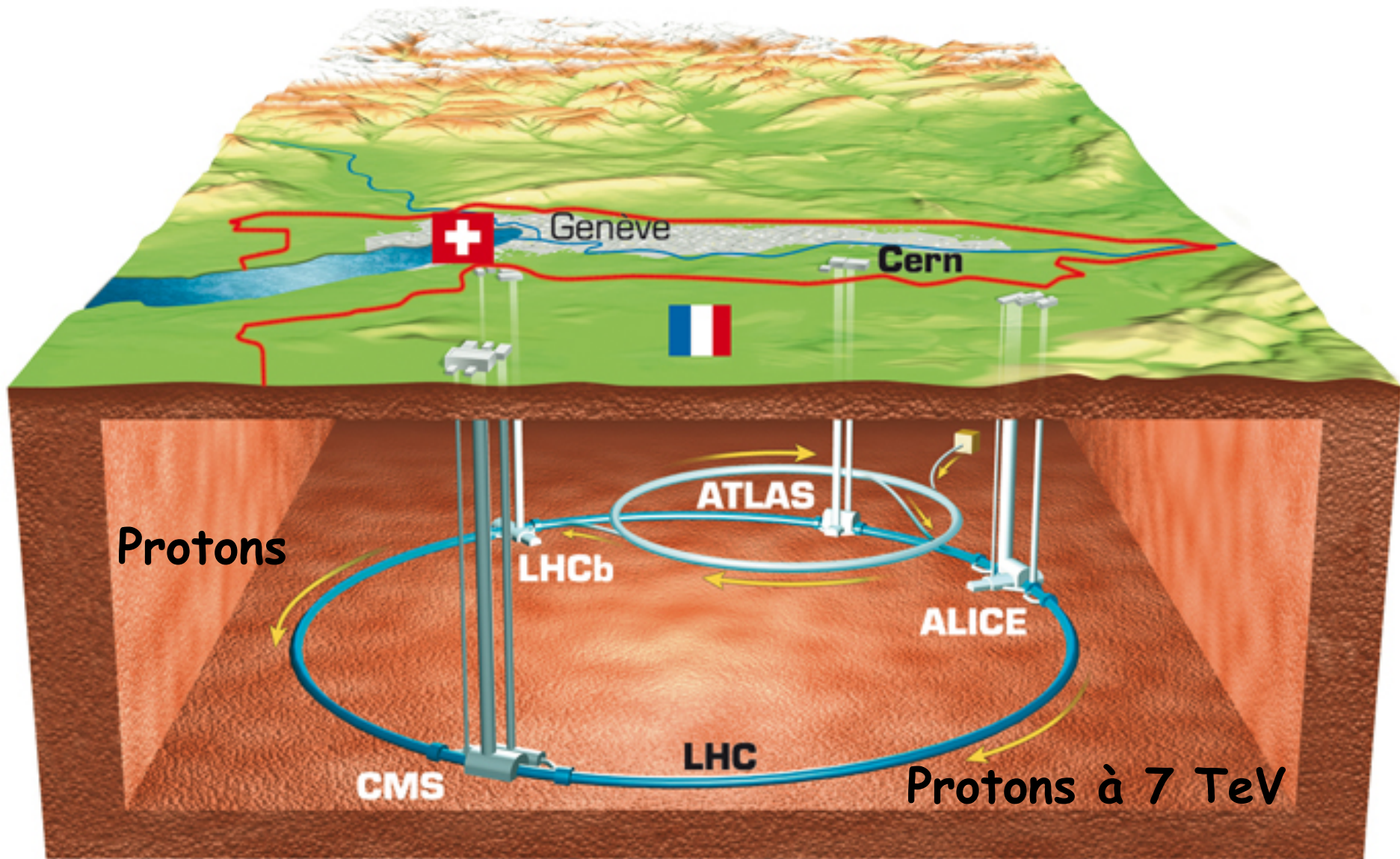


Petite question...

Quelle distance parcourent les protons au LHC en 10 heures ?

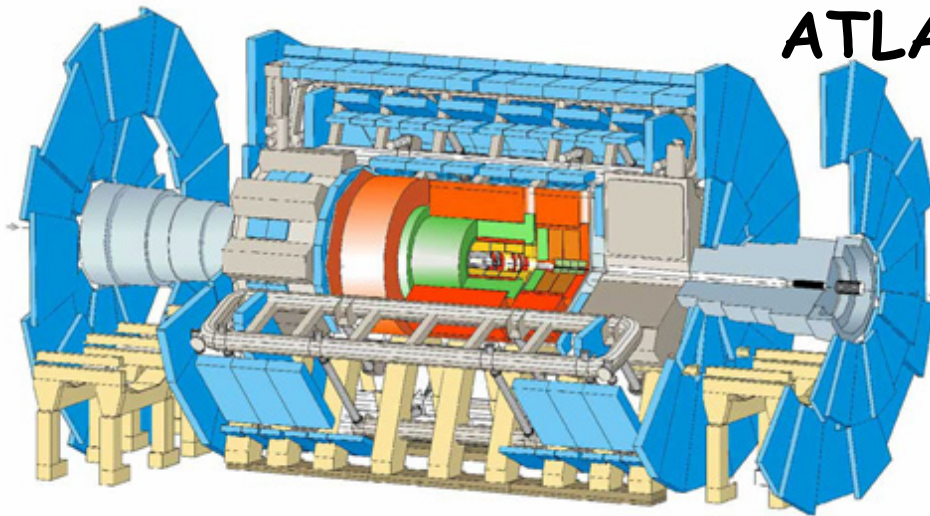
Aller-retour Terre-Neptune !



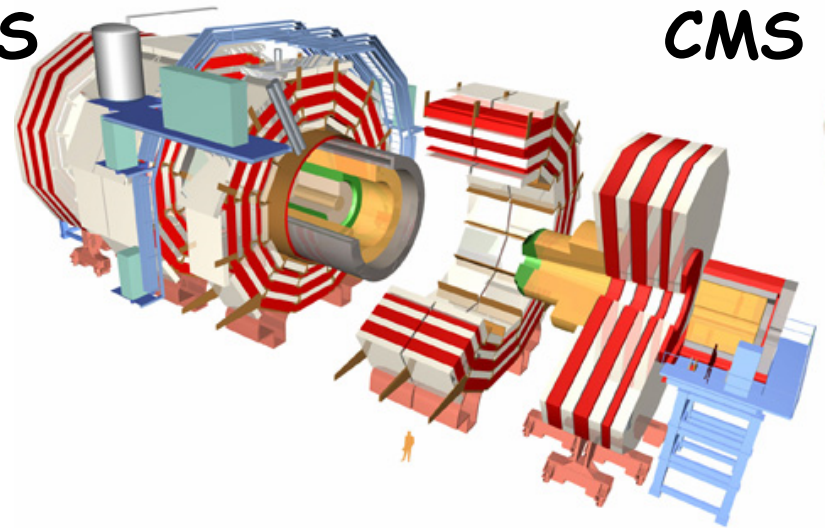


4 détecteurs sous terre

Des géants pour traquer l'infiniment petit

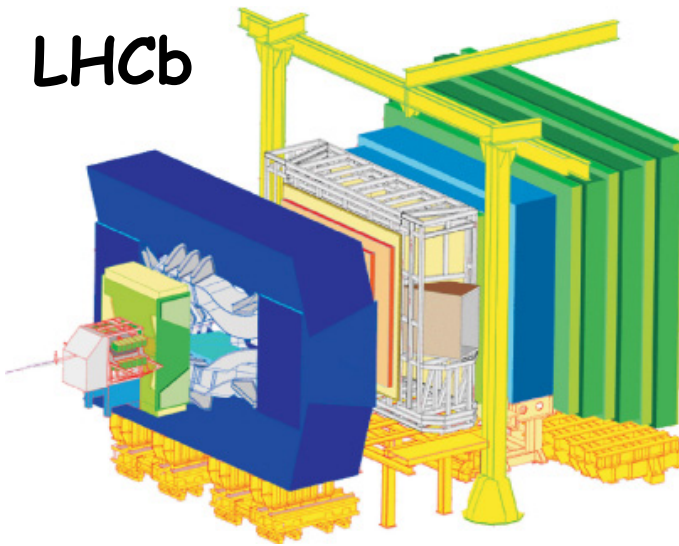


ATLAS

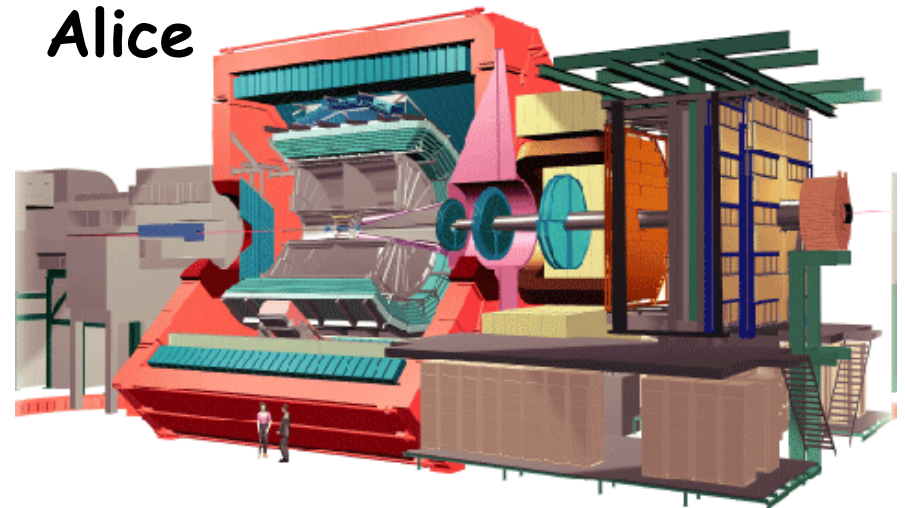


CMS

LHCb



Alice



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

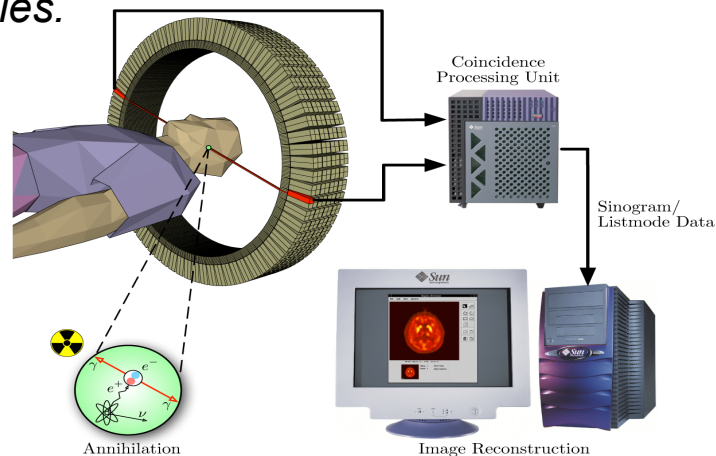
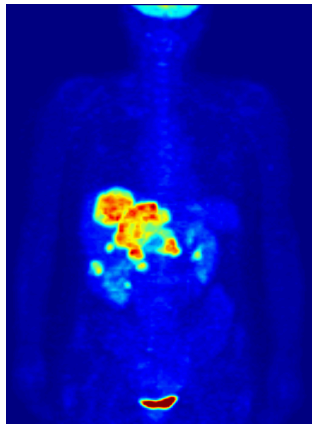
Les apports pour la société

Les découvertes en sciences fondamentales permettent les grandes avancées

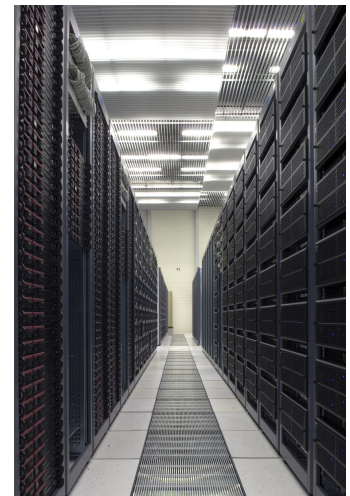
- *Les transistors ont été inventés parce qu'on avait découvert la mécanique quantique*
- *Le système de positionnement GPS utilise la relativité générale*

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.*

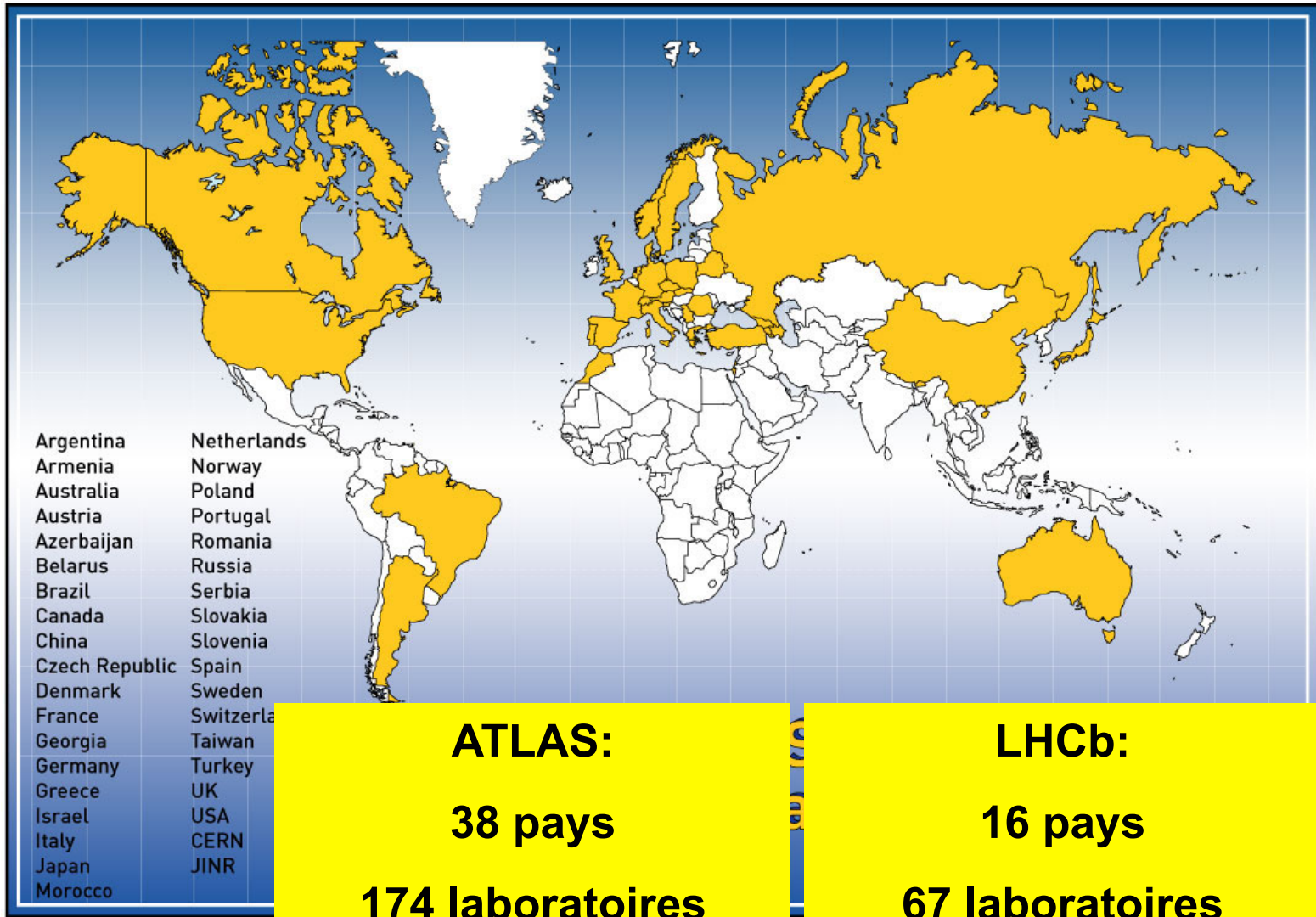


Système de tomographie à émission de positons



“ferme” de PC au CERN (2006)

Les collaborations ATLAS et LHCb



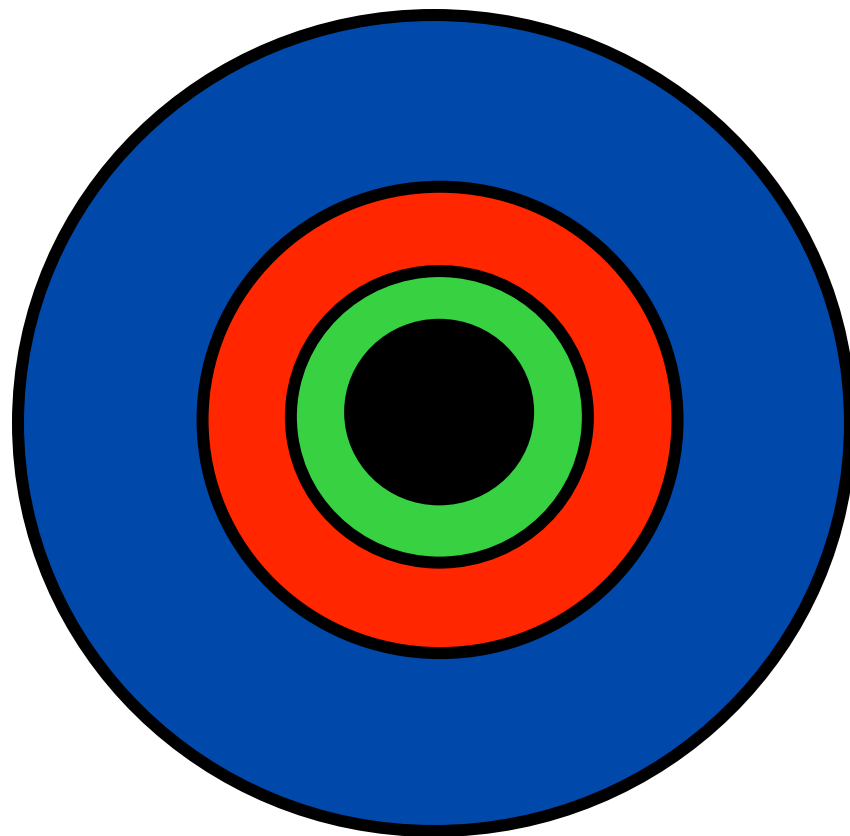
Les détecteurs

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

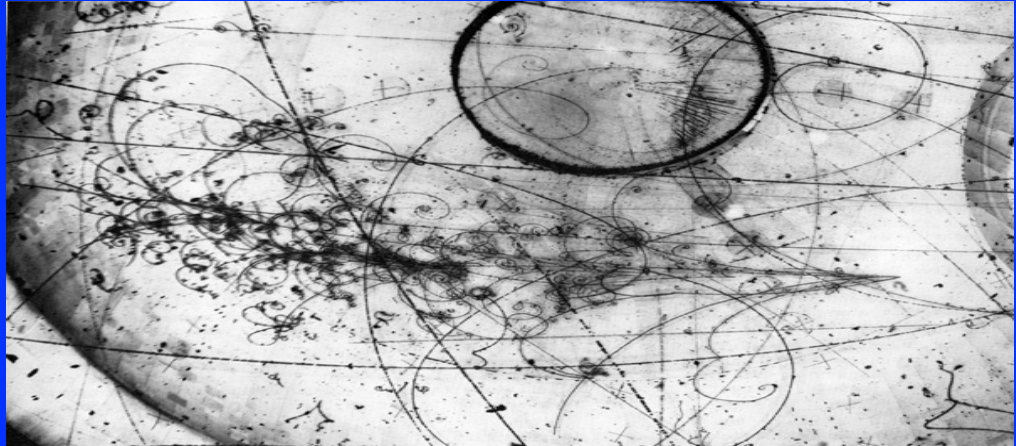


Trajectographes

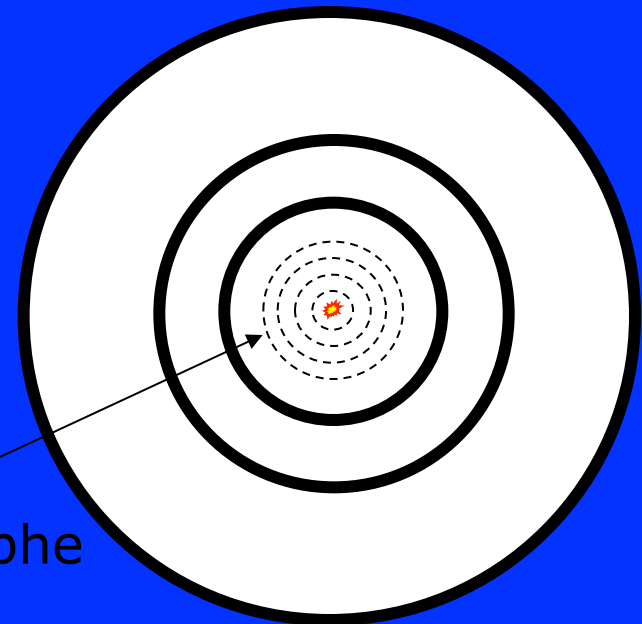
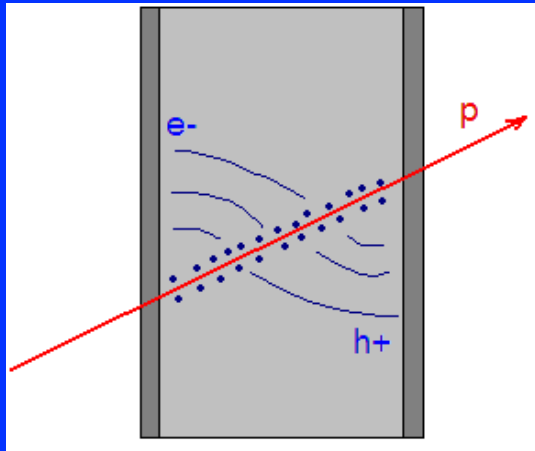
tout l'art de regarder sans se faire voir

Rôle : détecter les traces des particules chargées

Un outil merveilleux :
les chambres à bulles

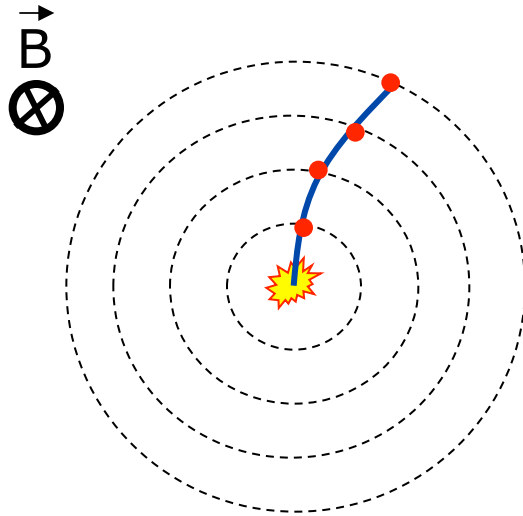


La méthode moderne :
le détecteur électronique

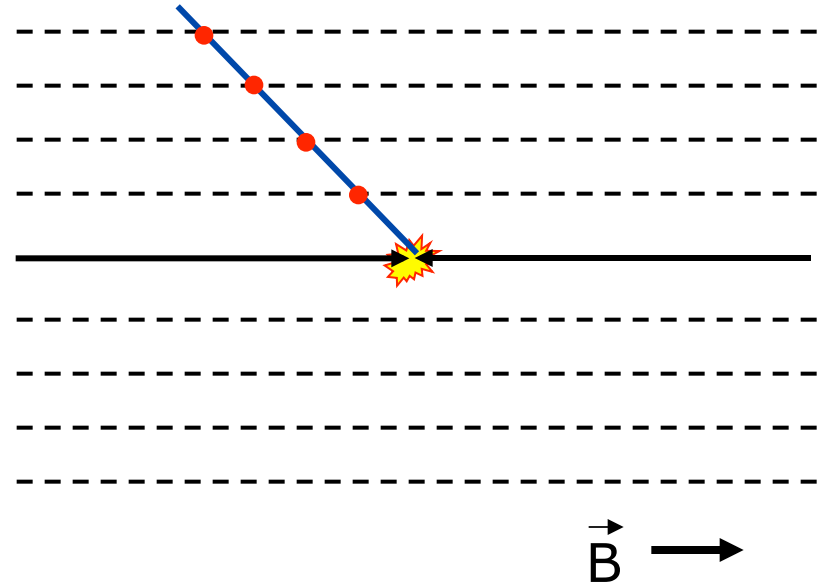


Le trajectographe

Le trajectographe



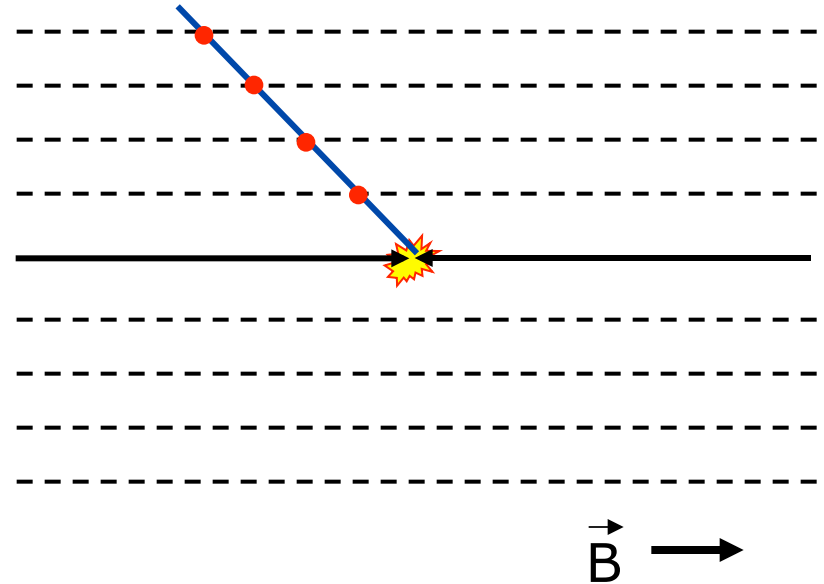
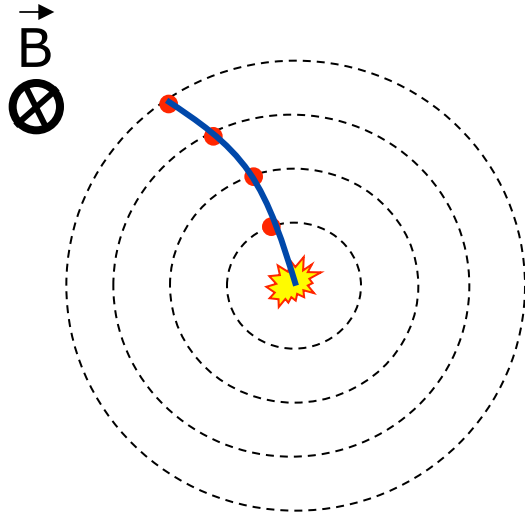
Un électron



- 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



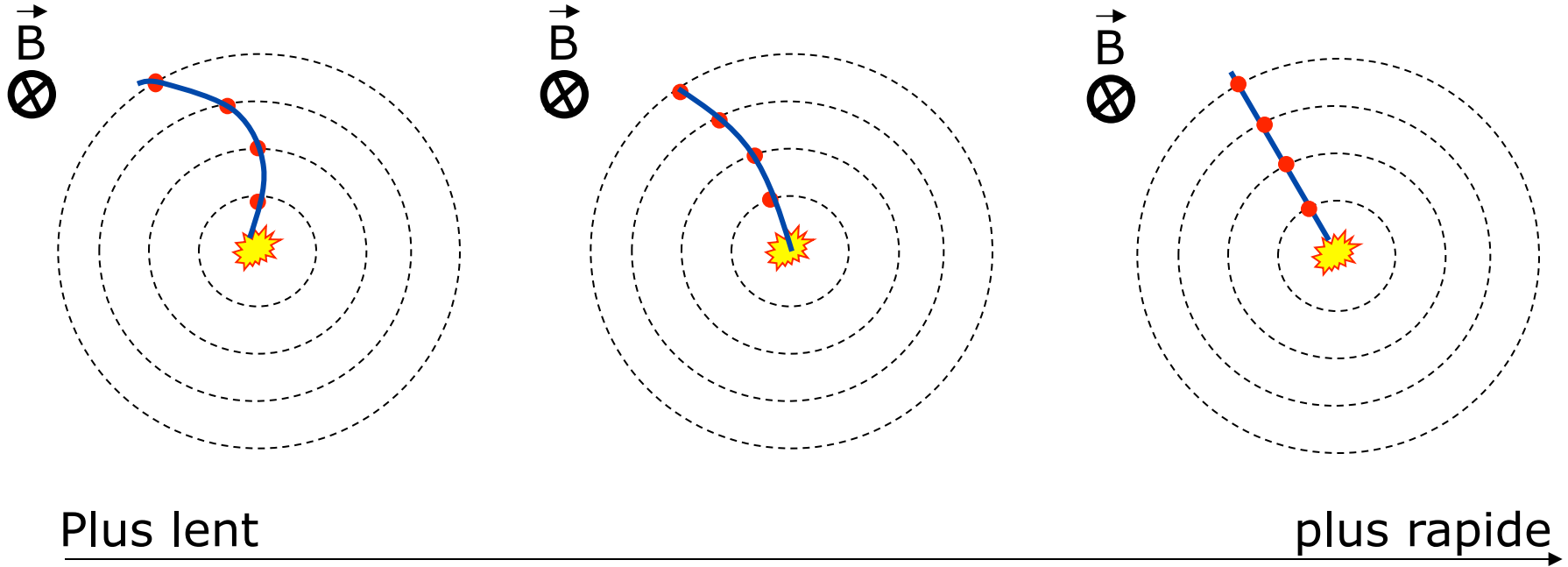
Un anti-électron=positron

C'est le même principe avec les pions (π^\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 $R = mv/qB$

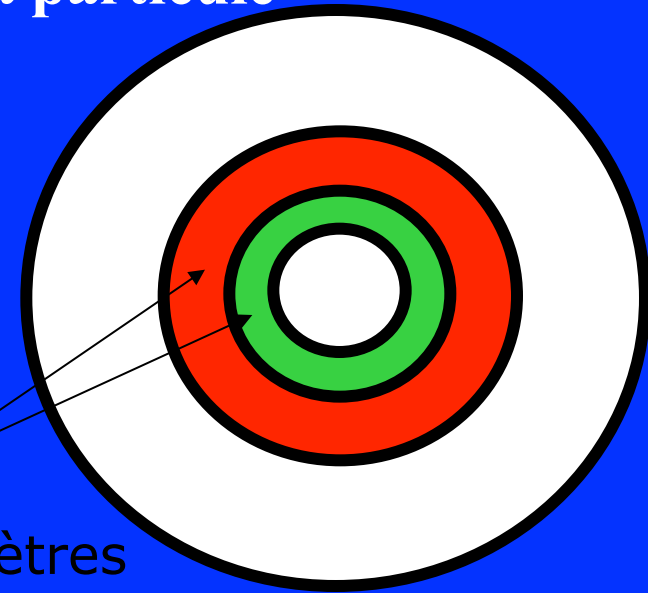
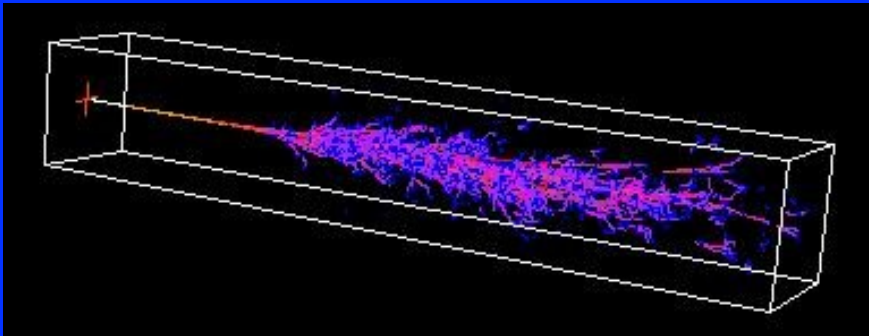


Calorimétrie

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

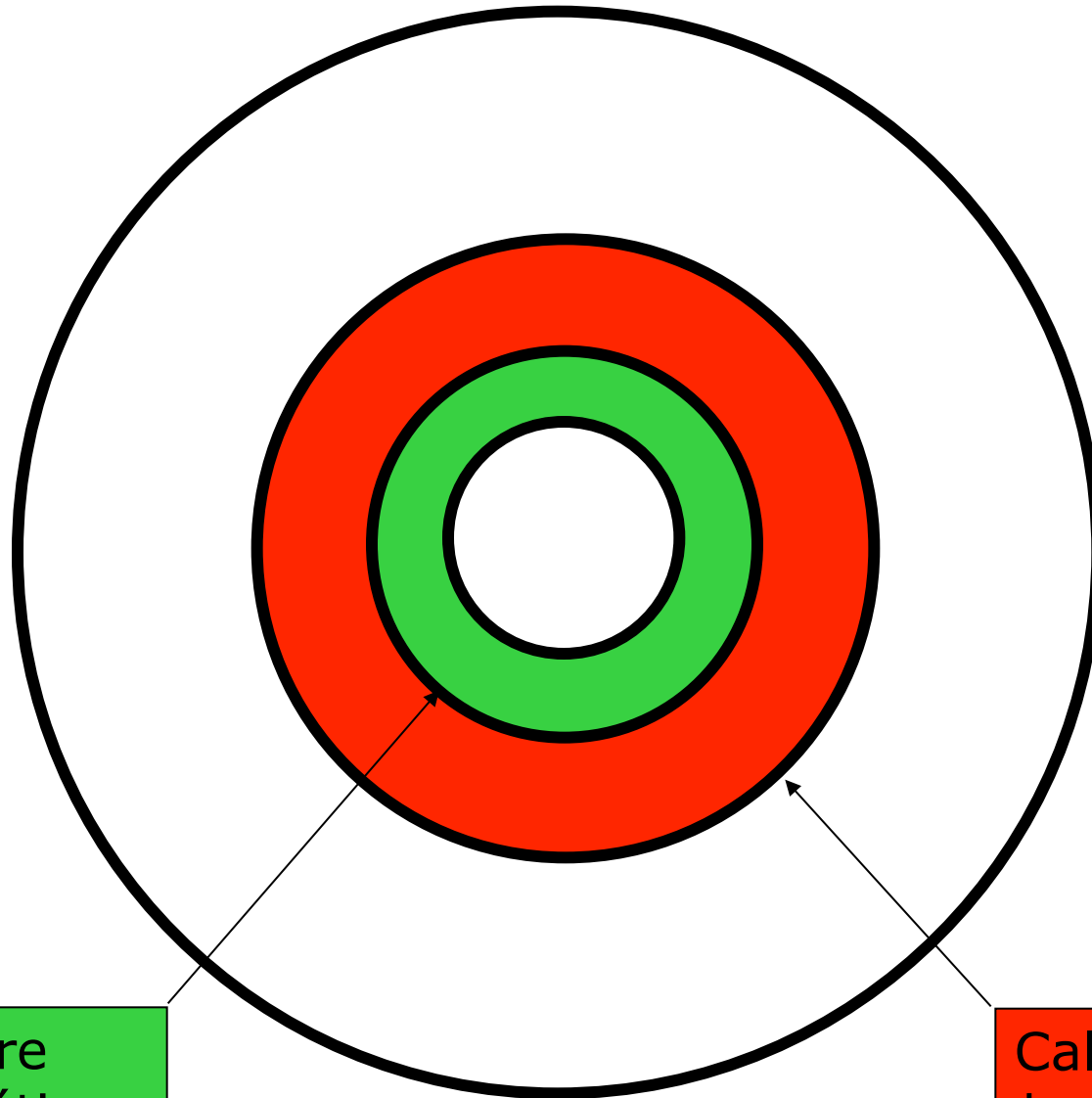


Les calorimètres

Facile pour un électron, mais difficile pour un proton !



Les calorimètres

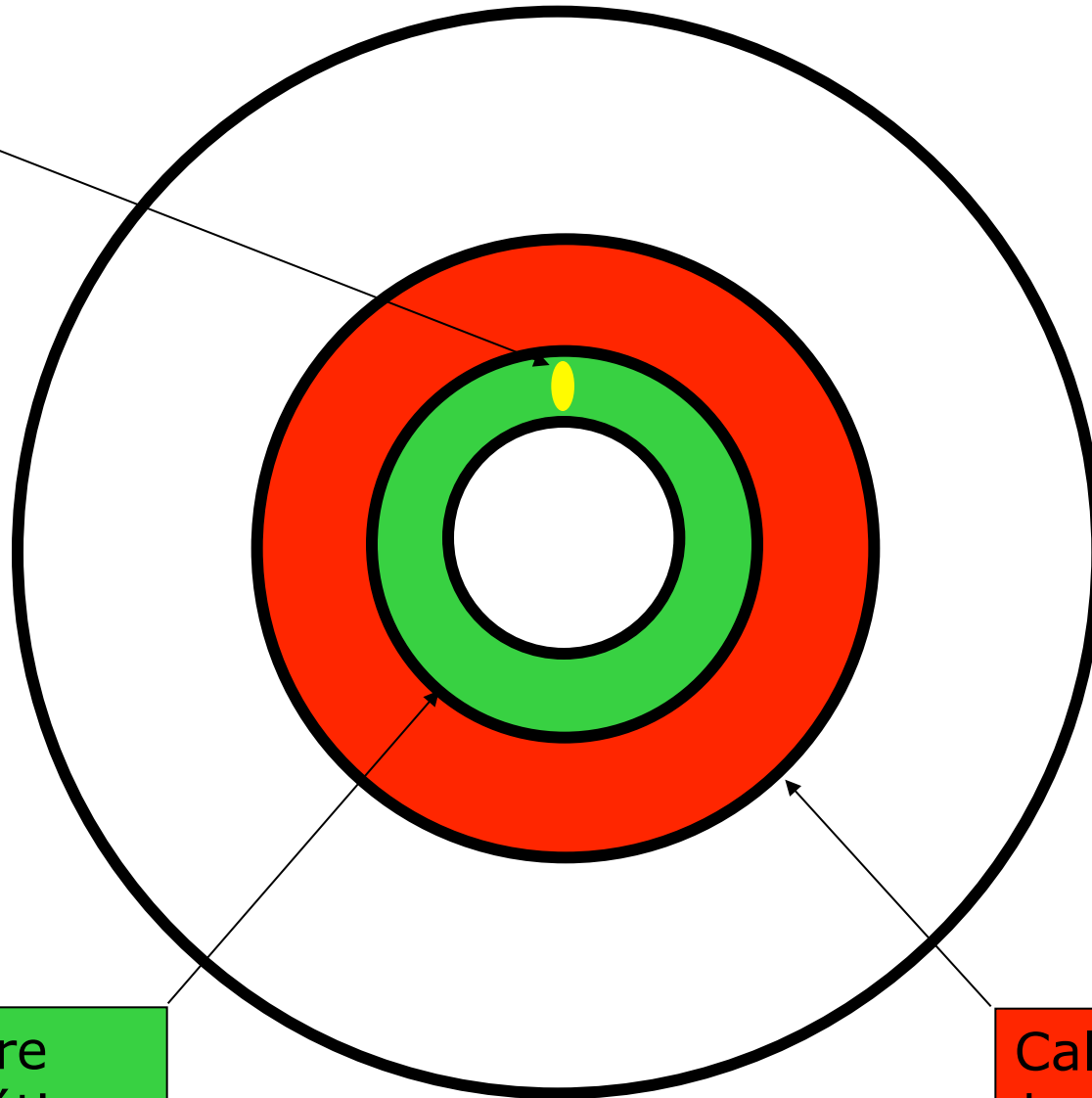


Calorimètre
électromagnétique

Calorimètre
hadronique

Les calorimètres

Electron
ou photon

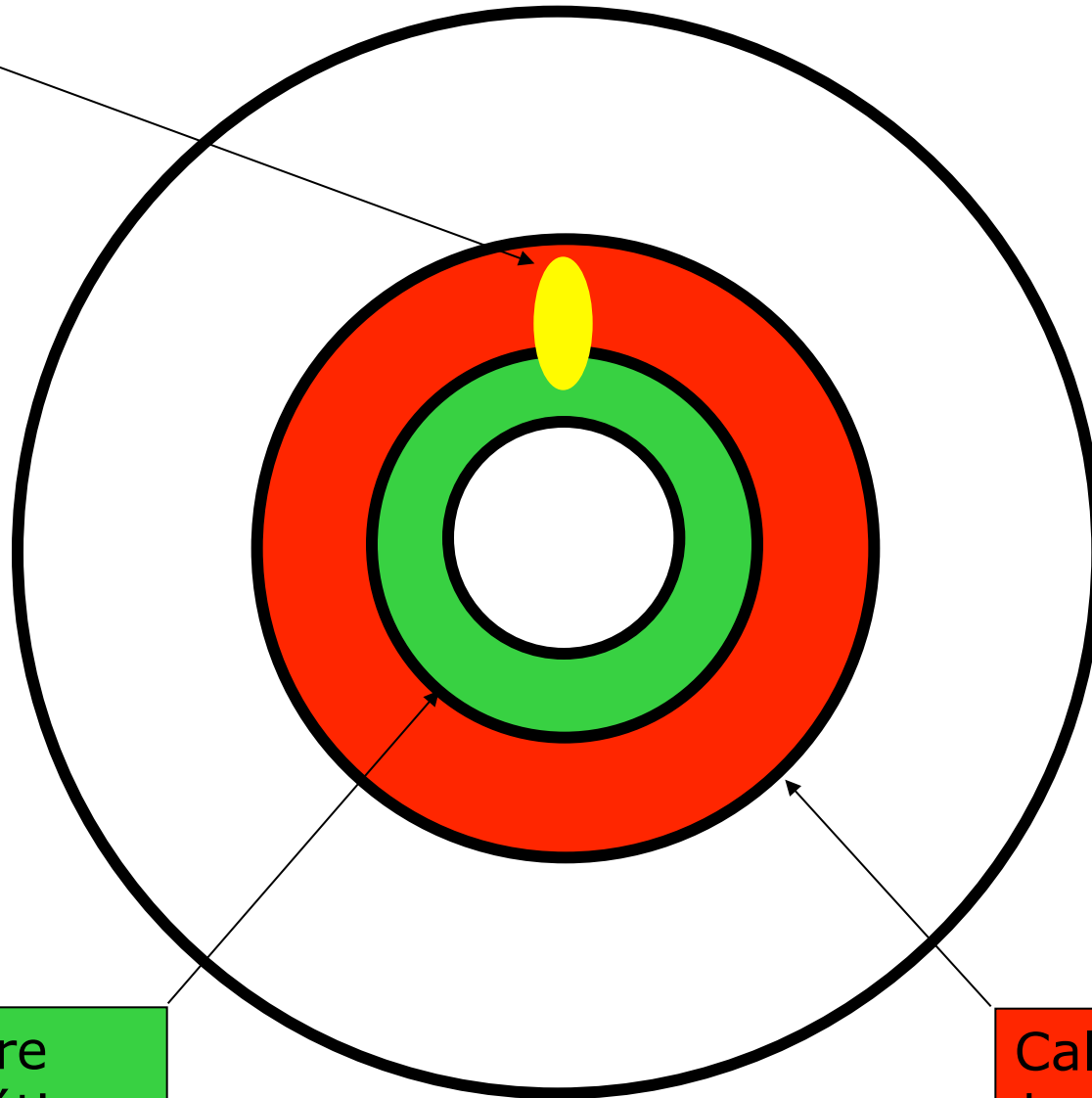


Calorimètre
électromagnétique

Calorimètre
hadronique

Les calorimètres

Hadron

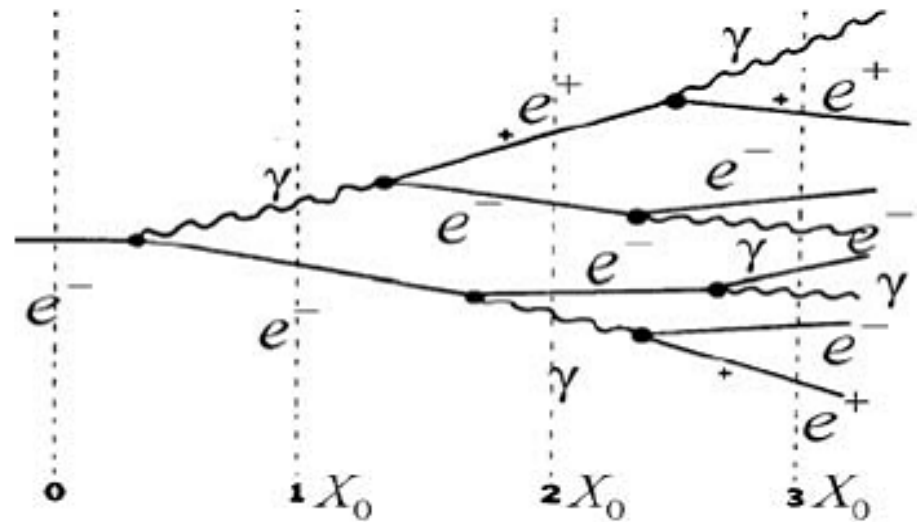


Calorimètre
électromagnétique

Calorimètre
hadronique

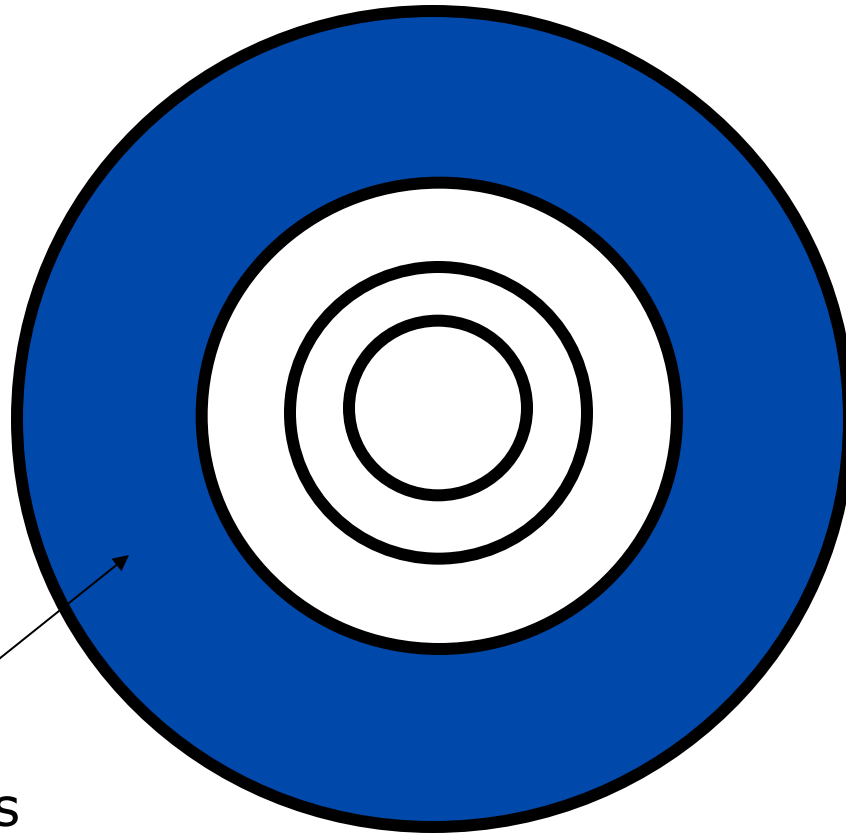
Fonctionnement d'un calorimètre

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

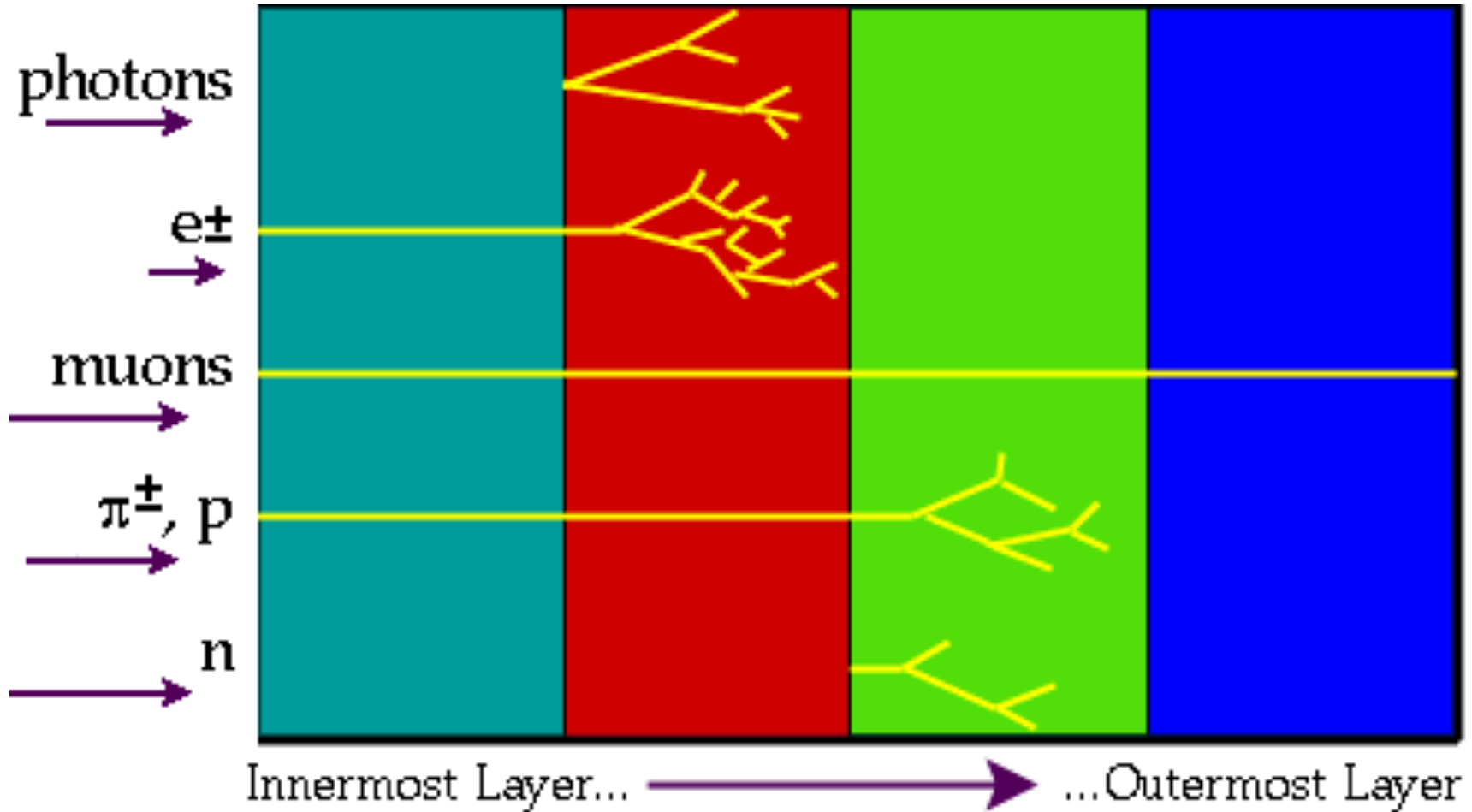


Détecteur à muons

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



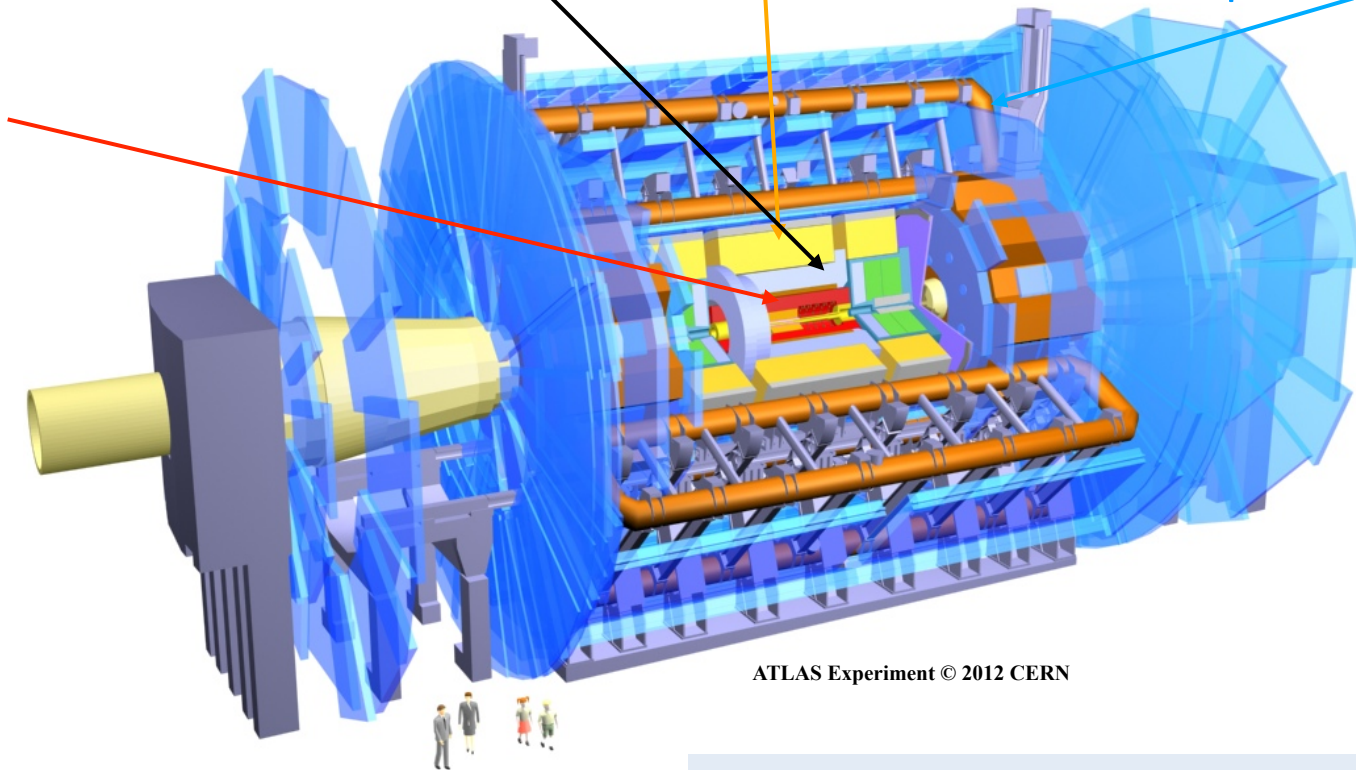
Le détecteur ATLAS

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

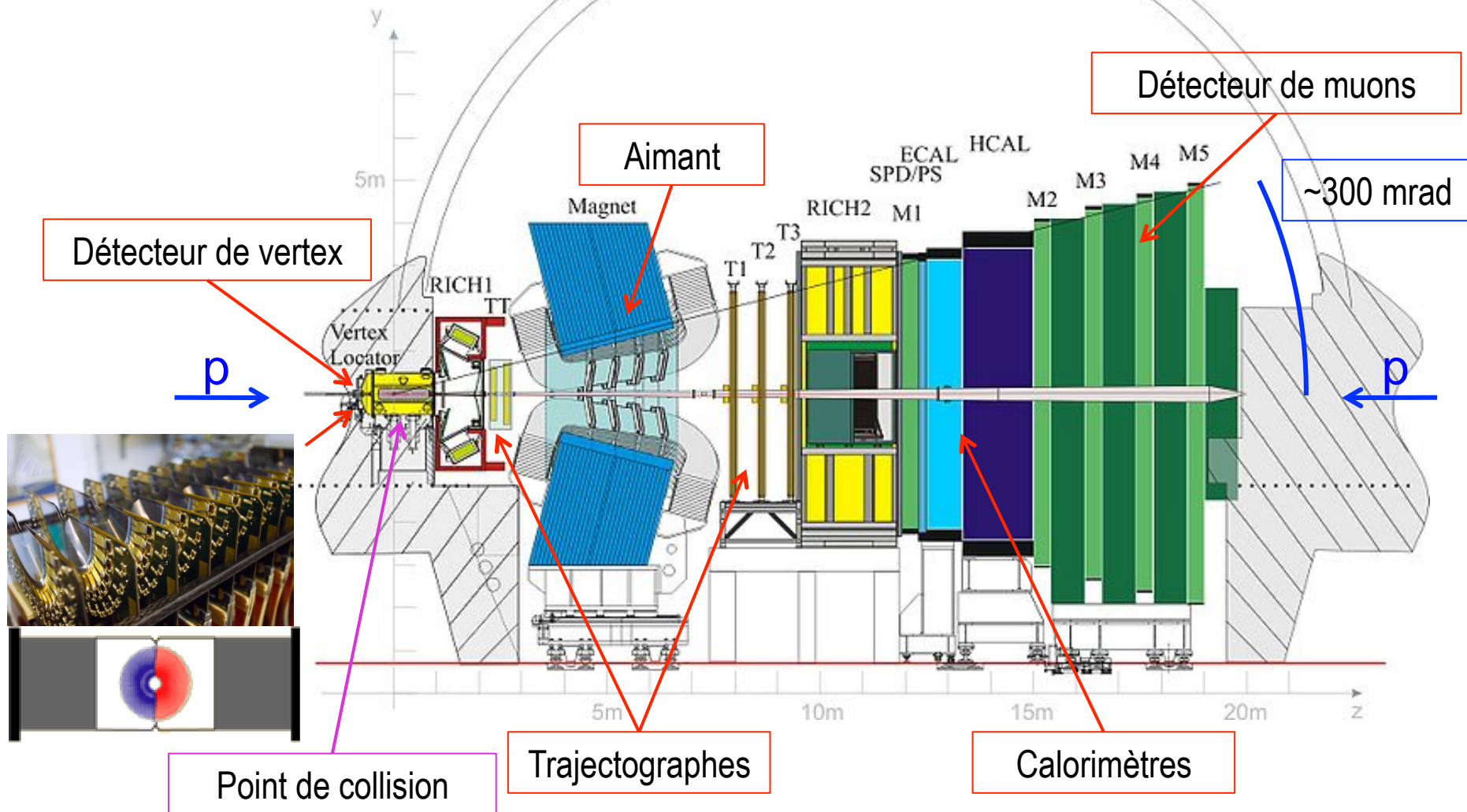
Longueur : ~ 46 m

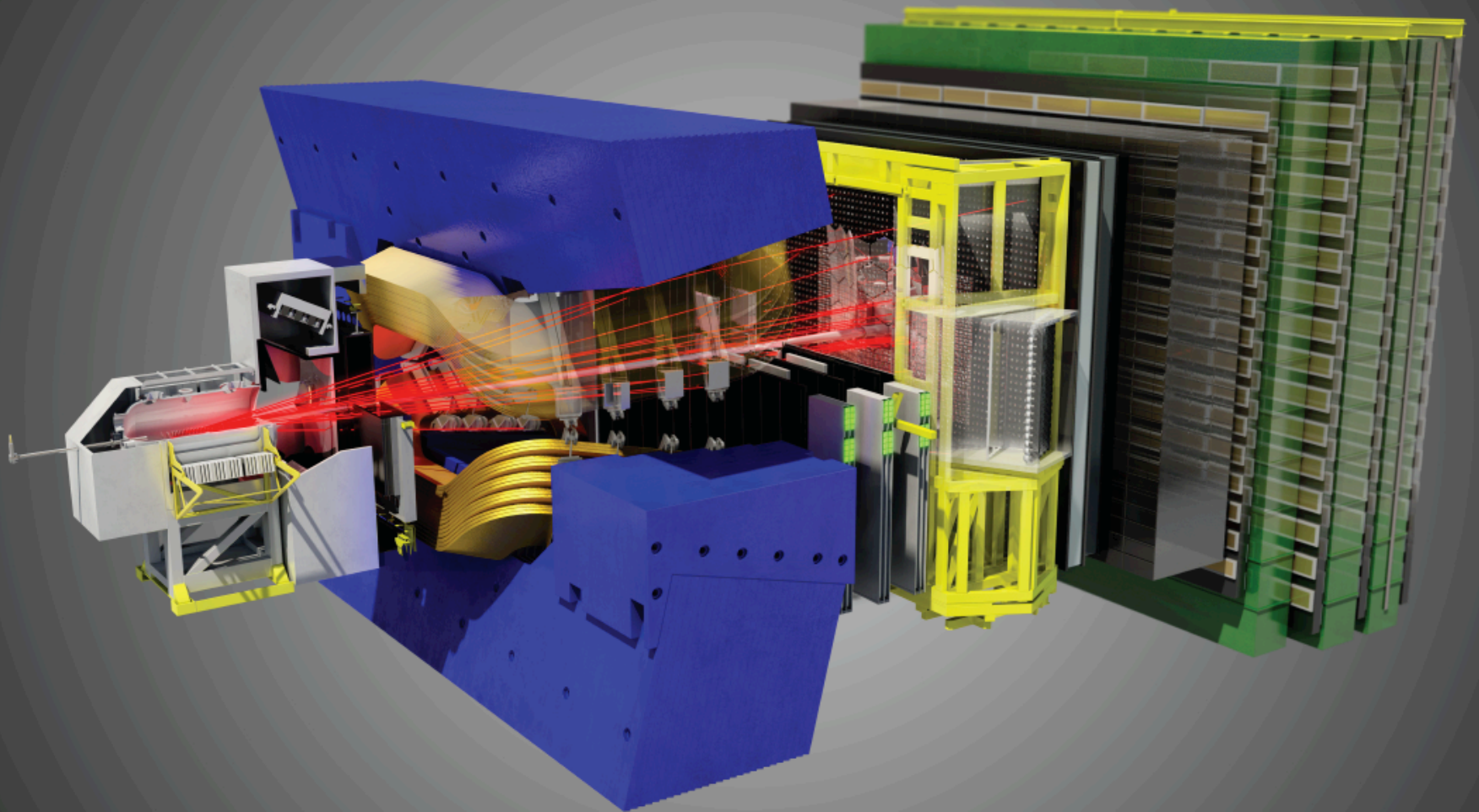
Diamètre : ~ 25 m

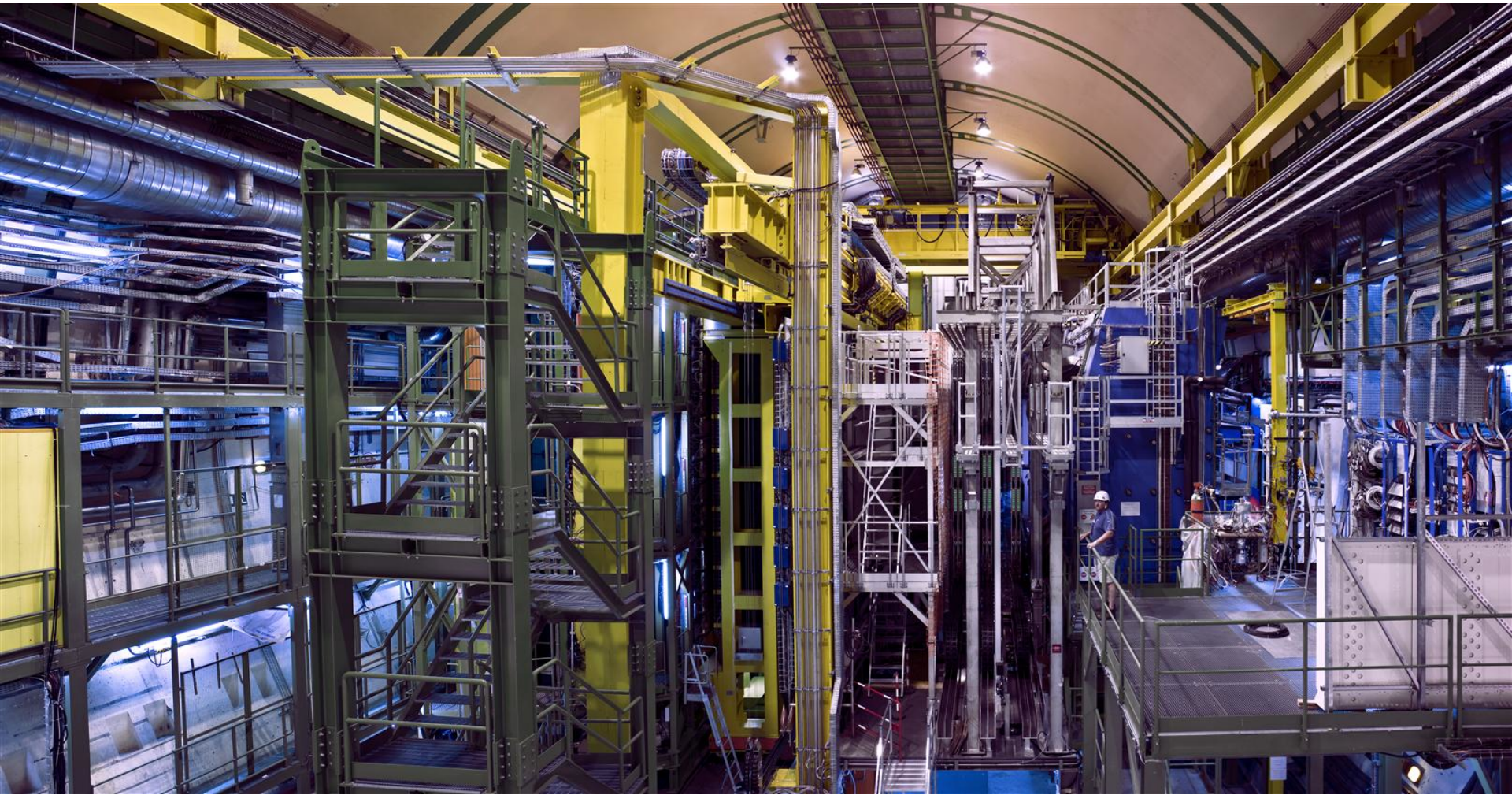
Poids : ~ 7000 tonnes

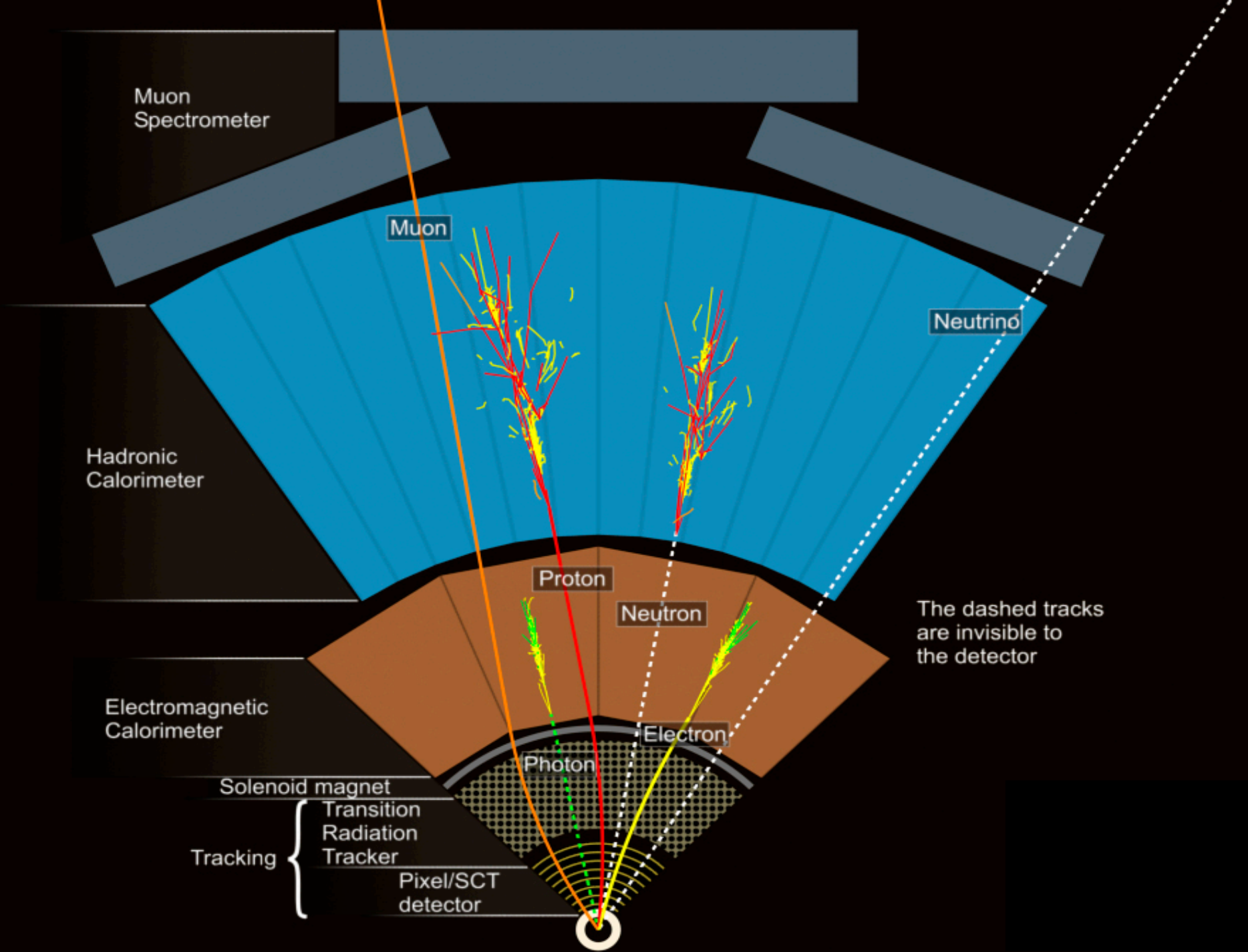
Le détecteur *LHCb*

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



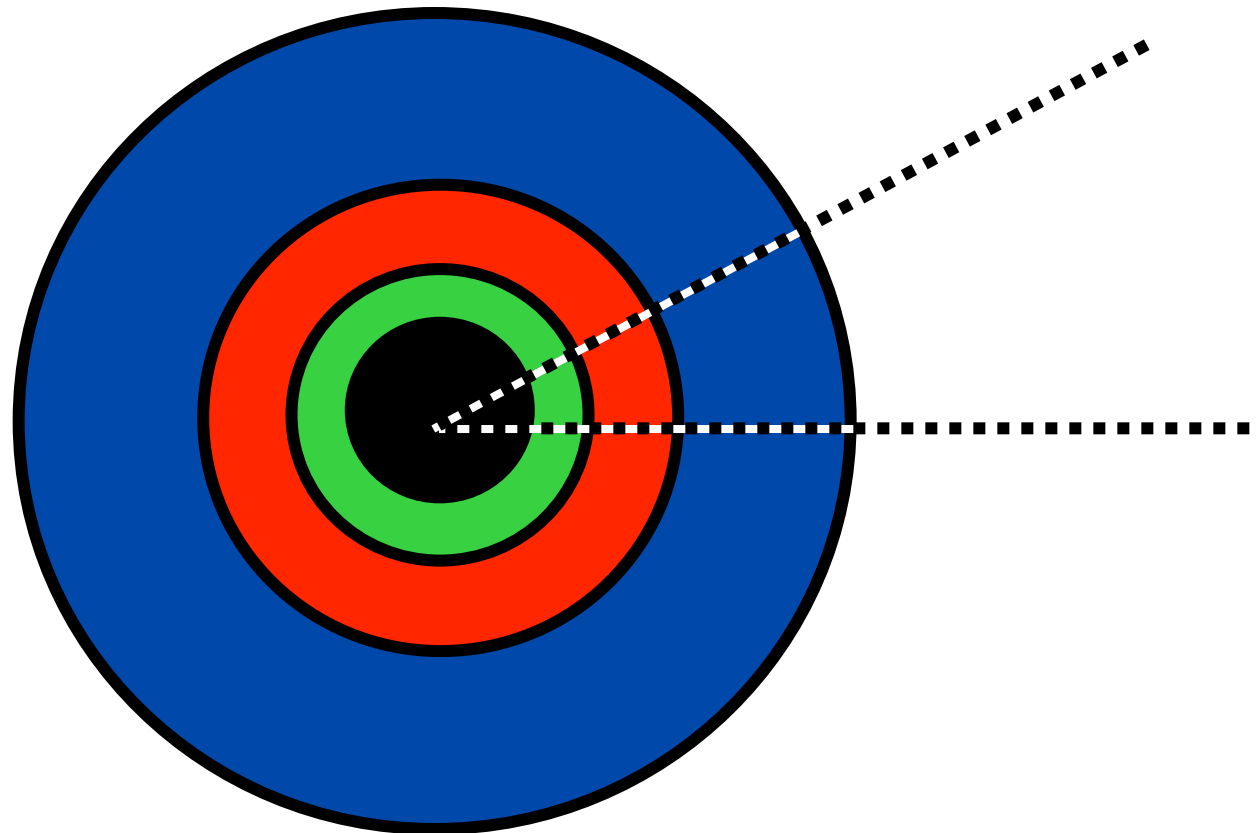




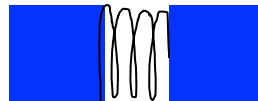


Comment « voir » les particules qui se désintègrent très vite ?

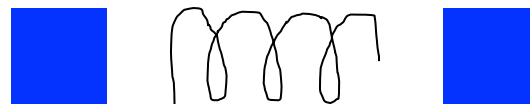
(avant même d'interagir avec le détecteur...)



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

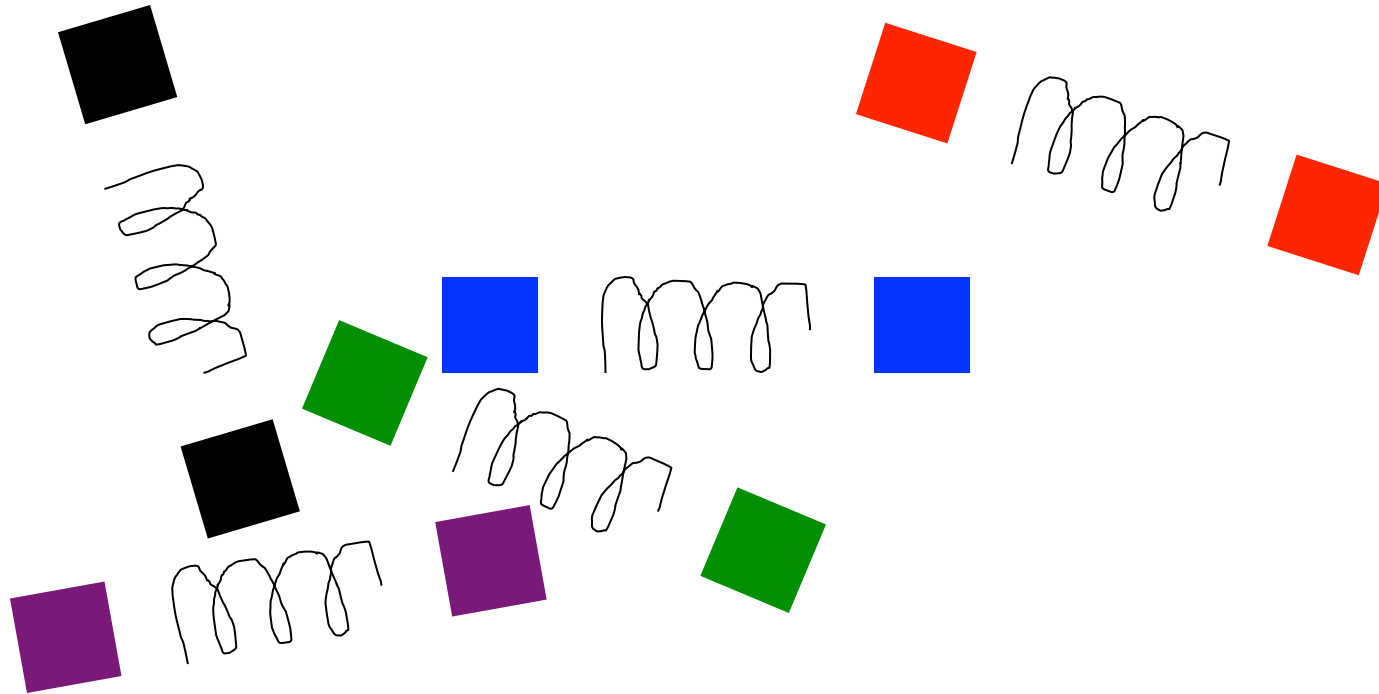


Deux cubes identiques de la même couleur sont reliés par un ressort et sont posées sur une table



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

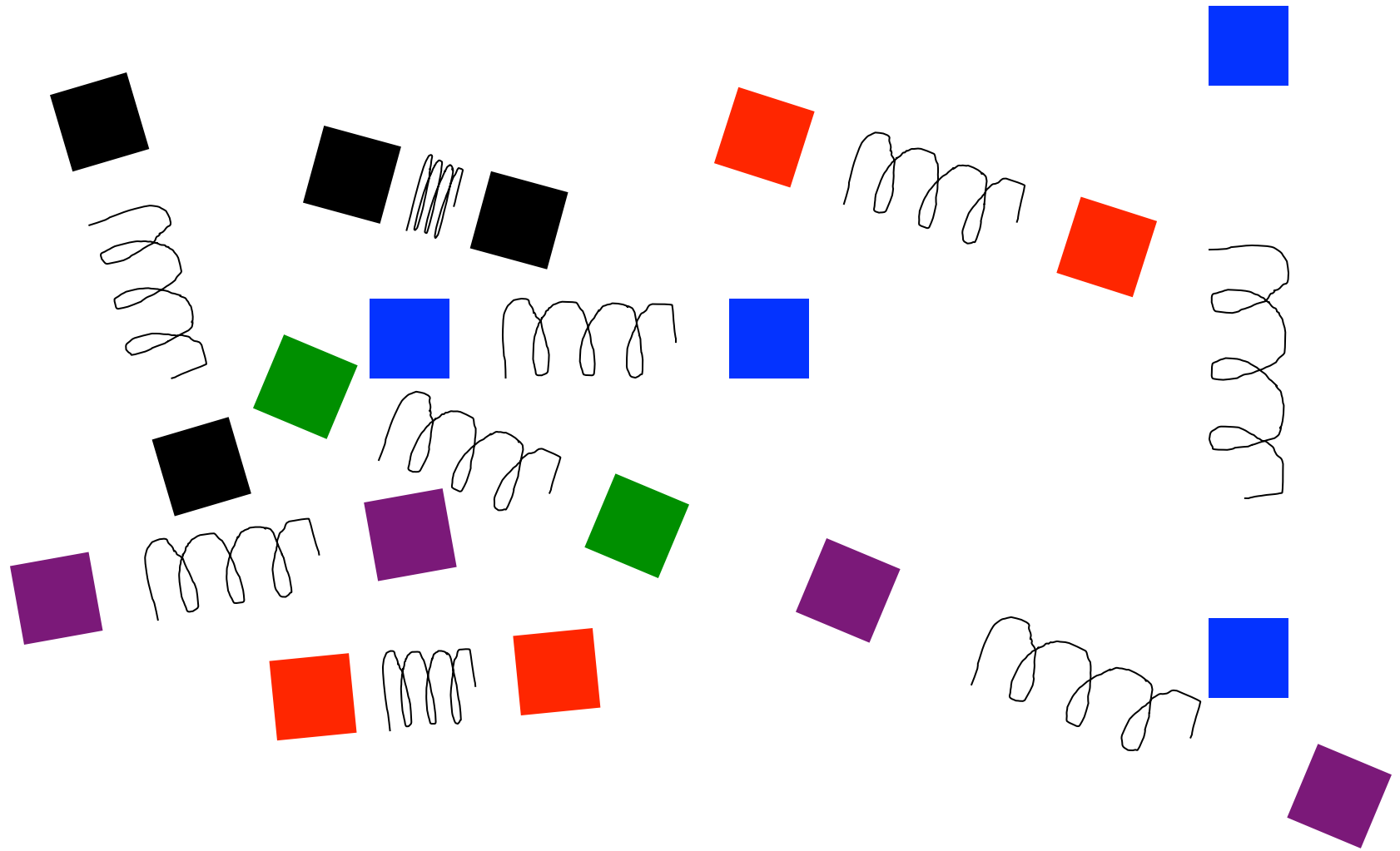
En mesurant cette distance on peut déduire l'énergie emmagasinée dans le ressort



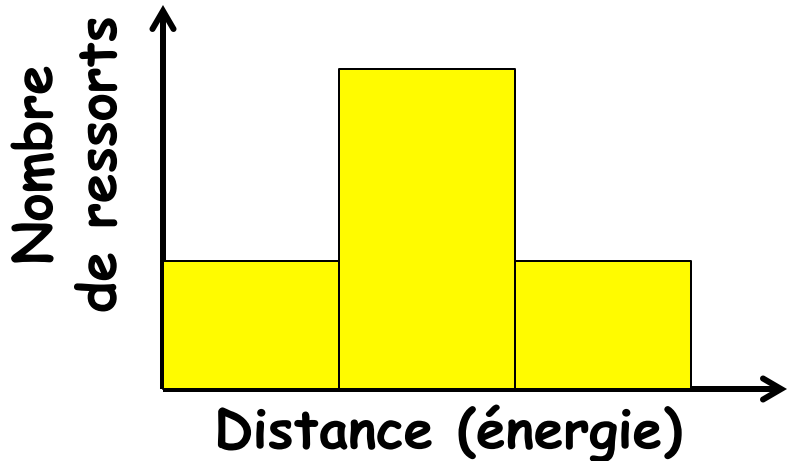
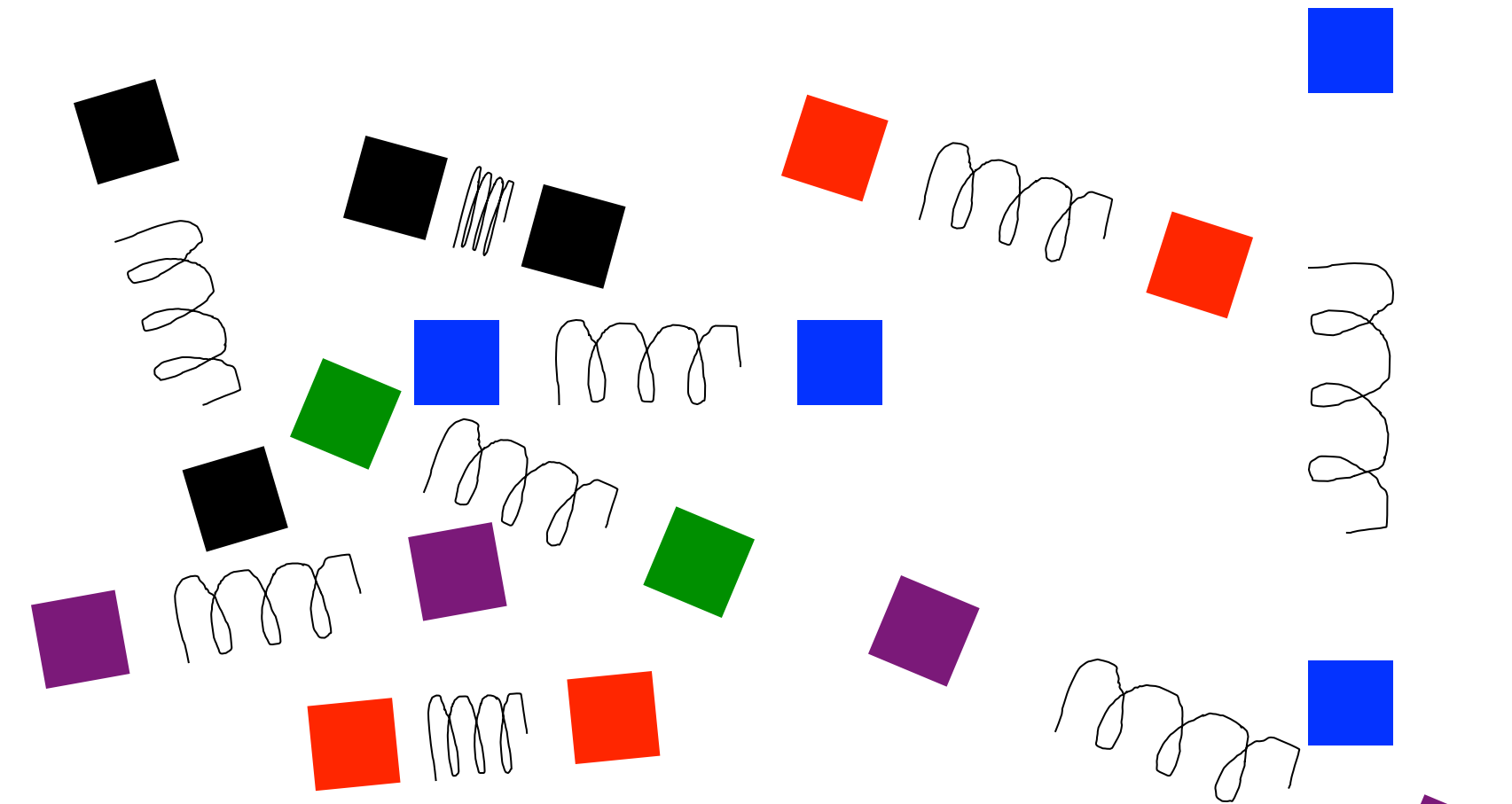
S'il y a plusieurs systèmes avec des ressorts identiques, on doit associer les cubes deux par deux en respectant deux règles:

→ 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

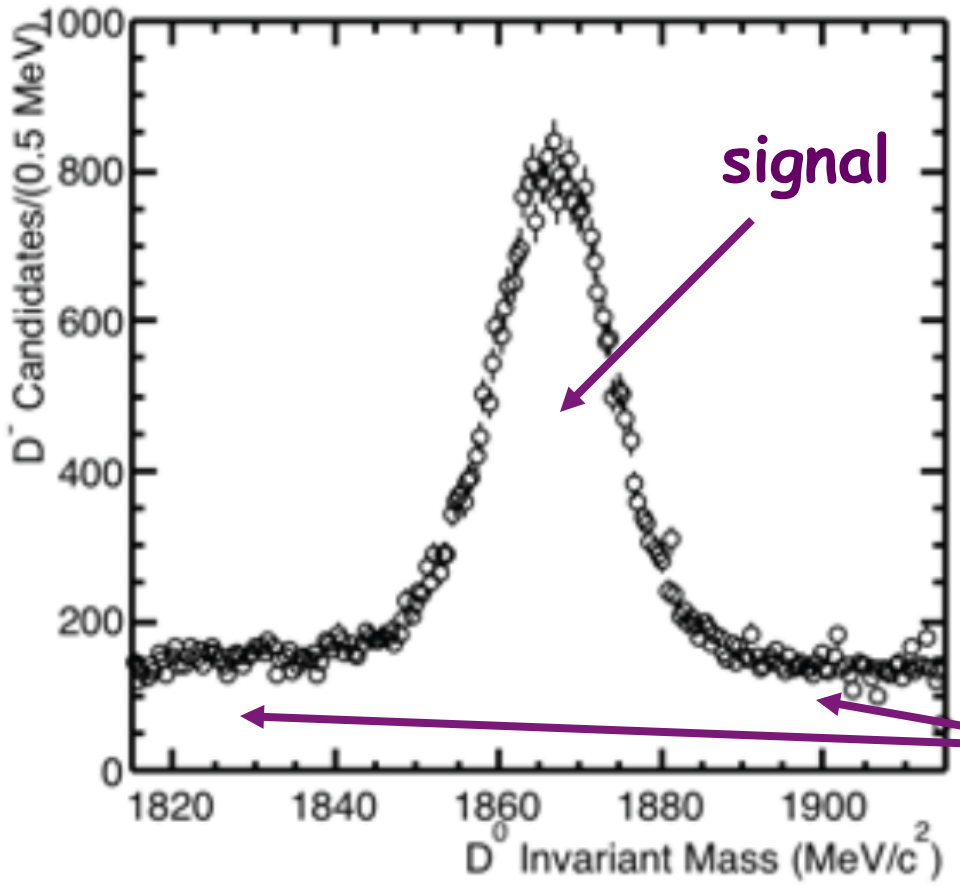
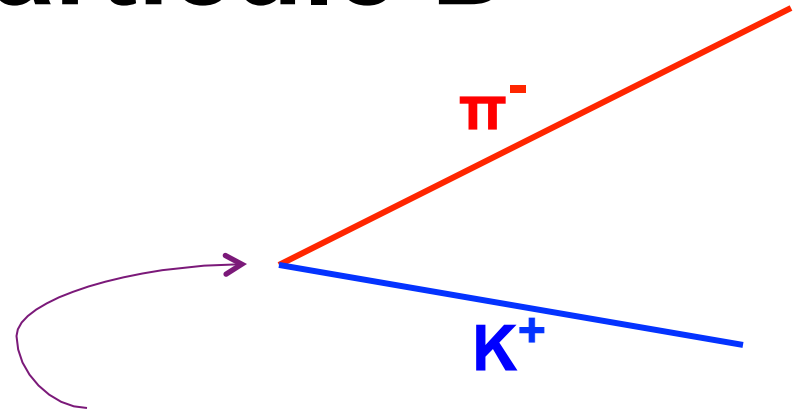
Pas de panique: Hypathia fait le calcul de m pour nous.

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



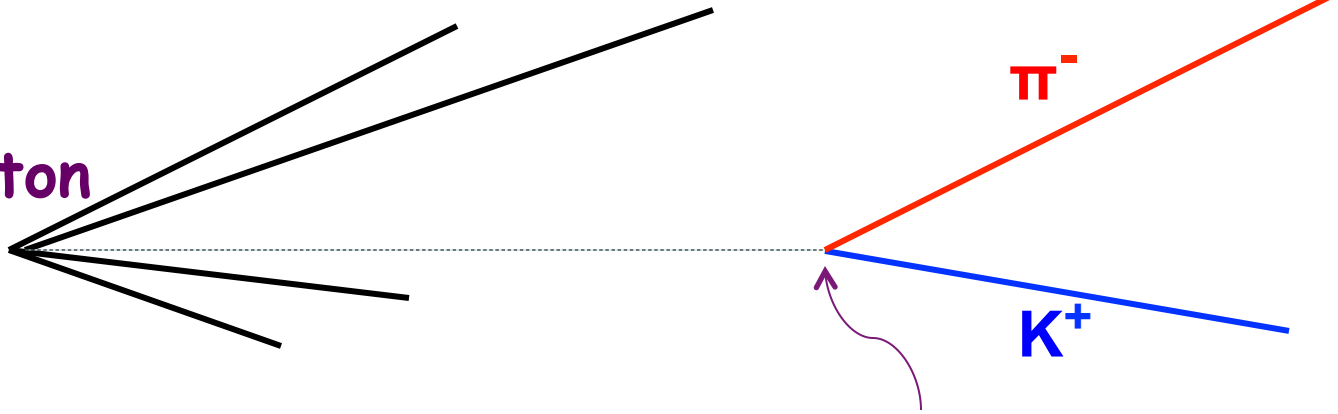
Vertex, ou « sommet » du D^0

Bruit de fond

D^0 est une particules 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)

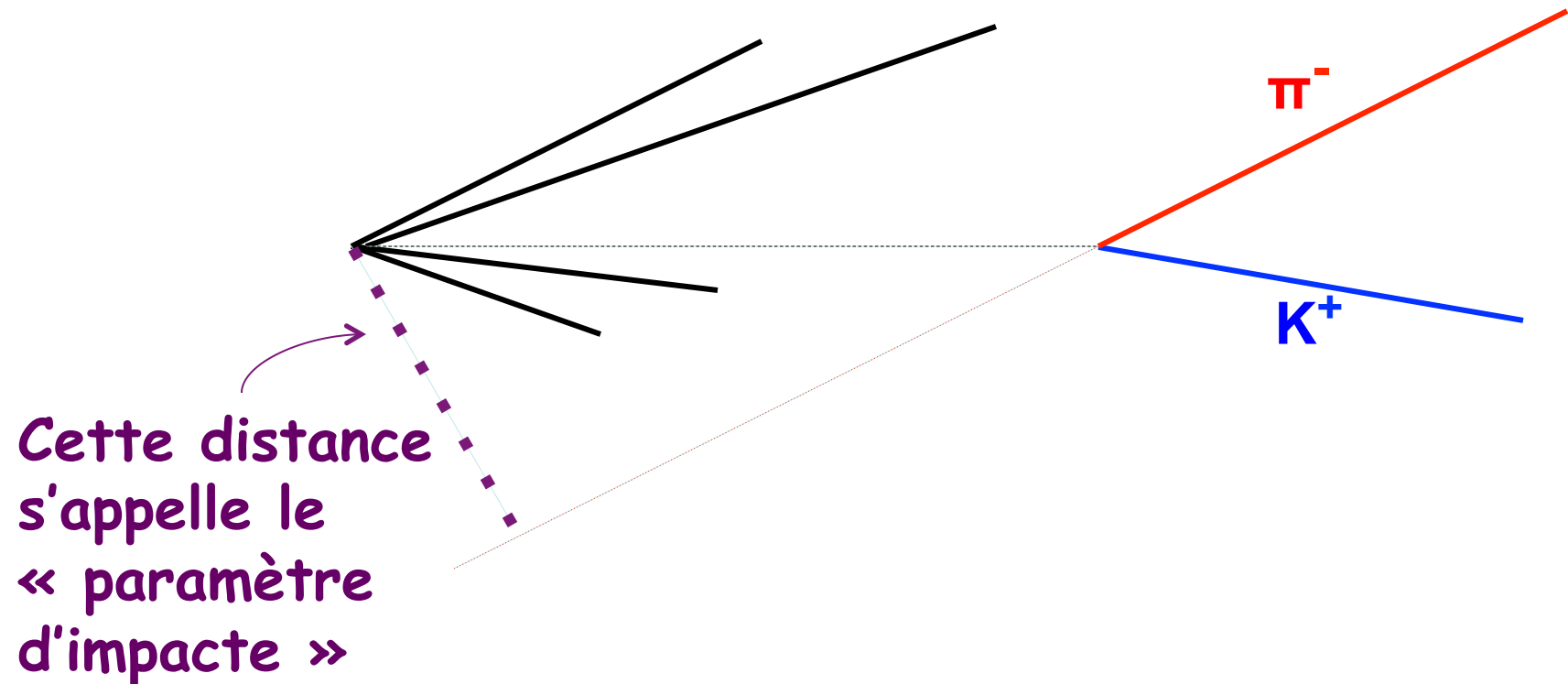
Point de
collision
proton-proton
(vertex
primaire)



Vertex du D^0
(secondaire)

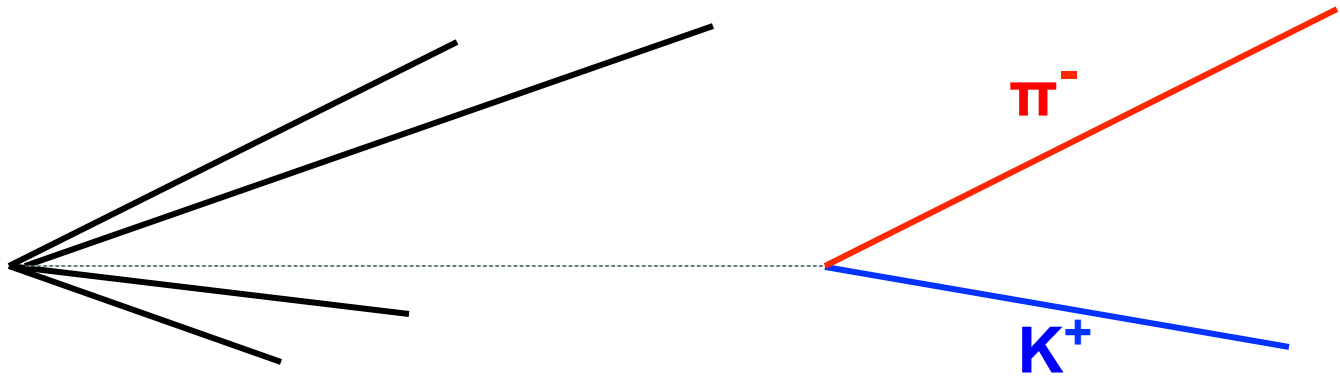
D^0 est une particules avec un temps de vie « long »

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 particules 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

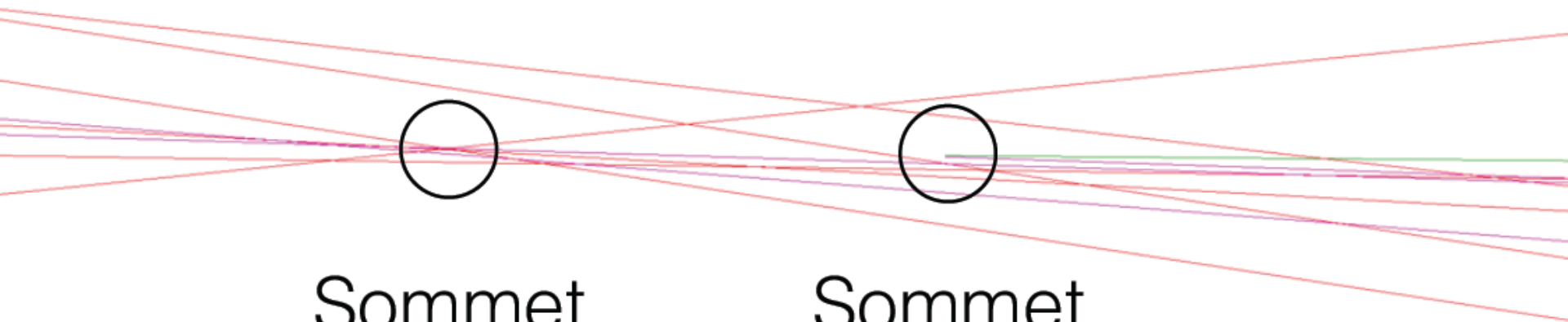
En réalité ça ressemble à ceci...



Sommet
principal



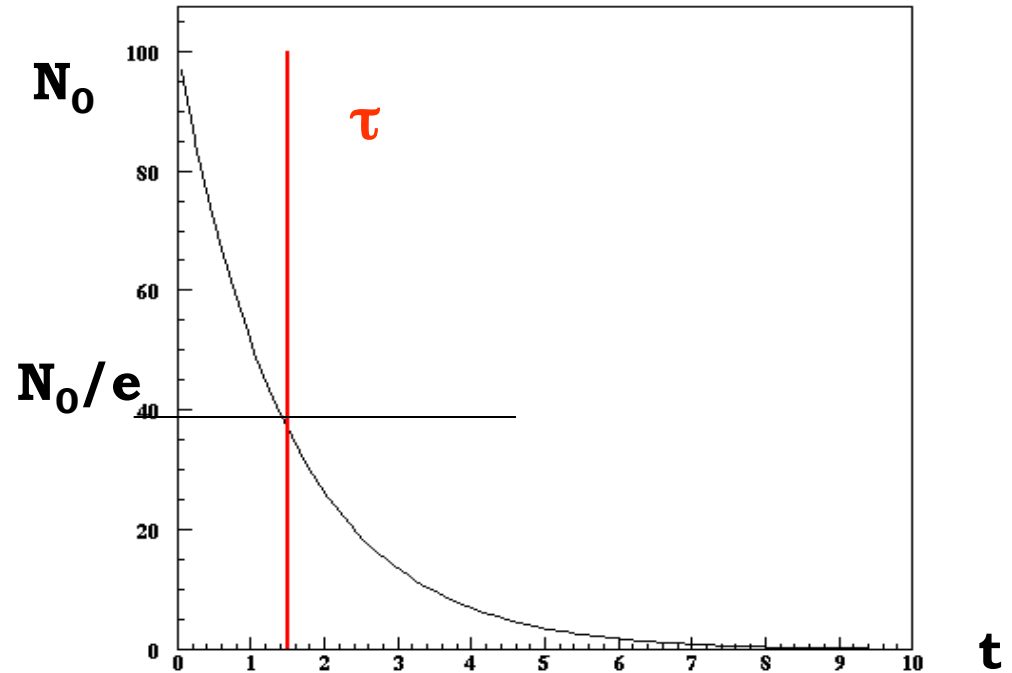
Sommet
secondaire



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
∝ 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)

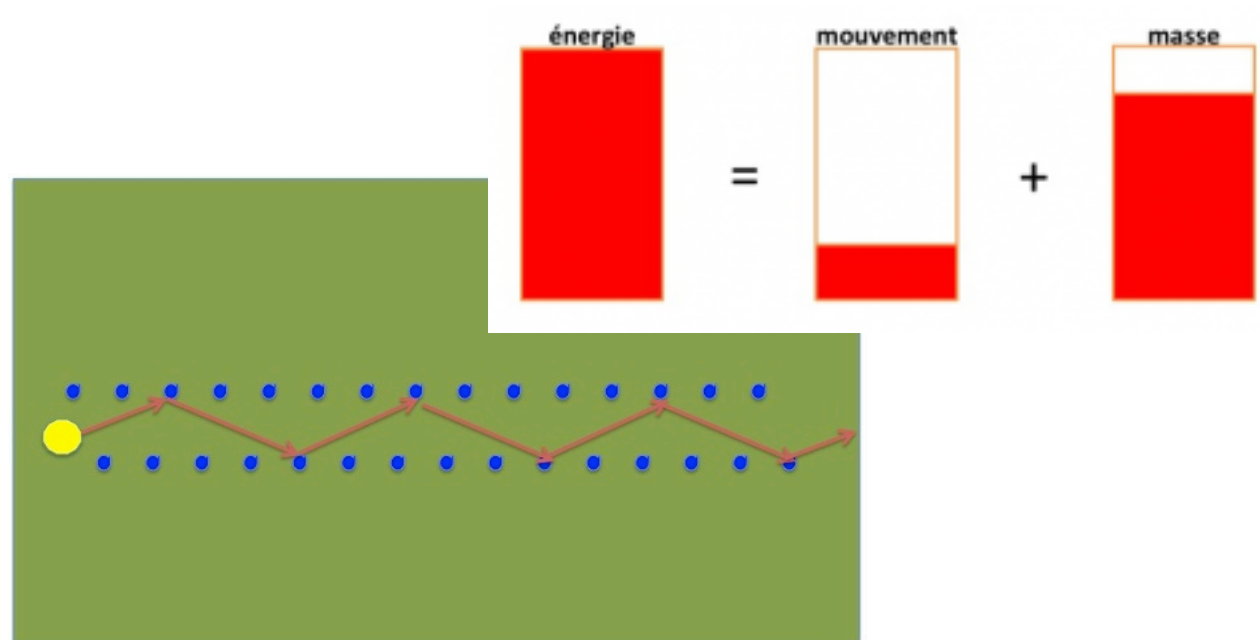
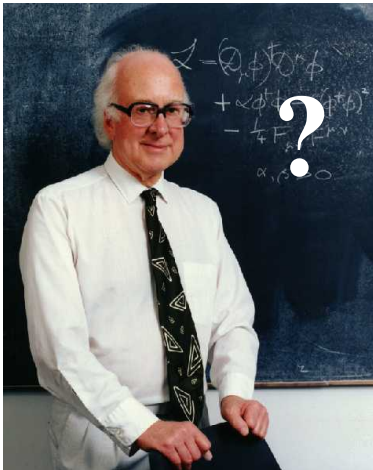
Le boson de Higgs

La problématique de la masse des particules

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

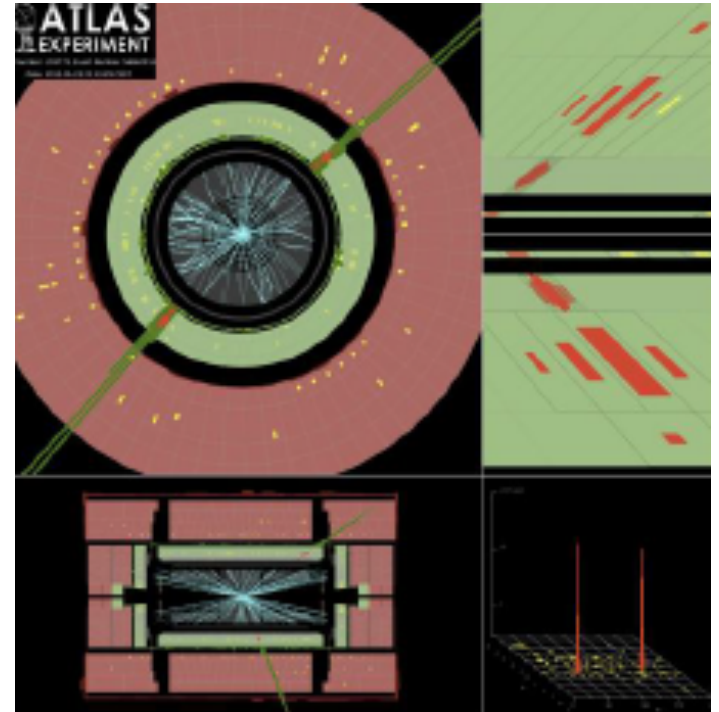
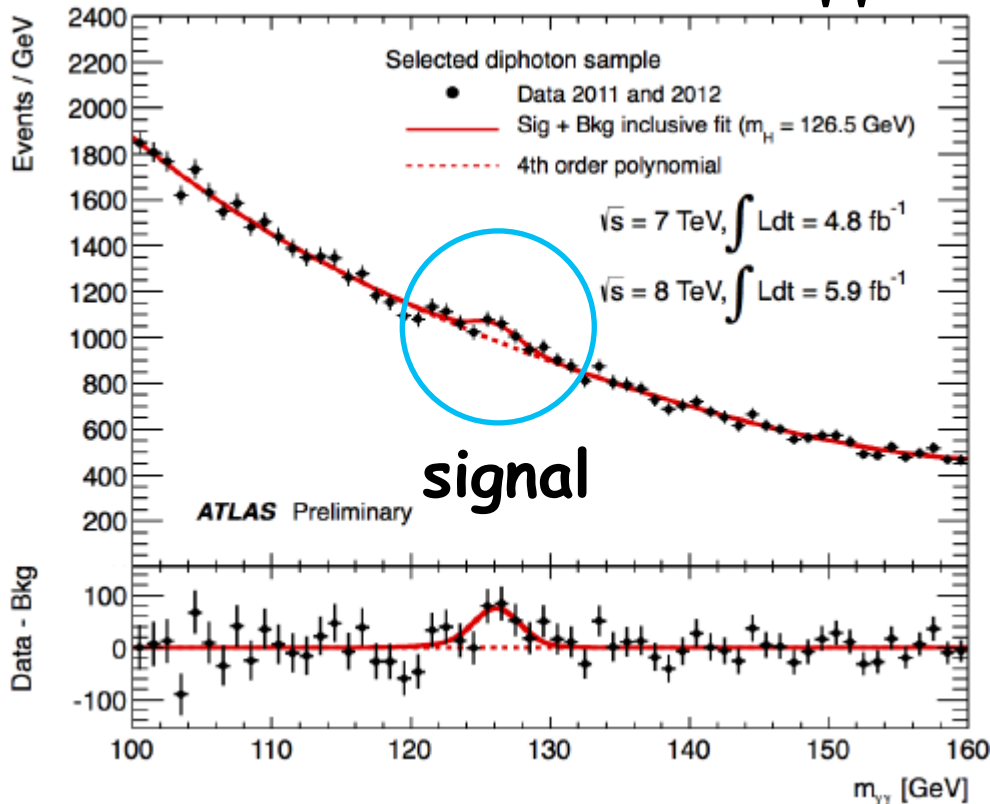
les particules acquièrent leur masse en interagissant avec le « champs de Higgs »

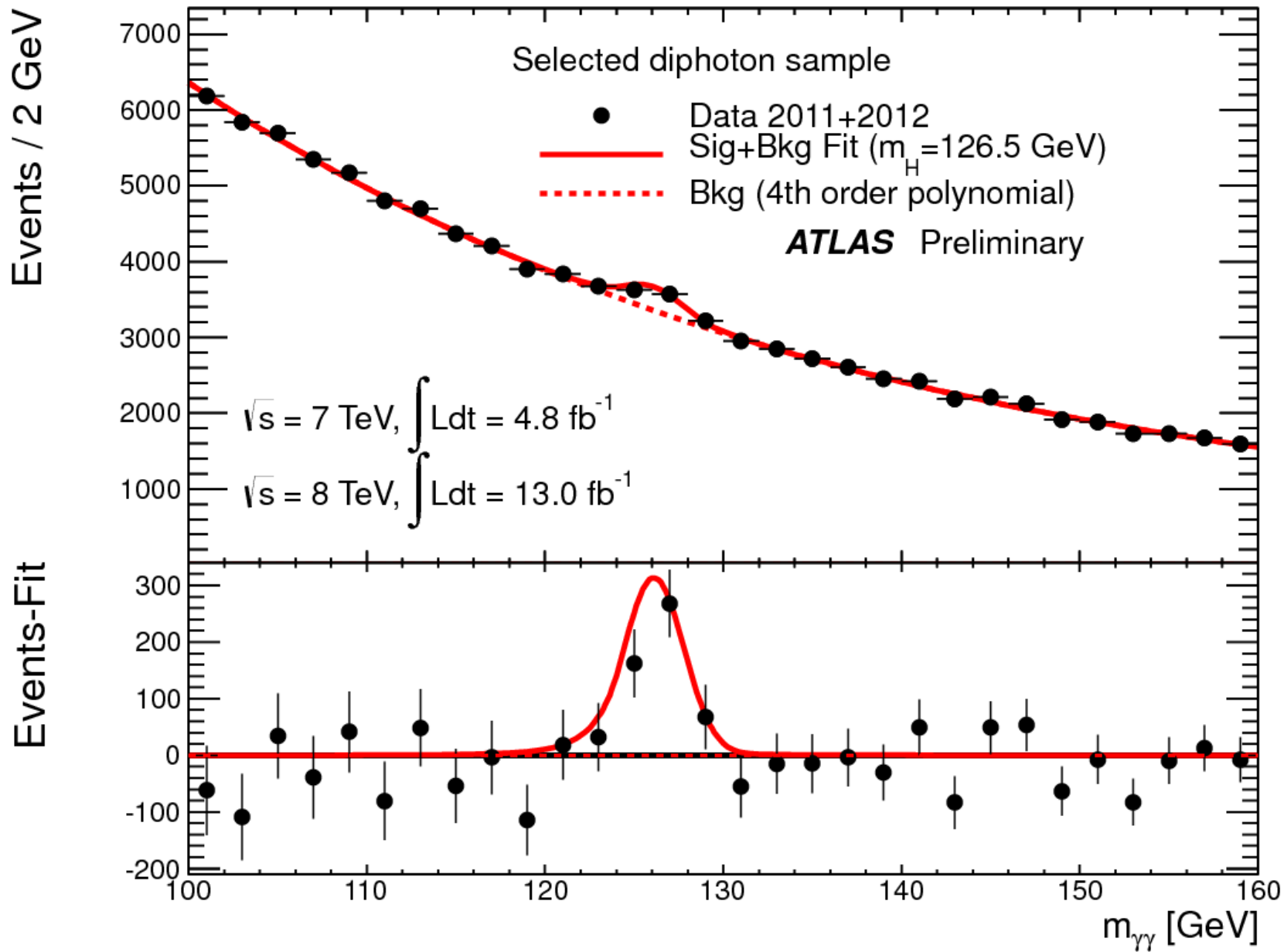
Intensité de l'interaction proportionnelle à la masse

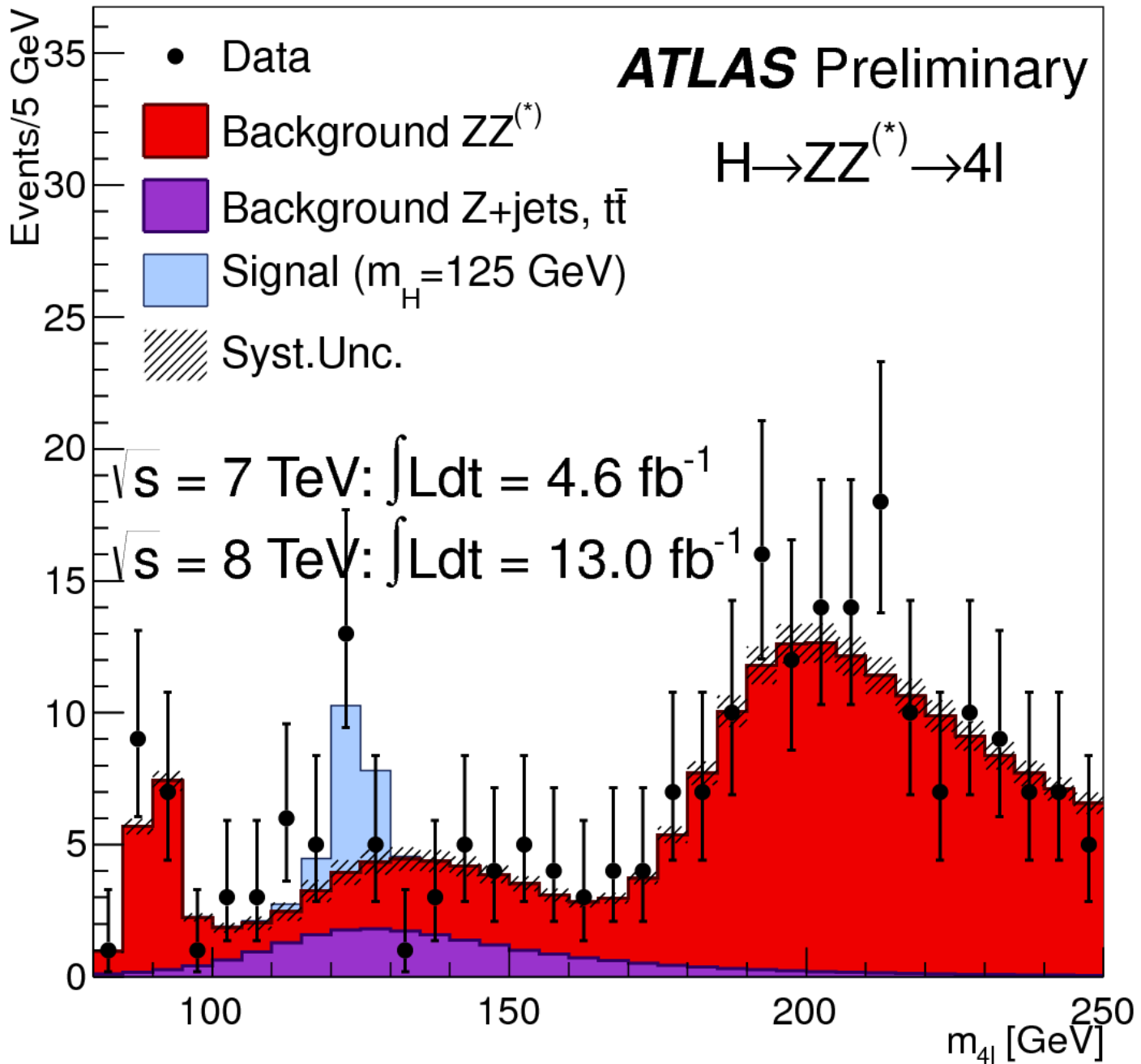


Sa découverte a été annoncée par ATLAS et CMS le 4 juillet 2012

Masse invariante $H \rightarrow \gamma\gamma$





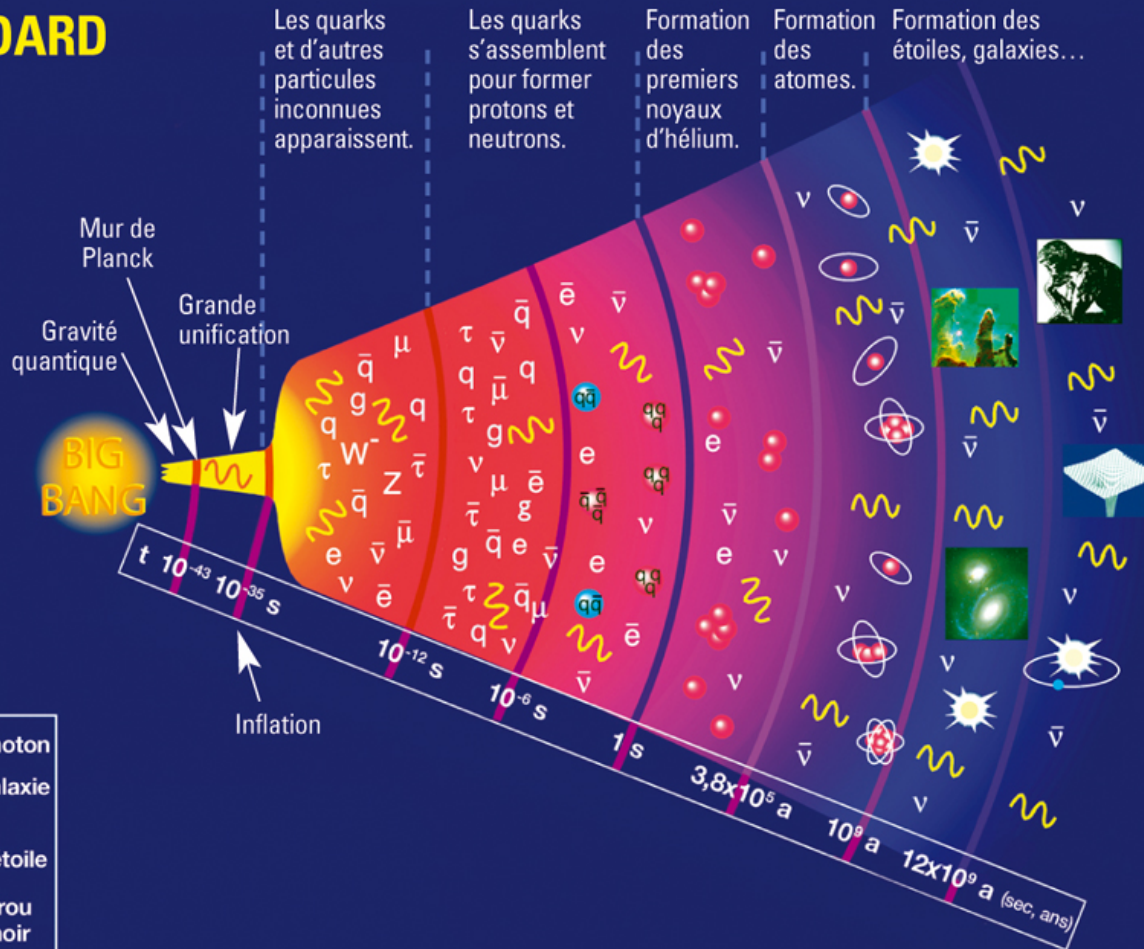


Lien entre l'infiniment petit et l'infiniment grand... Le « big bang »

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.

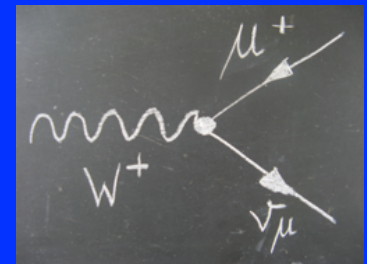
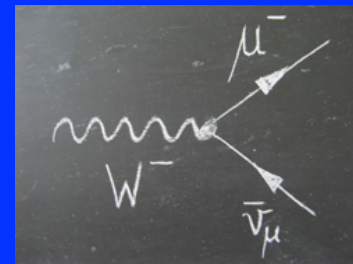
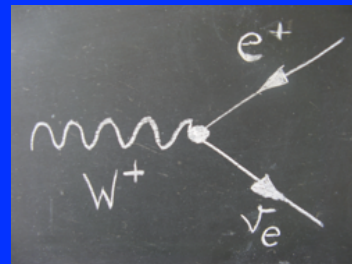
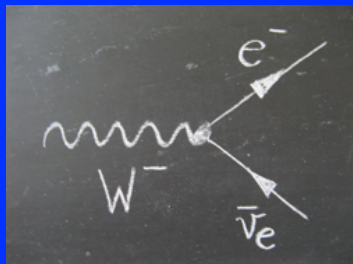
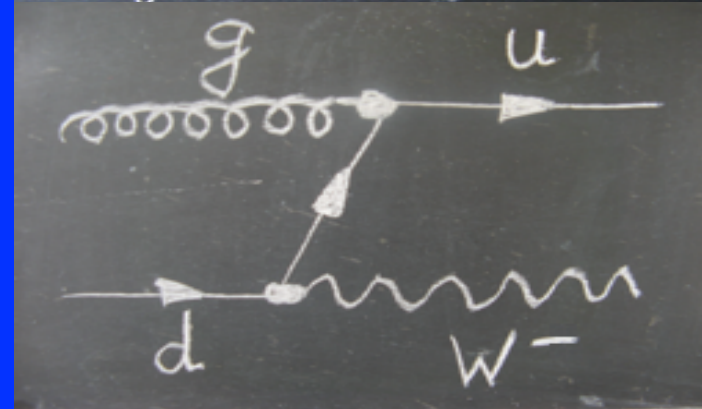
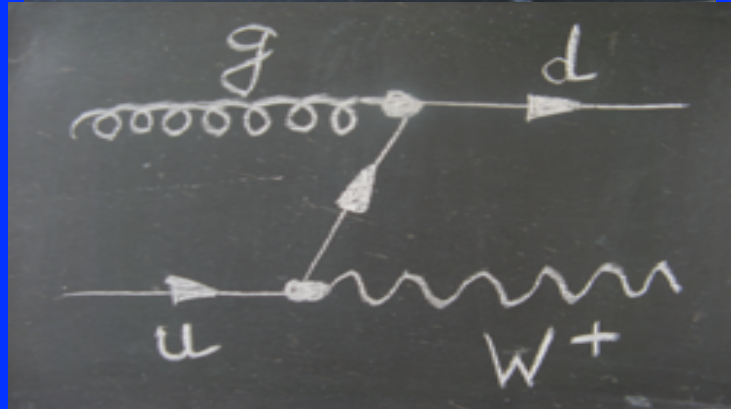
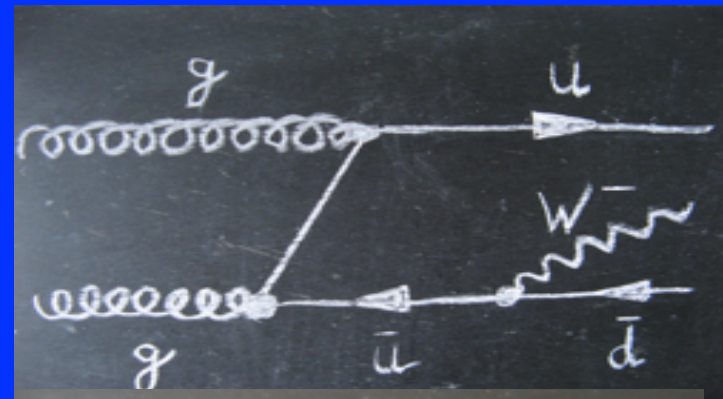
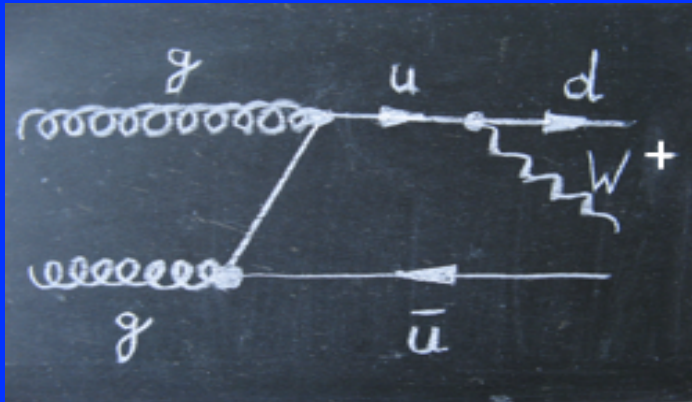


Légendes		
W, Z bosons		photon
q quark		galaxie
g gluon		baryons
e électron		ions
μ muon		τ tau
ν neutrino		atome
		étoile
		trou noir

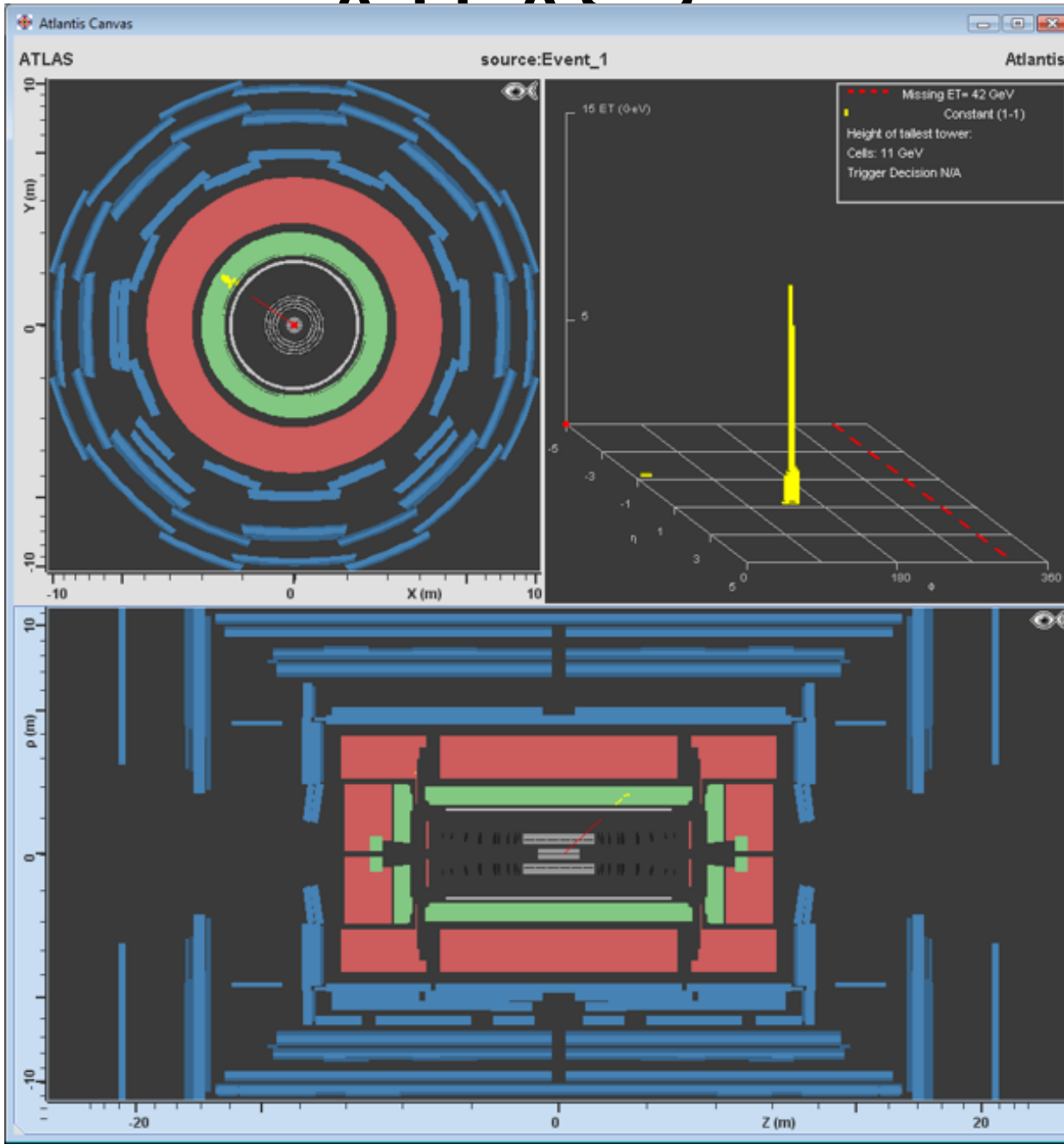
96% de l'univers composé de matière/énergie noire...

réserve

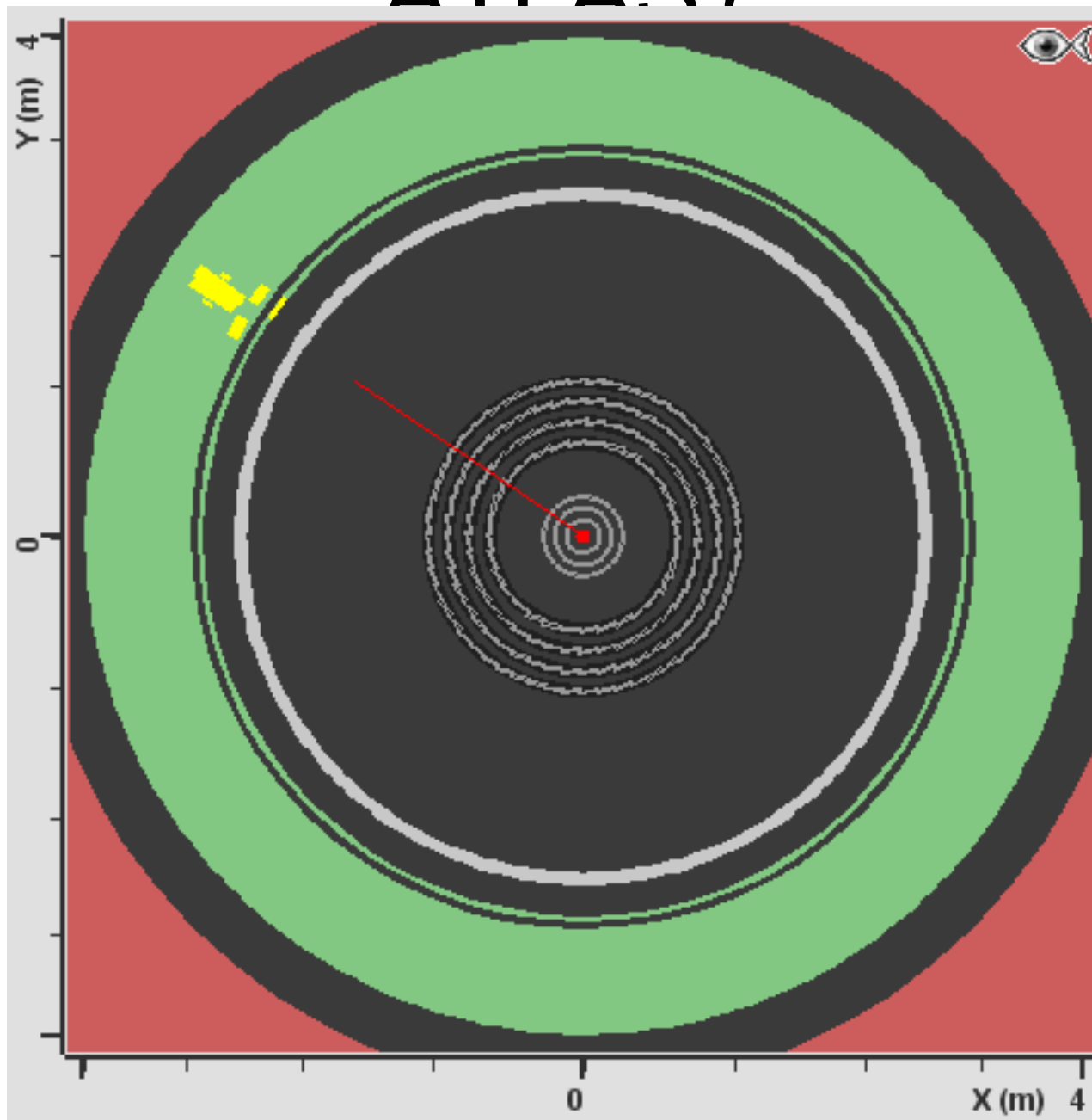
Production et désintégrations de W

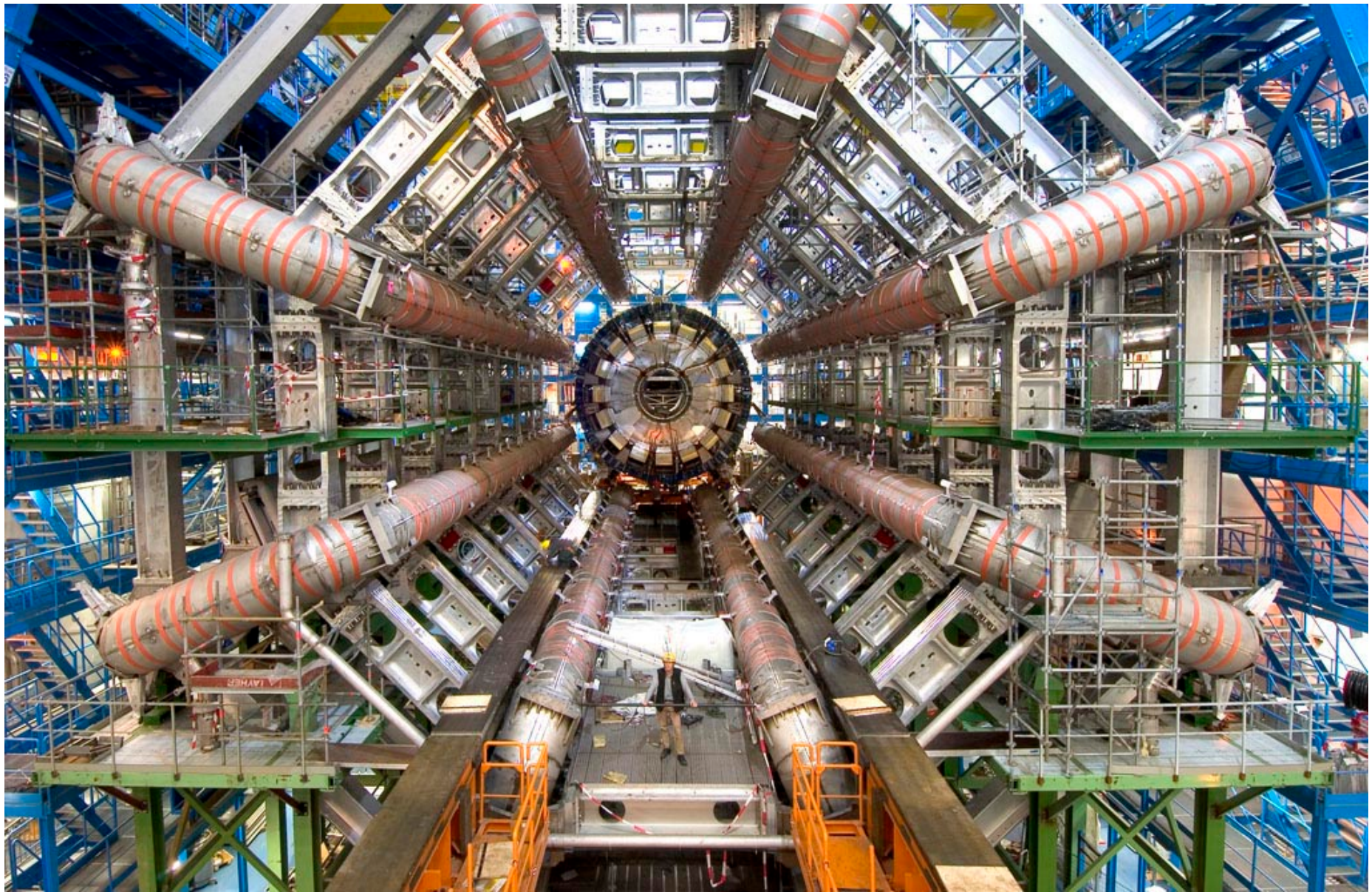


COMMITMENT VOI-FORMES traces a ATLAS

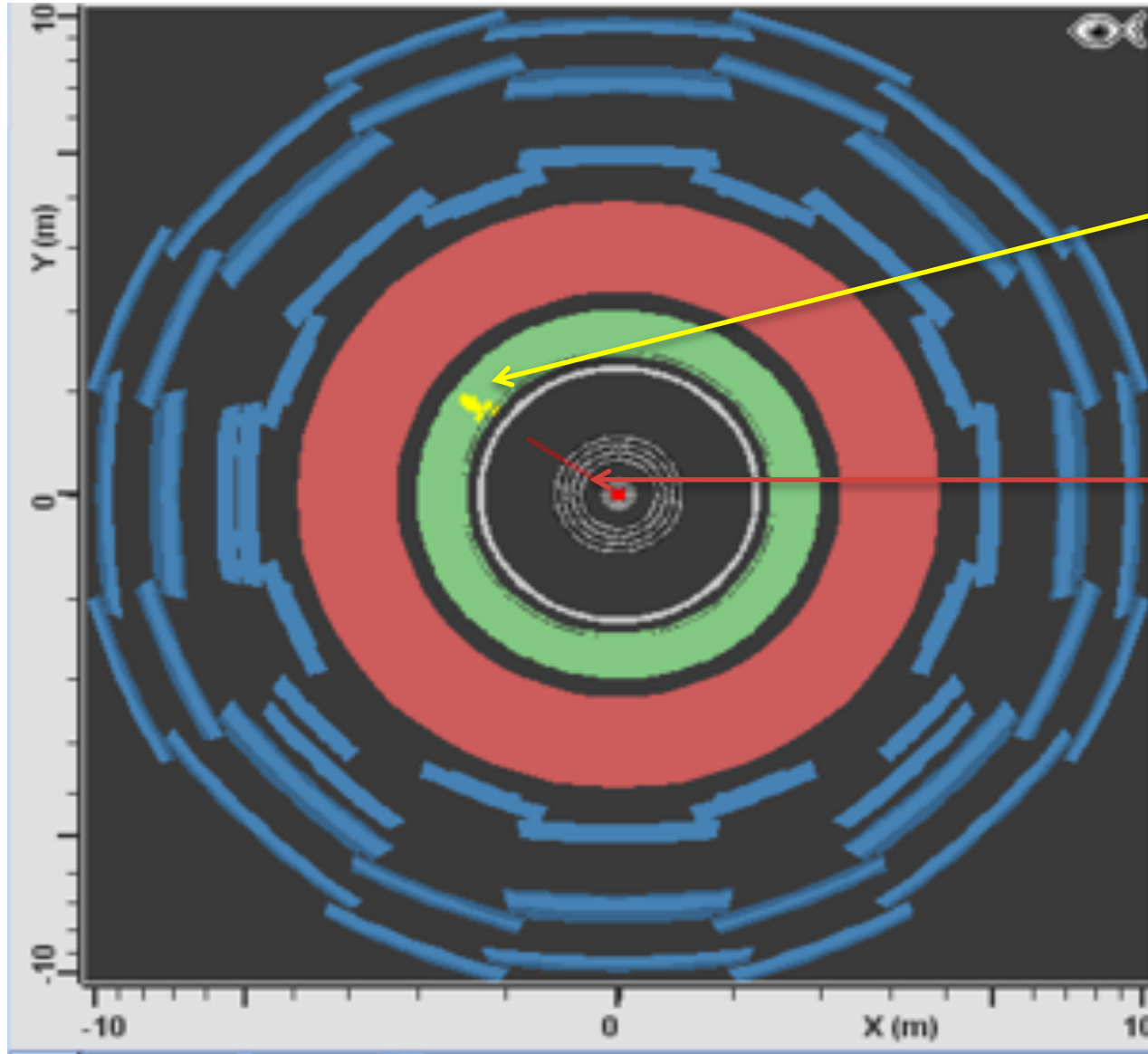


ATI AS?





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

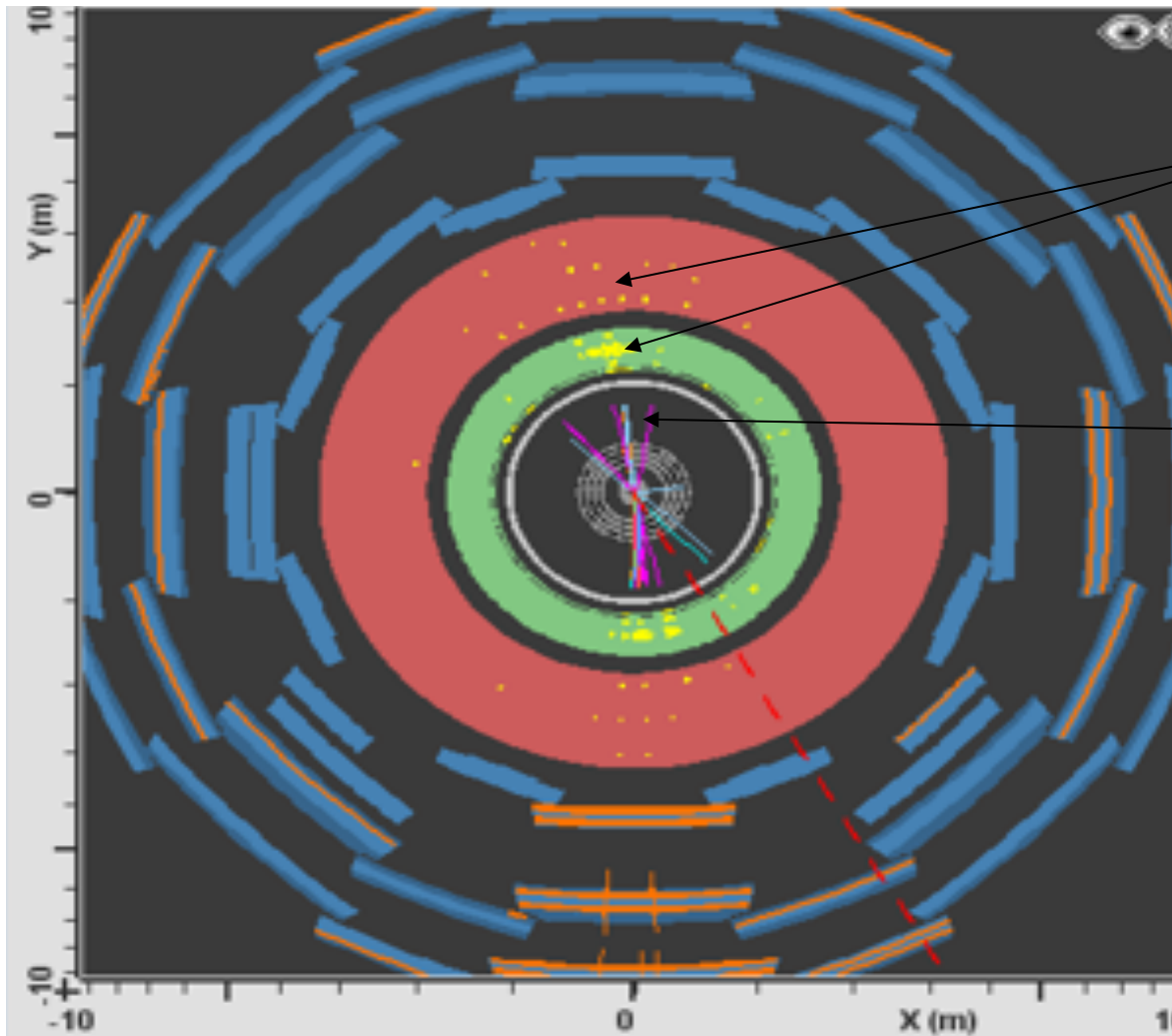
Et le photon ?

Et d'autres particules chargées ?

Comment voit-on un quark dans ATLAS?

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

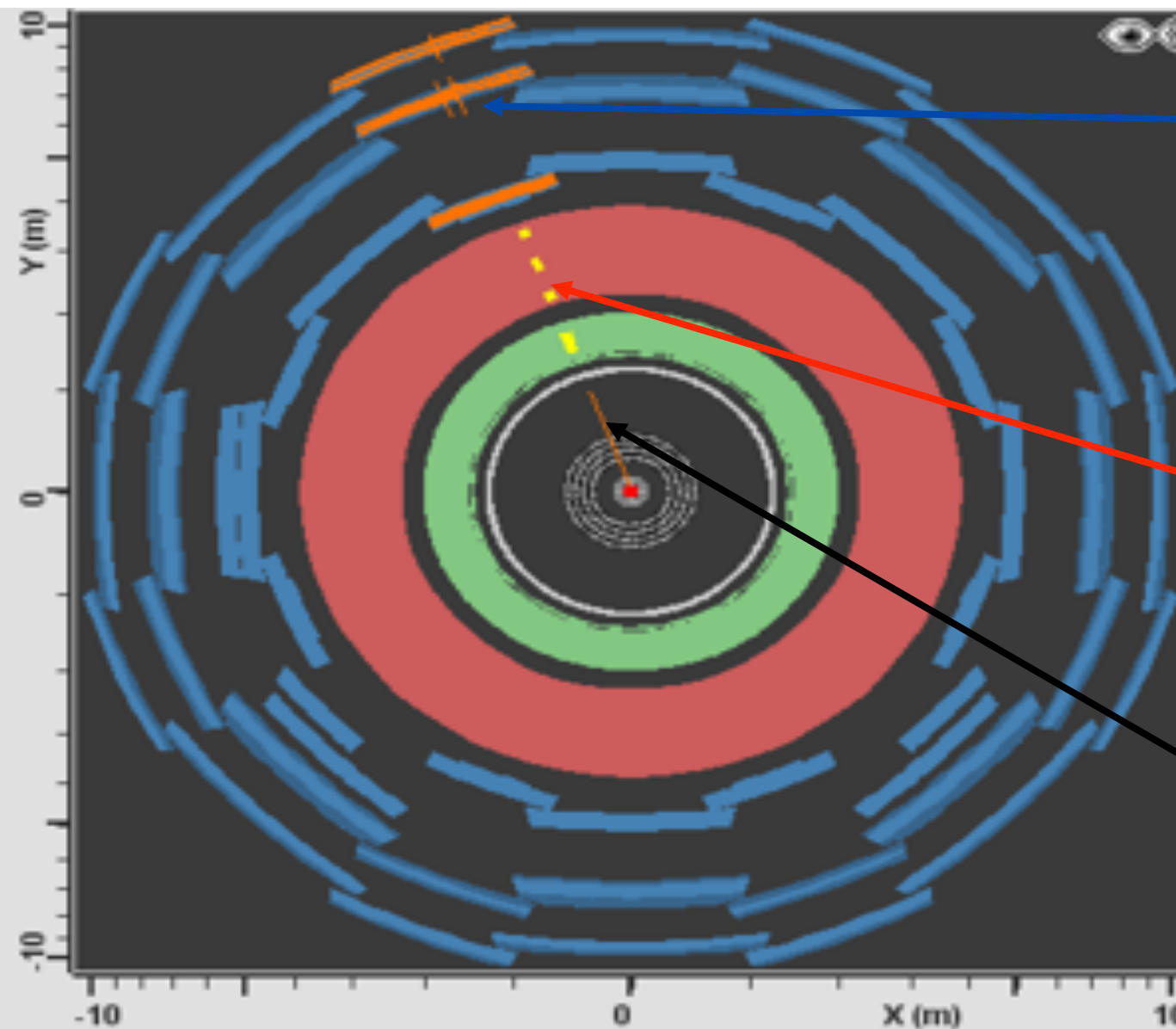
- Les quarks n'existent pas à l'état libre!
→ Jet: groupe de hadrons allant dans la même direction que le quark initial



Dépot d'énergie dans les deux calorimètres

Plusieurs traces

Comment voit-on un muon dans ATLAS?

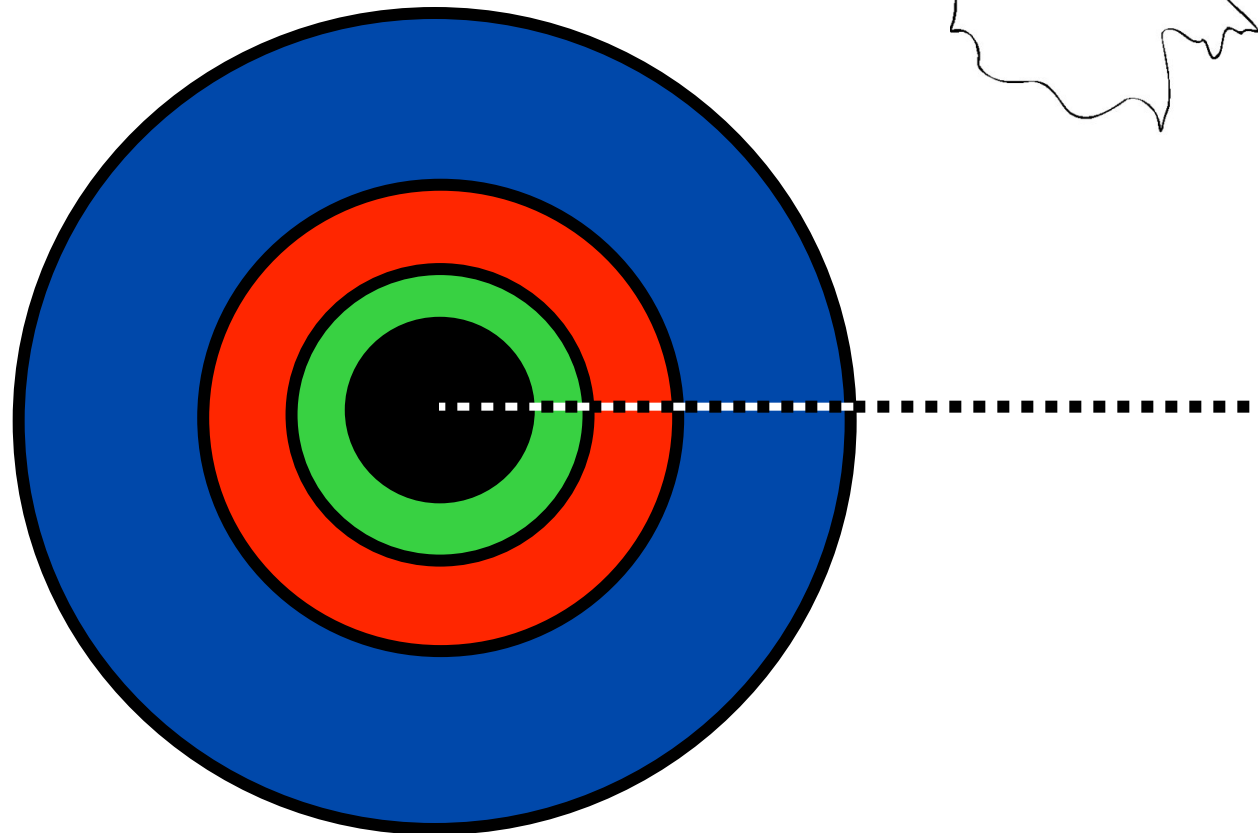


Chambres à muons touchées

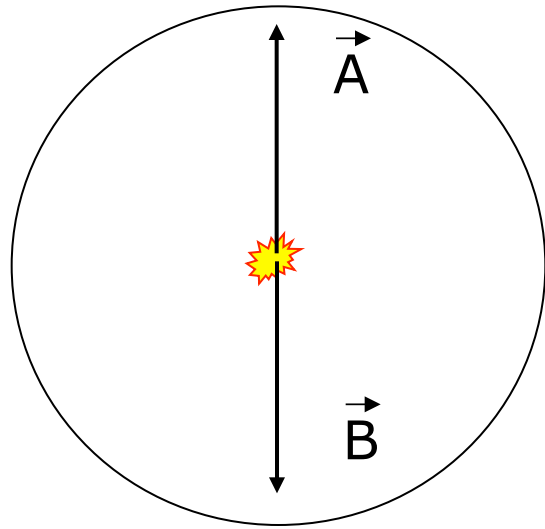
Faibles dépôts d'énergie dans les calorimètres électromagnétique et hadronique

Trace visible dans le détecteur de traces

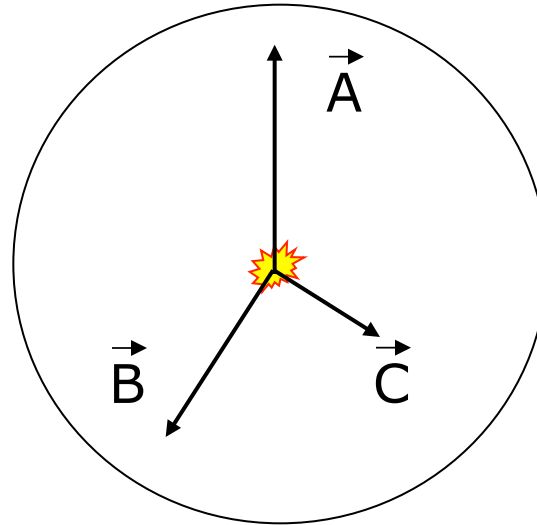
Et le neutrino?



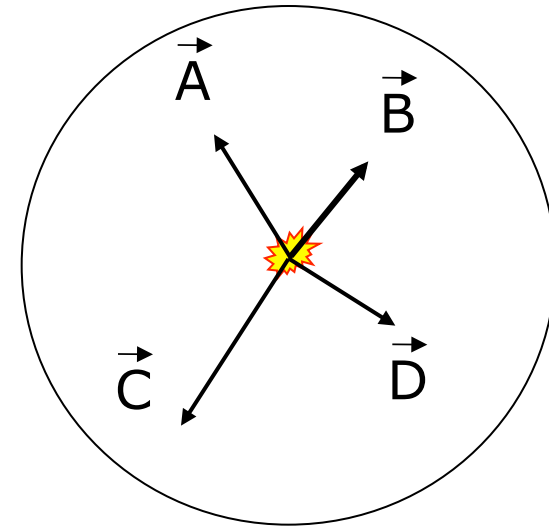
L' énergie transverse manquante



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



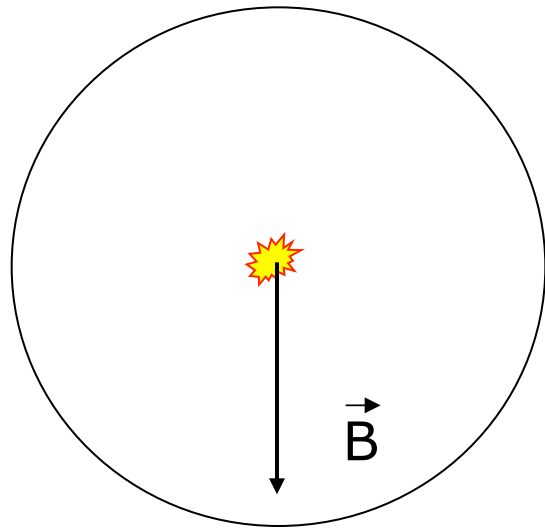
$$\vec{A} + \vec{B} + \vec{C} = \vec{0}$$



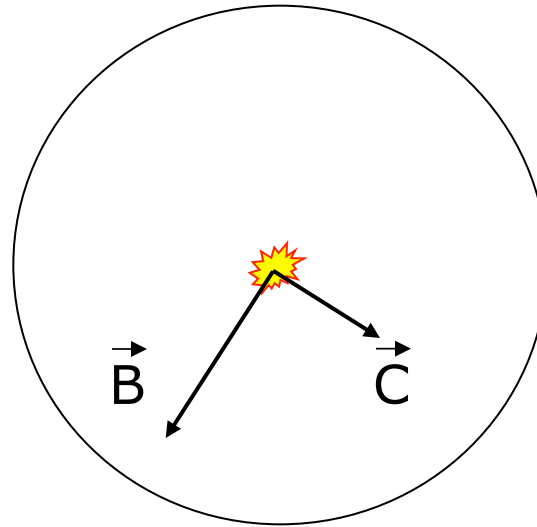
$$\vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = \vec{0}$$

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

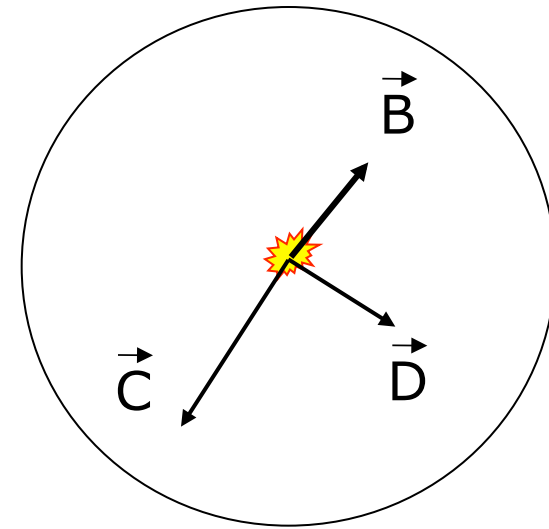
L' énergie transverse manquante



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



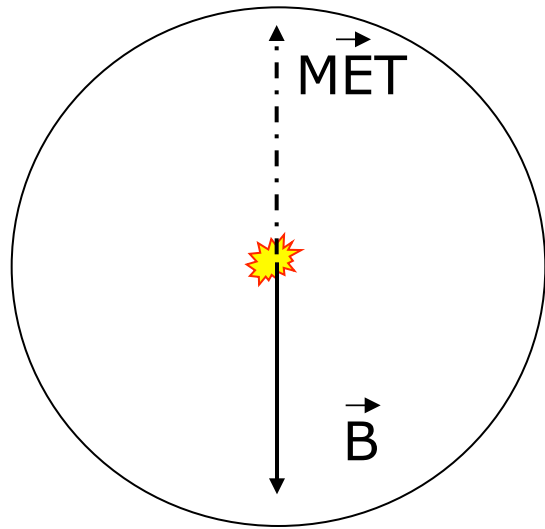
$$\vec{B} + \vec{C} \neq 0$$



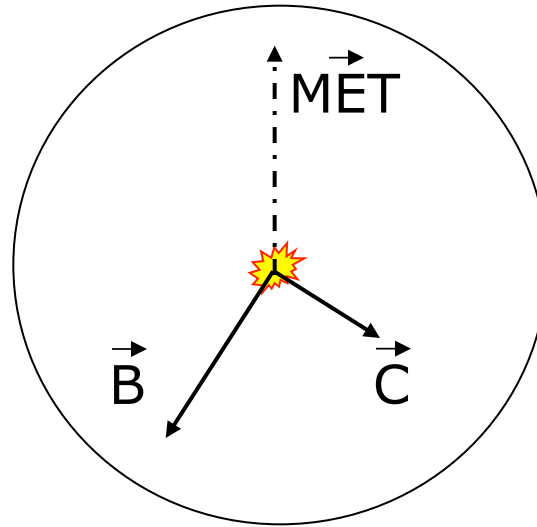
$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} \neq 0$$

- 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

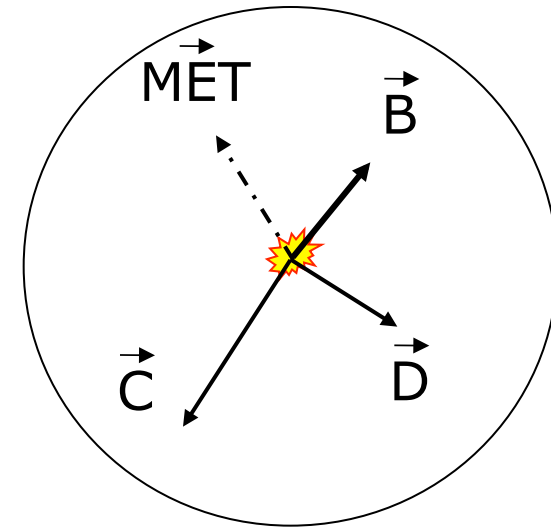
L' énergie transverse manquante (MET)



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



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

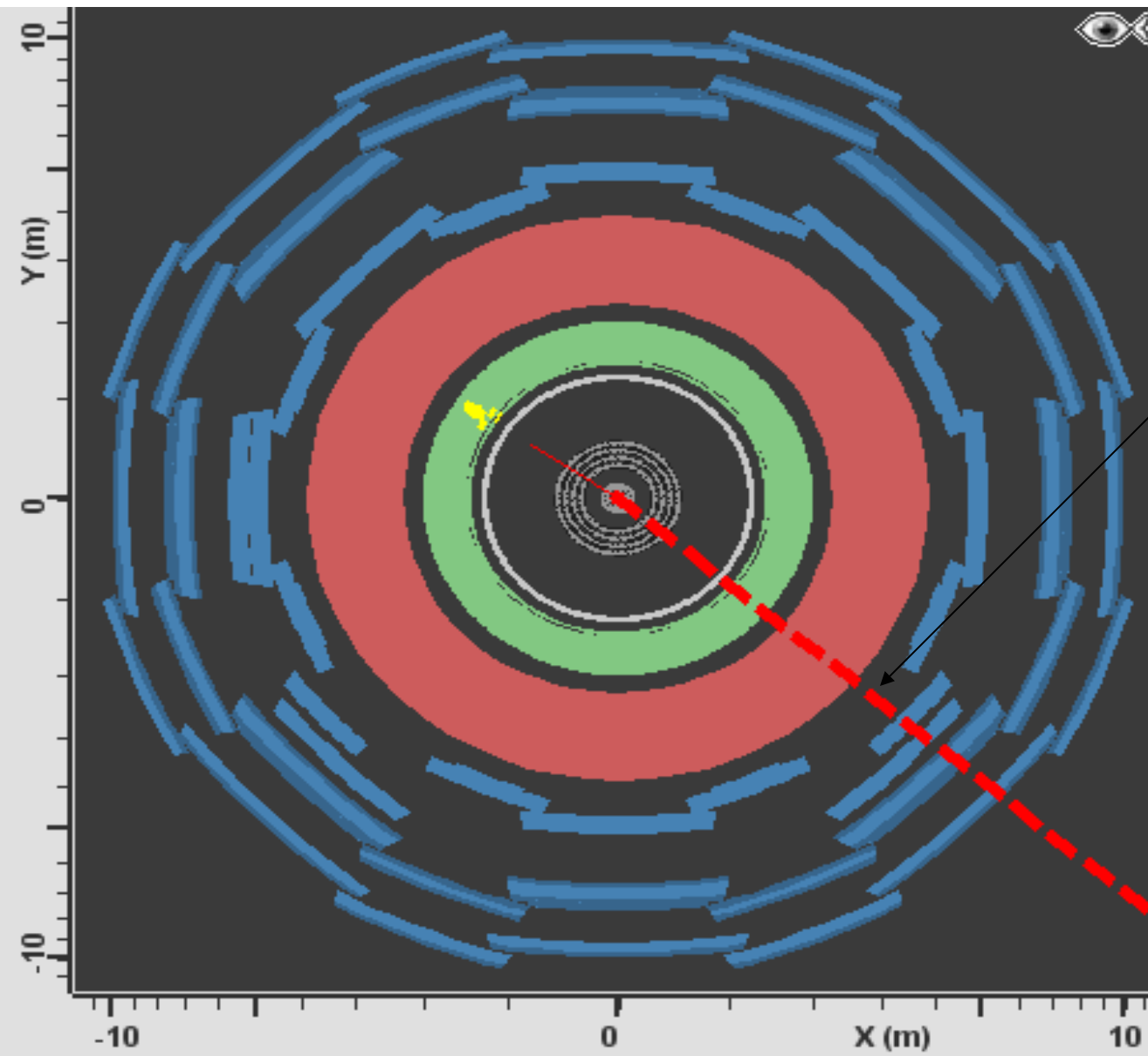


$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = -\vec{MET}$$

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

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

L' énergie transverse manquante



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

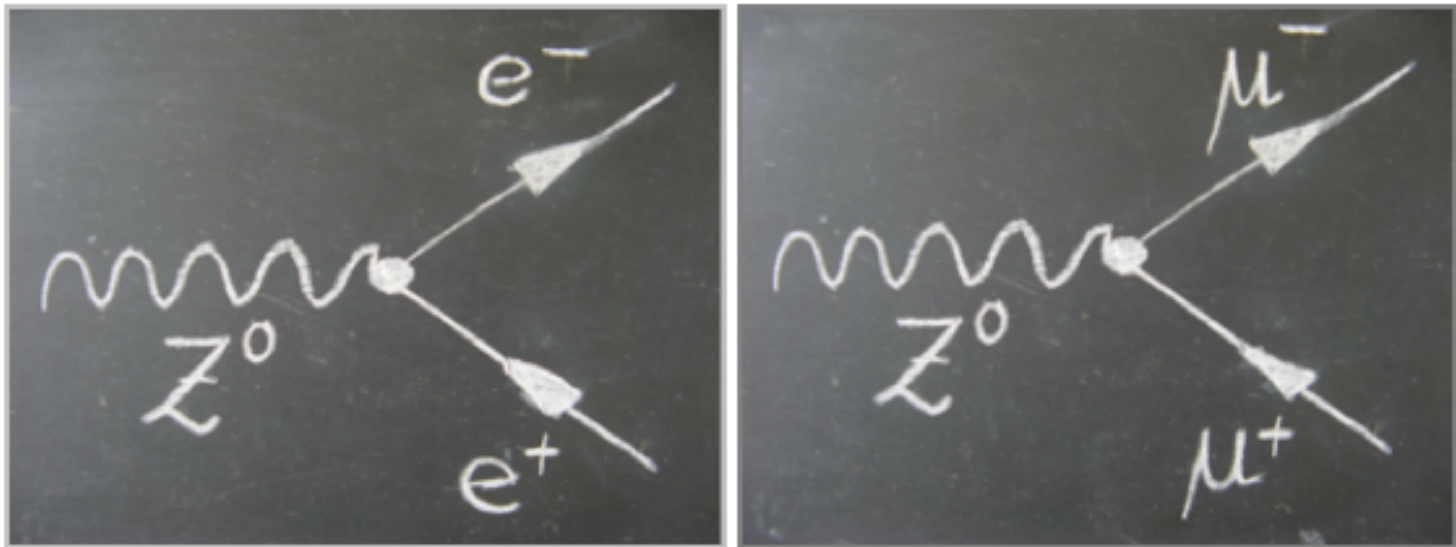
Dans cet exemple, le neutrino est dos à dos avec la particule chargée

Les désintégrations du Z^0

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

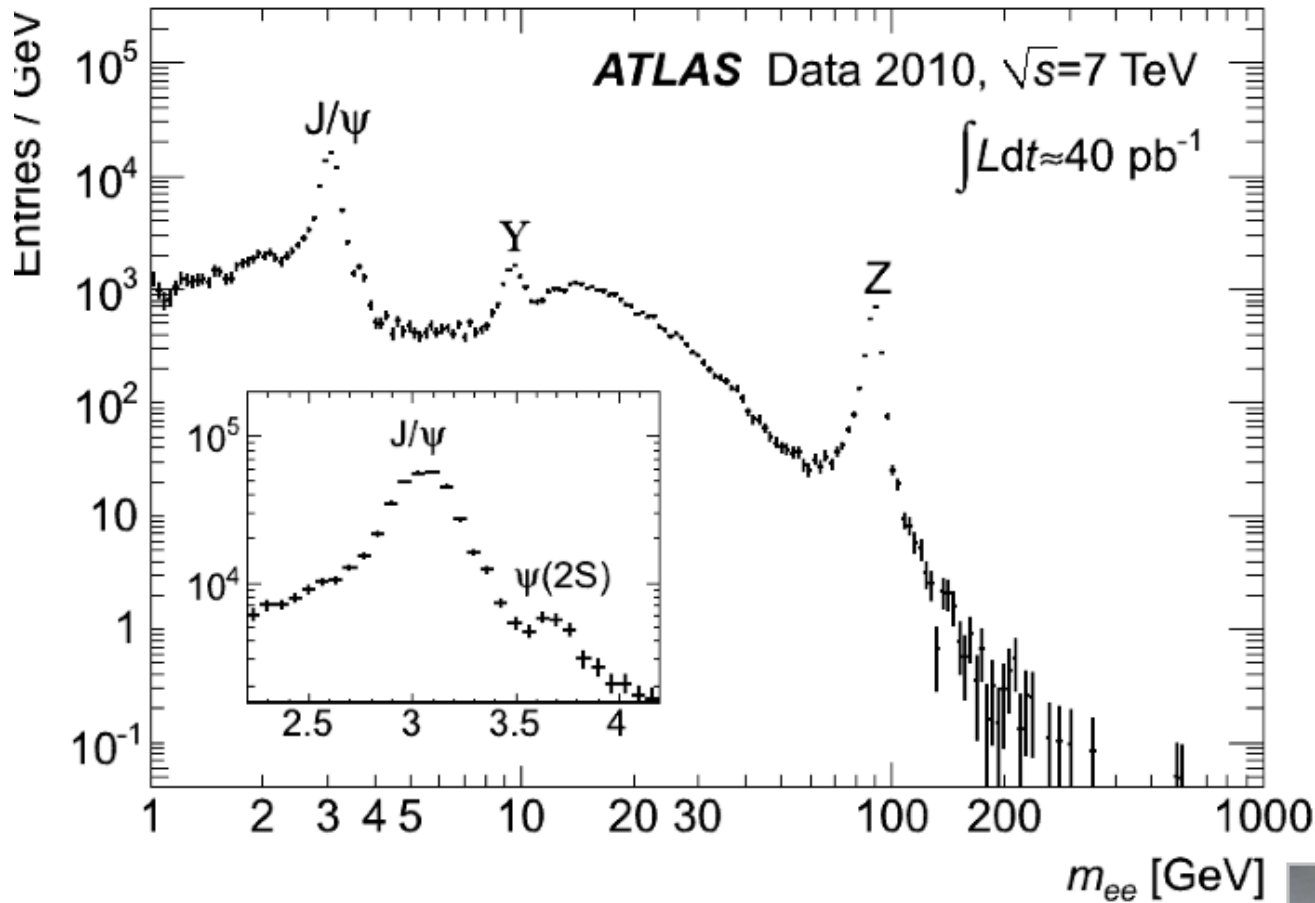
- une paire quark – anti quark (70 % des cas), non considérées ici
- une paire neutrino – anti neutrino (20 % des cas), non considérées
- une **paire lepton chargé – anti lepton, de la même famille**, dans les cas 10% des restants.

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 »

