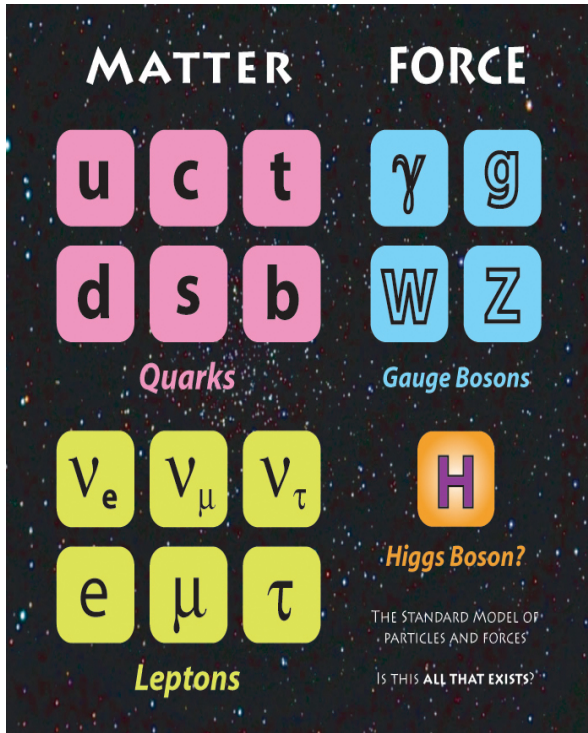


# Le détecteur LHCb

Masterclass @ LAL - 2017

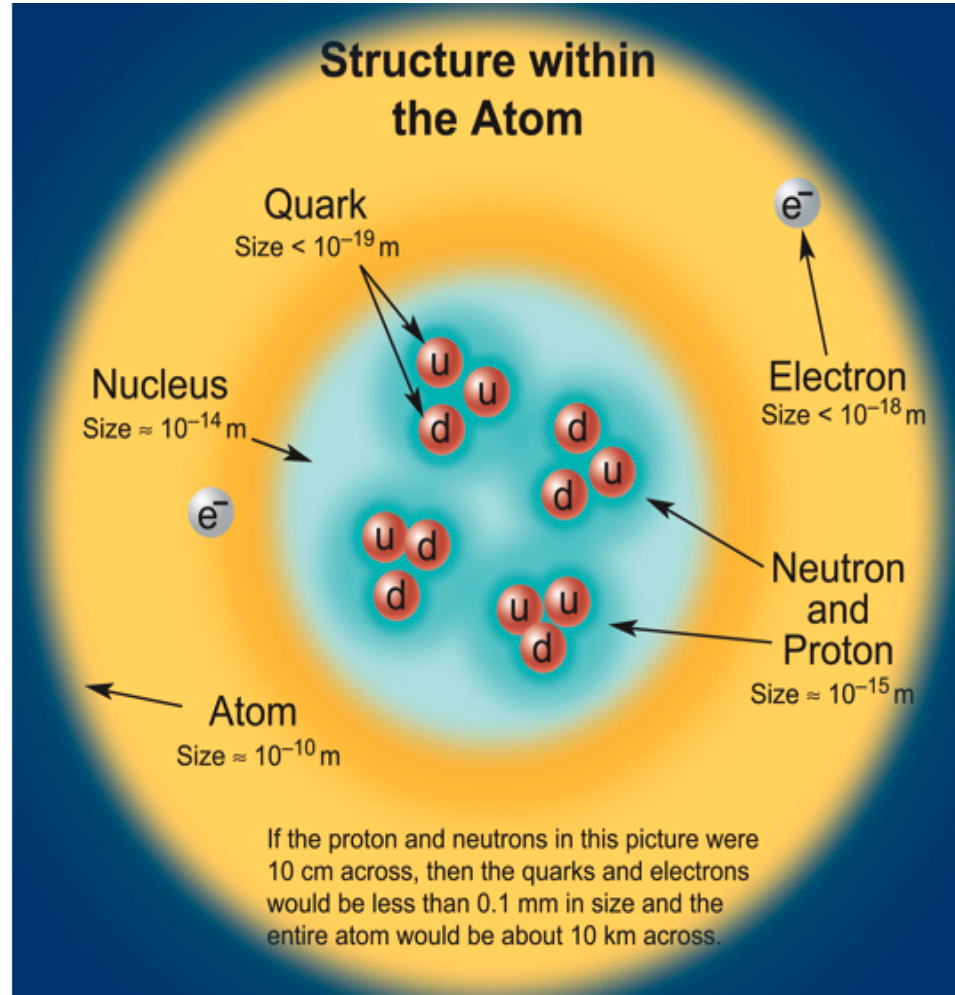
Victor Renaudin & Yasmine Amhis

# Un monde de particules



Il existe un petit nombre de particules fondamentales.

# Plus petites que les atomes



# Il y en a de plusieurs types

**MATTER**

**FORCE**

**Quarks**

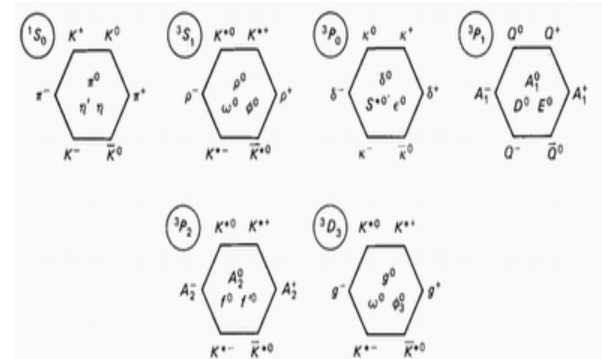
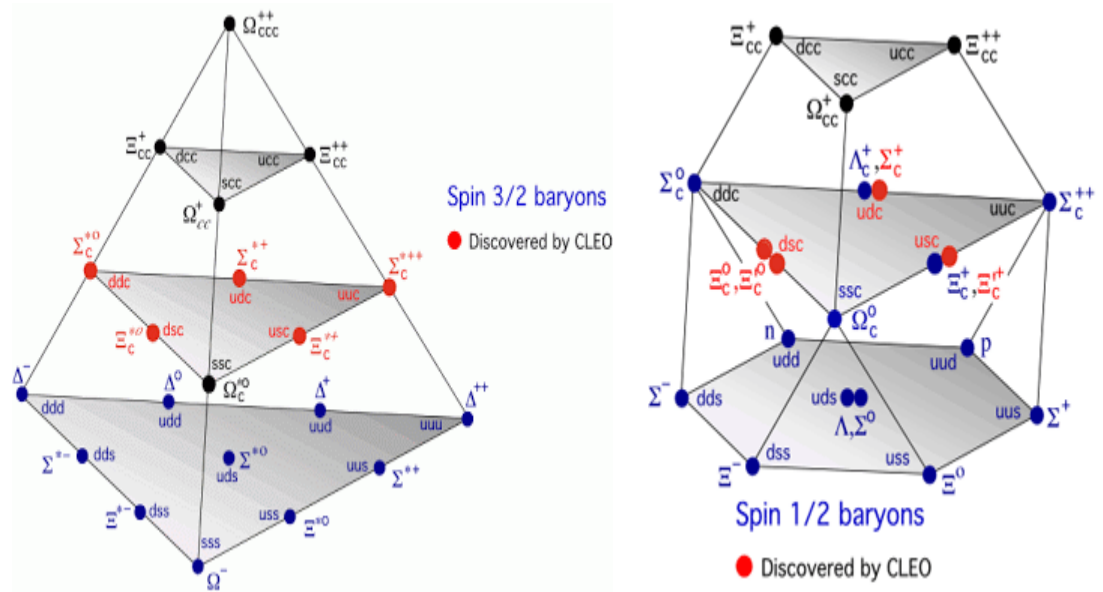
**Gauge Bosons**

**Leptons**

**Higgs Boson?**

THE STANDARD MODEL OF PARTICLES AND FORCES

IS THIS ALL THAT EXISTS?

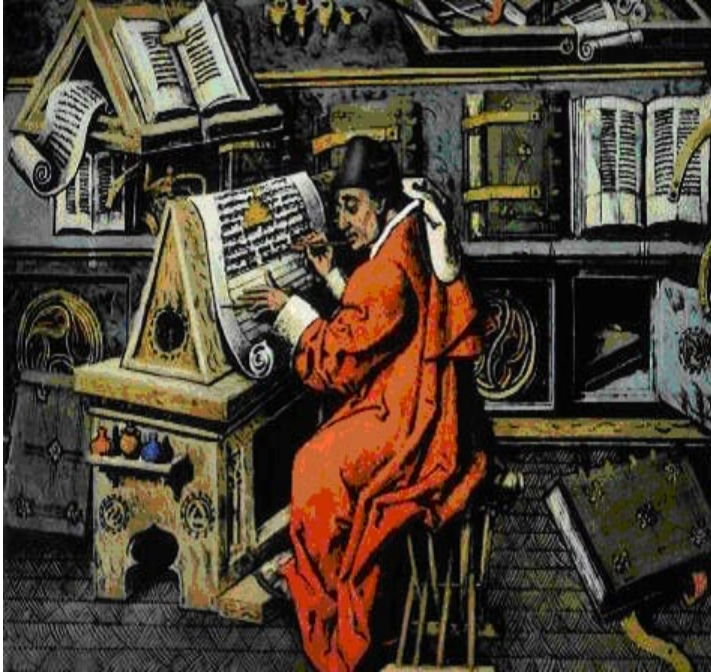


Il existe un petit nombre de particules fondamentales.

Et un tres grand nombre de combinaisons de quarks !

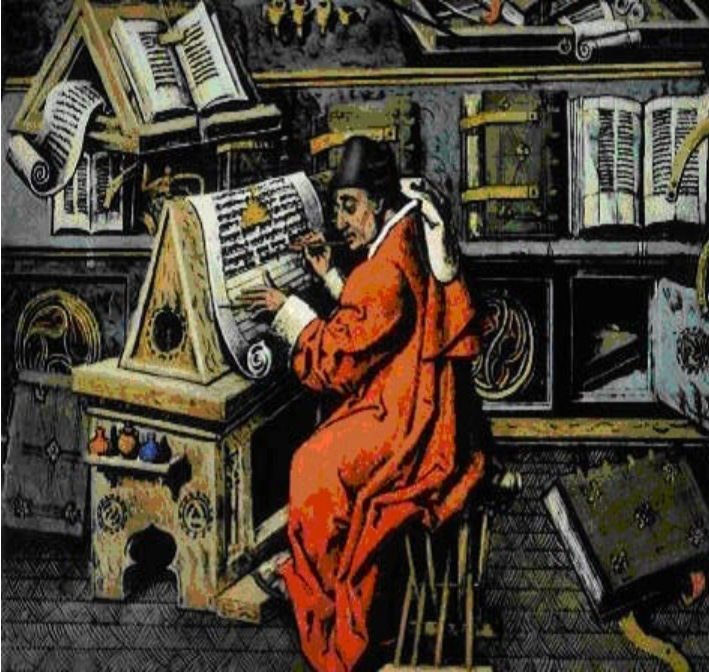


# Quelle sorte de particules existe-t-il?

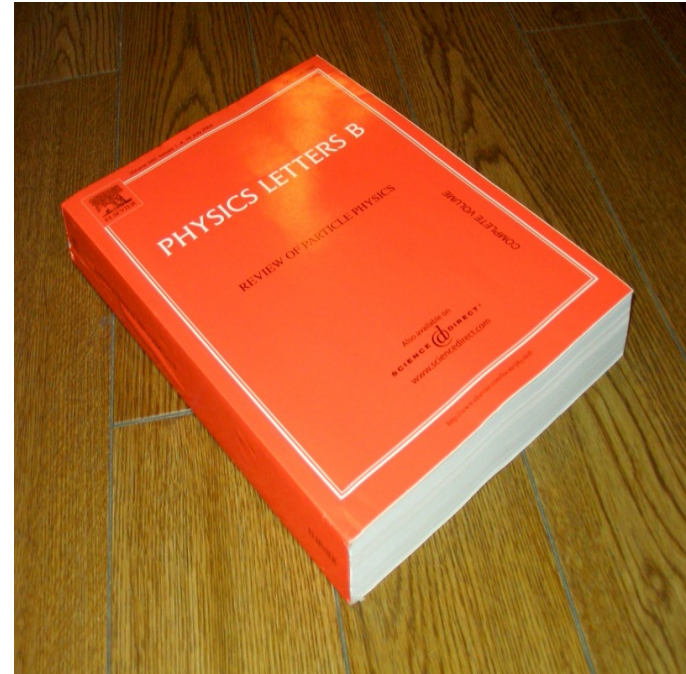


Les moines avaient leur documents

# Quelle sorte de particules existe-t-il?

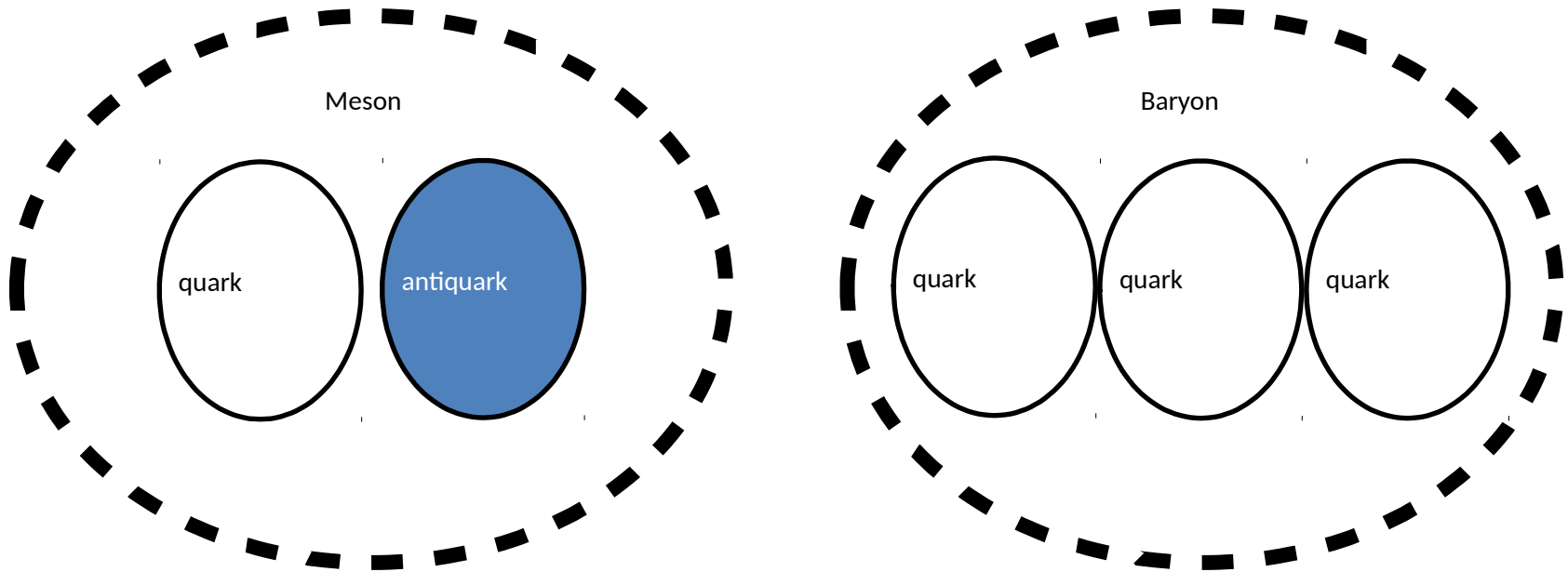


Les moines avaient leur documents



Nous avons le Particule Data Book

# Que forment les quarks?



Deux types de combinaison : quark-antiquark, ou trois (anti)quarks.

Les Antiparticules ont une charge opposée aux Particules, mais sinon sont supposées interagir de la même façon.

# Combien de temps vit une particule?

Type	Name	Symbol	Energy (MeV)	Mean lifetime
Lepton	Electron / Positron	$e^- / e^+$	0.511	$> 4.6 \times 10^{26}$ years
	Muon / Antimuon	$\mu^- / \mu^+$	105.7	$2.2 \times 10^{-6}$ seconds
	Tau lepton / Antitau	$\tau^- / \tau^+$	1777	$2.9 \times 10^{-13}$ seconds
Meson	Neutral Pion	$\pi^0$	135	$8.4 \times 10^{-17}$ seconds
	Charged Pion	$\pi^+ / \pi^-$	139.6	$2.6 \times 10^{-8}$ seconds
Baryon	Proton / Antiproton	$p^+ / p^-$	938.2	$> 10^{29}$ years
	Neutron / Antineutron	$n / \bar{n}$	939.6	885.7 seconds
Boson	W boson	$W^+ / W^-$	80,400	$10^{-25}$ seconds
	Z boson	$Z^0$	91,000	$10^{-25}$ seconds

Temps de vie  $\approx$  Demi-vie d'un élément radioactif.

# Combien de temps vit une particule?

Type	Name	Symbol	Energy (MeV)	Mean lifetime
Lepton	Electron / Positron	$e^- / e^+$	0.511	$> 4.6 \times 10^{26}$ years
	Muon / Antimuon	$\mu^- / \mu^+$	105.7	$2.2 \times 10^{-6}$ seconds
	Tau lepton / Antitau	$\tau^- / \tau^+$	1777	$2.9 \times 10^{-13}$ seconds
Meson	Neutral Pion	$\pi^0$	135	$8.4 \times 10^{-17}$ seconds
	Charged Pion	$\pi^+ / \pi^-$	139.6	$2.6 \times 10^{-8}$ seconds
Baryon	Proton / Antiproton	$p^+ / p^-$	938.2	$> 10^{29}$ years
	Neutron / Antineutron	$n / \bar{n}$	939.6	885.7 seconds
Boson	W boson	$W^+ / W^-$	80,400	$10^{-25}$ seconds
	Z boson	$Z^0$	91,000	$10^{-25}$ seconds

Les durées de vie sont très variées : vous allez en mesurer une particulièrement petite..

# Comment mesurer une durée de vie courte ?

Par exemple, prenez une particule qui vit en moyenne  $10^{-12}$  seconde



# Comment mesurer une durée de vie courte ?

Par exemple, prenez une particule qui vit en moyenne  $10^{-12}$  seconde

Quelle distance parcourt elle, en moyenne, si elle va à la vitesse de la lumière?

# Comment mesurer une durée de vie courte ?

Par exemple, prenez une particule qui vit en moyenne  $10^{-12}$  seconde

Quelle distance parcourt elle, en moyenne, si elle va à la vitesse de la lumière?

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Donc elle parcourt  $3 \cdot 10^{-4}$  m, ou **0.3 mm**

# Comment mesurer une durée de vie courte ?

Par exemple, prenez une particule qui vit en moyenne  $10^{-12}$  seconde

Quelle distance parcourt elle, en moyenne, si elle va à la vitesse de la lumière?

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Donc elle parcourt  $3 \cdot 10^{-4}$  m, ou **0.3 mm**

Ce n'est pas très long! Heureusement, le calcul est faux – nous avons oublié la relativité restreinte qui nous dit que **pour une particule qui se déplace, le temps se dilate** (elle vit plus longtemps).

# Comment mesurer une durée de vie courte ?

Par exemple, prenez une particule qui vit en moyenne  $10^{-12}$  seconde

Quelle distance parcourt elle, en moyenne, si elle va à la vitesse de la lumière?

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Donc elle parcourt  $3 \cdot 10^{-4}$  m, ou **0.3 mm**

Ce n'est pas très long! Heureusement, le calcul est faux – nous avons oublié la relativité restreinte qui nous dit que **pour une particule qui se déplace, le temps se dilate** (pour nous qui sommes au repos, elle vit plus longtemps).

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Référentiel du Labo

Référentiel de la particule

# Comment mesurer une durée de vie courte ?

Par exemple, prenez une particule qui vit en moyenne  $10^{-12}$  seconde

Quelle distance parcourt elle, en moyenne, si elle va à la vitesse de la lumière?

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

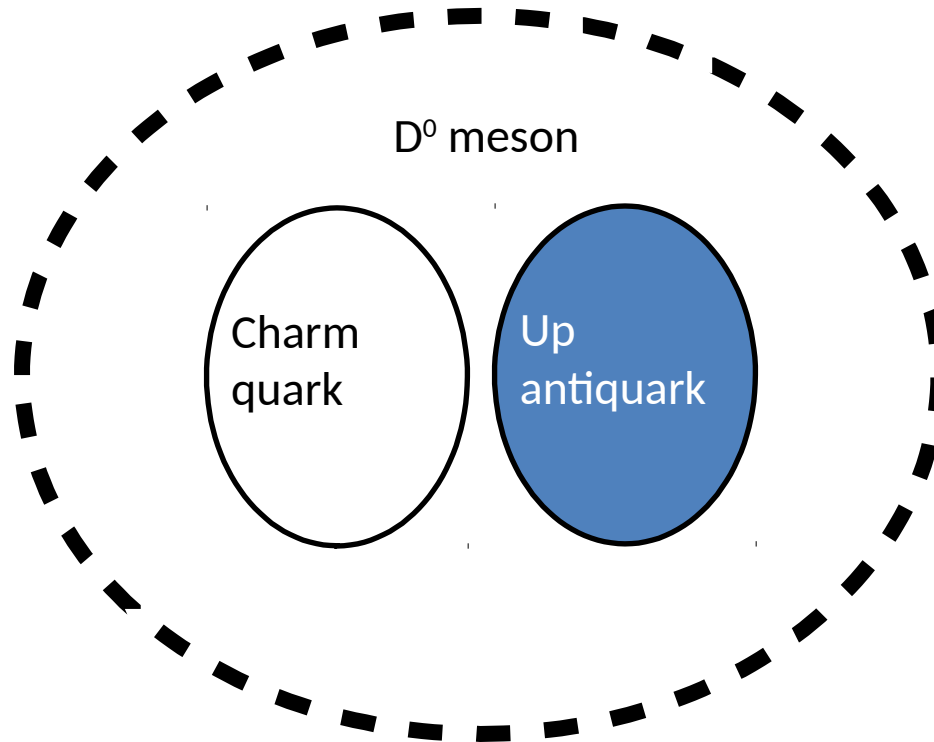
Donc elle parcourt  $3 \cdot 10^{-4}$  m, ou **0.3 mm**

Ce n'est pas très long! Heureusement, le calcul est faux – nous avons oublié la relativité restreinte qui nous dit que **pour une particule qui se déplace, le temps se dilate** (pour nous qui sommes au repos, elle vit plus longtemps).

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

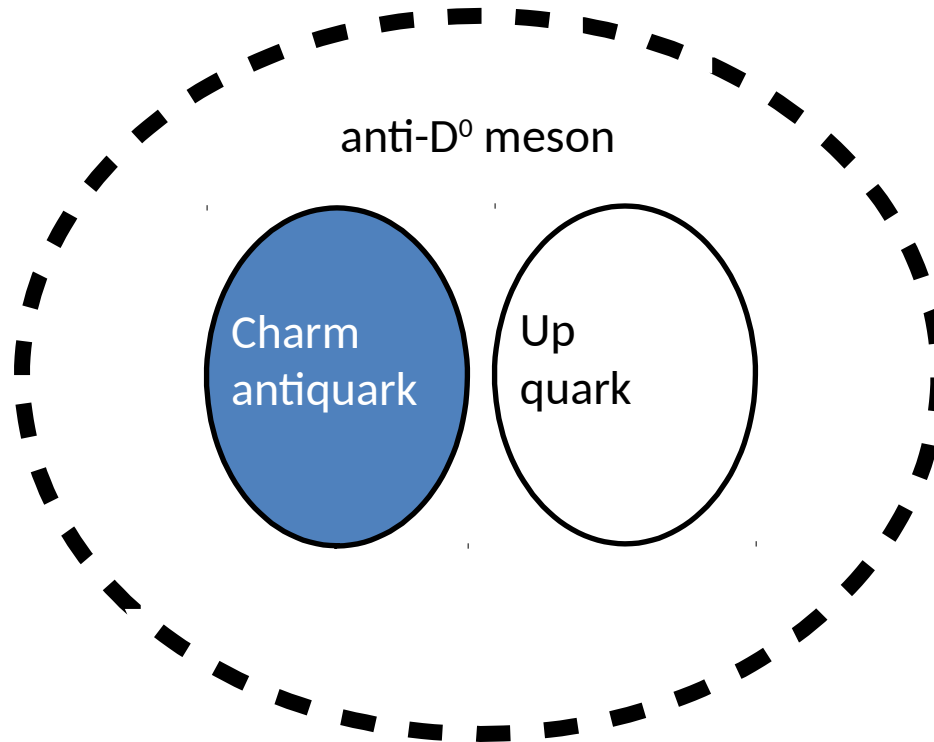
Typiquement au LHC, une particule vivant  $10^{-12}$  s, va traverser le détecteur sur 1cm. C'est suffisant pour pouvoir le mesurer!

# Mais qu'a de spécial le $D^0$ ?

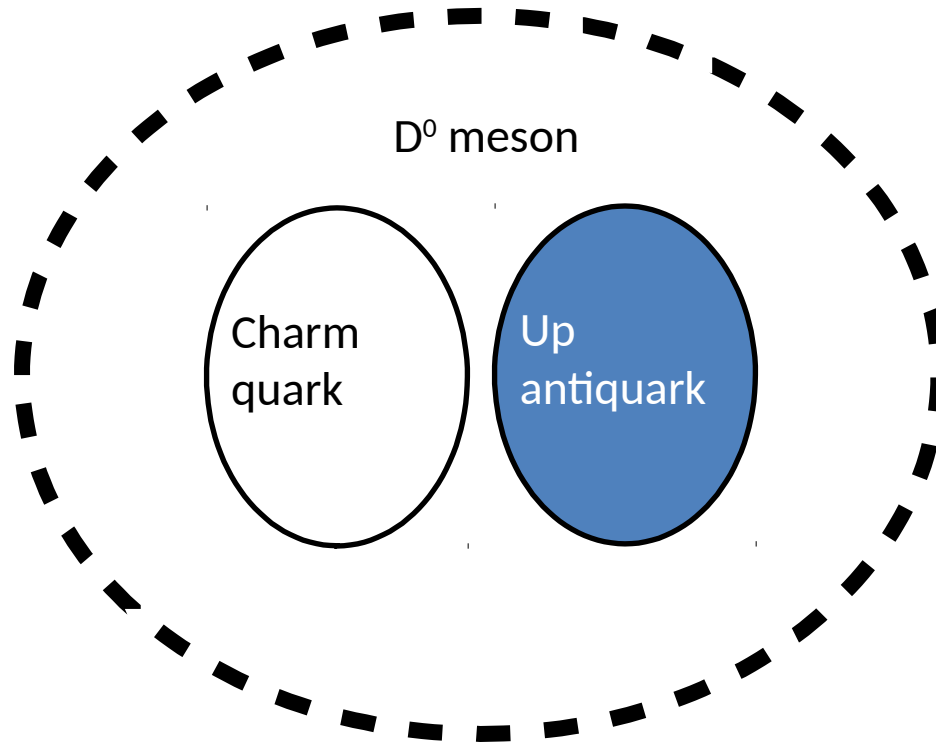




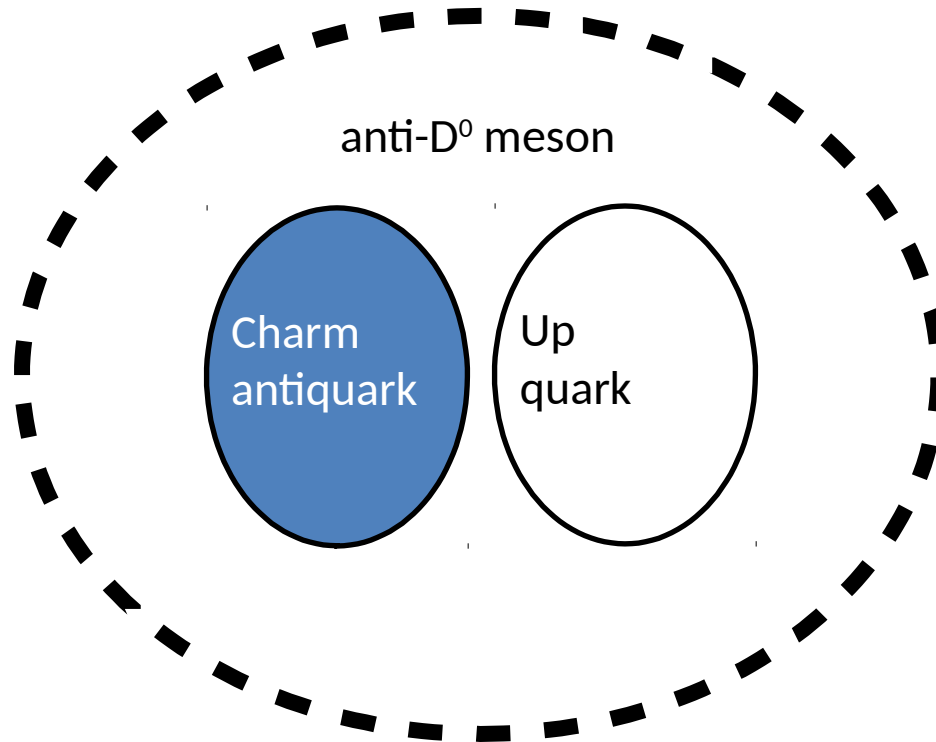
# Mais qu'a de spécial le $D^0$ ?



# Mais qu'a de spécial le $D^0$ ?

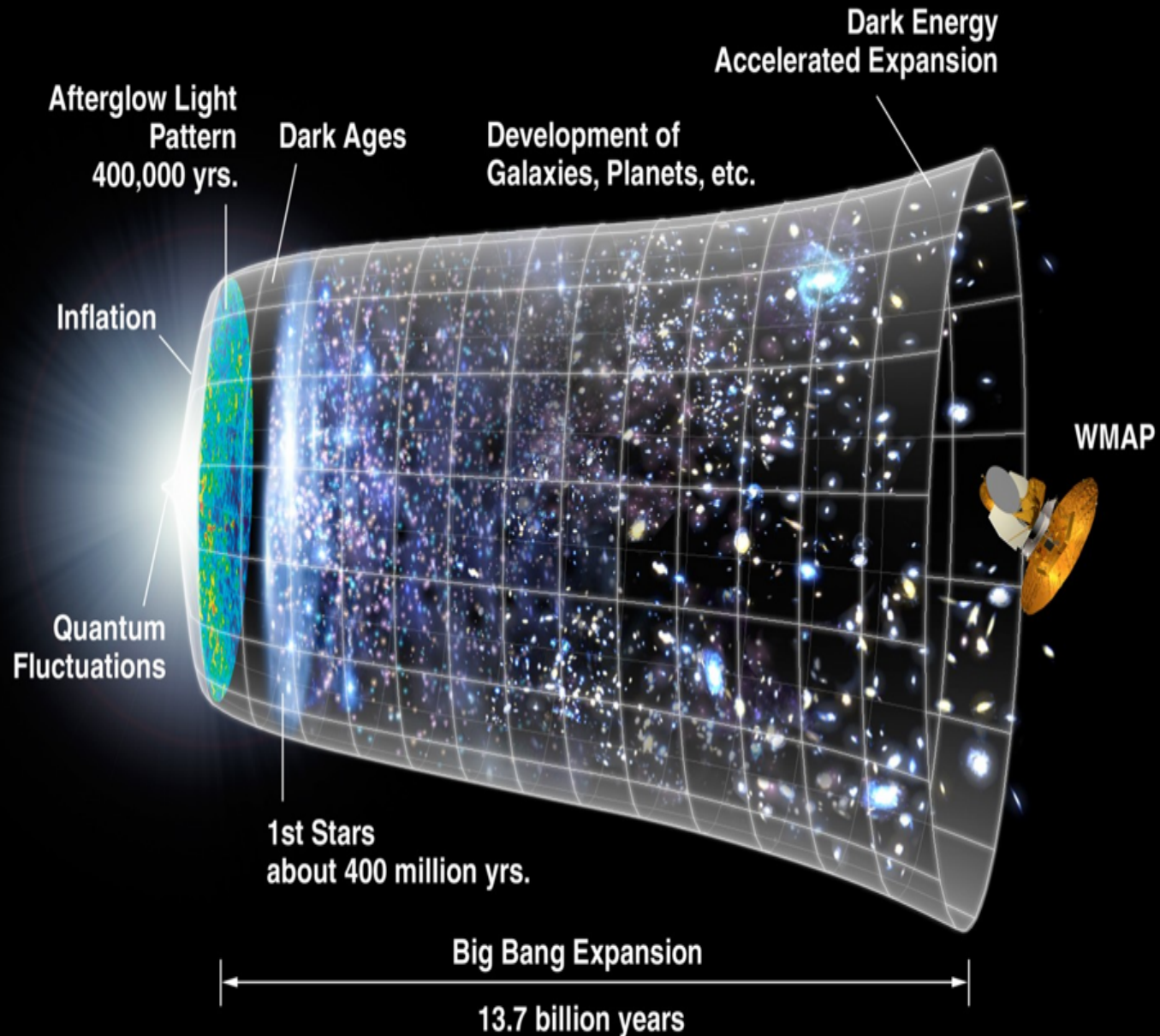


# Il oscille!

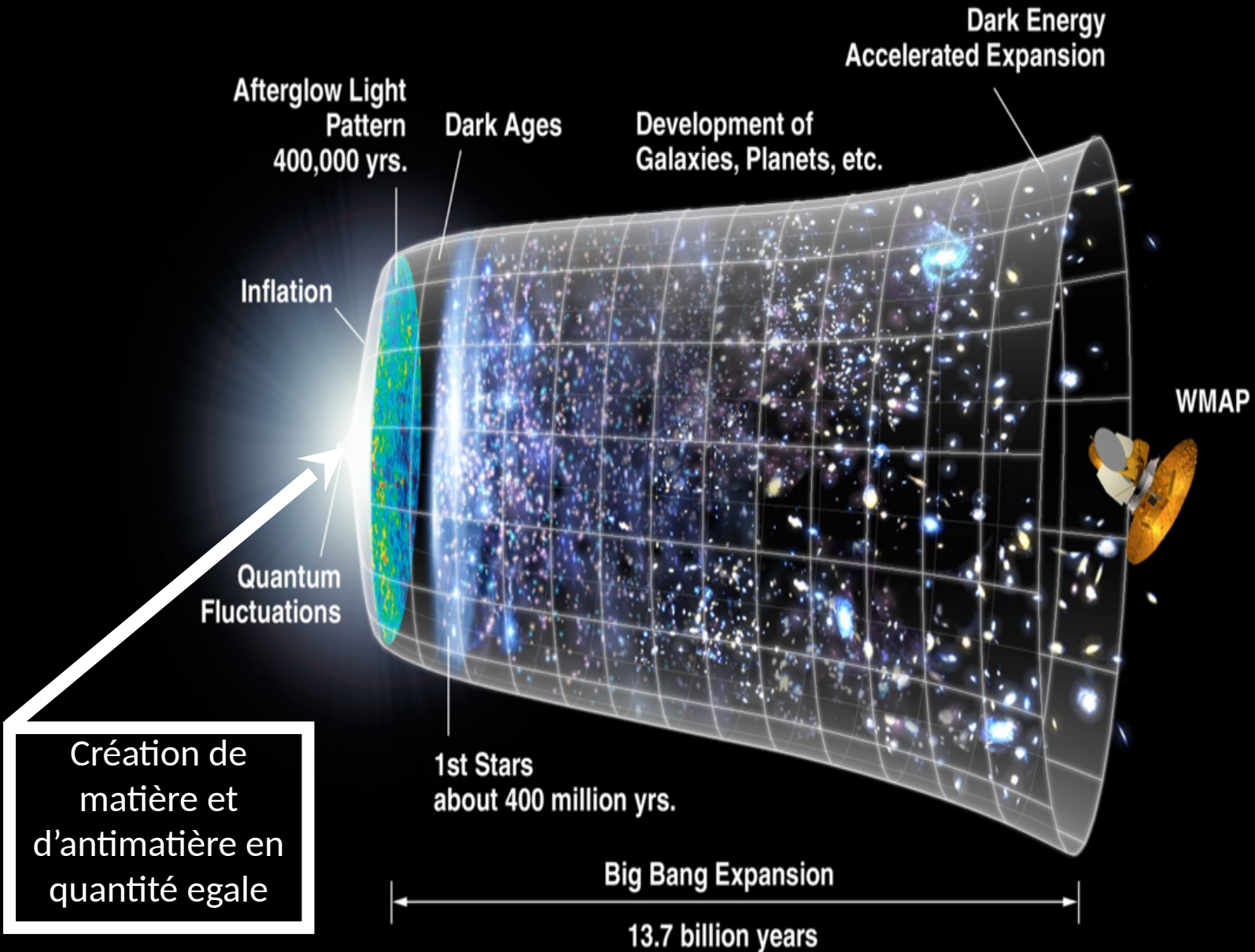


Le D<sup>0</sup> est une particule neutre : il peut **osciller entre matière et antimatière** avant de se désintégrer!

# Pourquoi s'intéresser à l'anti-matière?

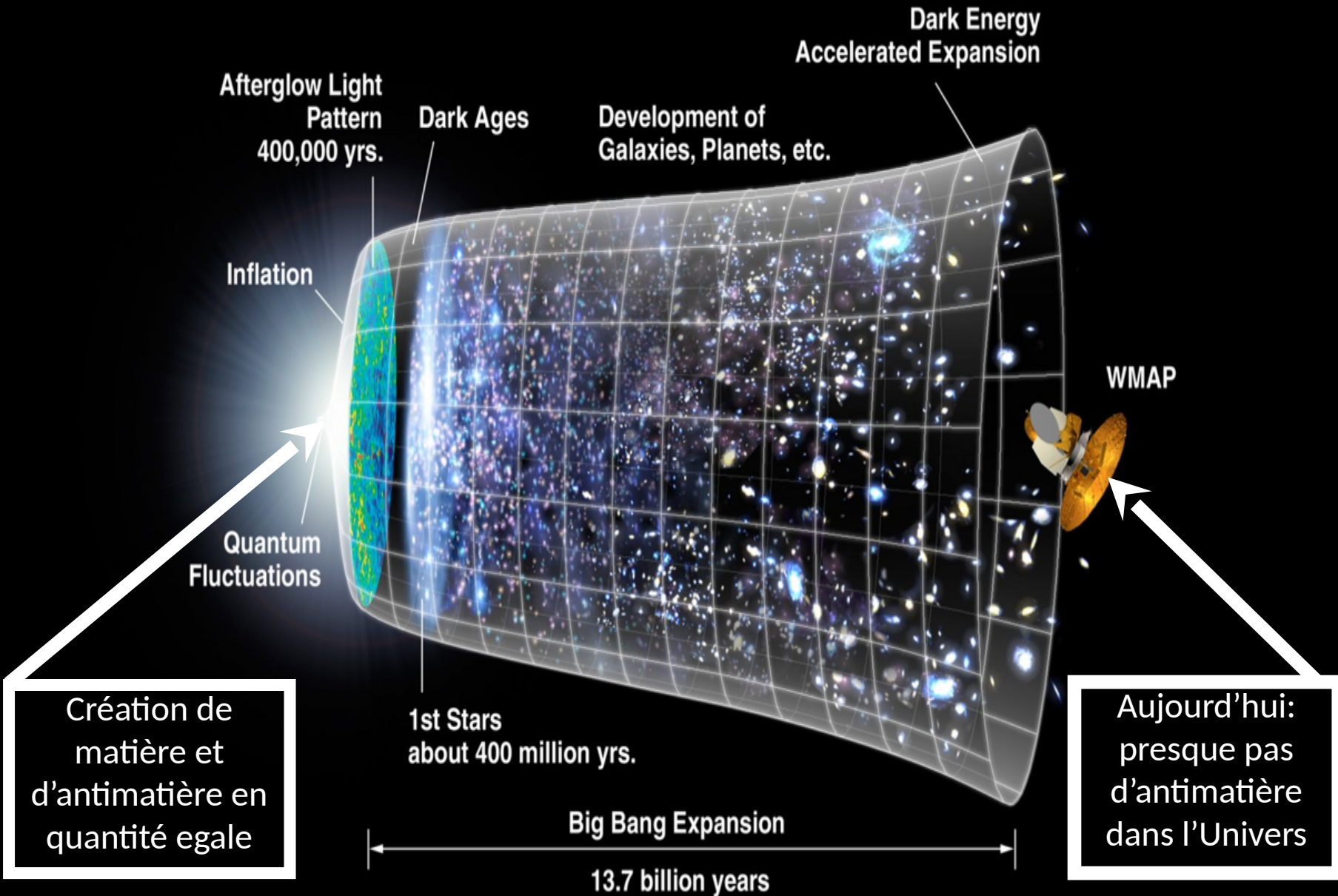


# Pourquoi s'intéresser à l'anti-matière?



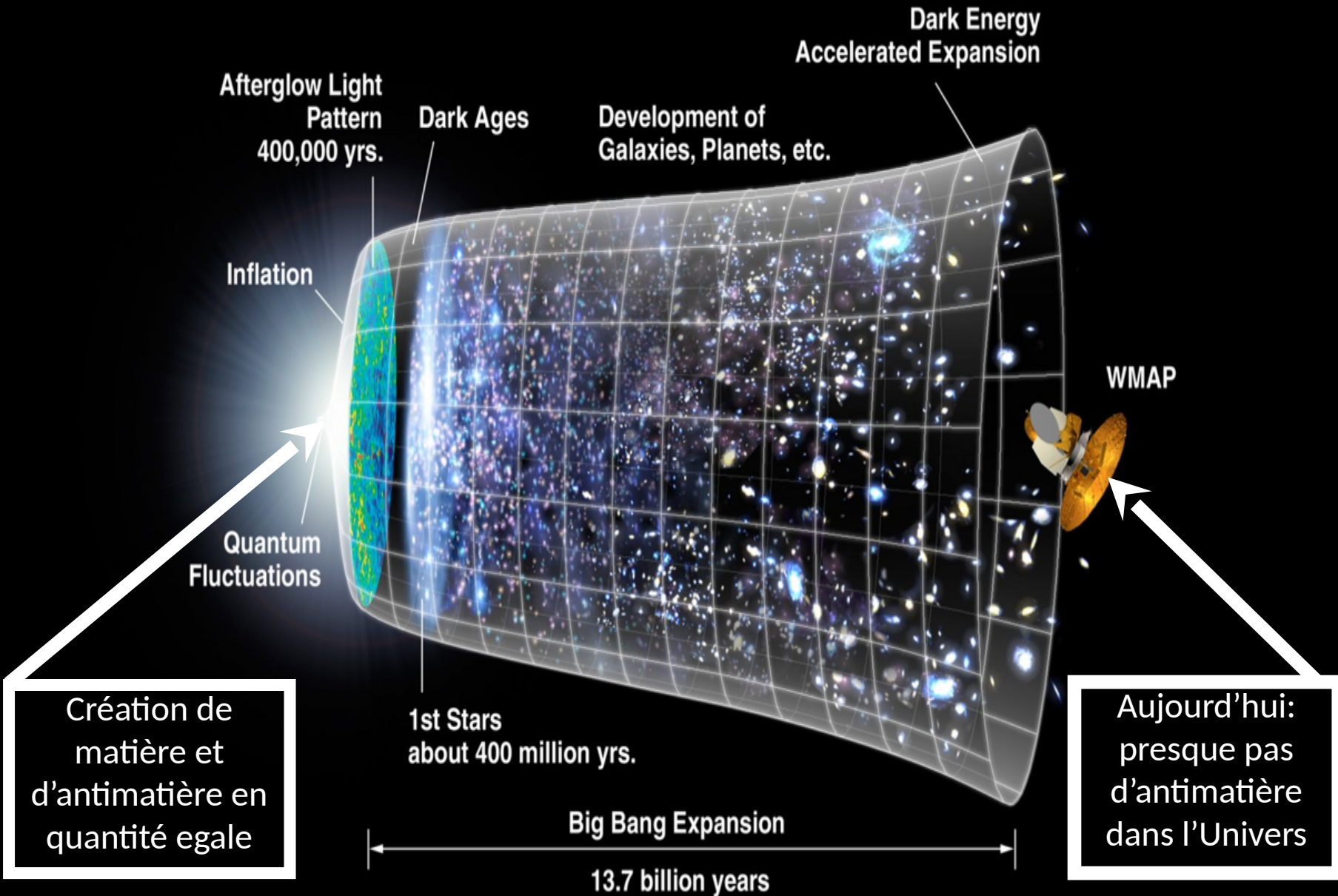


# Pourquoi s'intéresser à l'anti-matière?



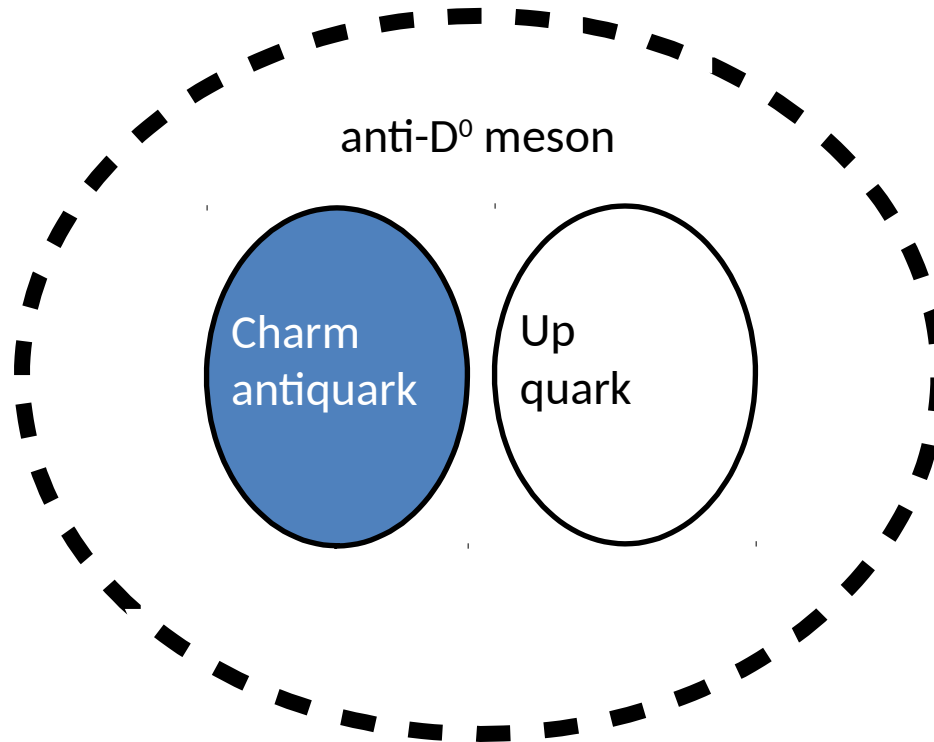


# Pourquoi s'intéresser à l'anti-matière?



Mais où est donc passée l'anti-matière?

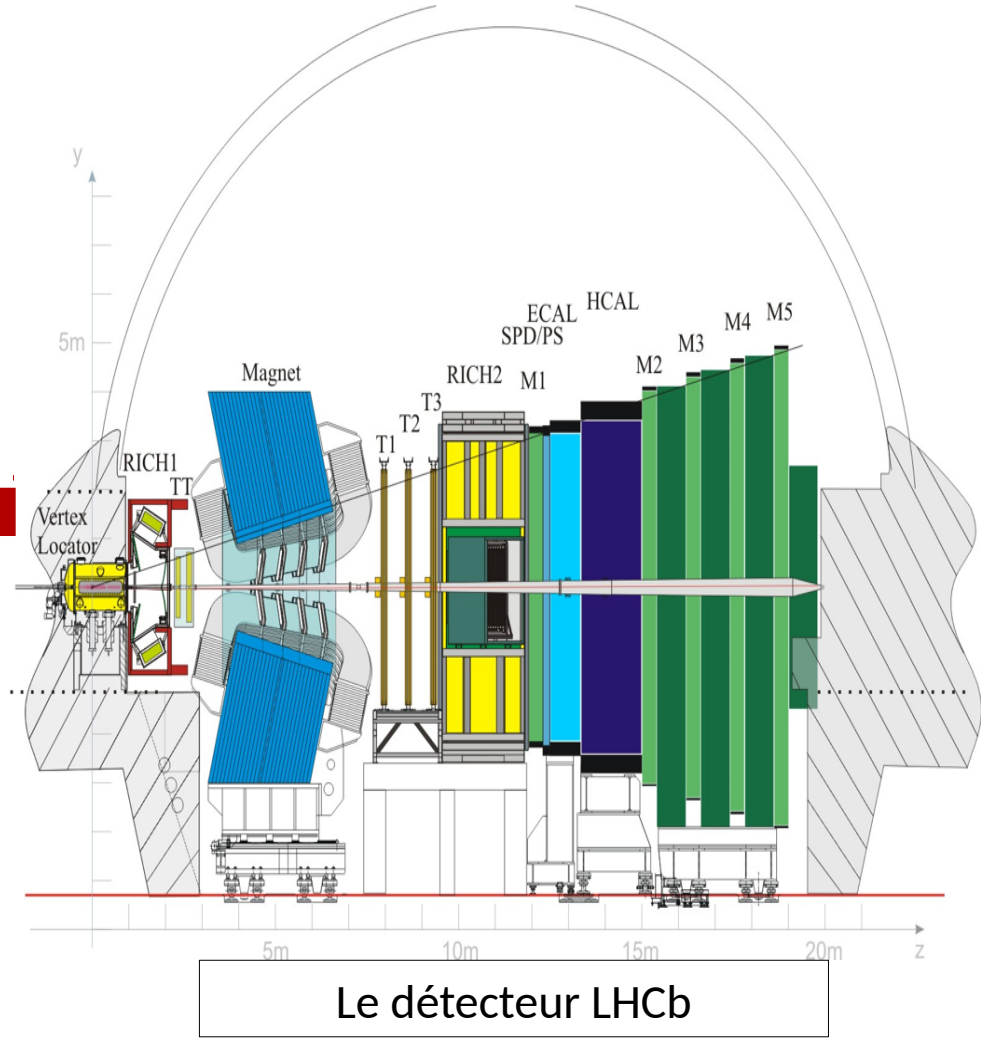
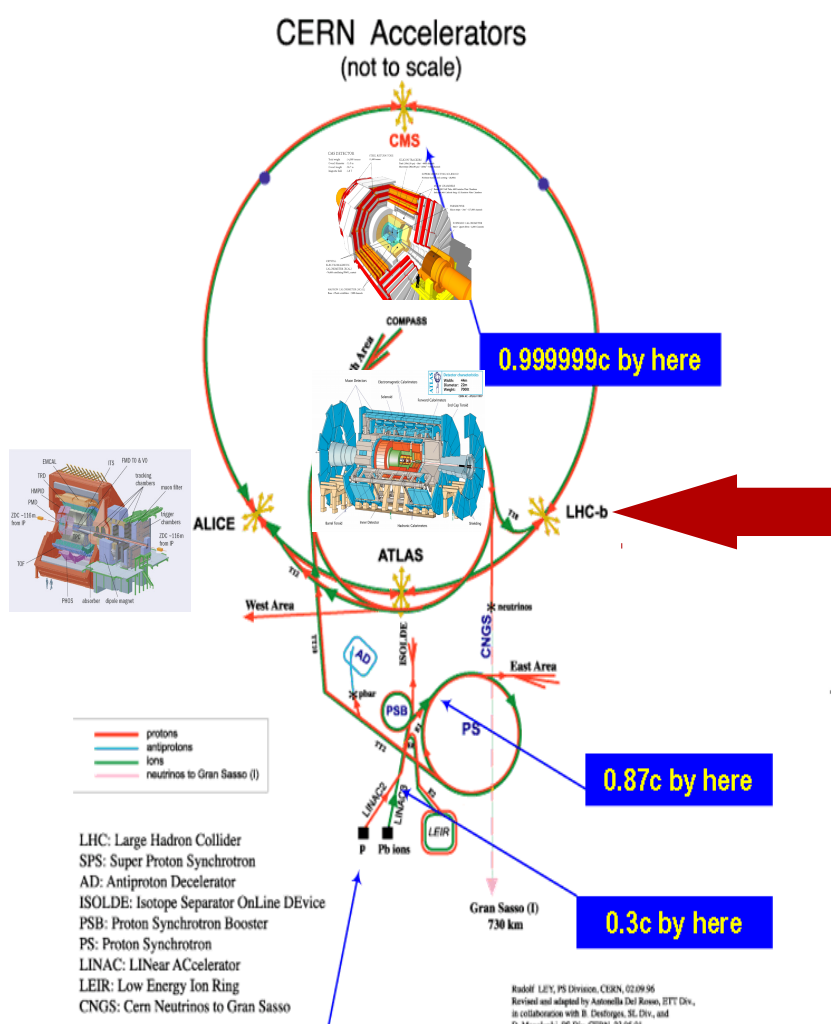
# Il oscille!



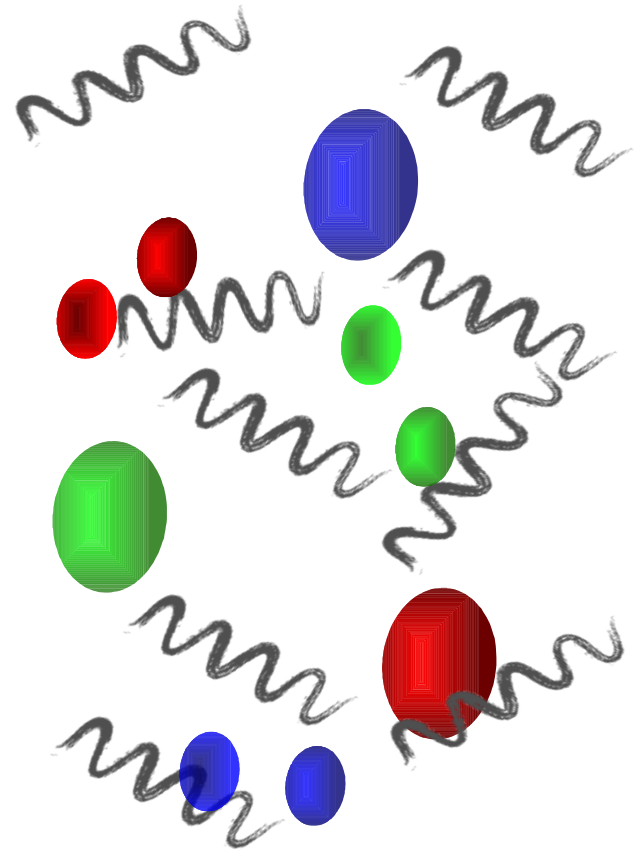
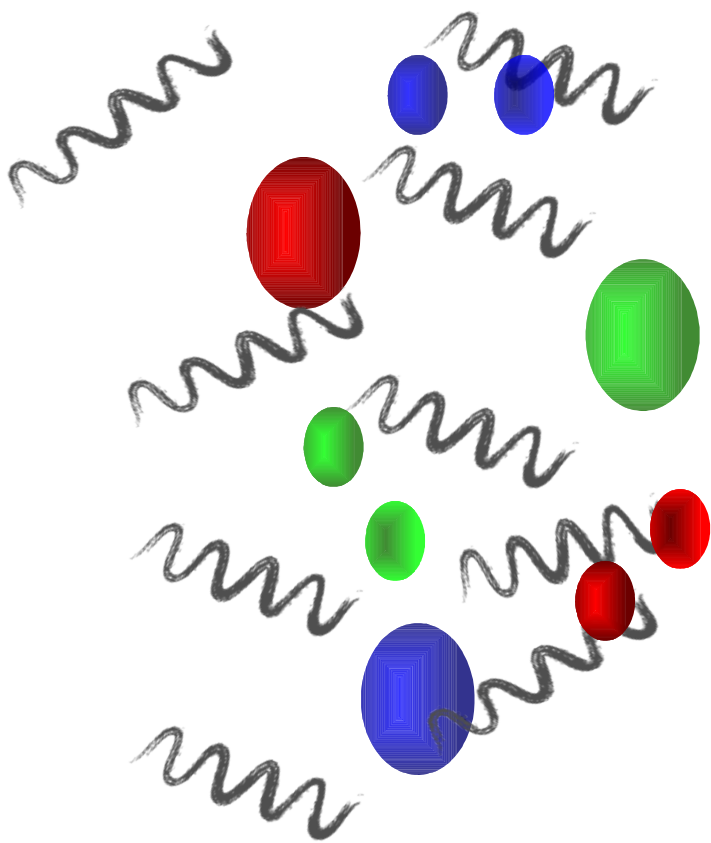
Le D<sup>0</sup> est une particule neutre : il peut osciller entre matière et antimatière avant de se désintégrer!

Une telle particule peut donc nous donner des indices sur ce qui fait la différence entre la matière et l'antimatière.

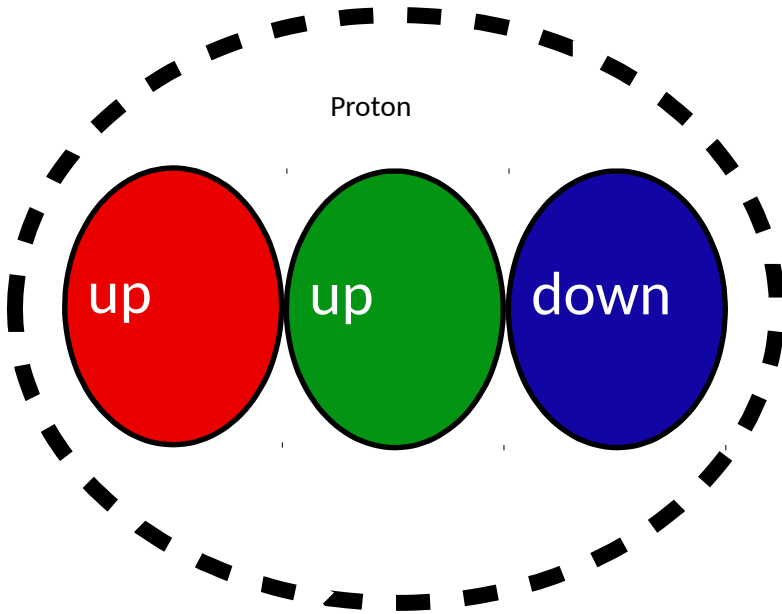
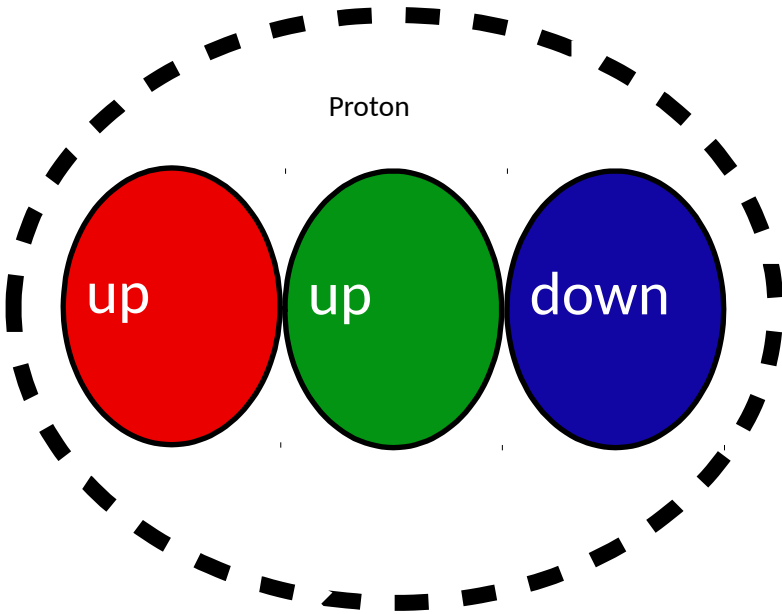
# Large Hadron Collider @ CERN



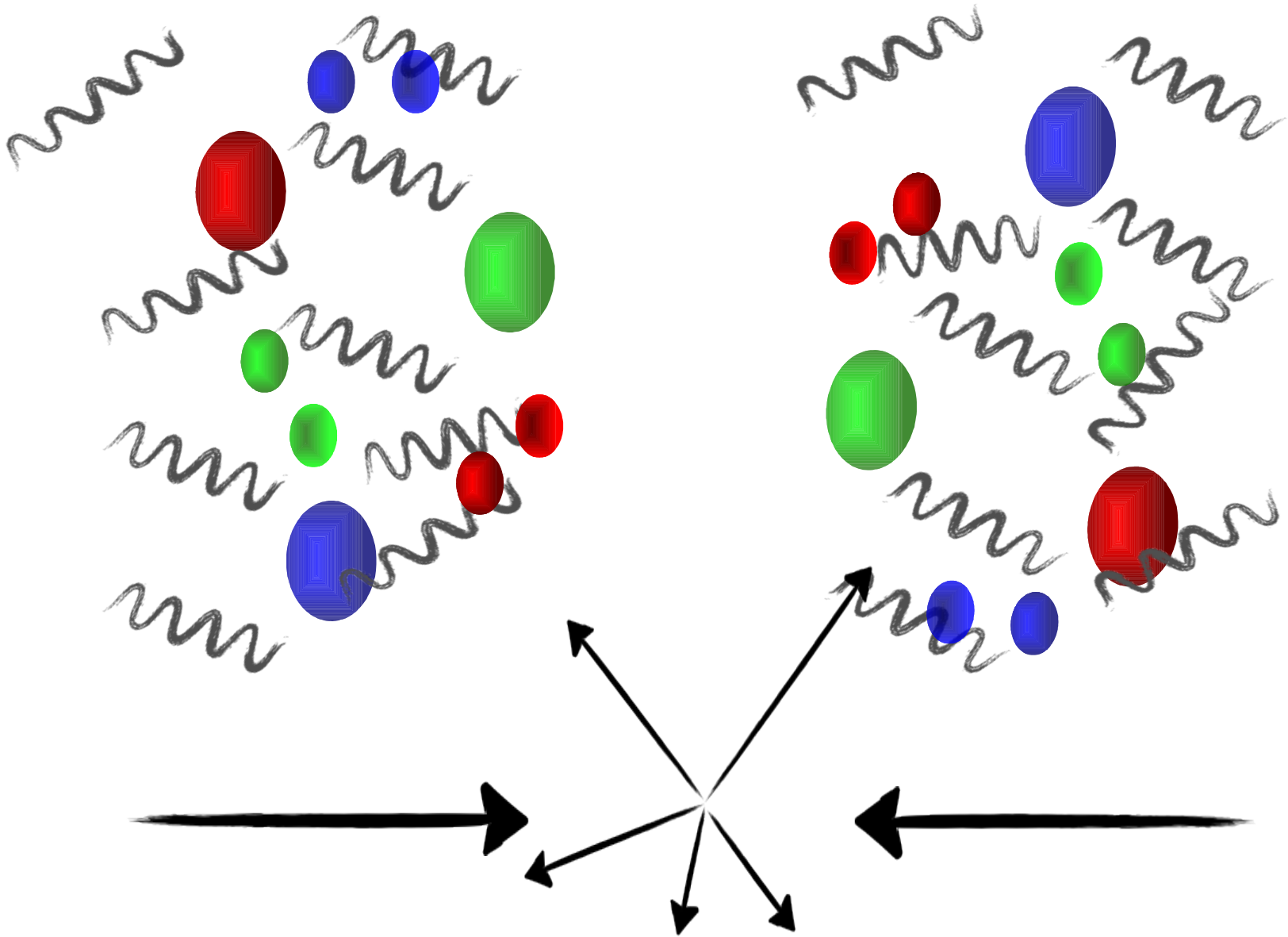
# Les protons entrent en collision...



# Les protons entrent en collision ...

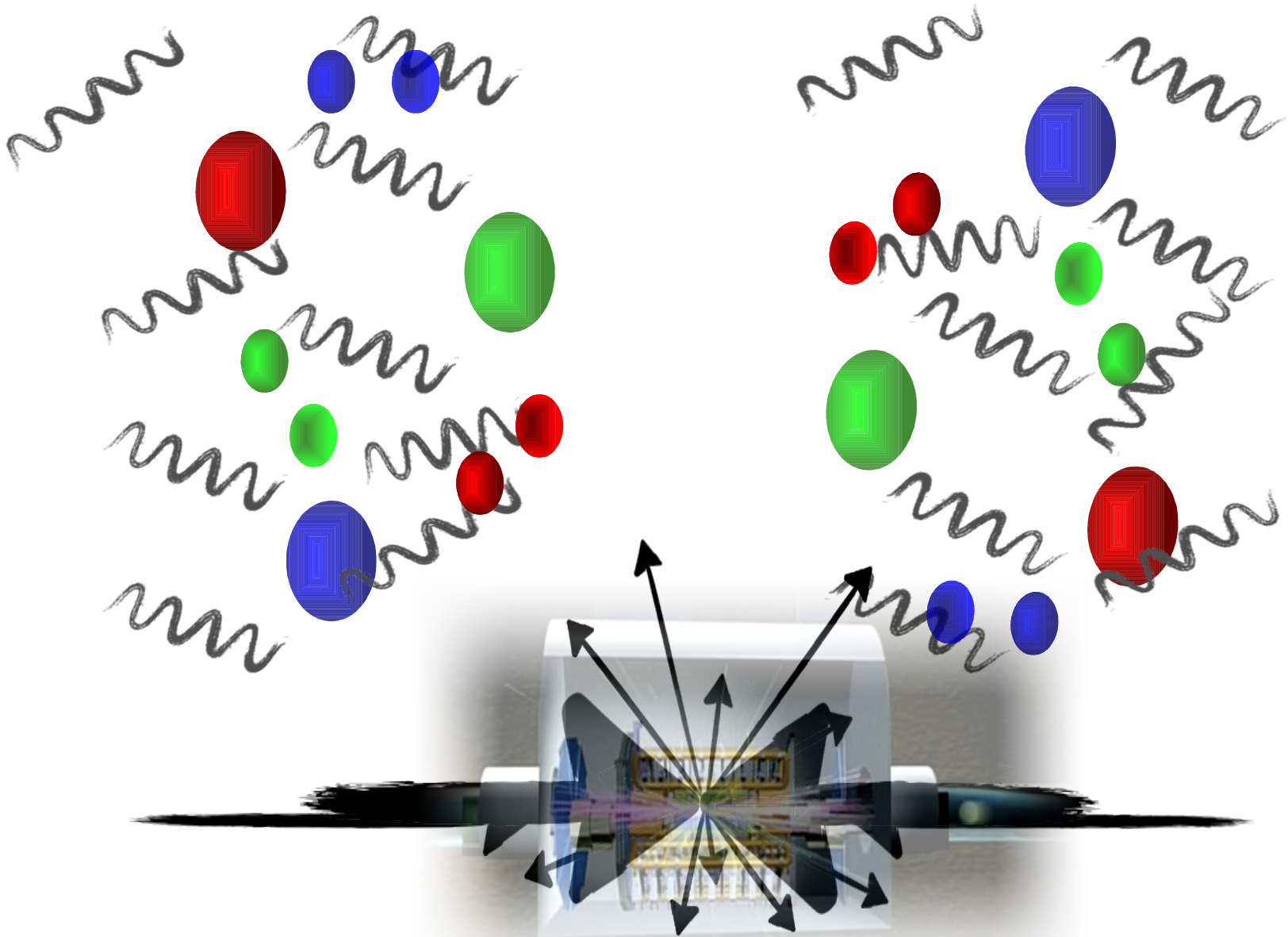


# Les protons entrent en collision ...

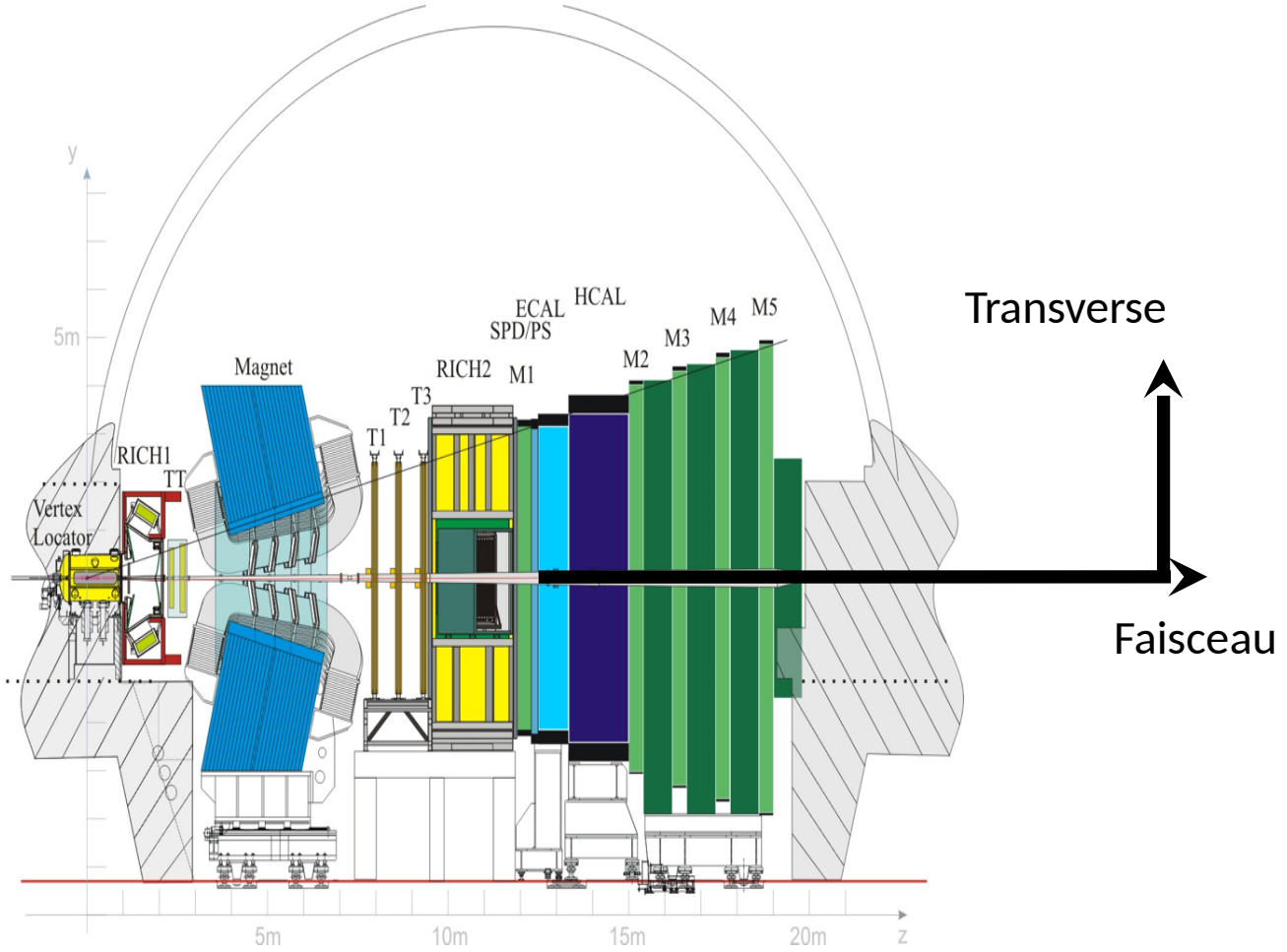




# Les protons entrent en collision...



# LHCb @ LHC

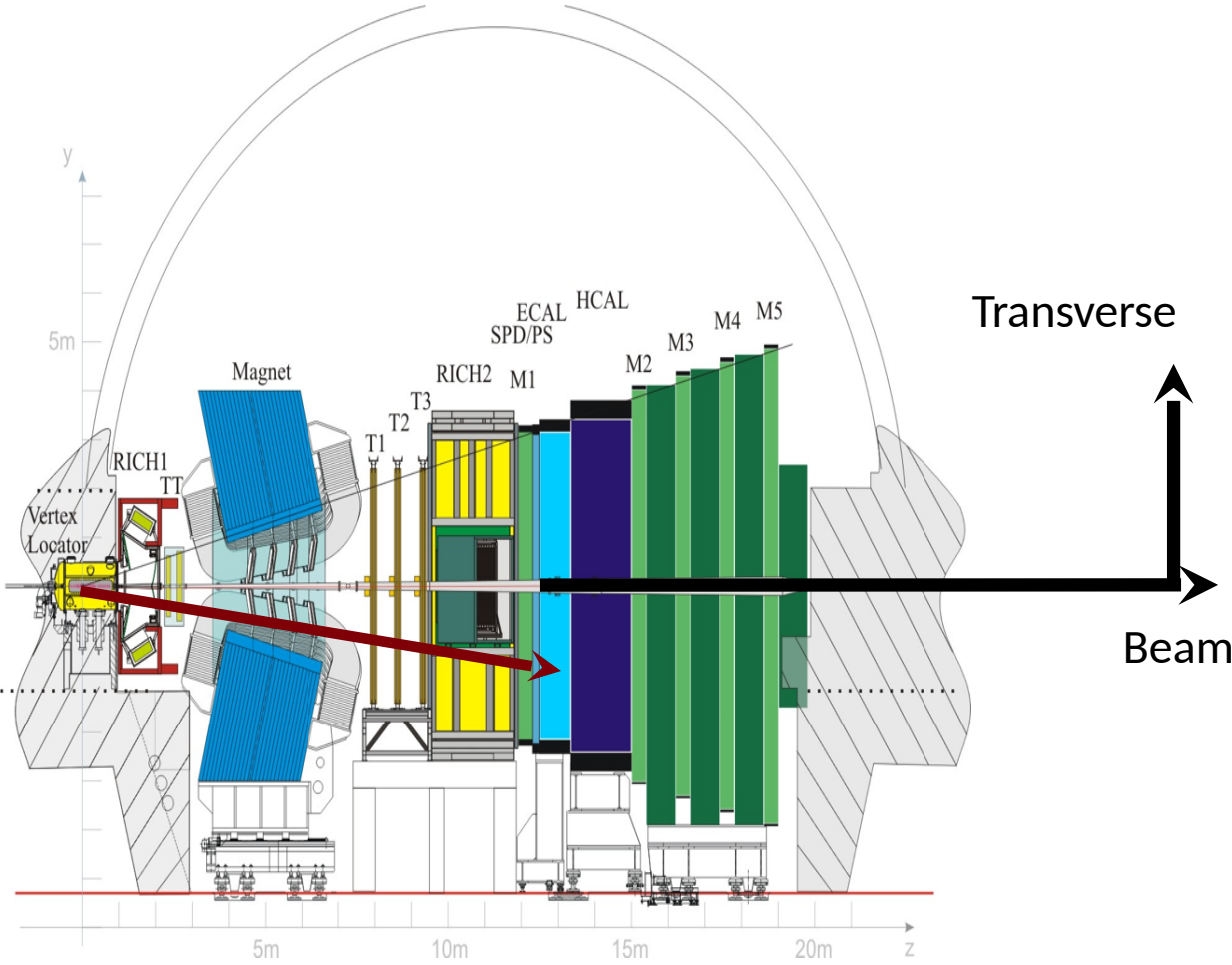


$p_T$  = impulsion transverse  
 $E_T$  = energie transverse

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

# LHCb @ LHC

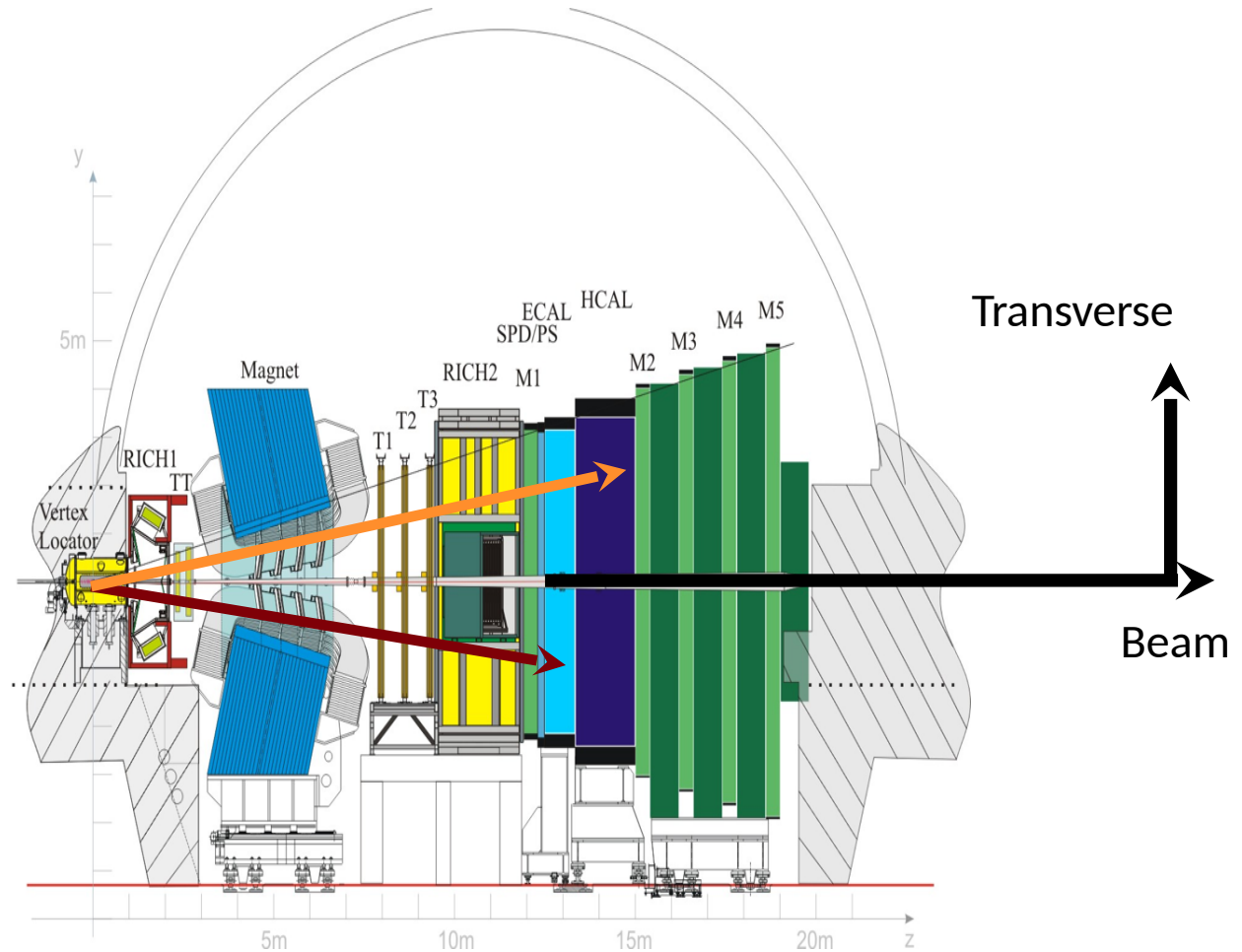
† ELECTRONS  
† PHOTONS



Chaque particule dépose son énergie dans les différents sous-détecteurs.

# LHCb @ LHC

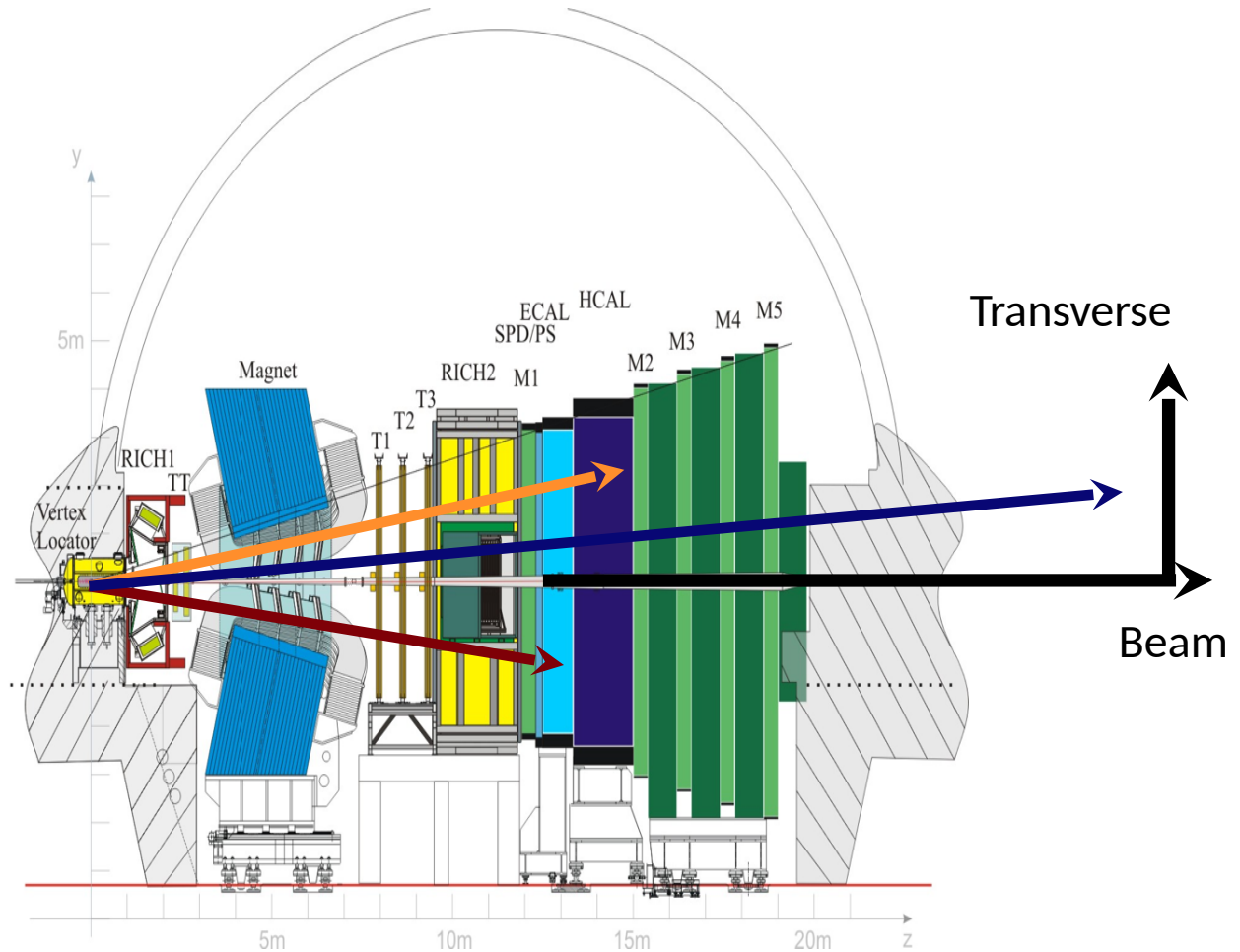
- † ELECTRONS
- † PHOTONS
- † HADRONS



Chaque particule dépose son énergie dans les différents sous-détecteurs.

# LHCb @ LHC

- † ELECTRONS
- † PHOTONS
- † HADRONS
- † MUONS

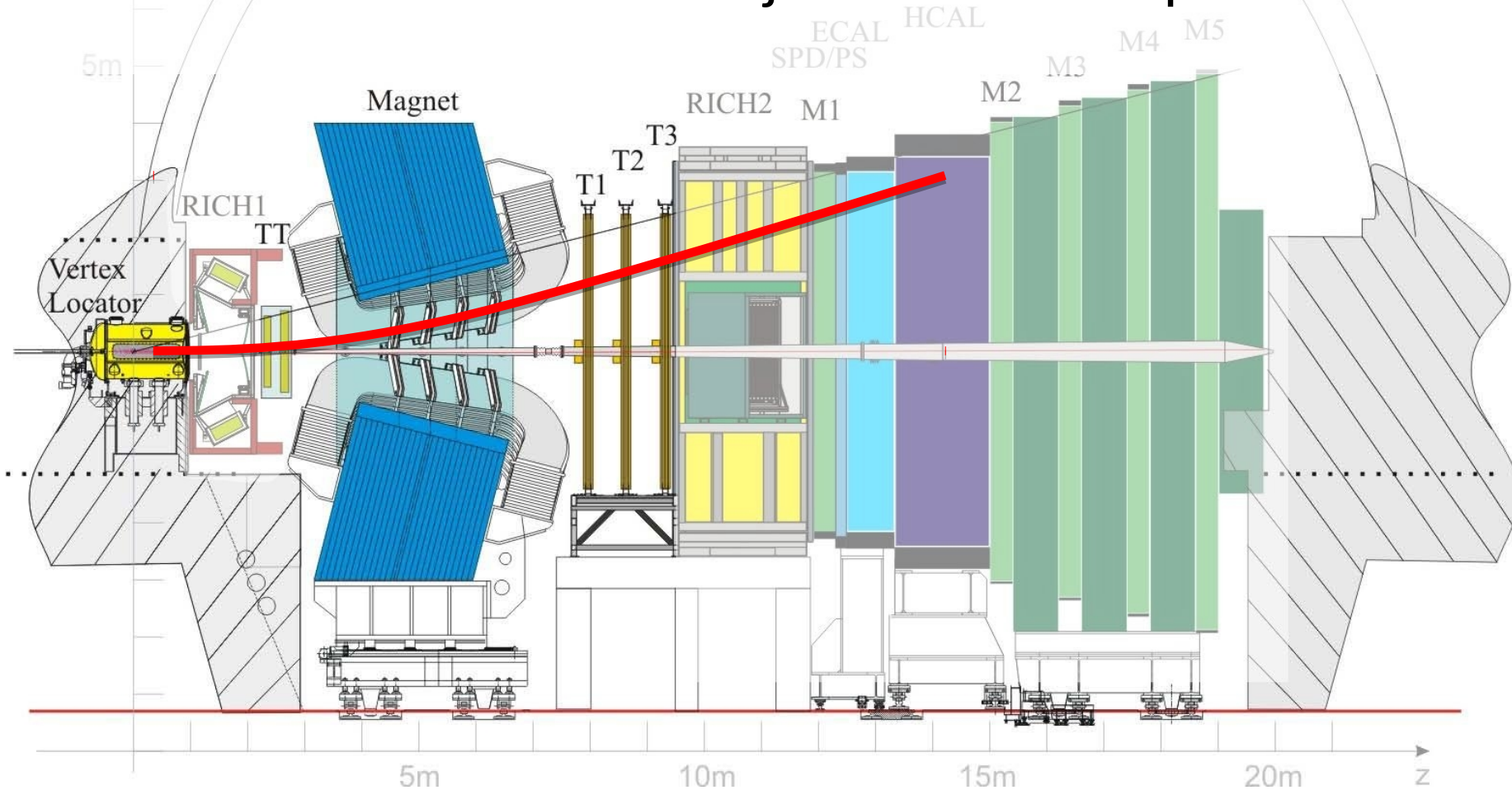


Chaque particule dépose son énergie dans les différents sous-détecteurs.

Comment mesurer une masse?

# Comment mesurer une impulsion?

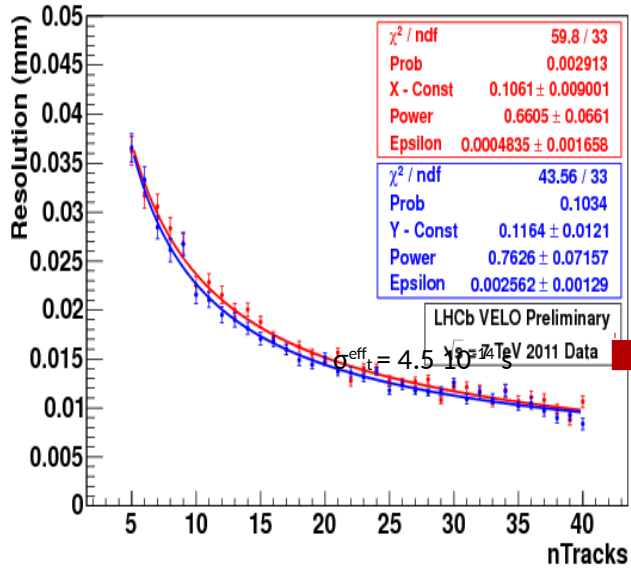
- Champ magnétique courbe les trajectoires des particules chargées.
- Mesure la courbure des trajectoires --> impulsion



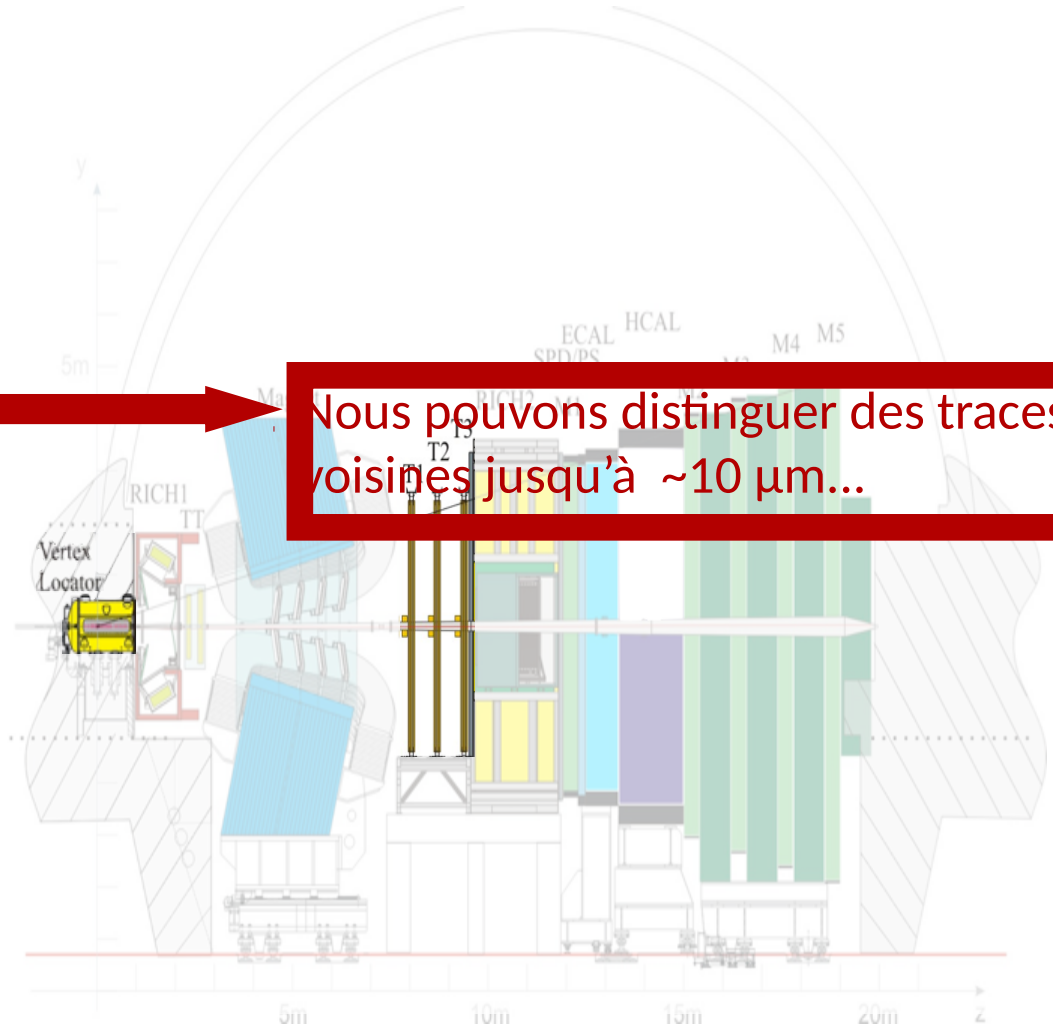
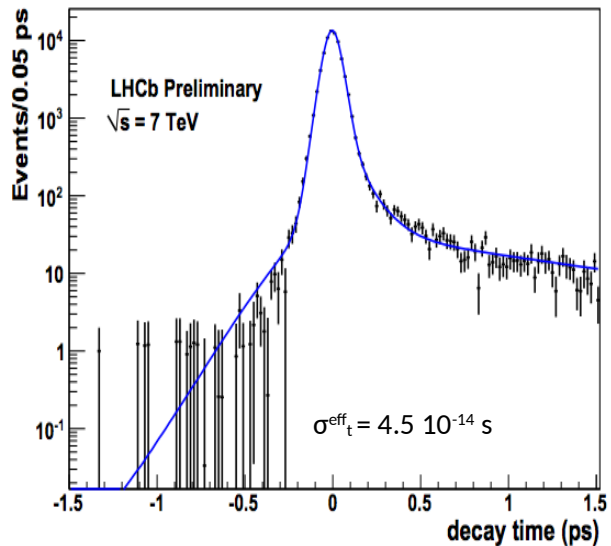


# Performances de LHCb

X and Y resolution - offline, exactly 1 PV



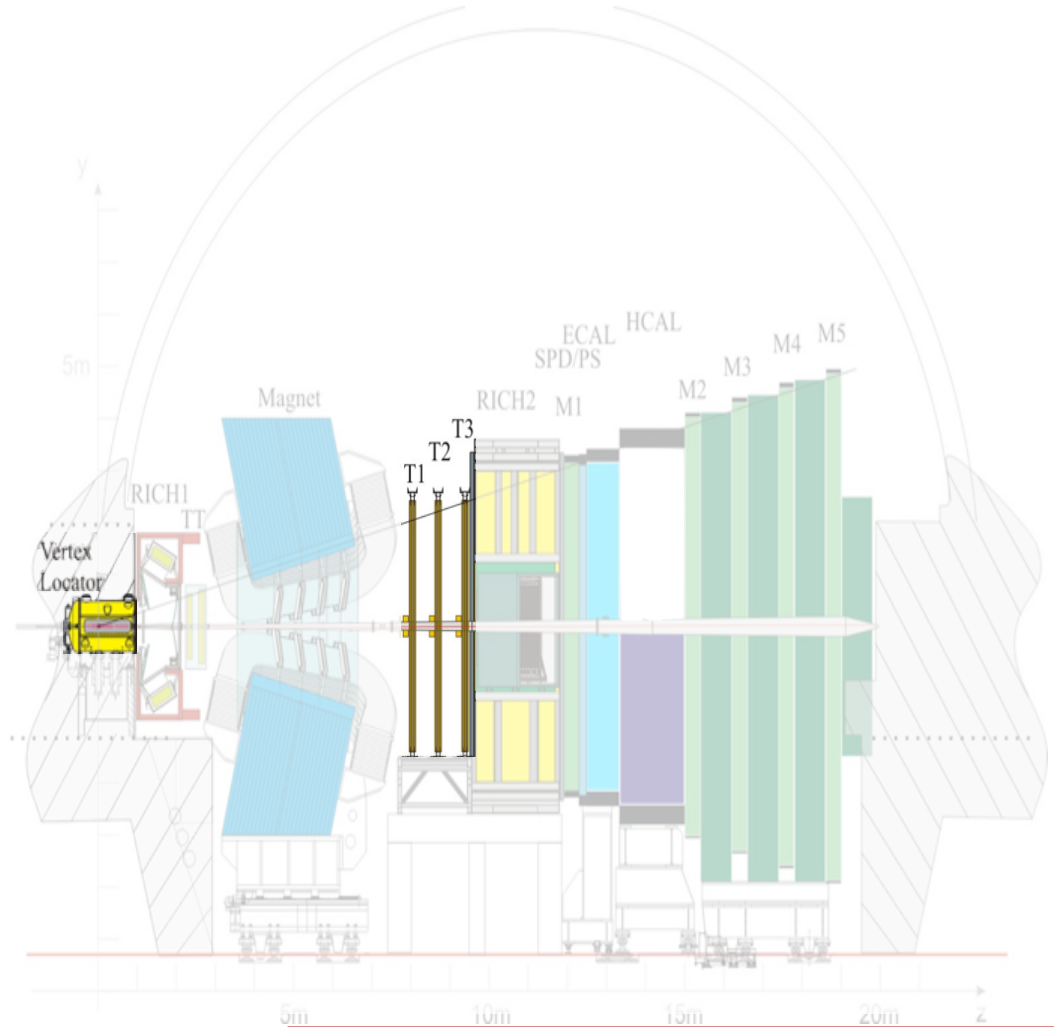
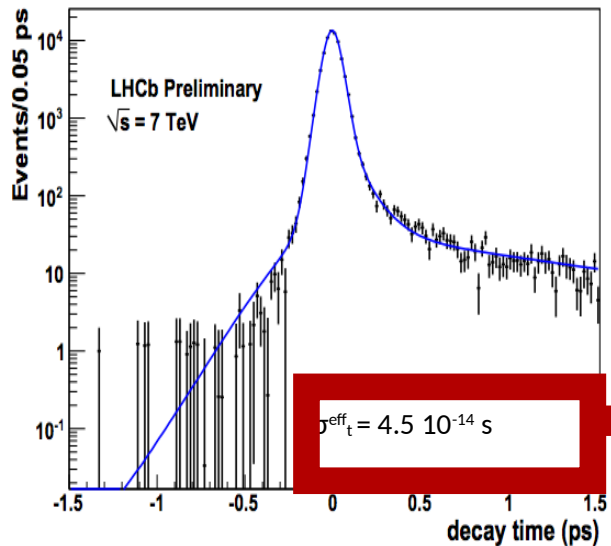
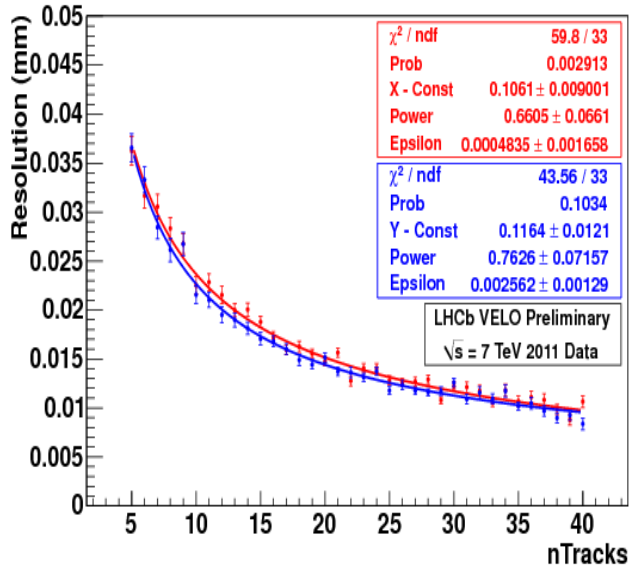
Nous pouvons distinguer des traces voisines jusqu'à  $\sim 10 \mu\text{m}$ ...





# Performances de LHCb

X and Y resolution - offline, exactly 1 PV



Nous pouvons mesurer des temps de vie jusqu'à  $\sim 10^{-14}$  seconds...

*Thanks to Bolek and Vava for providing the material for the exercise.*

# Why the $D^0$ and not another particle?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	$2.4 \text{ MeV}/c^2$	$1.27 \text{ GeV}/c^2$	$171.2 \text{ GeV}/c^2$	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	$\gamma$ photon
Quarks				
mass	$4.8 \text{ MeV}/c^2$	$104 \text{ MeV}/c^2$	$4.2 \text{ GeV}/c^2$	0
charge	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons				
mass	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	0	0	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z^0$ Z boson
Leptons				
mass	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
charge	-1	-1	-1	$\pm 1$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$W^\pm$ W boson

Gauge Bosons

Neutral mesons can oscillate between matter and anti-matter as they propagate

# Why the $D^0$ and not another particle?

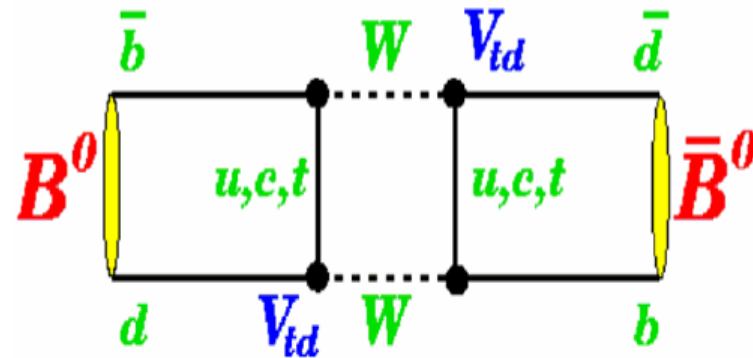
Three Generations of Matter (Fermions)

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

Gauge Bosons

Neutral mesons can oscillate between matter and anti-matter as they propagate

Classic example is the  $B_d$  meson : measurement of  $B_d$  oscillations was an early indication of the top quark mass



# Why the $D^0$ and not another particle?

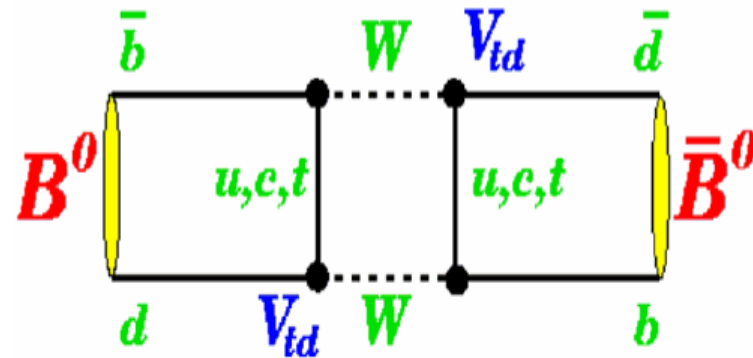
Three Generations of Matter (Fermions)

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

Gauge Bosons

Neutral mesons can oscillate between matter and anti-matter as they propagate

Classic example is the  $B_d$  meson : measurement of  $B_d$  oscillations was an early indication of the top quark mass



Oscillations are interesting because they are sensitive to new particles appearing virtually inside the box diagram, which can be very much heavier than directly produced particles

# Why the $D^0$ and not another particle?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	4 MeV/c <sup>2</sup>	27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	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	$\gamma$ photon
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	< 2.2 eV/c <sup>2</sup>	< 0.17 MeV/c <sup>2</sup>	< 15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z^0$ Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$W^\pm$ W boson
				Gauge Bosons

Neutral mesons can oscillate between matter and anti-matter as they propagate

There are several different “down-type” mesons which oscillate : (ds)  $K^0$ , (db)  $B_d$ , (sb)  $B_s$

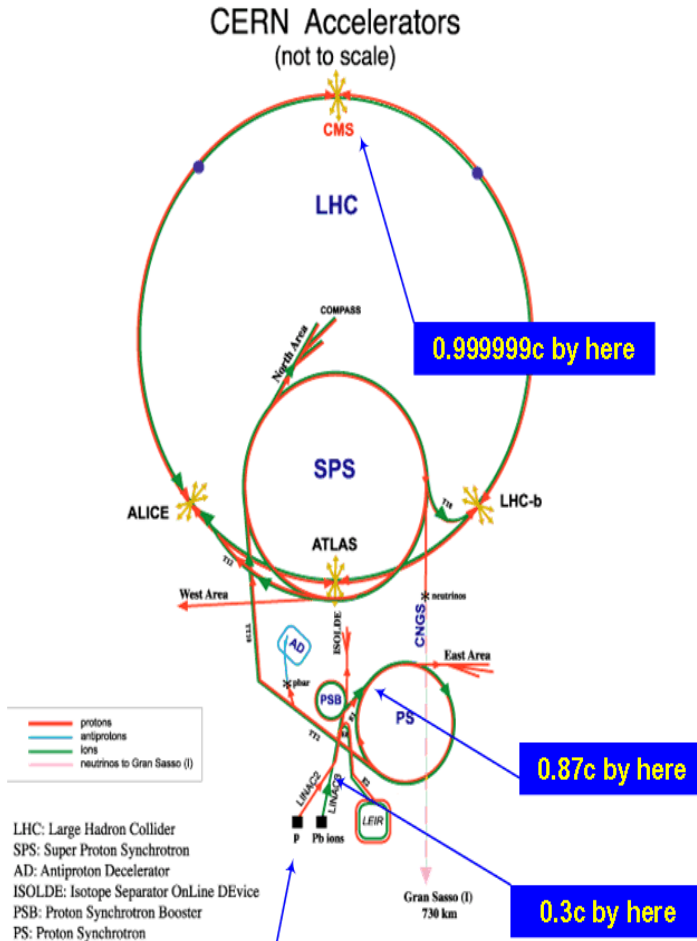
But only one up-type : the (cu)  $D^0$  meson

The top quark does not form mesons or baryons

This makes the  $D^0$  a unique laboratory for studying matter-antimatter symmetry in the up-type quark sector

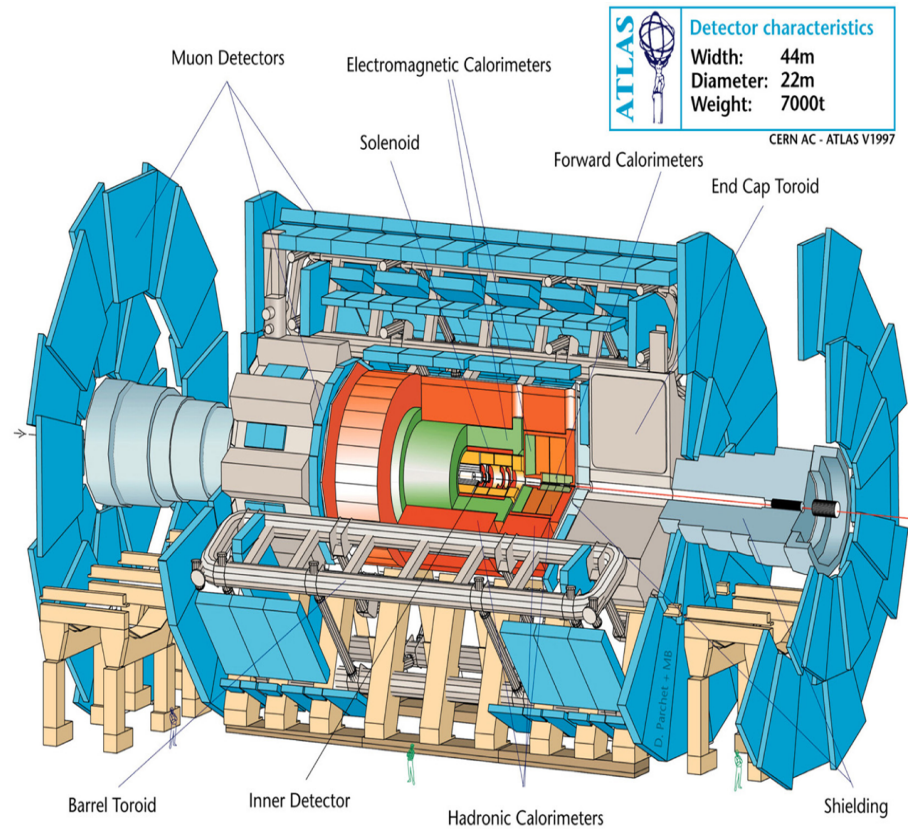


# Large hadron collider @ CERN



LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

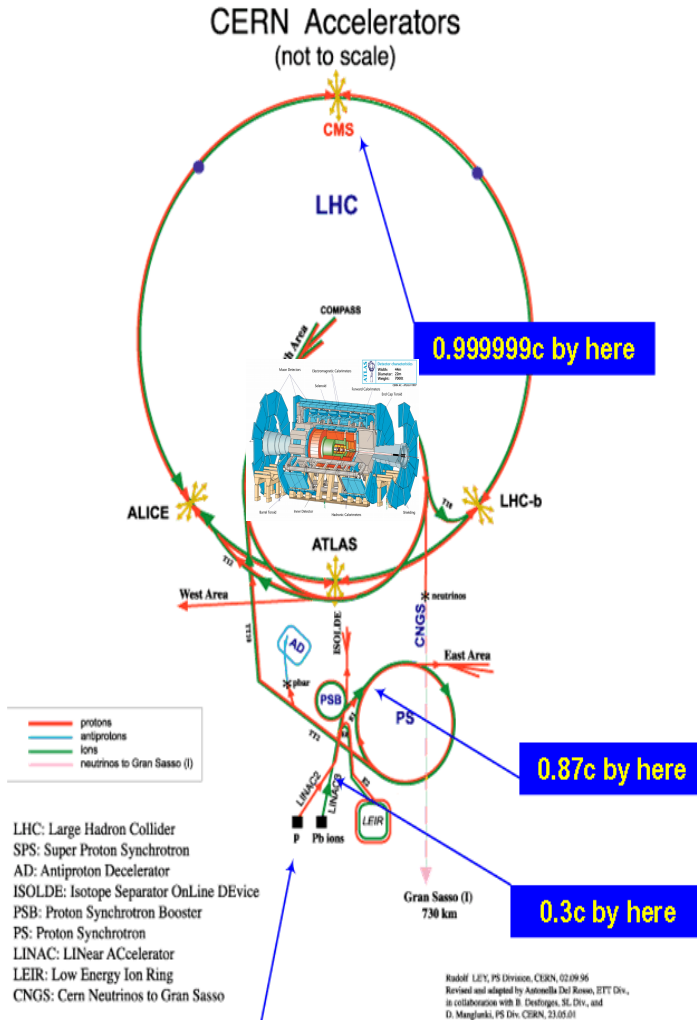
Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02/09/96  
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,  
 in collaboration with B. Desforges, SE Div., and  
 D. Murejani, PS Div. CERN, 23/05/01



**Start the protons out here**

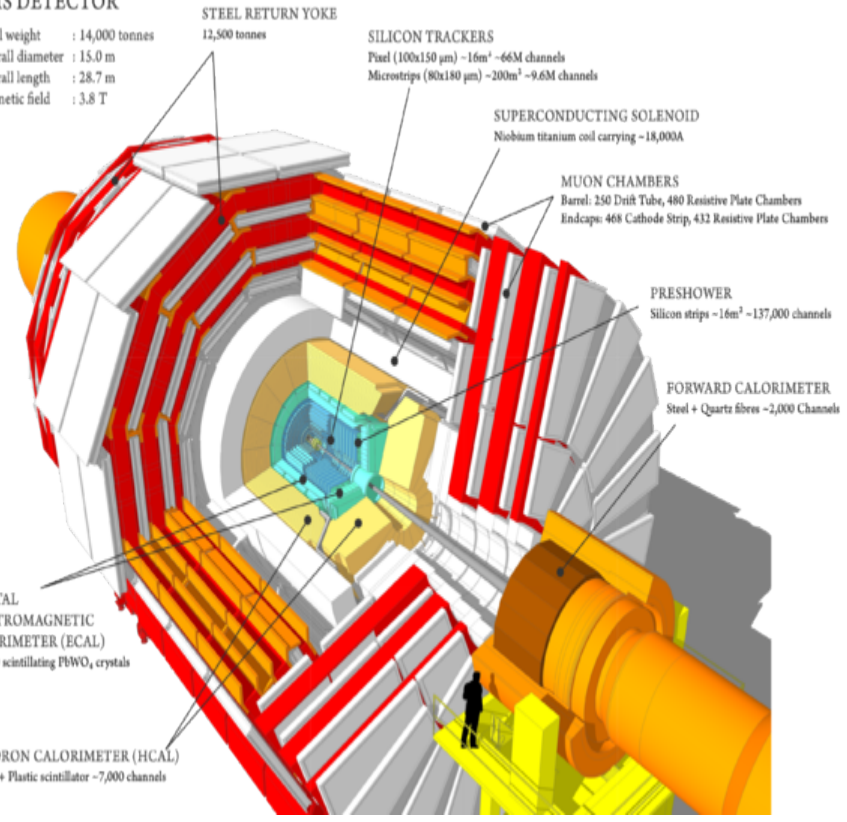


# Large hadron collider @ CERN

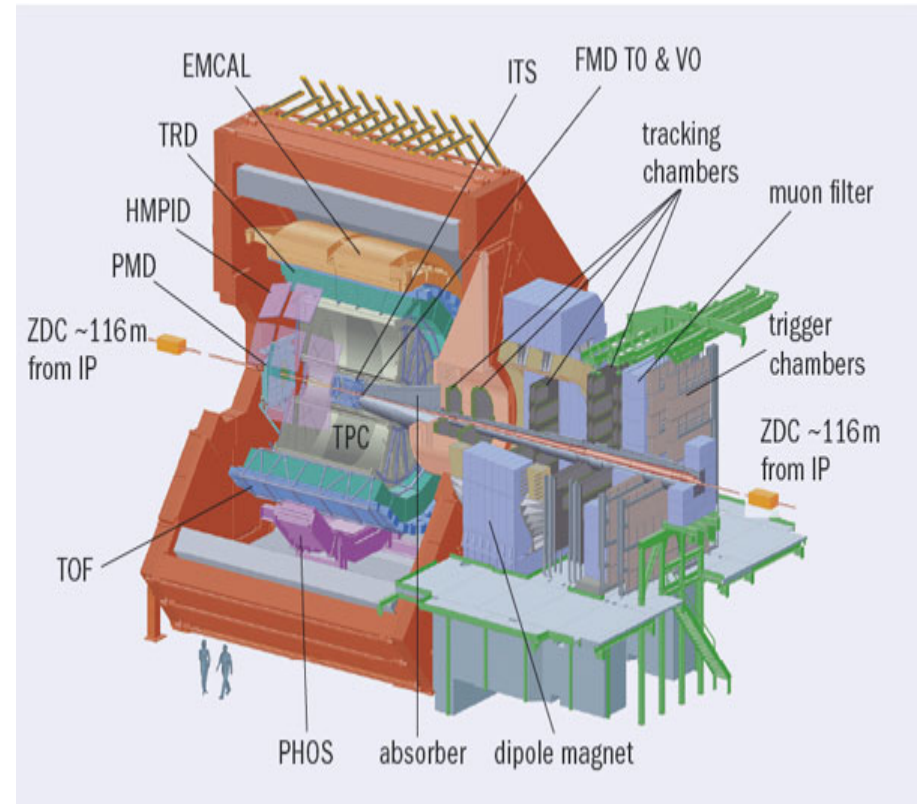
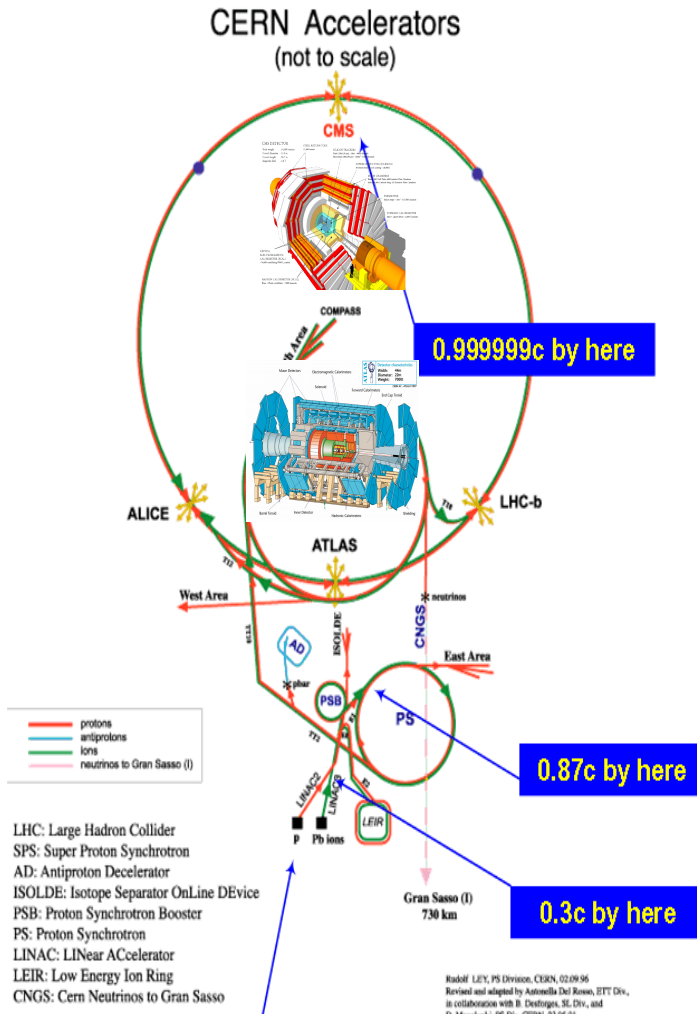


## CMS DETECTOR

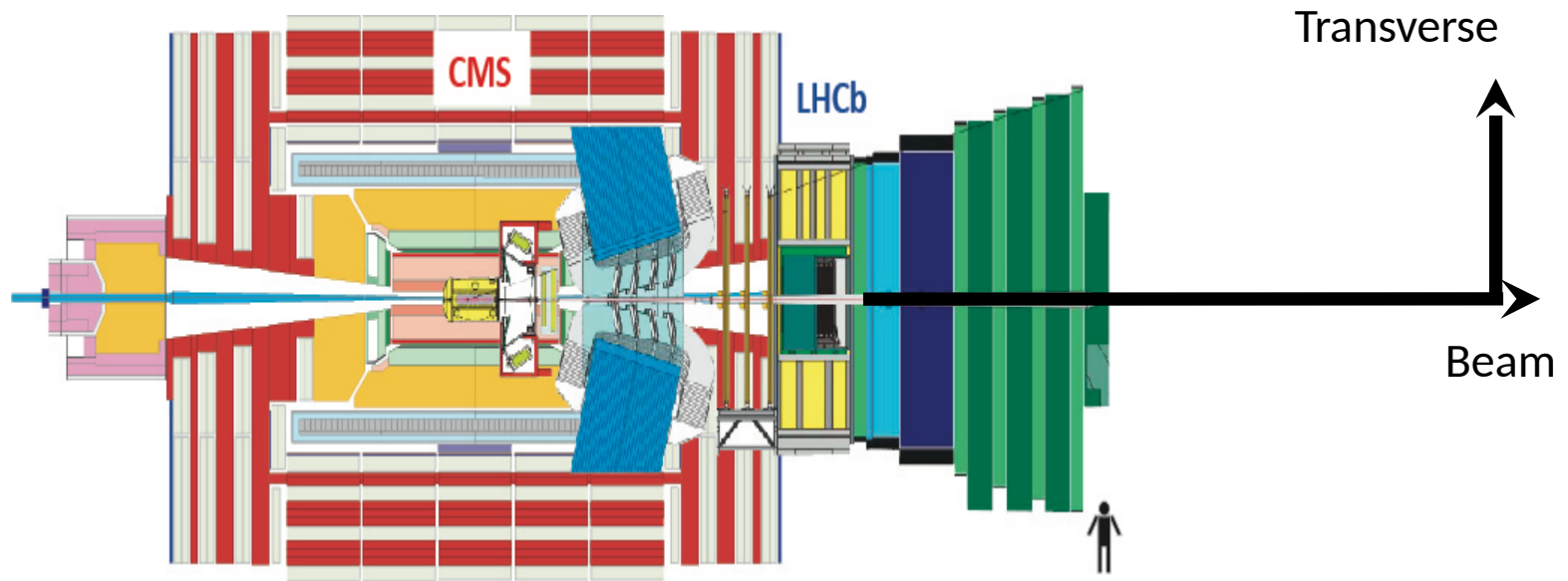
Total weight : 14,000 tonnes  
 Overall diameter : 15.0 m  
 Overall length : 28.7 m  
 Magnetic field : 3.8 T



# Large hadron collider @ CERN



# LHCb and CMS geometries compared



$p_T$  = Transverse momentum  
 $E_T$  = Transverse energy