

**Matériel de**  
Louis Henry  
Vincenzo Chiochia

# **Ecole « techniques de base du détecteur » Cargèse**

**Pascal Vincent**  
**Université Pierre et Marie Curie**

Introduction  
Les systèmes expérimentaux  
Les interactions des particules chargées  
Les interactions des particules neutres  
Les détecteurs de particules  
**Visite d'une expérience**

# Visite d'une expérience

2005 : **HESS** et les astroparticules

2007 : **ATLAS** et la recherche du Higgs

2009 : Neutrinos, de **Poltergeist** à **T2K**

2011 : **CMS** à la recherche d'une nouvelle physique

2013 : absent ...

2015 : **AMS-02**, la recherche d'antimatière

2017 : **VIRGO**, les ondes gravitationnelles

# Visite d'une expérience

2005 : **HESS** et les astroparticules

2007 : **ATLAS** et la recherche du Higgs

2009 : Neutrinos, de **Poltergeist** à **T2K**

2011 : **CMS** à la recherche d'une nouvelle physique

2013 : absent ...

2015 : **AMS-02**, la recherche d'antimatière

2017 : **VIRGO**, les ondes gravitationnelles

**2019 : LHCb ou l'étude des saveurs**

# LHCb ou l'étude des saveurs

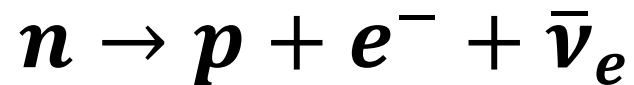
- **Qu'est ce que les saveurs**
- **Pourquoi s'intéressent t'on aux saveurs**
- **L'expérience LHCb**
- **Quelques résultats**

Les saveurs

**C'EST QUOI ?**

# Les particules

- Dans la première moitié du siècle dernier, le modèle atomique était complet et le neutrino de la radioactivité bêta était découvert.

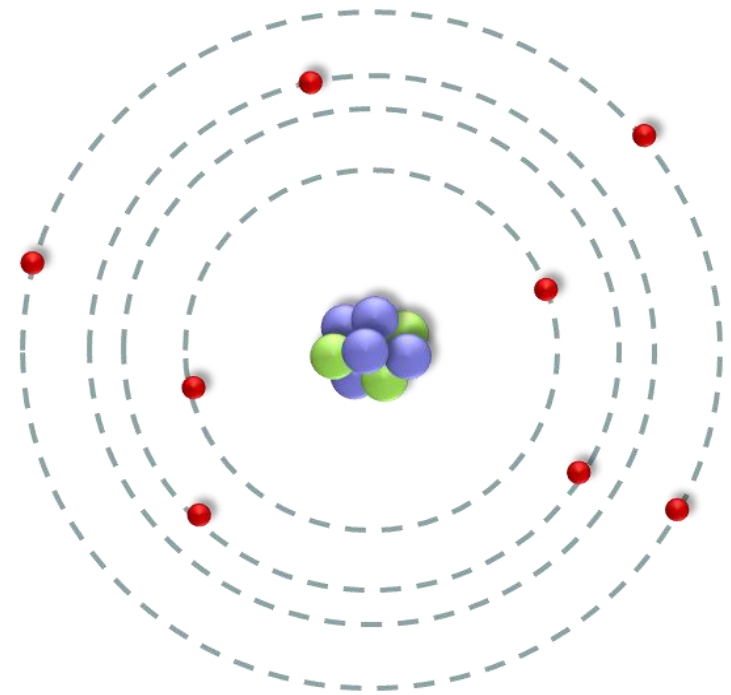


$e^{-}$

$\nu_e$

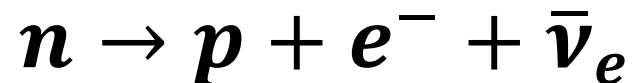
$p$

$n$



# Les particules

- Dans la première moitié du siècle dernier, le modèle atomique était complet et le neutrino de la radioactivité bêta était découvert.



$e^{-}$

$\nu_e$

Dans les rayonnements cosmique :

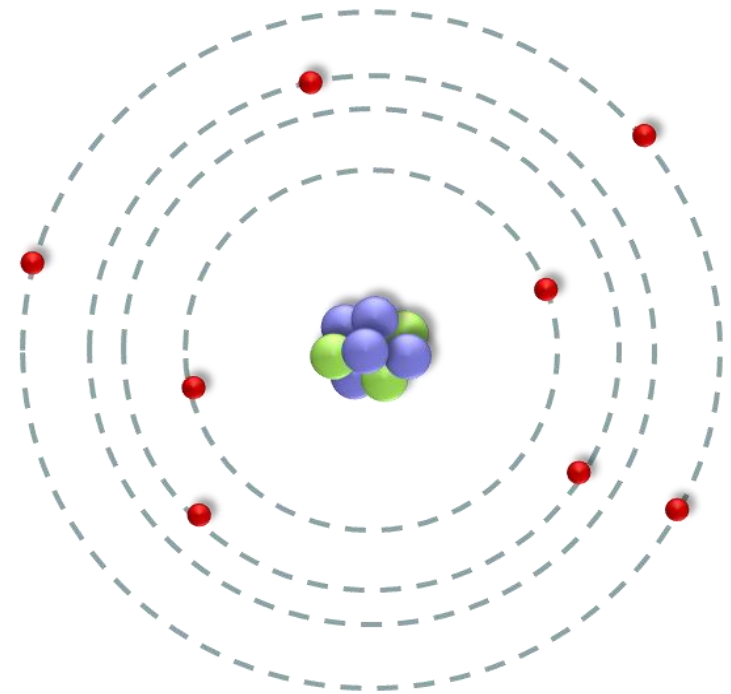
1947 : le pion

1949 : les particules  $K^{+}$  et  $K^{-}$

1951 : découverte du kaon neutre ( $K^0$ ), baptisée « V-particule »

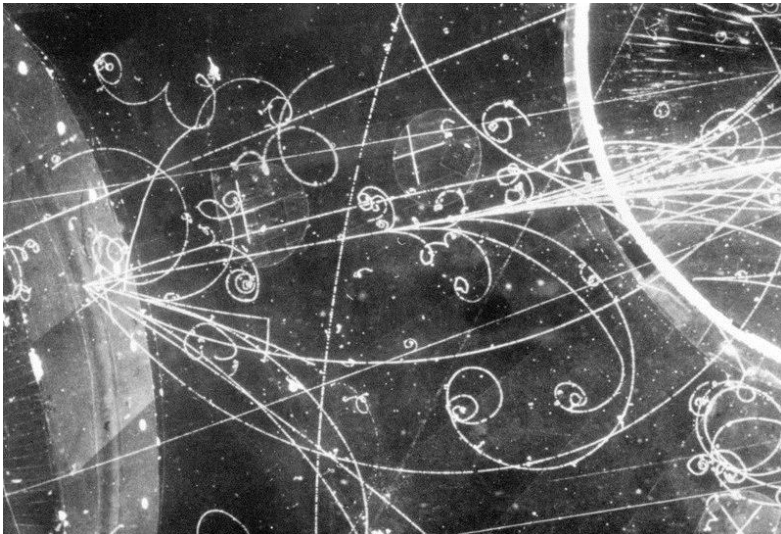
$p$

$n$



# Les particules

- Dans les années 60, trop de nouvelles particules différentes



$e^-$   $\mu^-$

$\nu_e$

$\pi^+, \pi^-$   
 $\pi^0, \rho, \alpha$   
 $\eta, \eta', h, h', \omega, \phi, f, f'$   
 $K^+, K^0, \bar{K}^0, K^-$

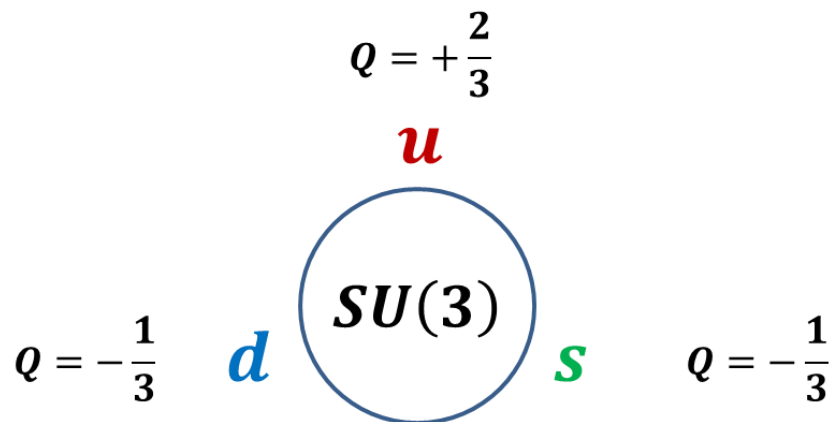
$p, N^+, \Delta^+$   
 $n, N^0, \Delta^0$   
 $\Delta^{++}, \Delta^-$   
 $(\Lambda^0, \Sigma^0), \Sigma^+, \Sigma^-$   
 $\Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$






# Les quarks

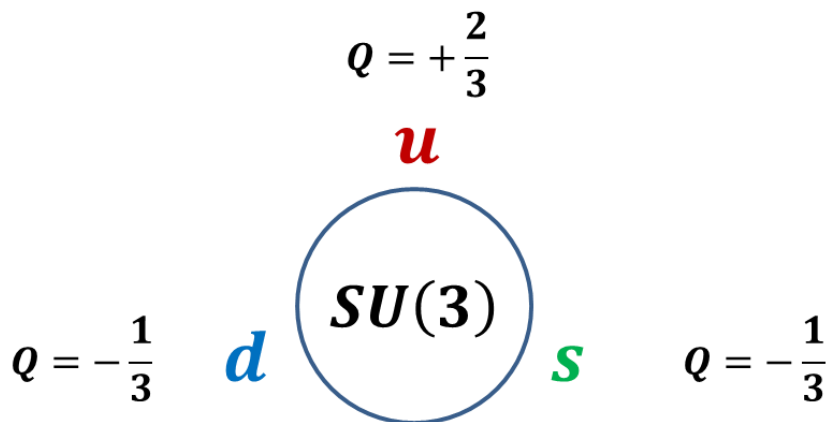
- Dans les années 60, trop de nouvelles particules différentes
- Introduction du modèle des quarks
  - SU(3) : u, d et s identiques vis-à-vis de l'interaction forte



$\pi^+, \pi^-$   
 $\pi^0, \mathbf{b}, \rho, \mathbf{a}$   
 $\eta, \eta', \mathbf{h}, \mathbf{h}', \omega, \phi, \mathbf{f}, \mathbf{f}'$   
 $K^+, K^0, \bar{K}^0, K^-$   
 $\mathbf{p}, N^+, \Delta^+$   
 $\mathbf{n}, N^0, \Delta^0$   
 $\Delta^{++}, \Delta^-$   
 $(\Lambda^0, \Sigma^0), \Sigma^+, \Sigma^-$   
 $\Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$

# Les quarks

- Dans les années 60, trop de nouvelles particules différentes
- Introduction du modèle des quarks
  - SU(3) : u, d et s identiques vis-à-vis de l'interaction forte
  - 1969 : Prix Nobel 



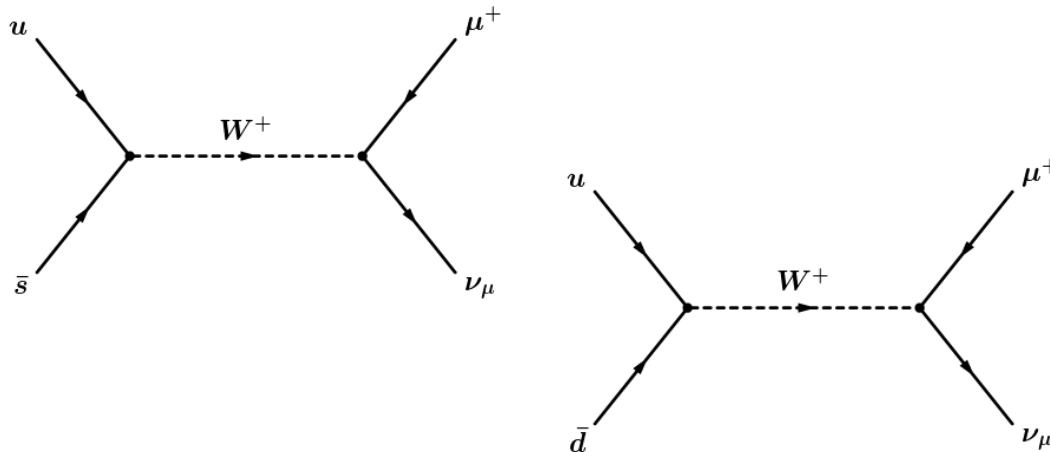
$\pi^+, \pi^-$	$u\bar{d}, \bar{u}d$
$\pi^0, \mathbf{b}, \rho, \mathbf{a}$	$(u\bar{u}, d\bar{d})$
$\eta, \eta', h, h', \omega, \phi, f, f'$	$(u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s})$
$K^+, K^0, \bar{K}^0, K^-$	$u\bar{s}, d\bar{s}, \bar{d}s, \bar{u}s$
$p, N^+, \Delta^+$	$uud$
$n, N^0, \Delta^0$	$udd$
$\Delta^{++}, \Delta^-$	$uuu, ddd$
$(\Lambda^0, \Sigma^0), \Sigma^+, \Sigma^-$	$uds, uus, dds$
$\Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$	$uss, dss, sss$

# Les saveurs

- Mais pourquoi certaines vivent longtemps et d'autres pas

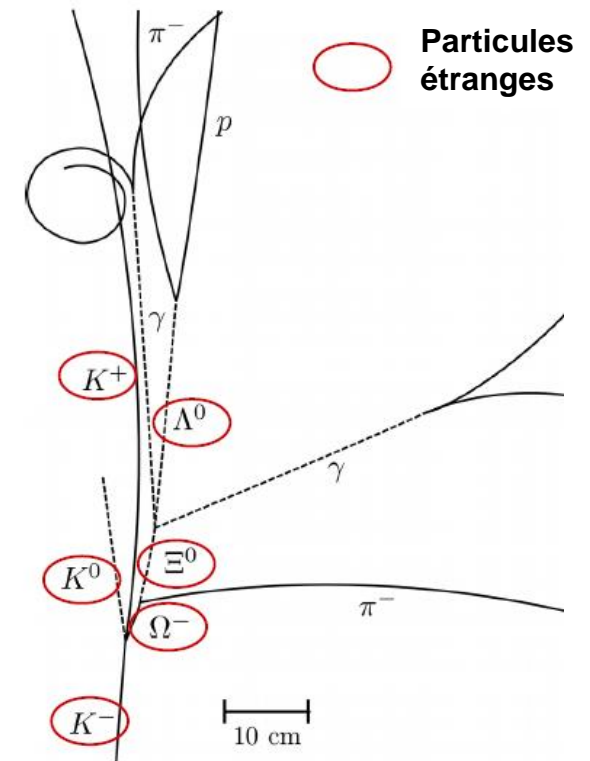
$$\tau_{K^+} = (1,238 \pm 0,002) \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$Br(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = (63,56 \pm 0,11)\%$$



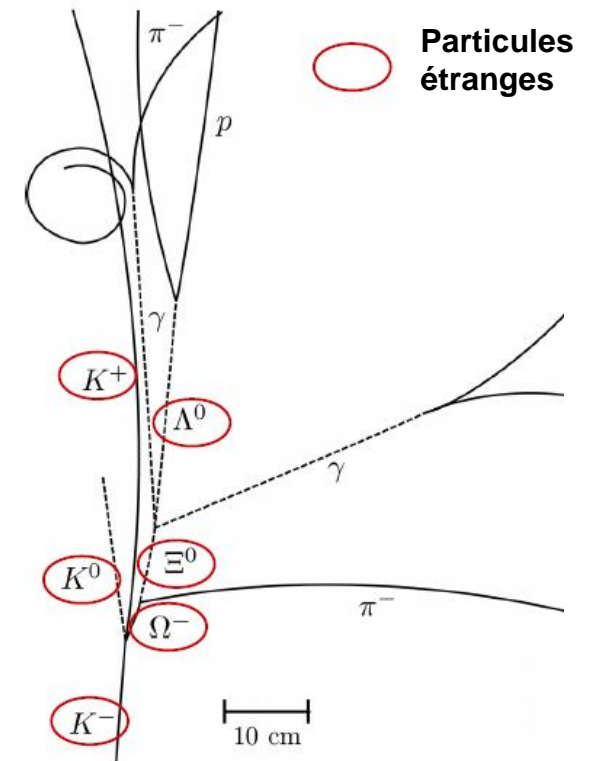
$$\tau_{\pi^+} = (2,6033 \pm 0,0005) \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$Br(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = (99,98774 \pm 0,00004)\%$$



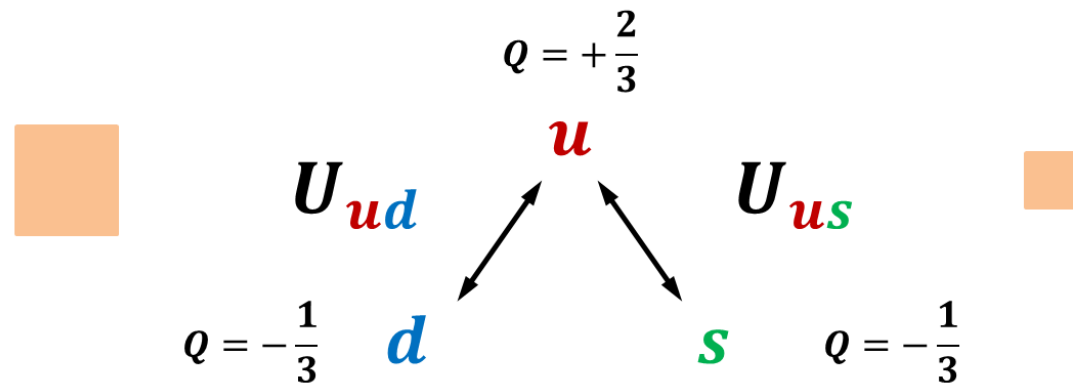
# Les saveurs

- Mais pourquoi certaines vivent longtemps et d'autres pas
  - Interaction faible :  $d \rightarrow u \neq s \rightarrow u$

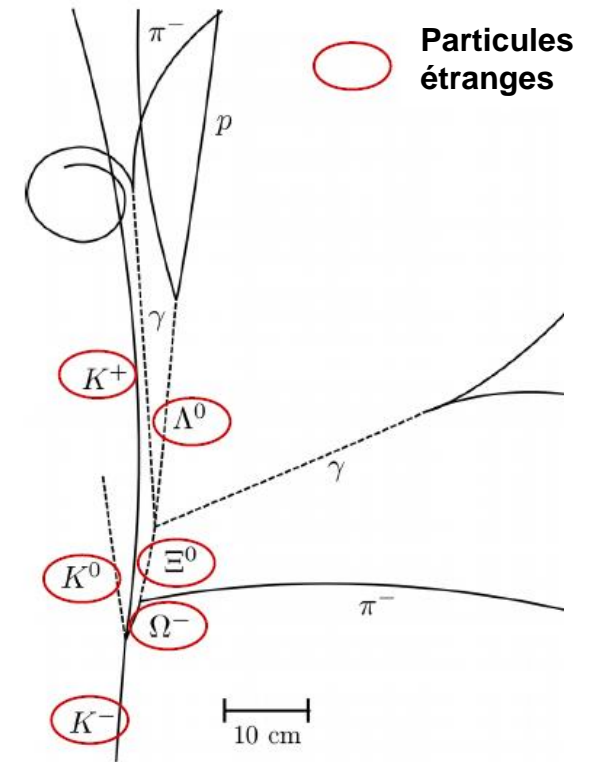


# Les saveurs

- Mais pourquoi certaines vivent longtemps et d'autres pas
  - Interaction faible :  $d \rightarrow u \neq s \rightarrow u$

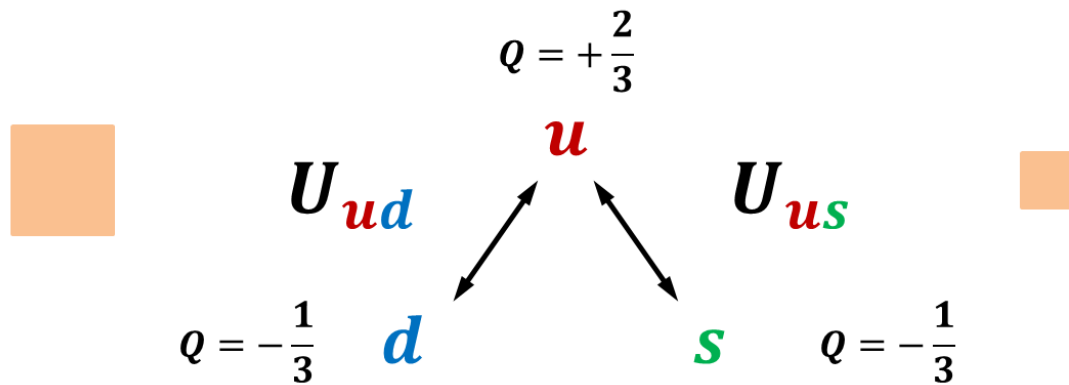


**Nicola Cabibbo**



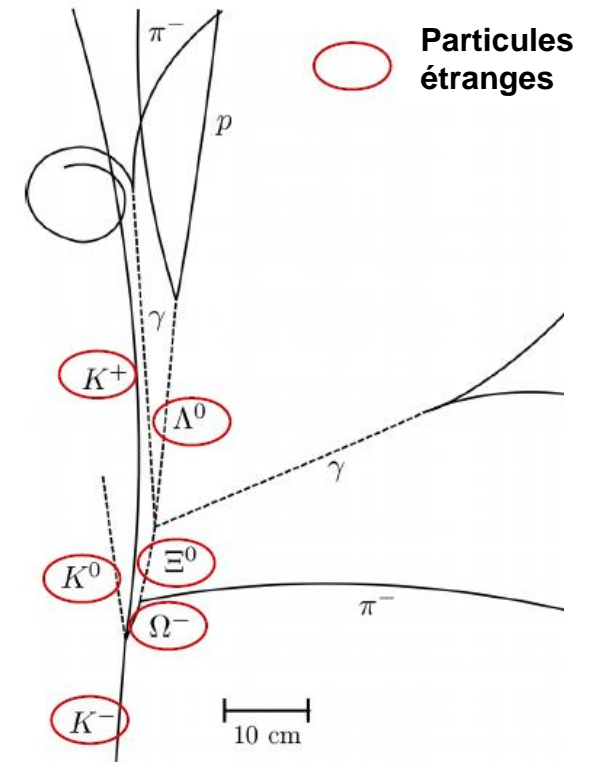
# Les saveurs

- Mais pourquoi certaines vivent longtemps et d'autres pas
  - Interaction faible :  $d \rightarrow u \neq s \rightarrow u$



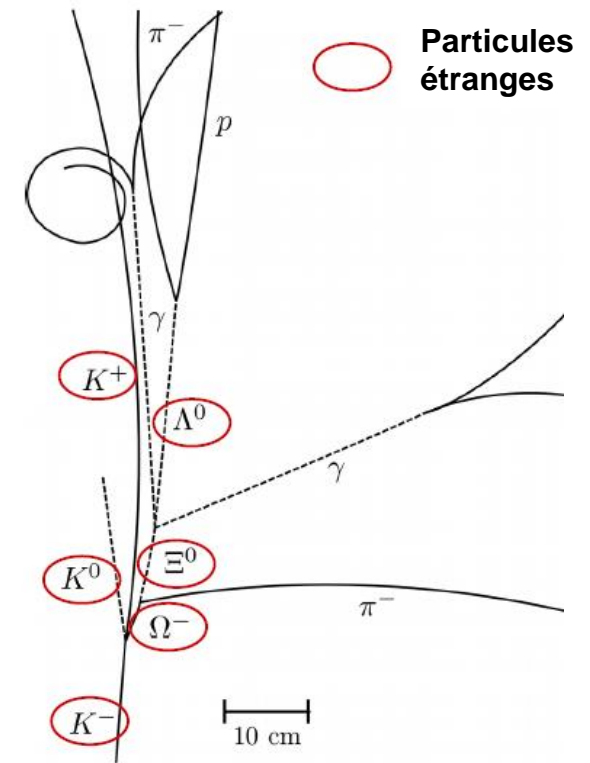
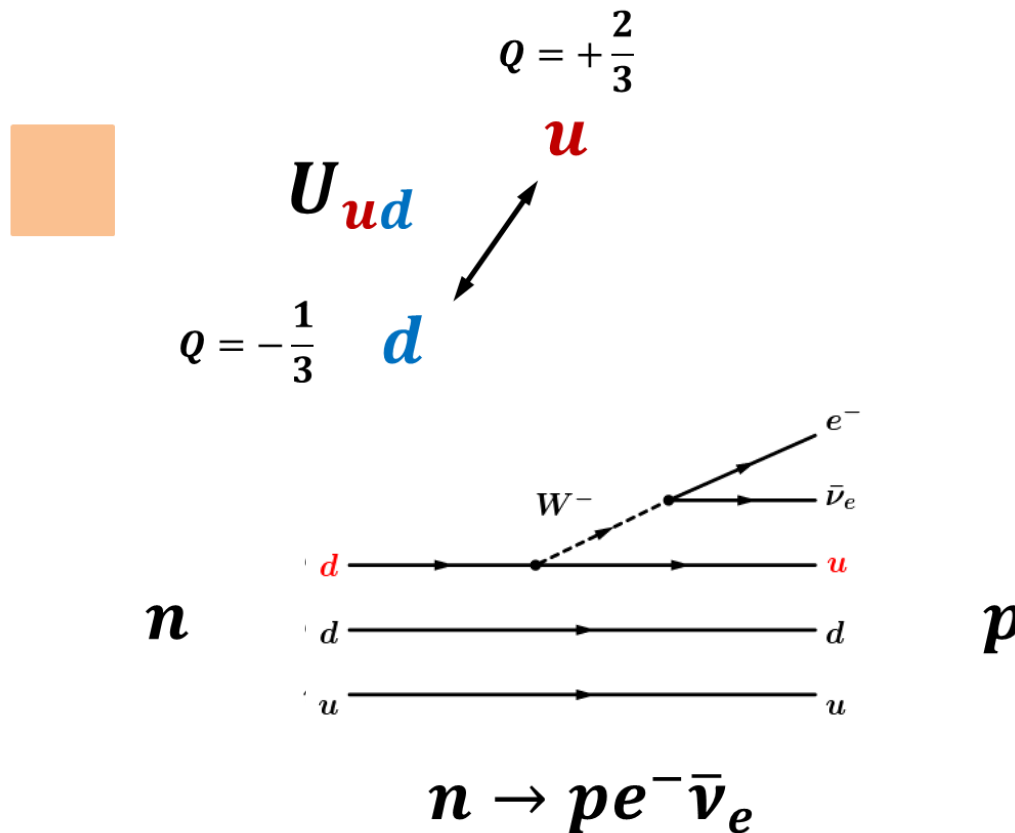
Nicola Cabibbo

$$\begin{aligned}
 e^- & \quad u' = u \\
 \nu_e & \quad d' = d \cos \theta_C + s \sin \theta_C \\
 U_{ud} & \cong 0,97 \quad \swarrow \quad \nwarrow \quad U_{us} \cong 0,02
 \end{aligned}$$



# Les saveurs

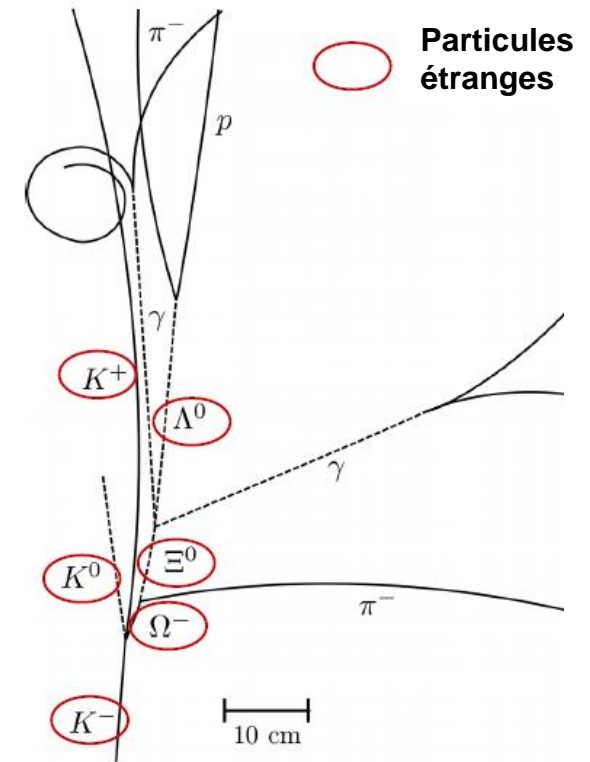
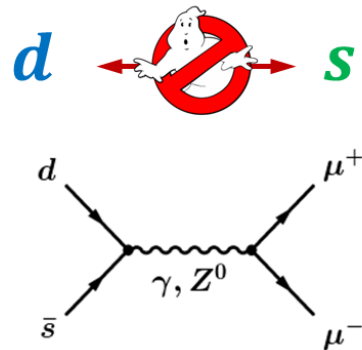
- Mais pourquoi certaines vivent longtemps et d'autres pas
  - Interaction faible :  $d \rightarrow u \neq s \rightarrow u$



# Les saveurs

- Pourquoi les saveurs ne changent elles pas par courant neutre ?

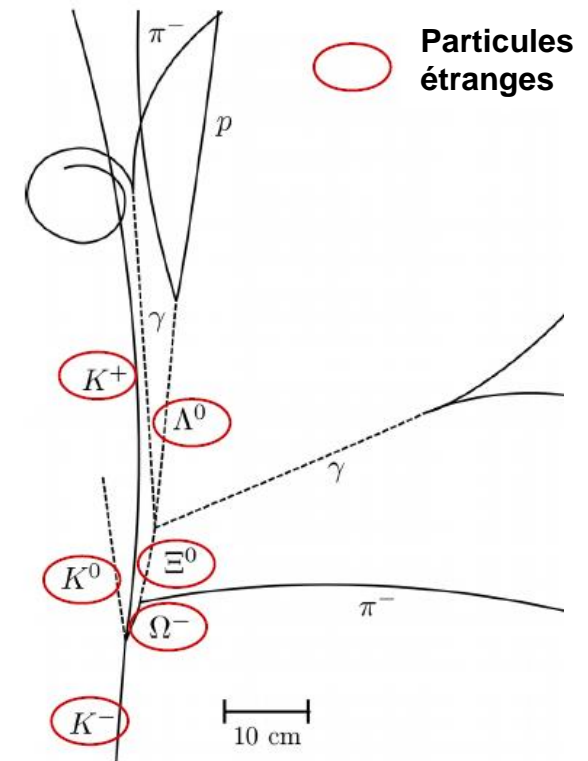
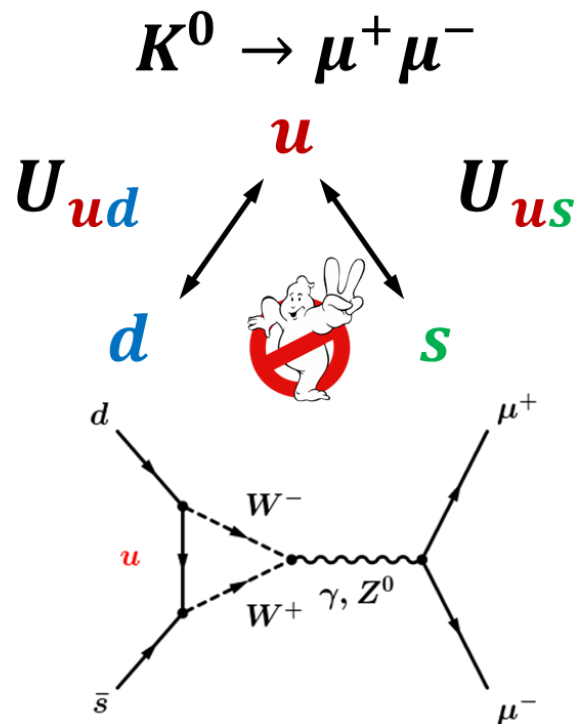
$$K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$





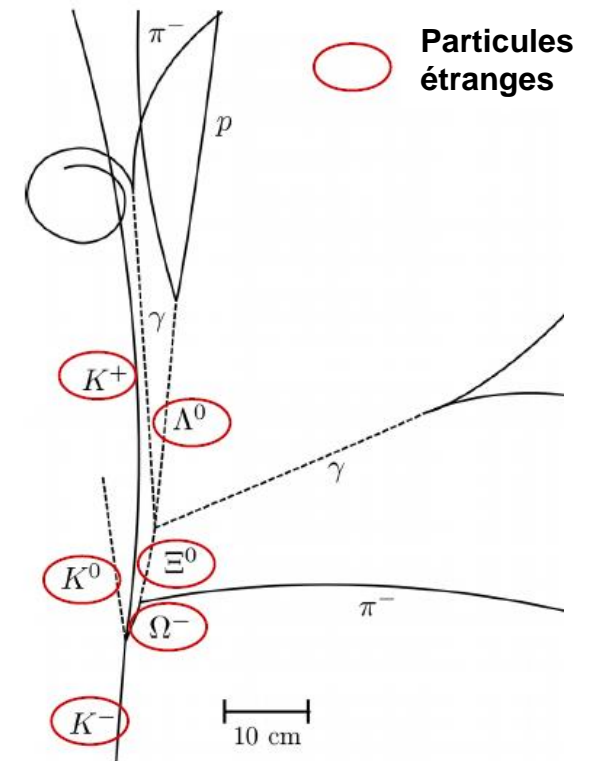
# Les saveurs

- Du fait de la différence d'amplitude des éléments de matrice, la transformation est « supprimé de Cabibbo ».



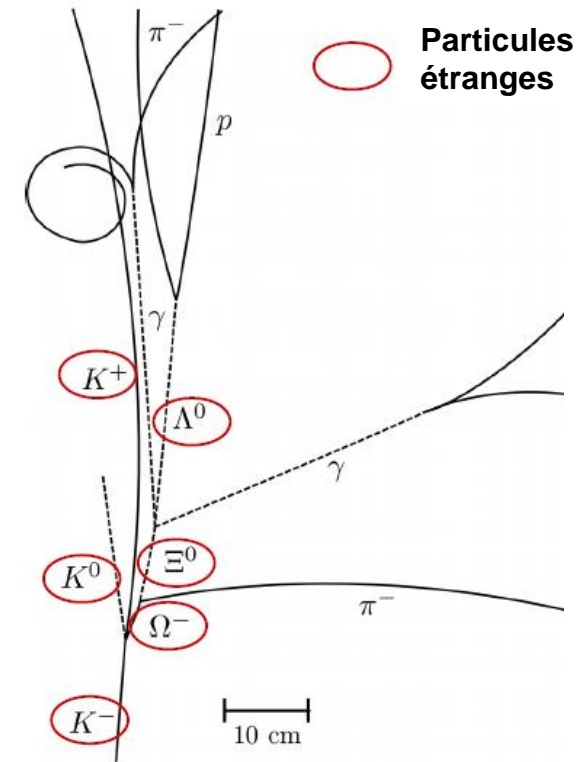
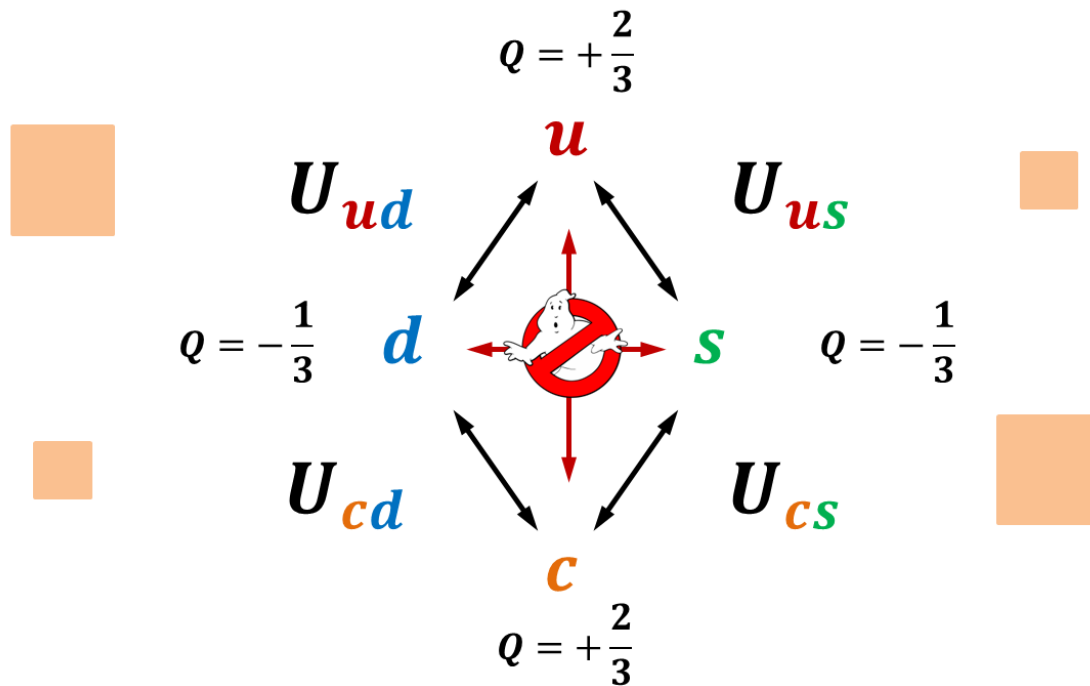
# Les saveurs

- Mécanisme de GIM (1970) : s'il existe un 4<sup>ième</sup> quark de type « u » cela peut expliquer la suppression des changements de saveur par courant neutre.



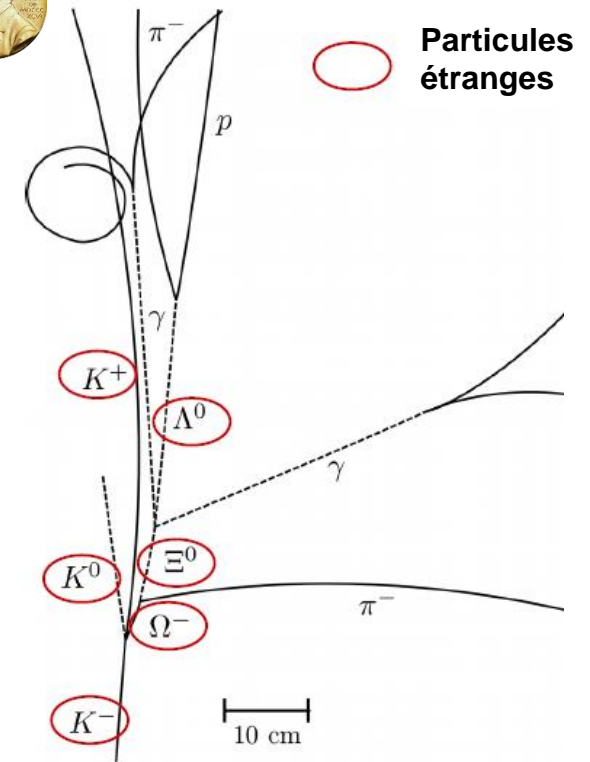
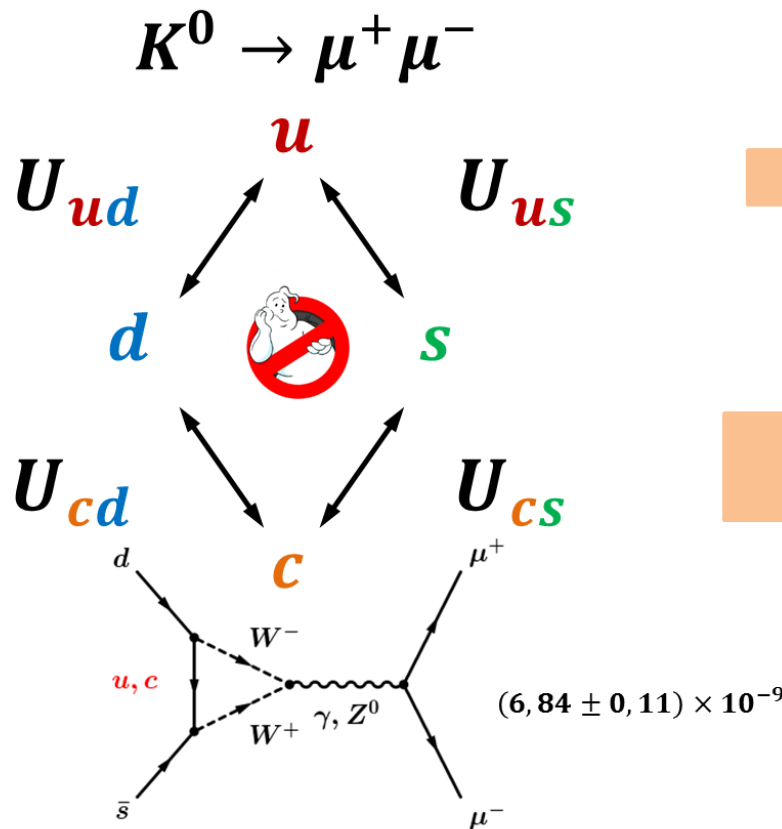
# Les saveurs

- Mécanisme de GIM (1970) : s'il existe un 4<sup>ième</sup> quark de type « u » cela peut expliquer la suppression des changements de saveur par courant neutre.



# Les saveurs

- De plus, un 4<sup>ième</sup> quark de type « u » avec une **très grande masse** cela préserve la « suppression » de la désintégration des kaons neutres en paire de muons. Observé en 1974



# Les saveurs

- Avec l'avènement des mesures de précision la matrice de **Cabibbo** (**Glashow, Iliopoulos, Maiani**) s'avère non unitaire (la somme des probabilités  $\neq 1$ ).

$$\begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} \\ U_{cd} & U_{cs} \end{pmatrix}$$

**Nicola Cabibbo**

**Glashow, Iliopoulos, Maiani**

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

# Les saveurs

- Avec l'avènement des mesures de précision la matrice de **Cabibbo** (**Glashow, Iliopoulos, Maiani**) s'avère non unitaire (la somme des probabilités  $\neq 1$ ).
- **Kobayashi** et **Maskawa** (1973) : troisième génération de quarks.

$$\begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} & \varepsilon^2 \\ U_{cd} & U_{cs} & \varepsilon \\ \varepsilon^2 & \varepsilon & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

# Les saveurs

- Avec l'avènement des mesures de précision la matrice de **Cabibbo** (**Glashow, Iliopoulos, Maiani**) s'avère non unitaire (la somme des probabilités  $\neq 1$ ).
- **Kobayashi** et **Maskawa** (1973) : troisième génération de quarks.

$$\begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} & \varepsilon^2 \\ U_{cd} & U_{cs} & \varepsilon \\ \varepsilon^2 & \varepsilon & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} & U_{ub} \\ U_{cd} & U_{cs} & U_{cb} \\ U_{td} & U_{ts} & U_{tb} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

# Les saveurs

- Avec l'avènement des mesures de précision la matrice de **Cabibbo** (**Glashow, Iliopoulos, Maiani**) s'avère non unitaire (la somme des probabilités  $\neq 1$ ).
- **Kobayashi** et **Maskawa** (1973) : troisième génération de quarks.

$$\begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} & U_{ub} \\ U_{cd} & U_{cs} & U_{cb} \\ U_{td} & U_{ts} & U_{tb} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Nicola Cabibbo} \\ \text{Glashow, Iliopoulos, Maiani} \\ \text{Kobayashi, Maskawa} \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} 1994 \\ 1977 \end{array}$$



# Les saveurs

- Avec l'avènement des mesures de précision la matrice de **Cabibbo** (**Glashow, Iliopoulos, Maiani**) s'avère non unitaire (la somme des probabilités  $\neq 1$ ).
- **Kobayashi** et **Maskawa** (1973) : troisième génération de quarks.

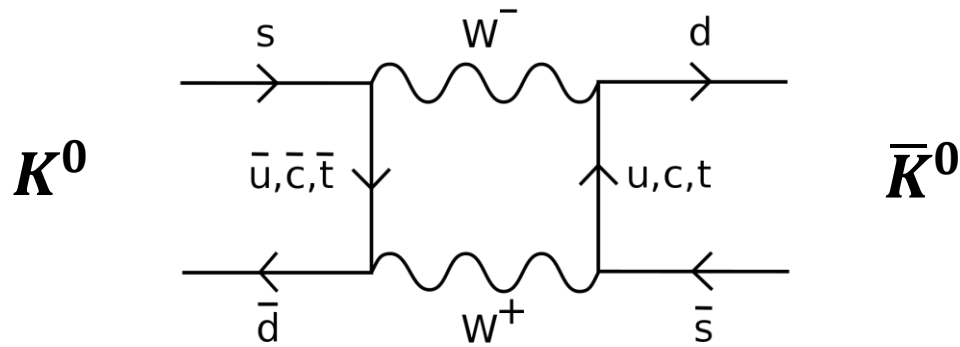
$$\begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} & U_{ub} \\ U_{cd} & U_{cs} & U_{cb} \\ U_{td} & U_{ts} & U_{tb} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

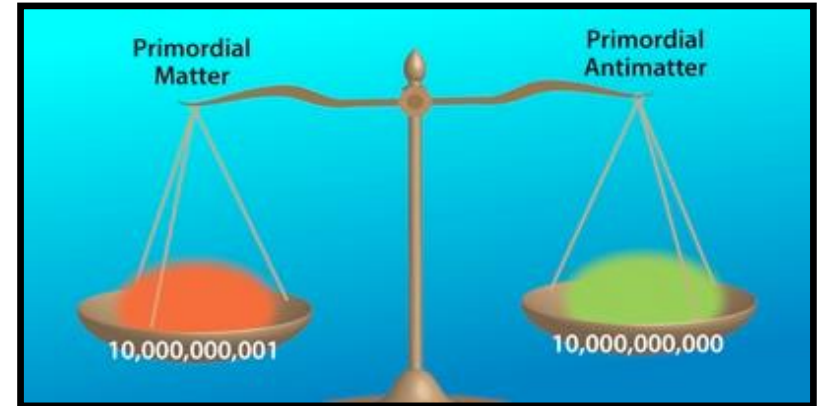
$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad 1974$$

# Que nous disent les saveurs

- Asymétrie matière/antimatière ?

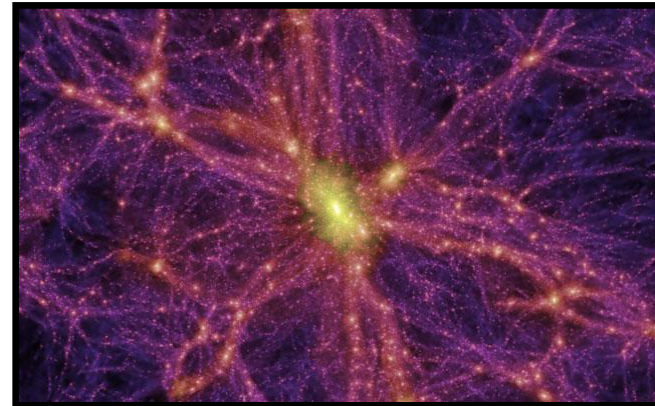
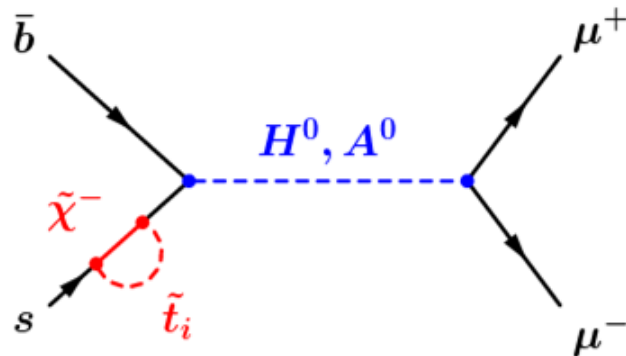
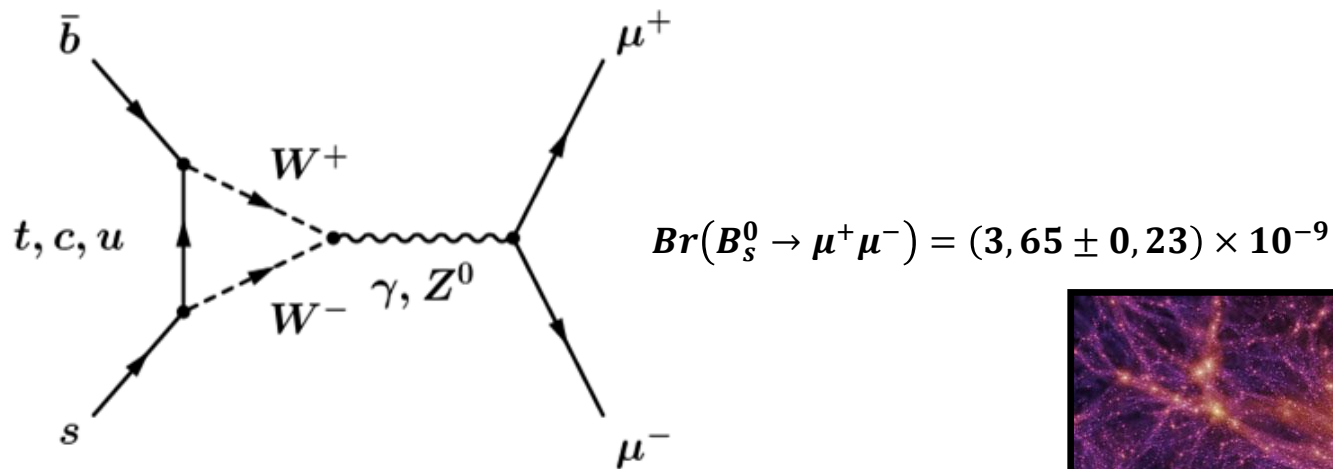


$\leftarrow \neq \rightarrow$



# Que nous disent les saveurs

- Asymétrie matière/antimatière ?
- Matière noire et nouvelle physique ?



# Que nous disent les saveurs

- Asymétrie matière/antimatière ?
- Matière noire et nouvelle physique ?
- Universalité leptonique ?

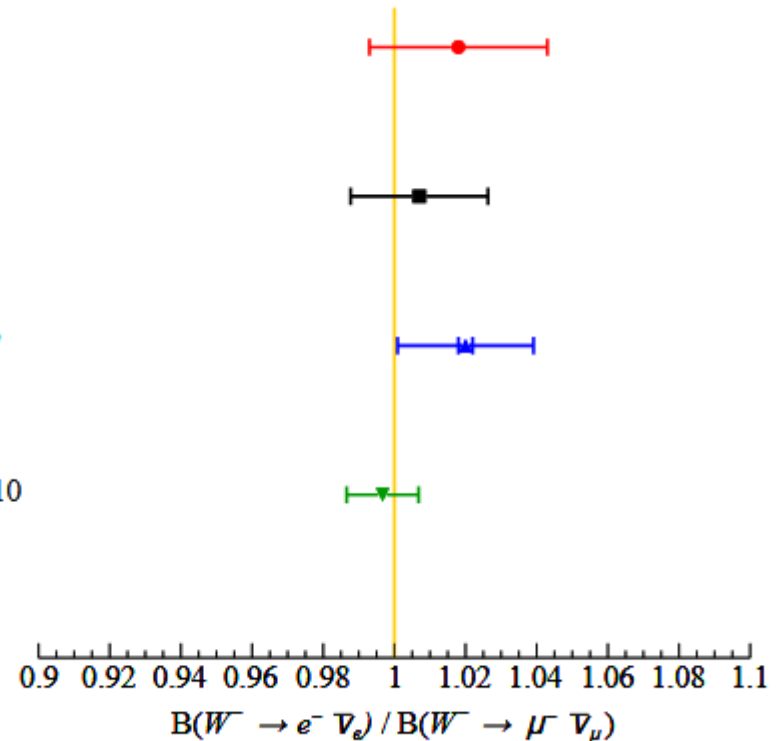
$$\frac{\Gamma_{Z \rightarrow \mu^+ \mu^-}}{\Gamma_{Z \rightarrow e^+ e^-}} = 0.9974 \pm 0.0050.$$

CDF :  $1.018 \pm 0.025$   
J. Phys. G34 (2007) 2457

LEP :  $1.007 \pm 0.019$   
Phys. Rept. 532 (2013) 119

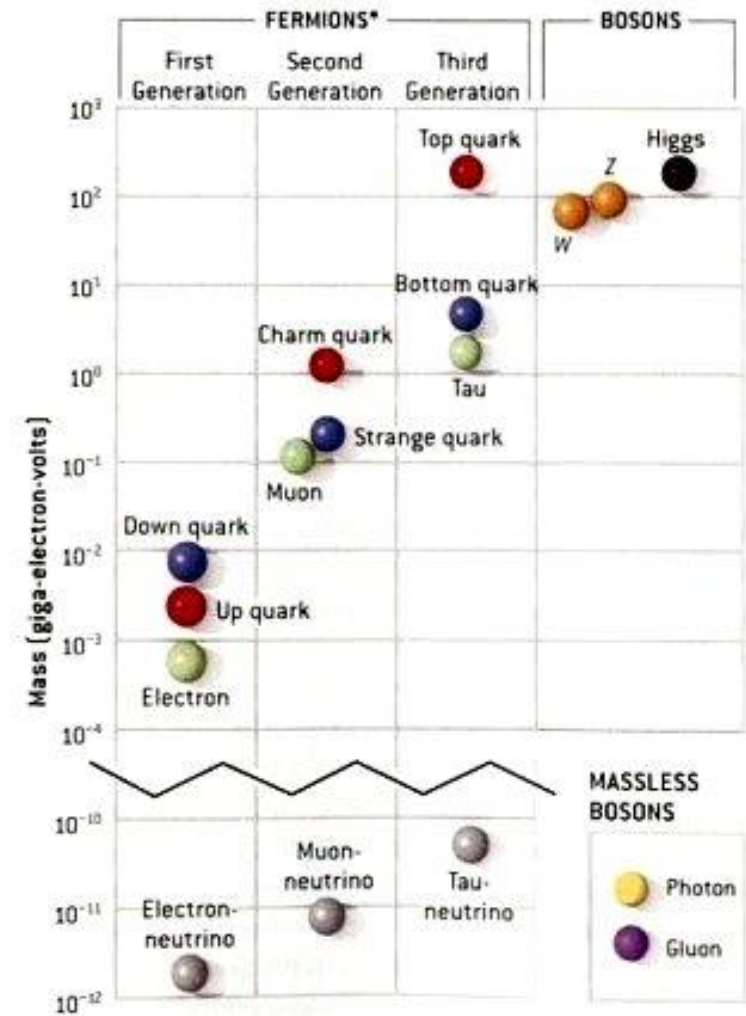
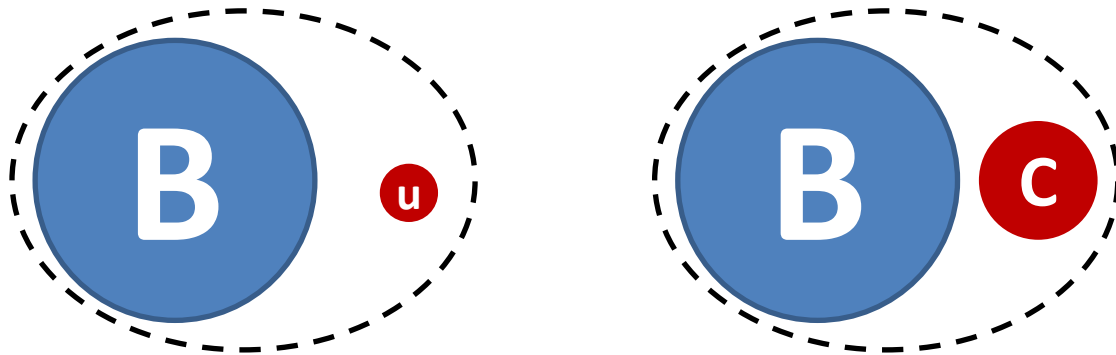
LHCb :  $1.020 \pm 0.019$   
JHEP 10 (2016) 030

ATLAS :  $0.997 \pm 0.010$   
Eur. Phys. J. C77 (2017) 367



# Que nous disent les saveurs

- Asymétrie matière/antimatière ?
- Matière noire et nouvelle physique ?
- Universalité leptonique ?
- Hiérarchie de masse ?



# LHCb

On s'intéresse à quoi ?

- Identifier des hadrons beaux et charmés
- Trouver de nouveaux systèmes liés de quarks
- Etudier leurs états excités
- Mesurer leur durée de vie (par leur temps de vol)
- Etudier leurs modes de désintégration
- Mettre en évidence des canaux de désintégration rare et évaluer l'amplitude de ceux-ci
- Extraire des écarts par rapport aux prédictions du modèle standard

On ne cherche pas à reconstruire l'intégralité de l'événement mais seulement certains comportements.

LHCb

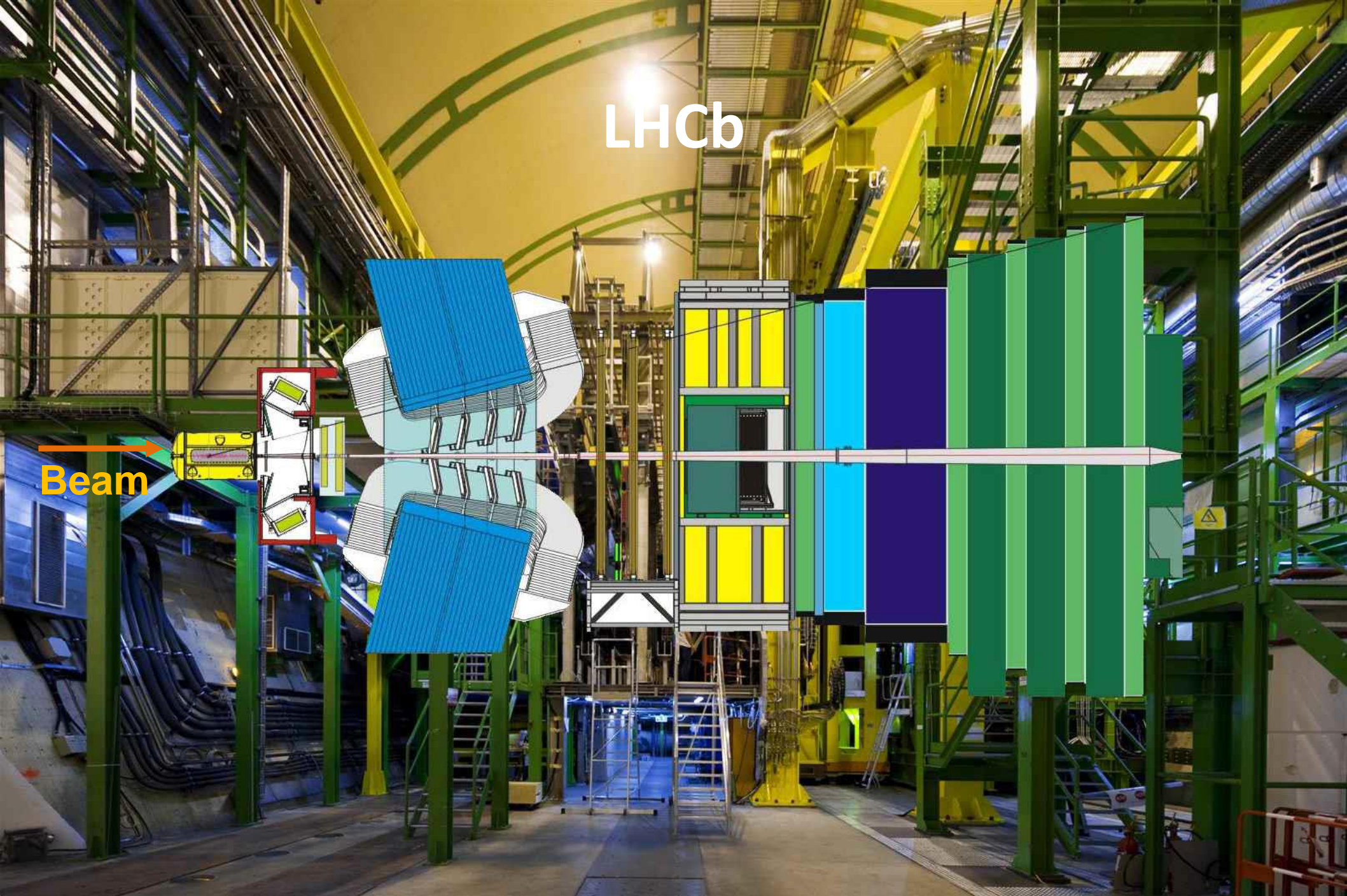
**C'EST QUOI ?**



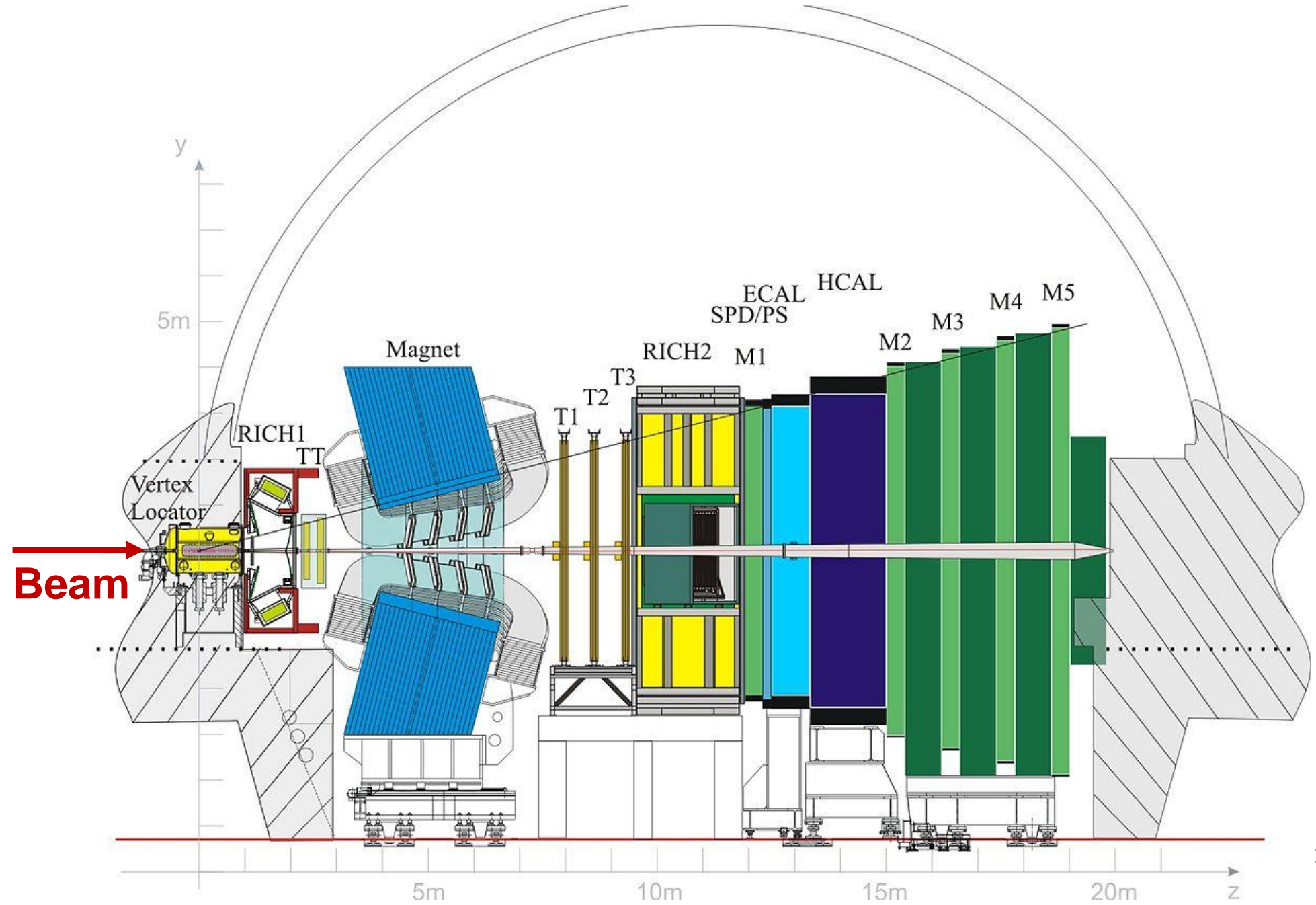


# LHCb

Beam

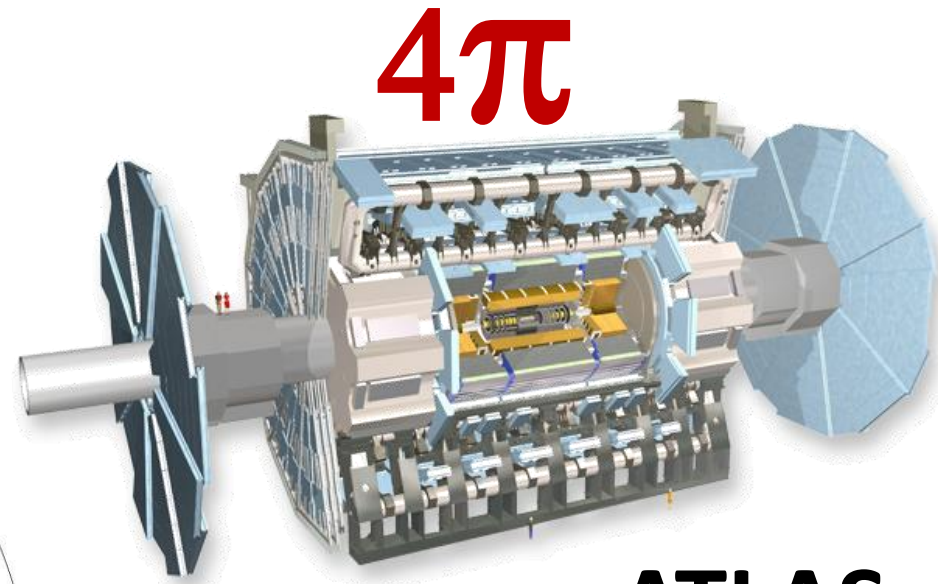
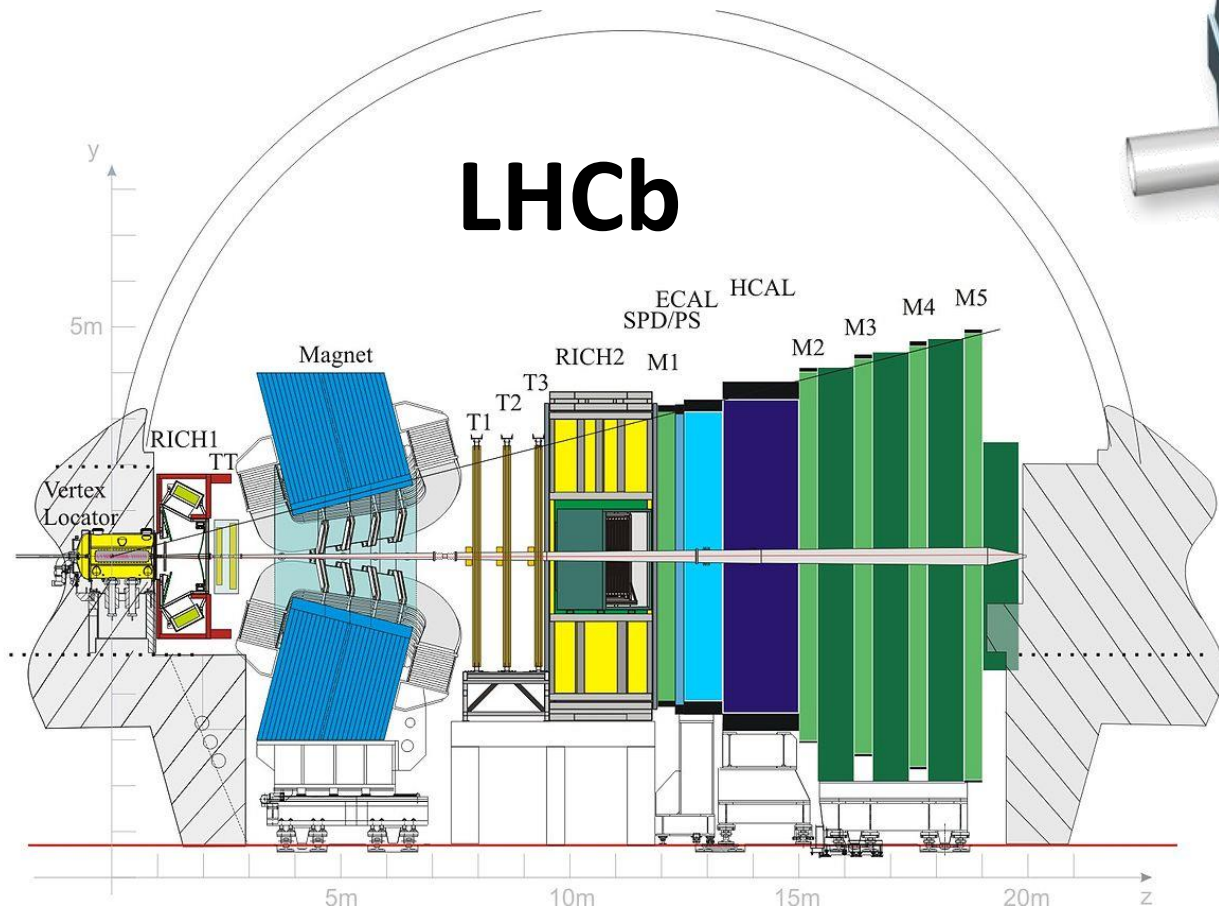


# LHCb



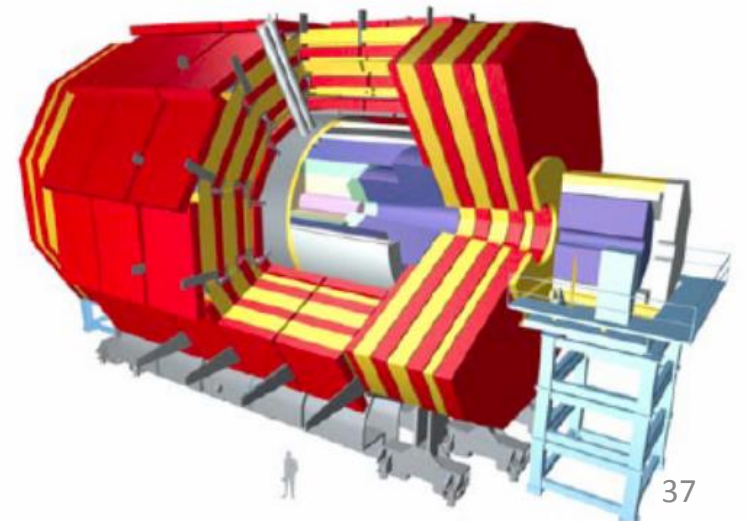
LHCb

# UN DETECTEUR SPECIALISE



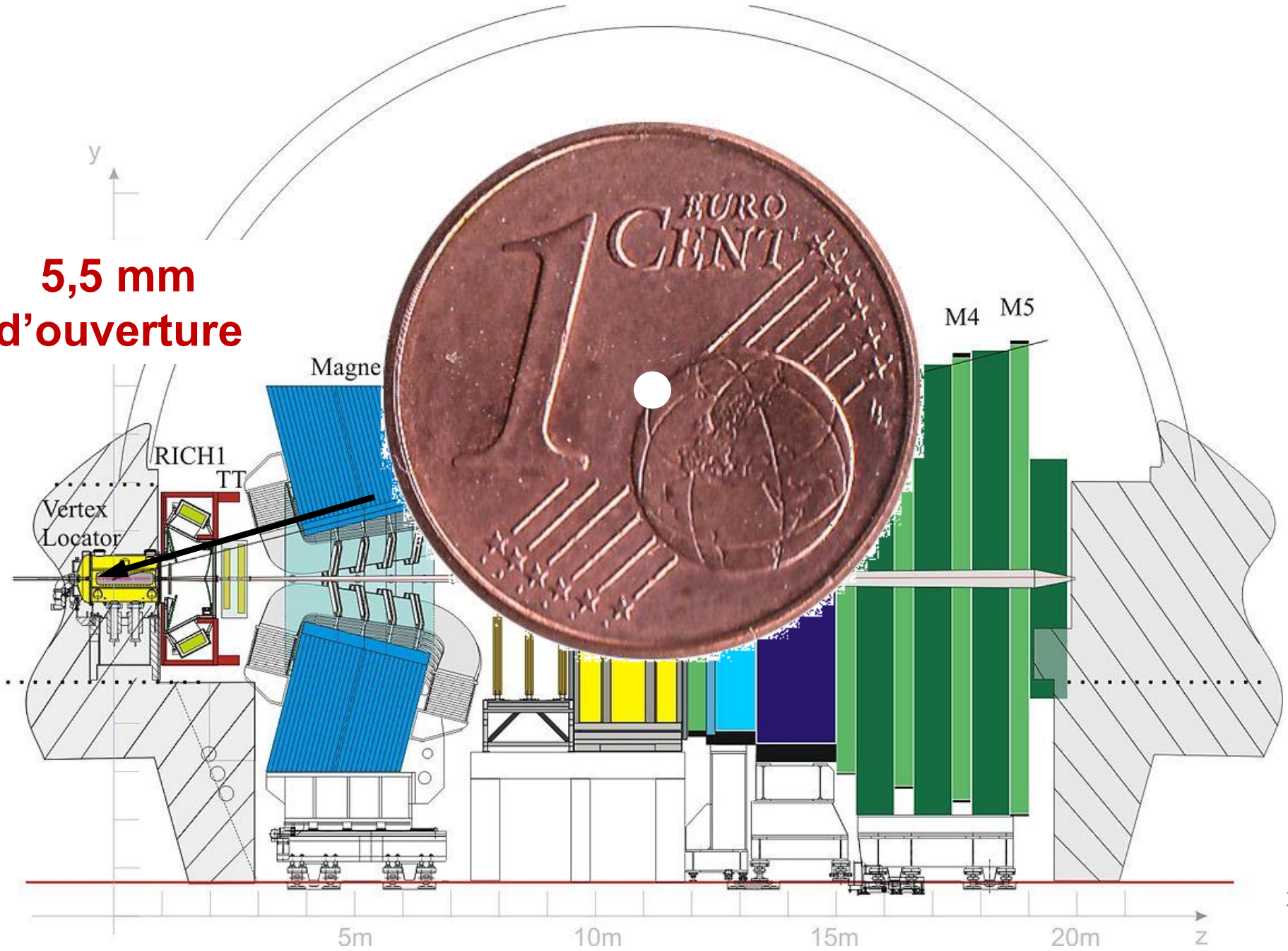
**ATLAS**

**CMS**



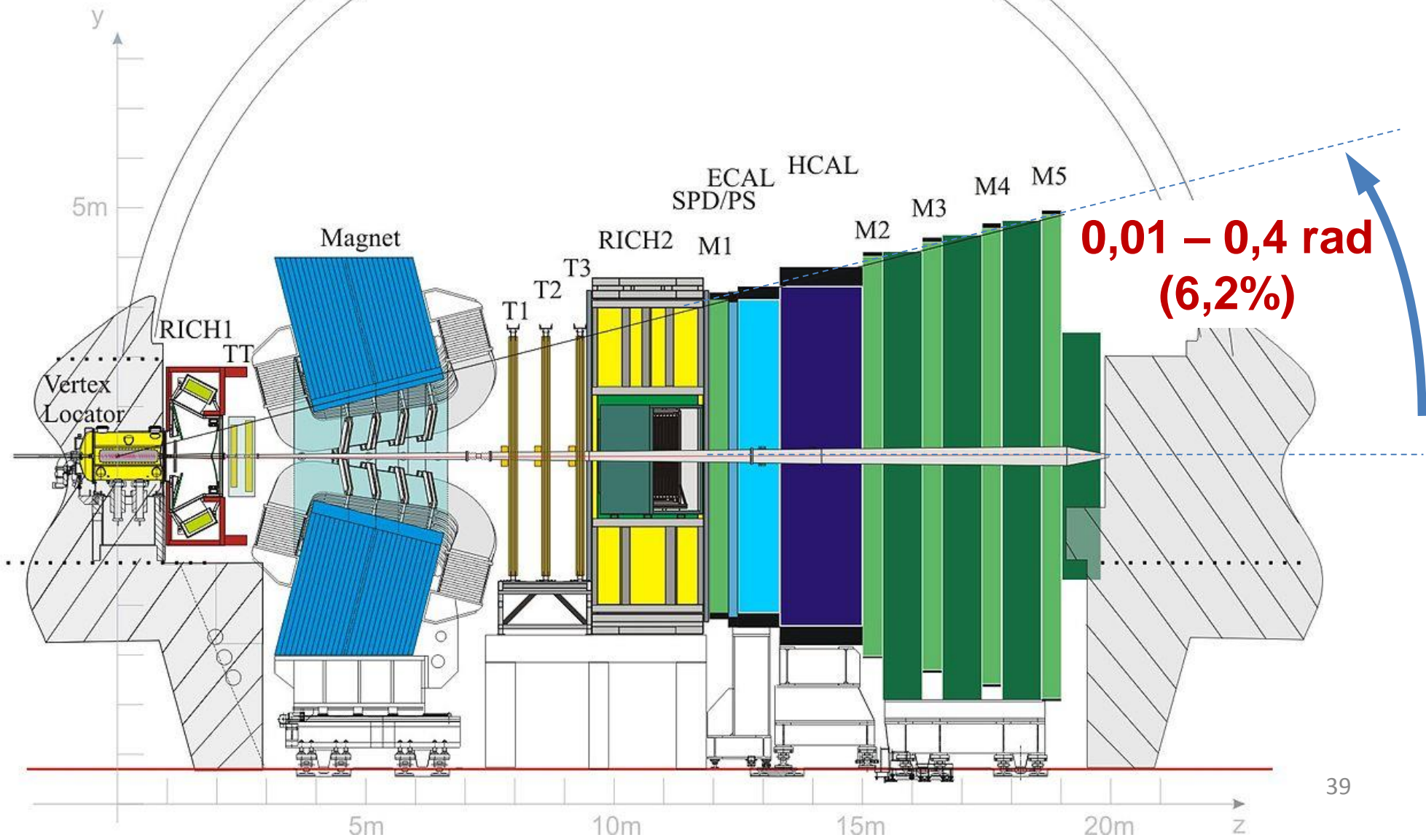
# LHCb

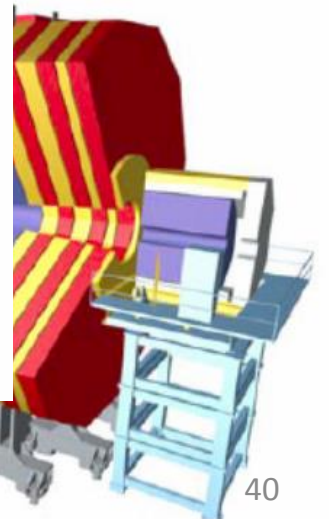
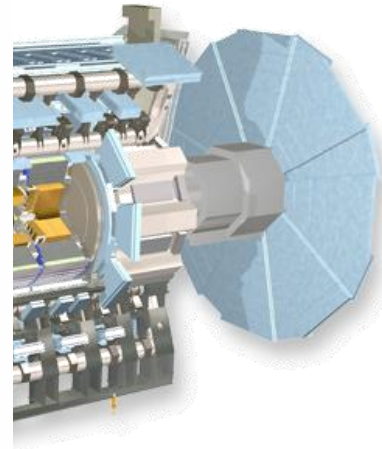
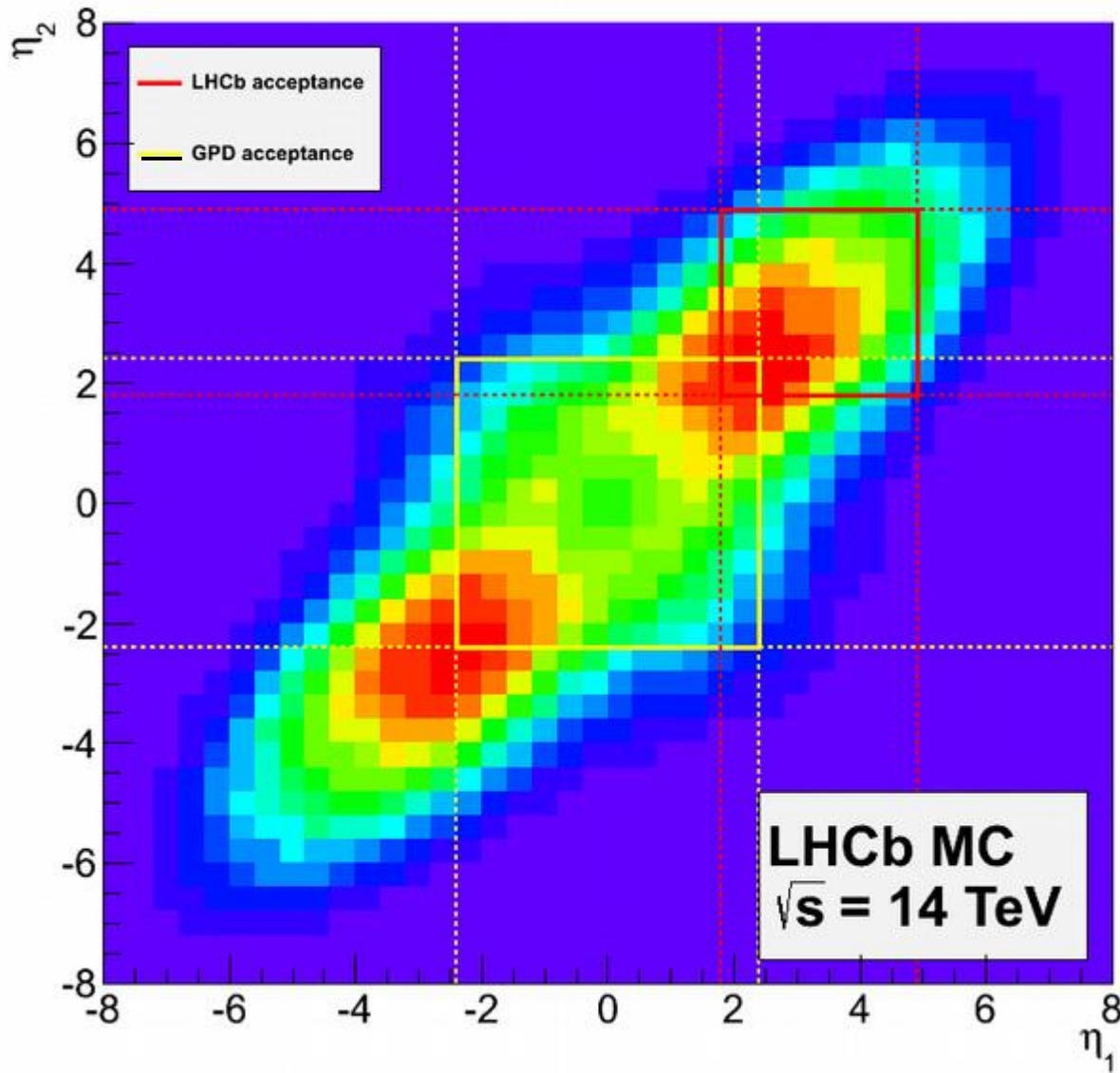
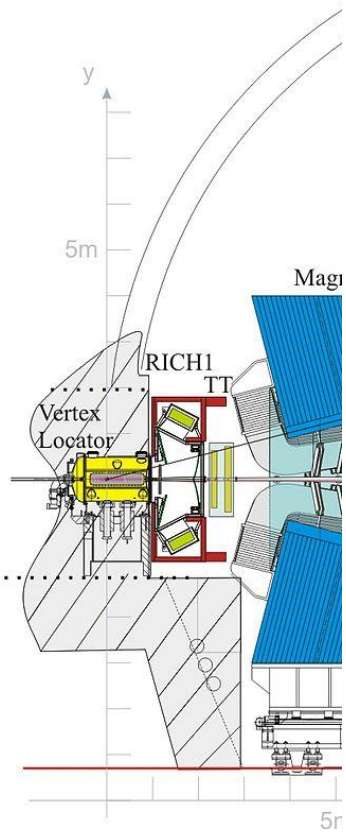
**5,5 mm  
d'ouverture**

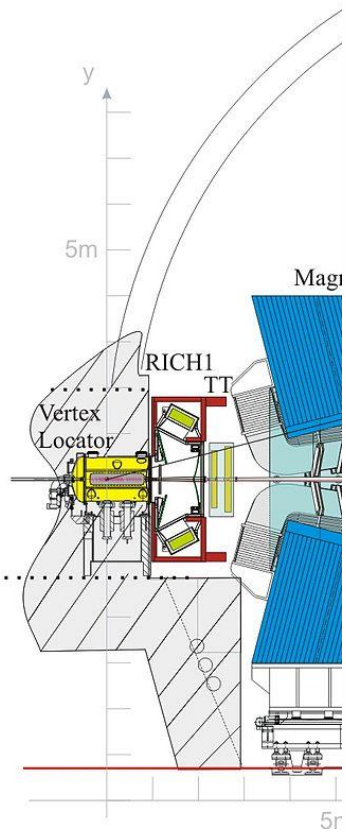


# LHCb

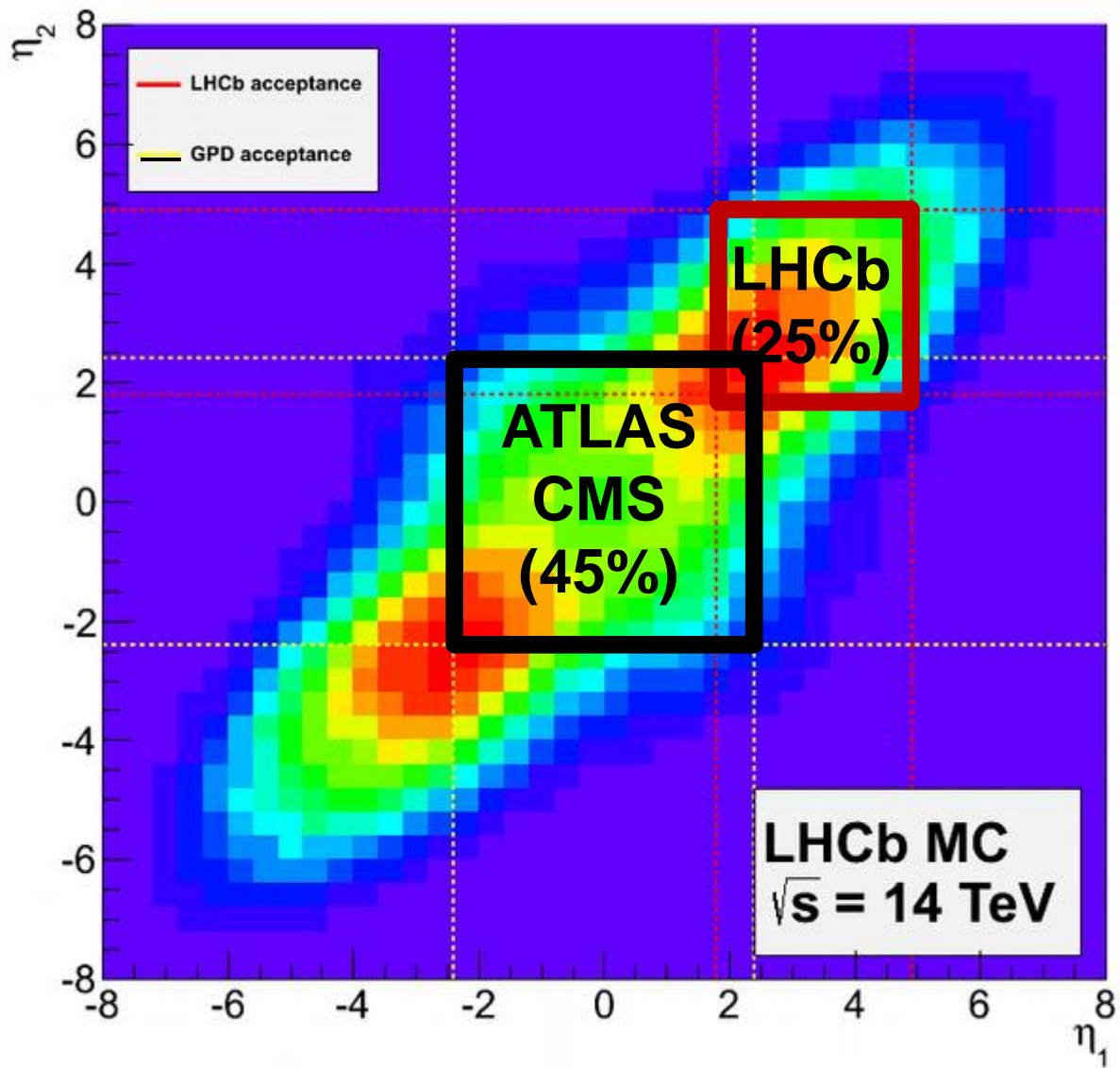
# $0,24\pi$



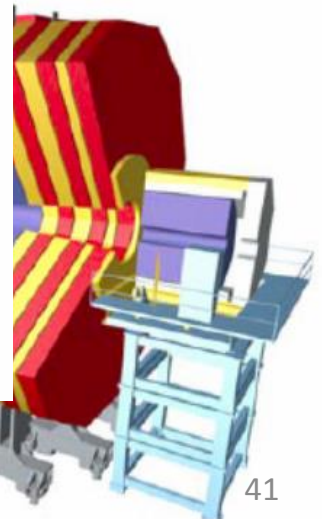
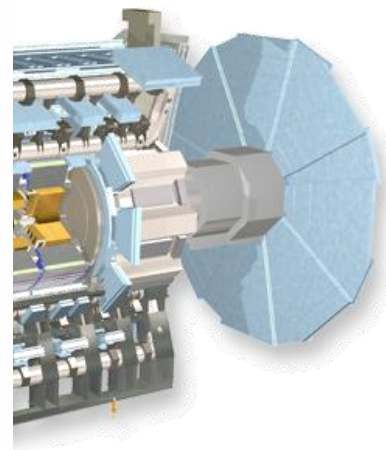




Pascal Vincent



Cargèse



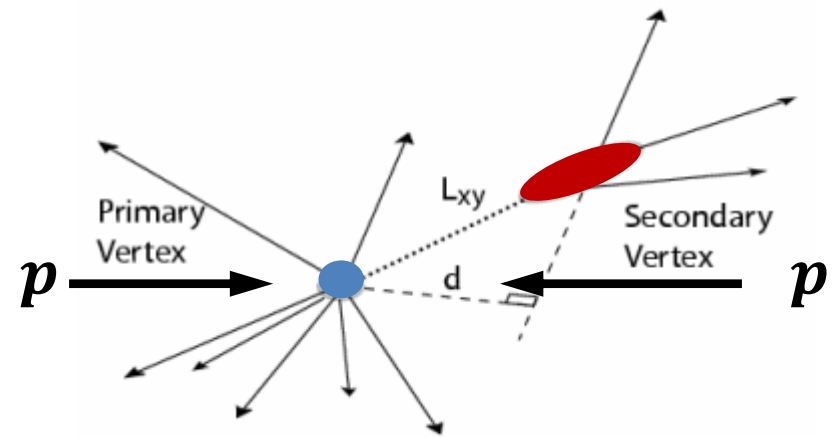


LHCb

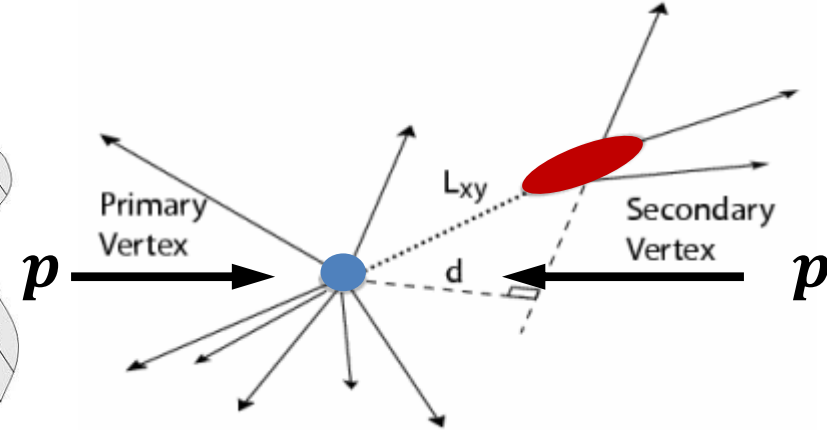
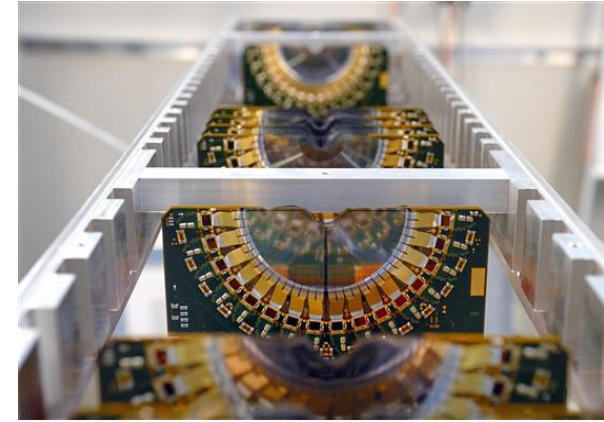
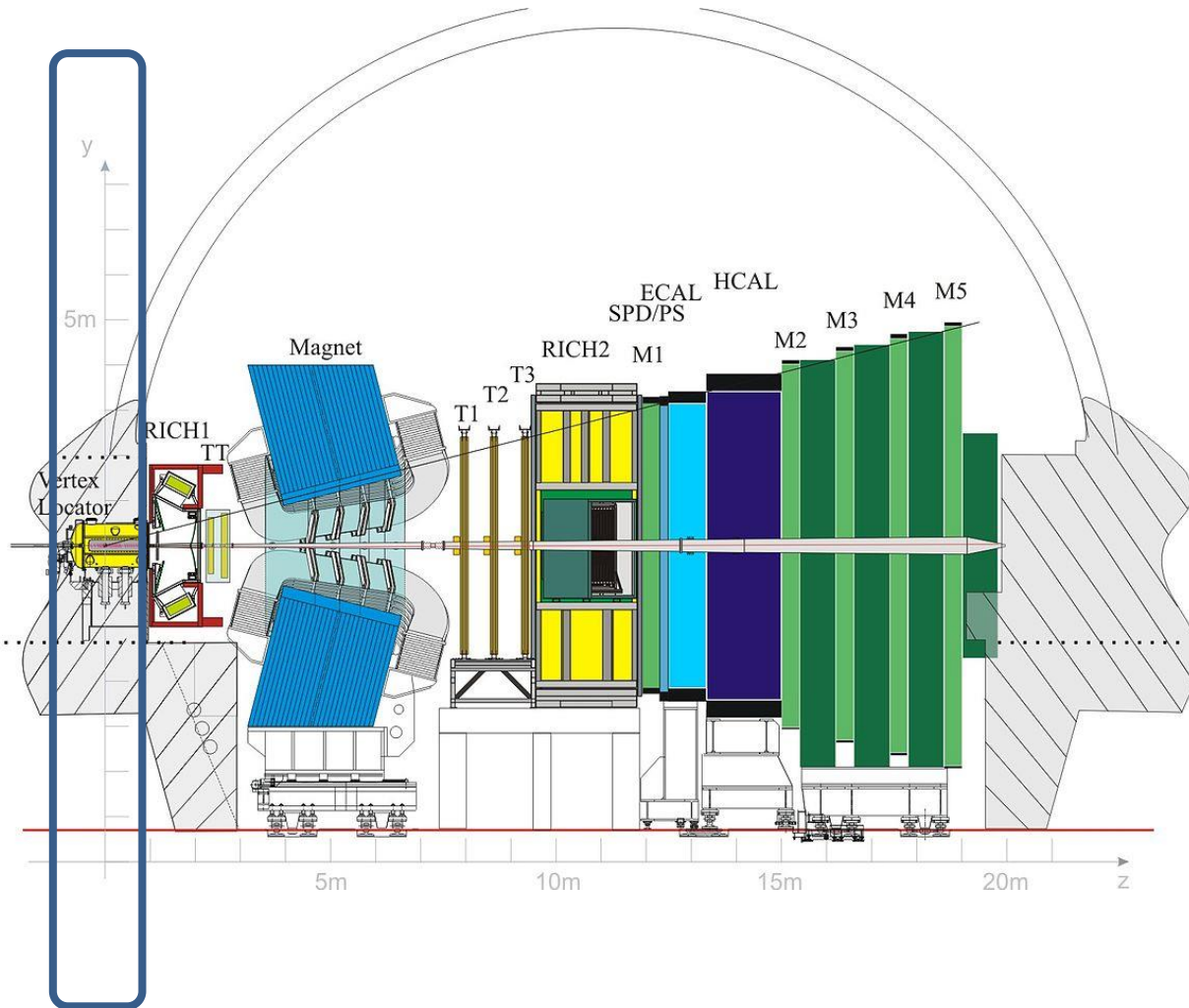
# UNE ARCHITECTURE

# LHCb

- Pour sélectionner les particules de beauté il faut une reconstruction au plus proche du faisceau. Temps de vol :  $b \leftrightarrow c$



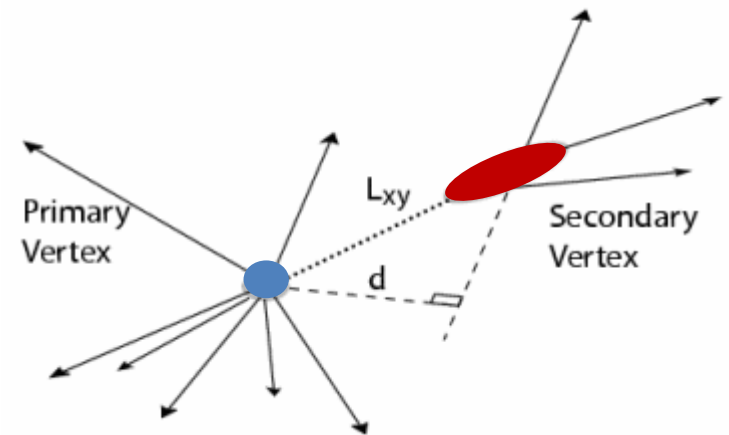
# LHCb : reconstruction des traces



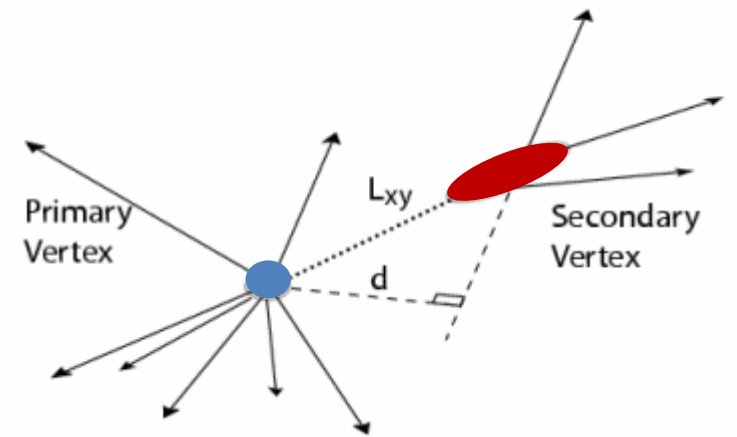
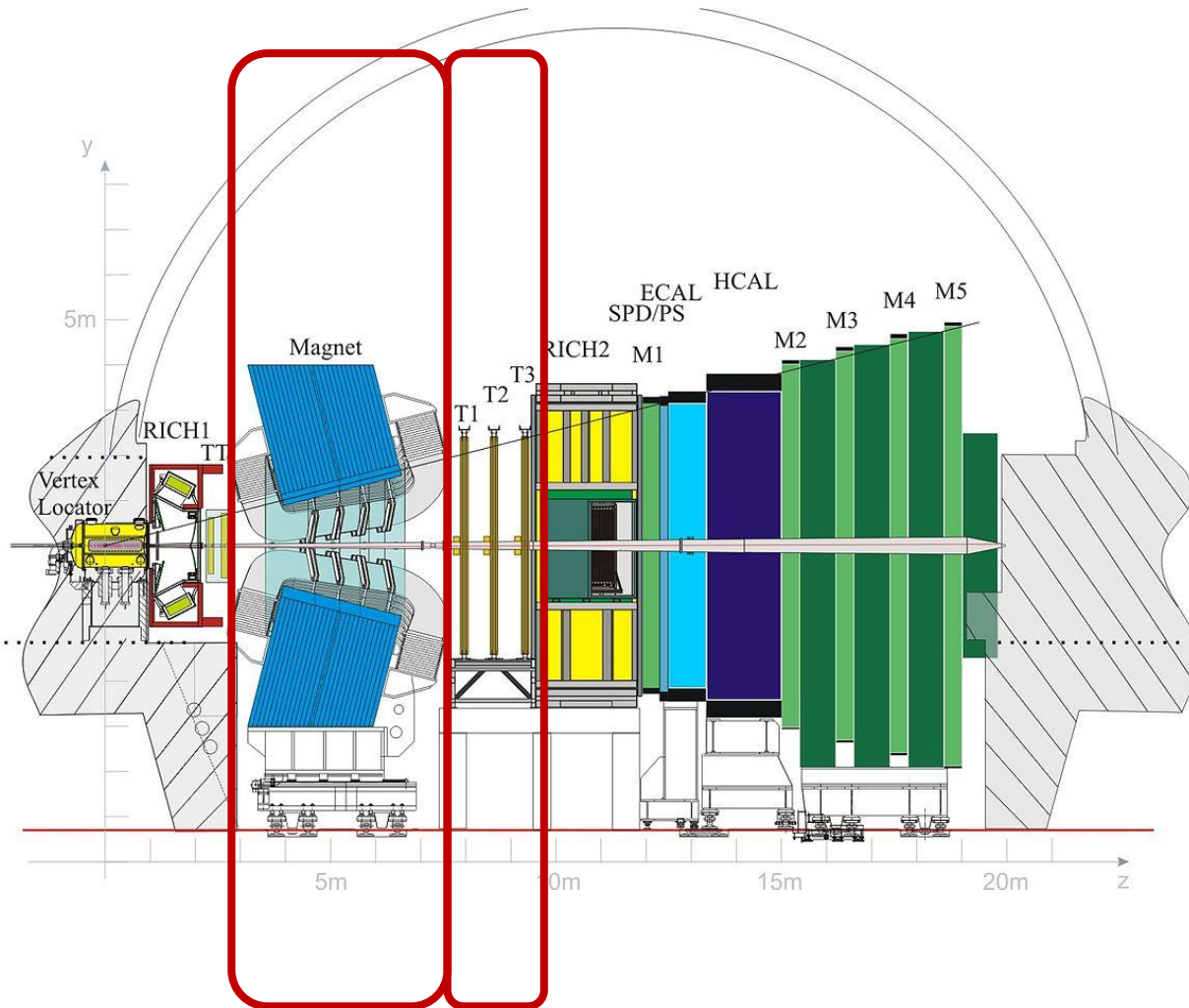
**VELO** : Succession de 42 couches de silicium à 5 mm de la ligne de faisceau

# LHCb

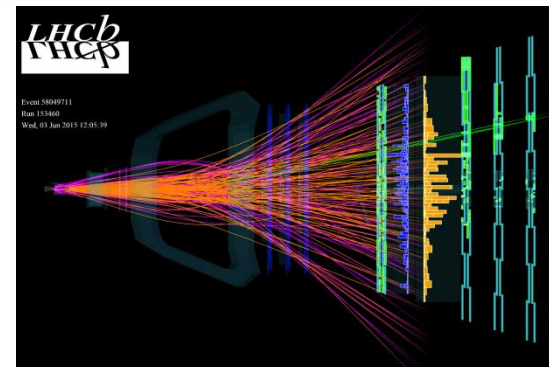
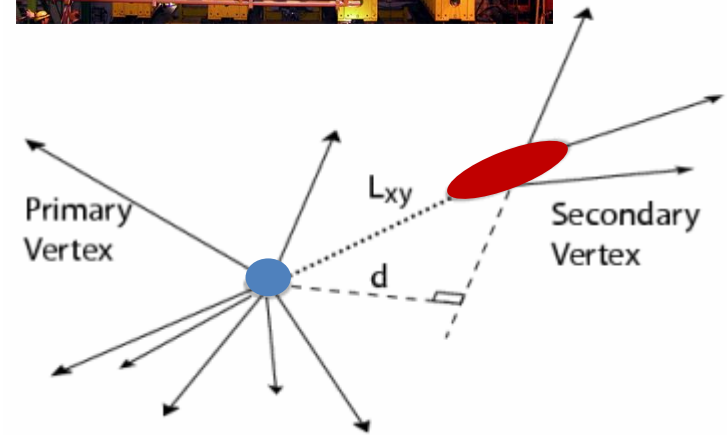
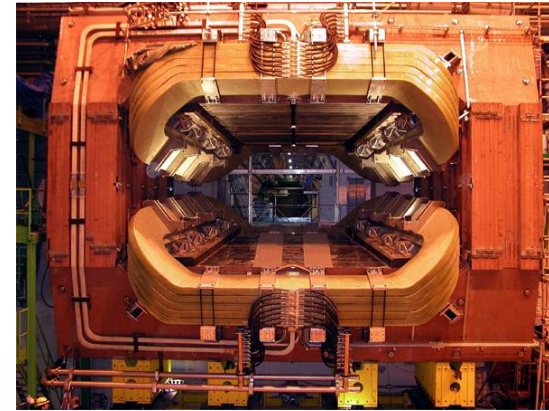
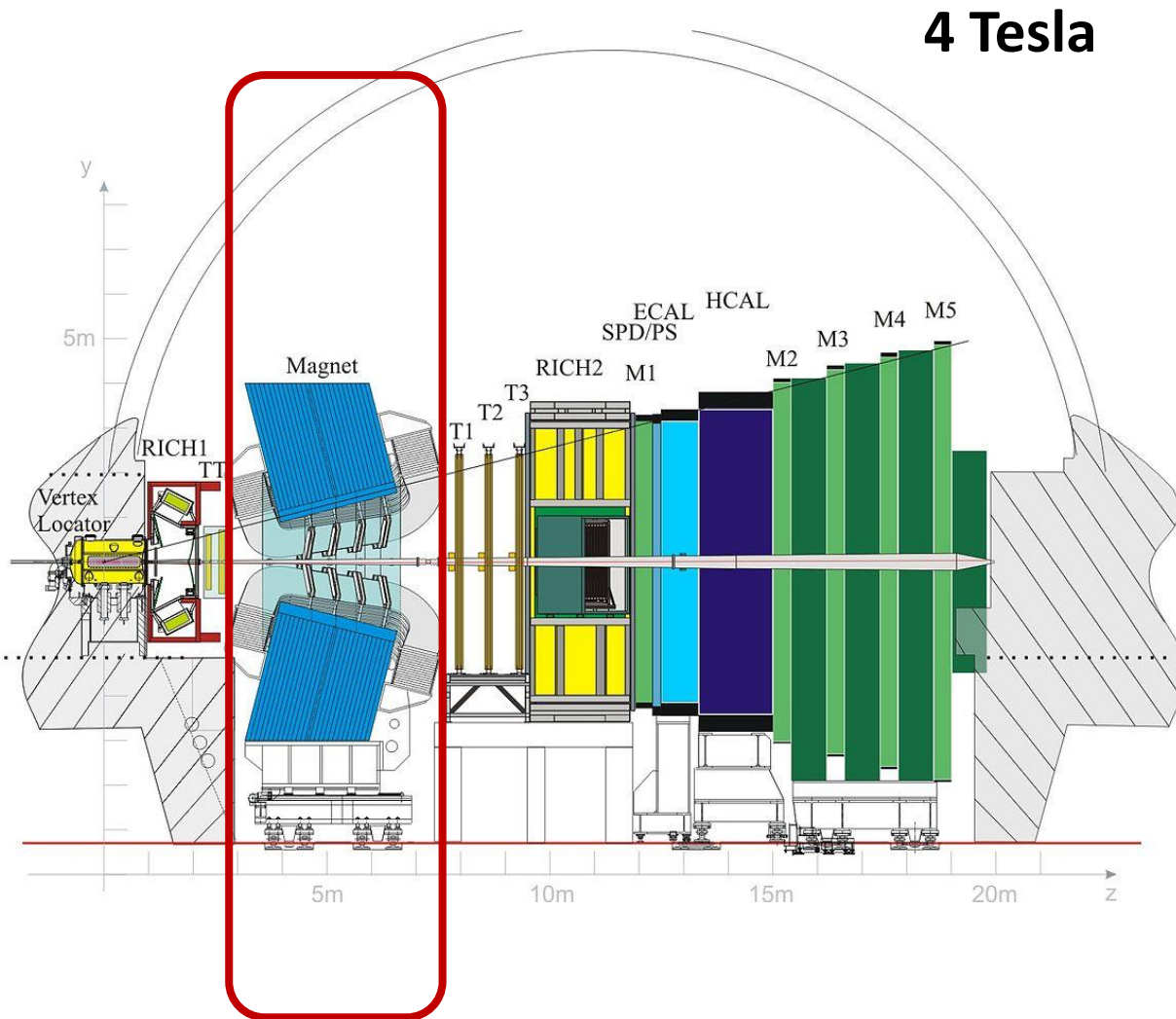
- Pour sélectionner les particules de beauté il faut une reconstruction au plus proche du faisceau. Temps de vol :  $b \leftrightarrow c$
- Les particules de beauté ont un temps de vie très court : nécessité de bien séparer le lieu de production du lieu de désintégration.



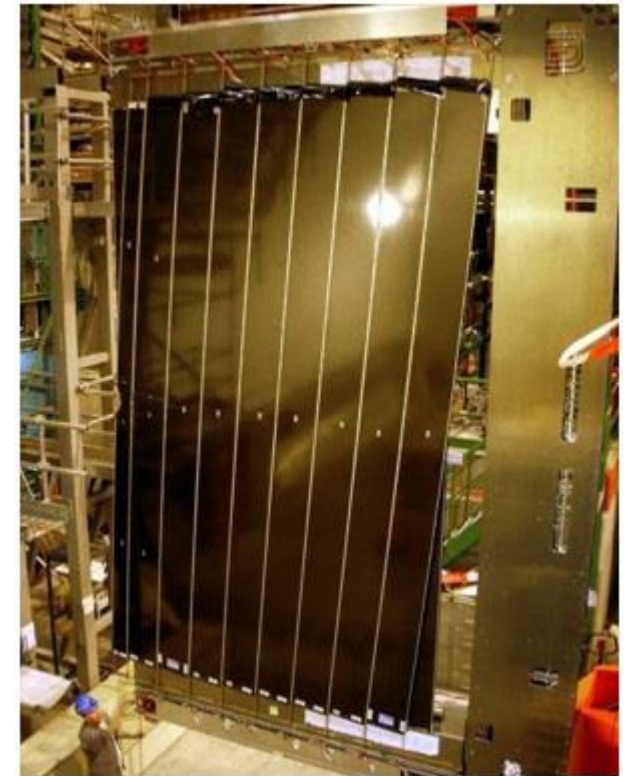
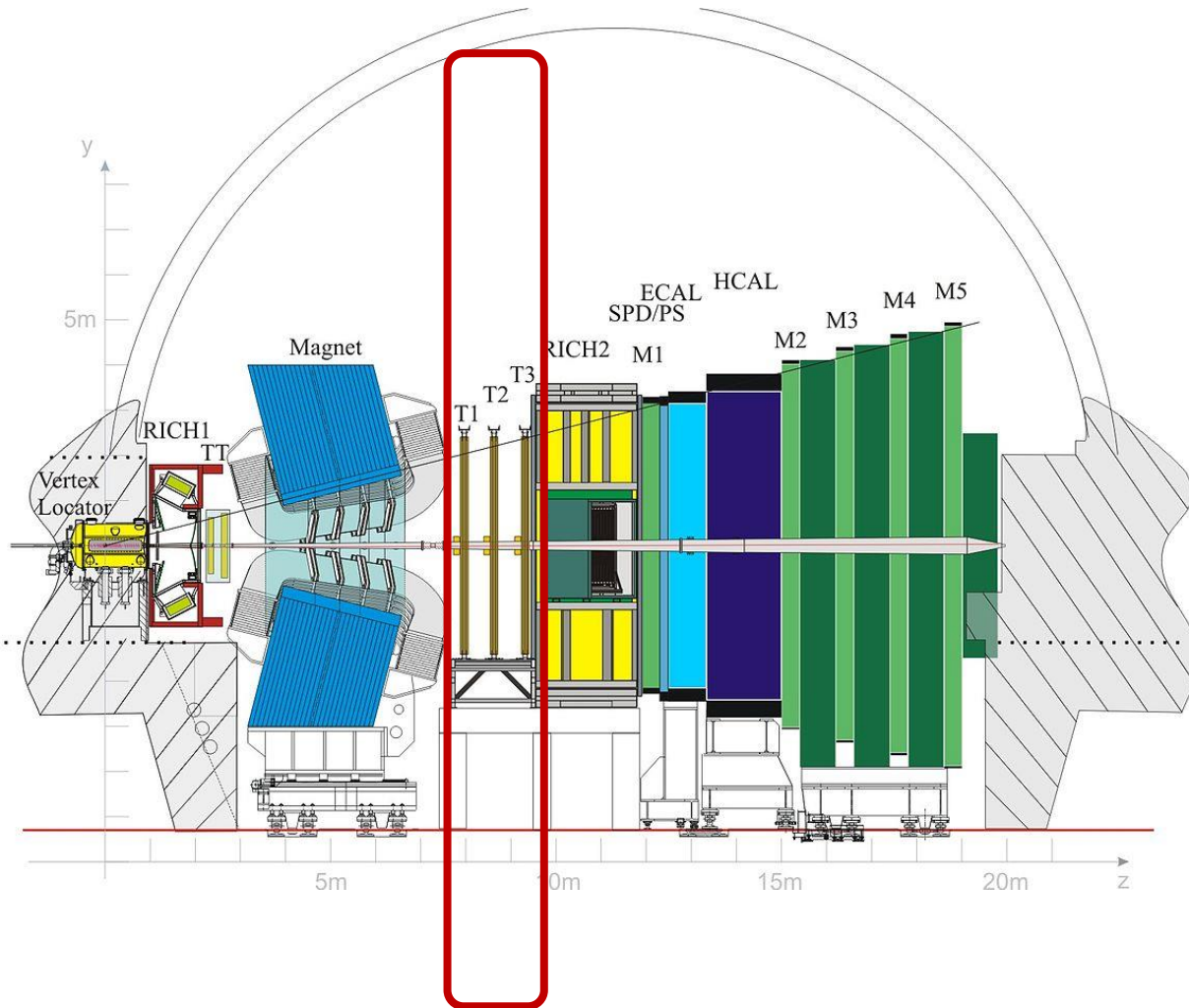
# LHCb : reconstruction des traces



# LHCb : reconstruction des traces



# LHCb : reconstruction des traces



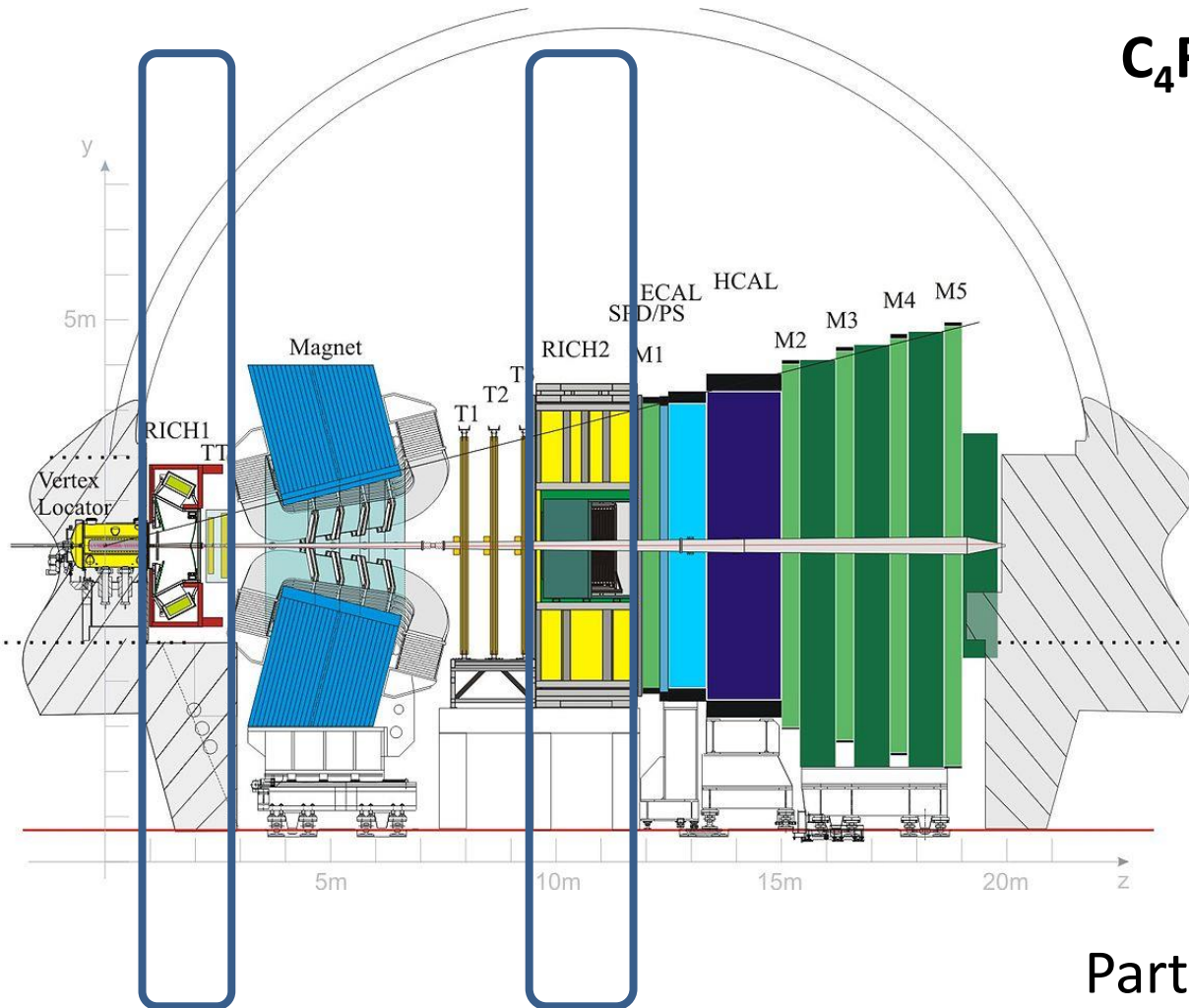
**Outer tracker :  
chambres à dérives**

# LHCb

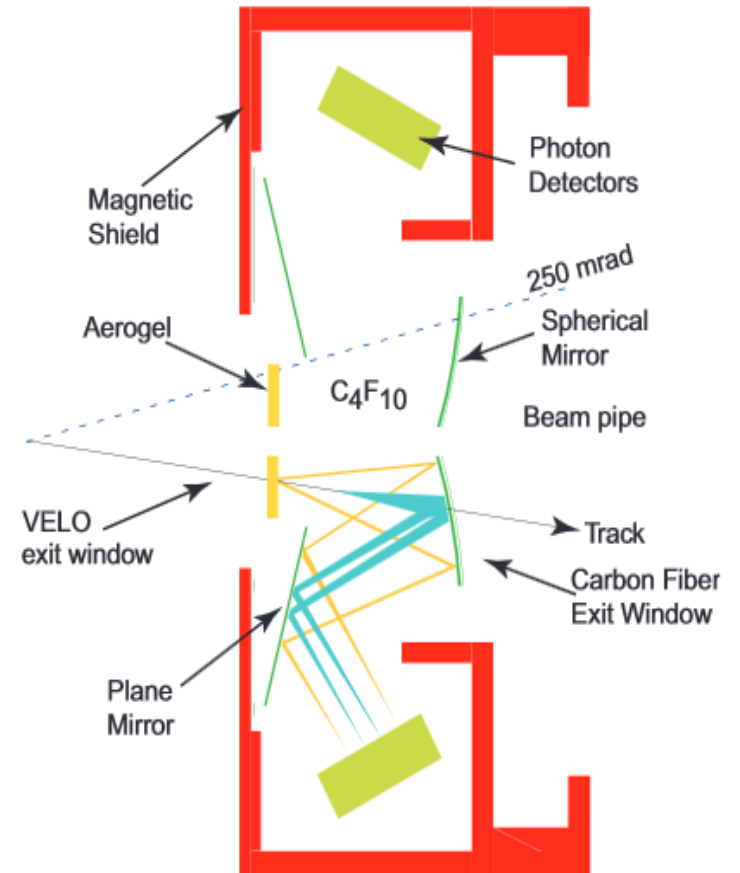
- Pour sélectionner les particules de beauté il faut une reconstruction au plus proche du faisceau. Temps de vol :  $b \leftrightarrow c$
- Les particules de beauté ont un **temps de vie très court** : nécessité de bien séparer le **lieu de production** du **lieu de désintégration**.
- Pour **distinguer les différentes particules** de beauté et identifier leurs voies de désintégration, il faut identifier toutes les particules dans l'état final.



# LHCb : identification des particules

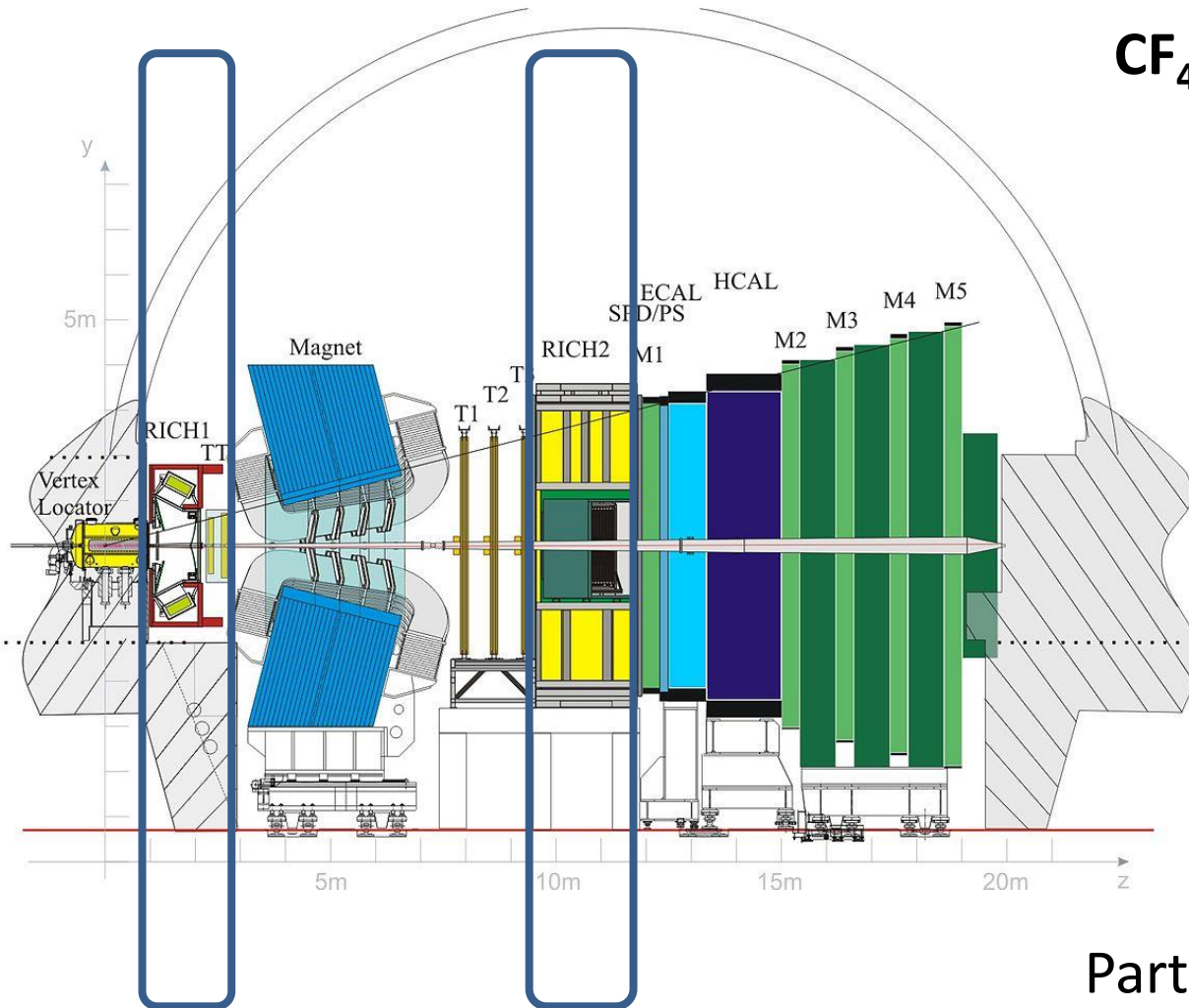


$C_4F_{10}$



Particules de 10 GeV/c à 65 GeV/c

# LHCb : identification des particules

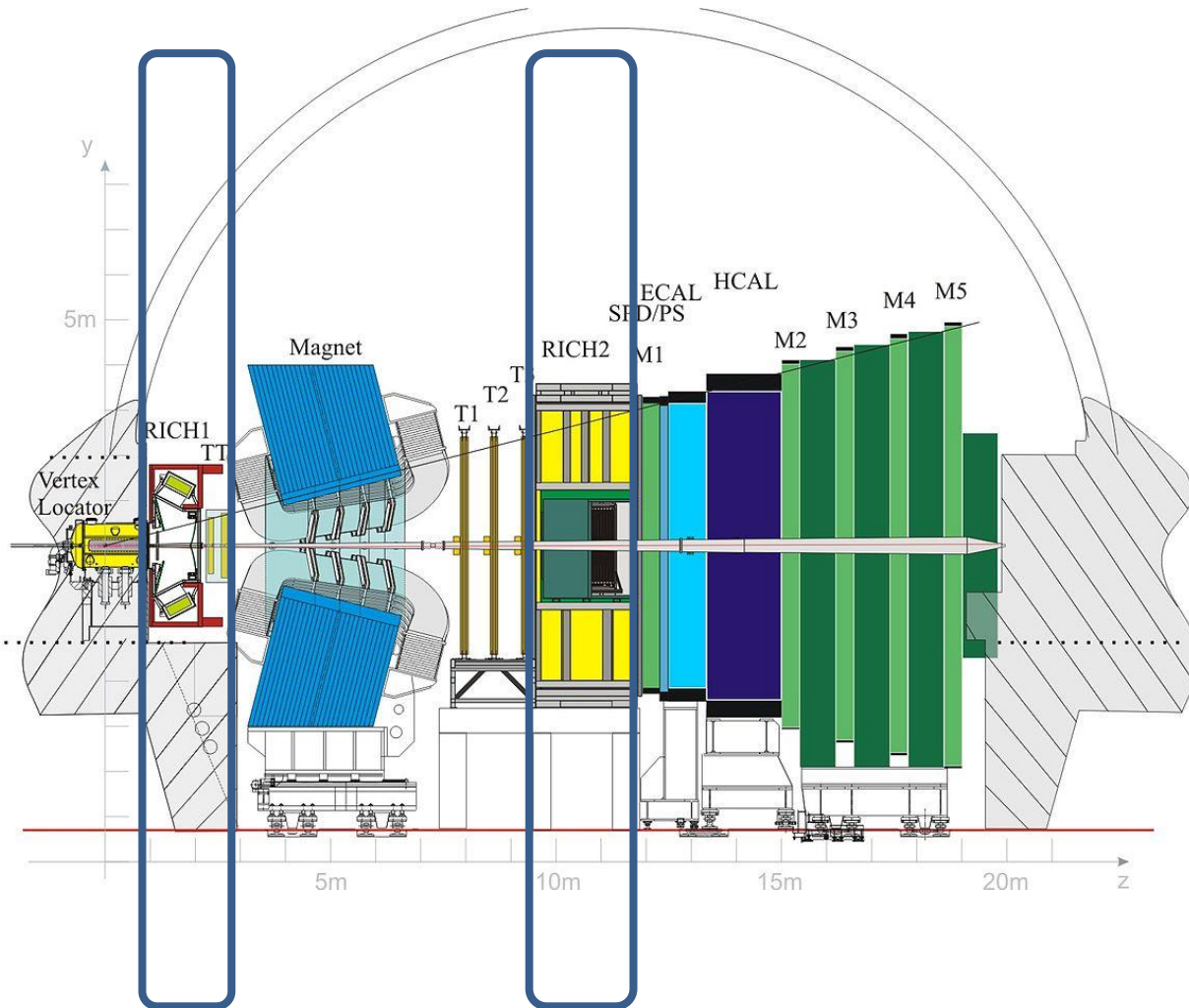


$CF_4$

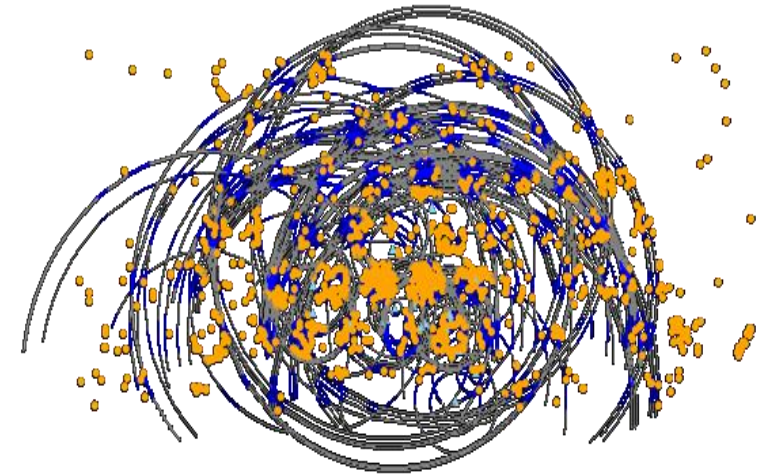


Particules de 15 GeV/c à 100 GeV/c

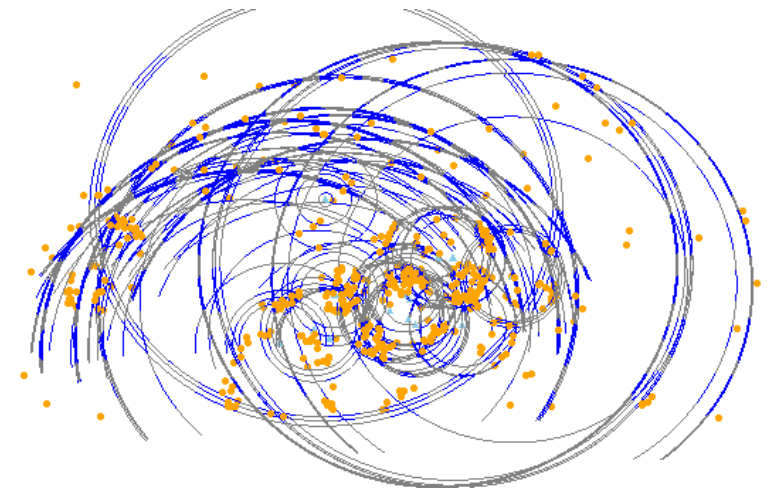
# LHCb : identification des particules



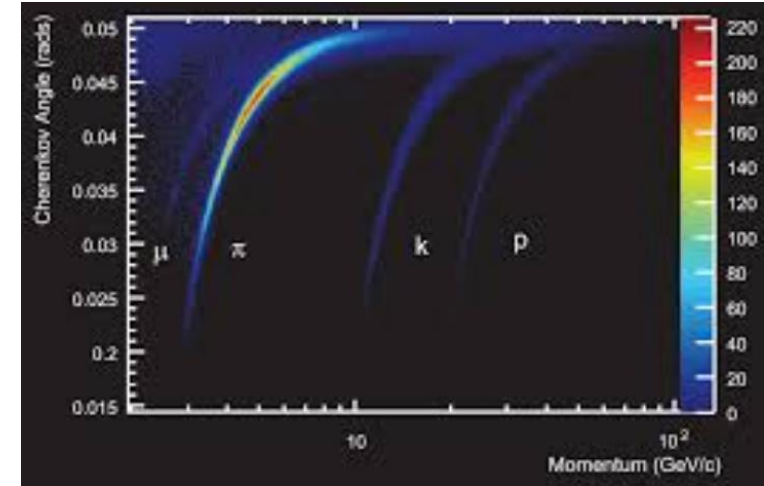
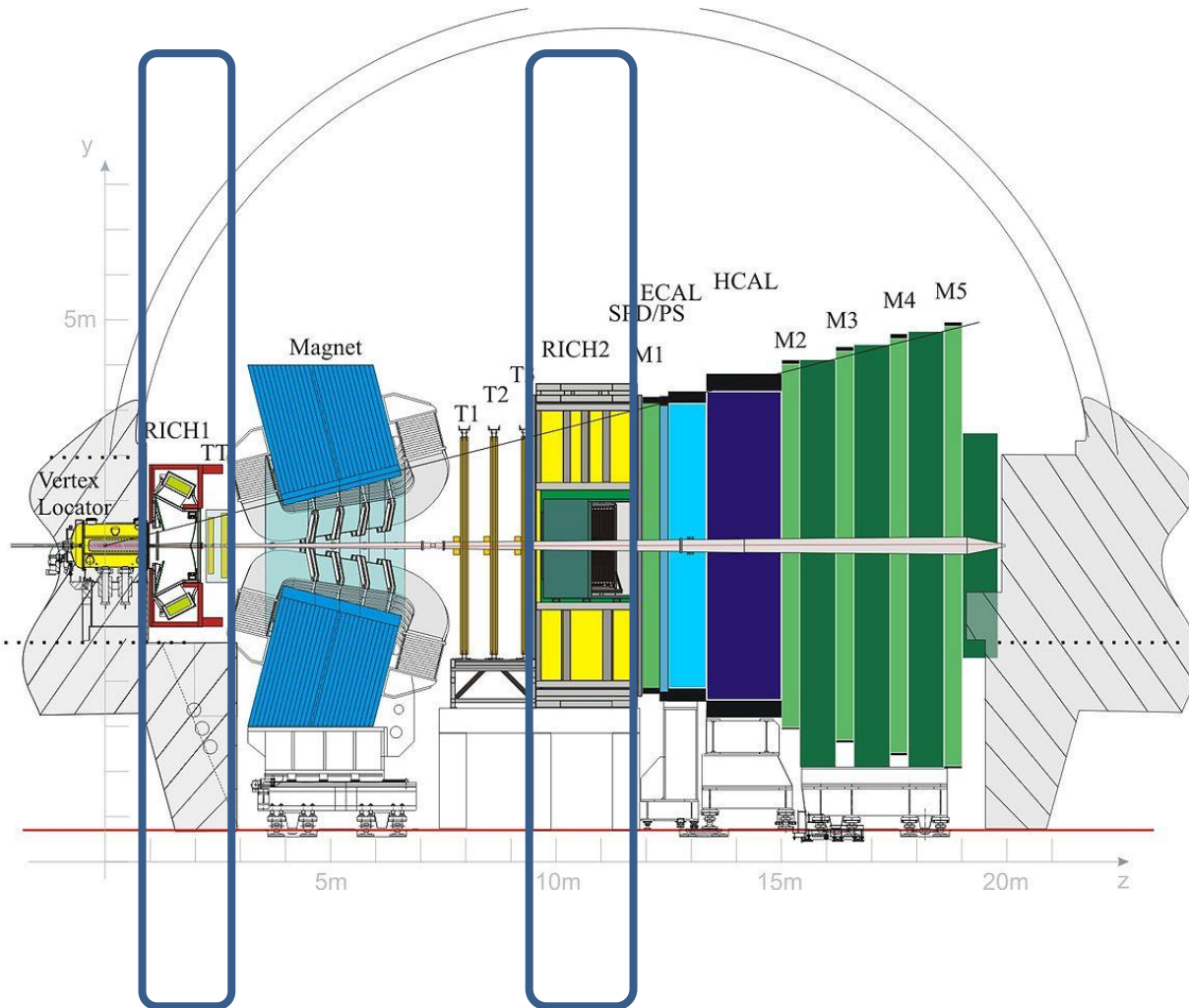
**RICH 1**



**RICH 2**

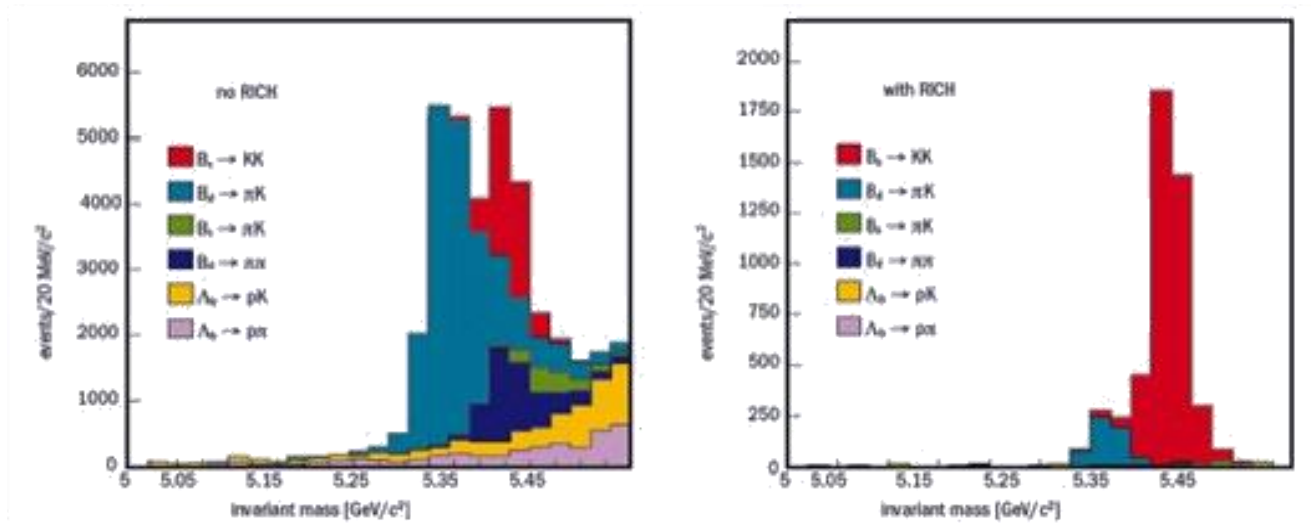


# LHCb : identification des particules



# LHCb

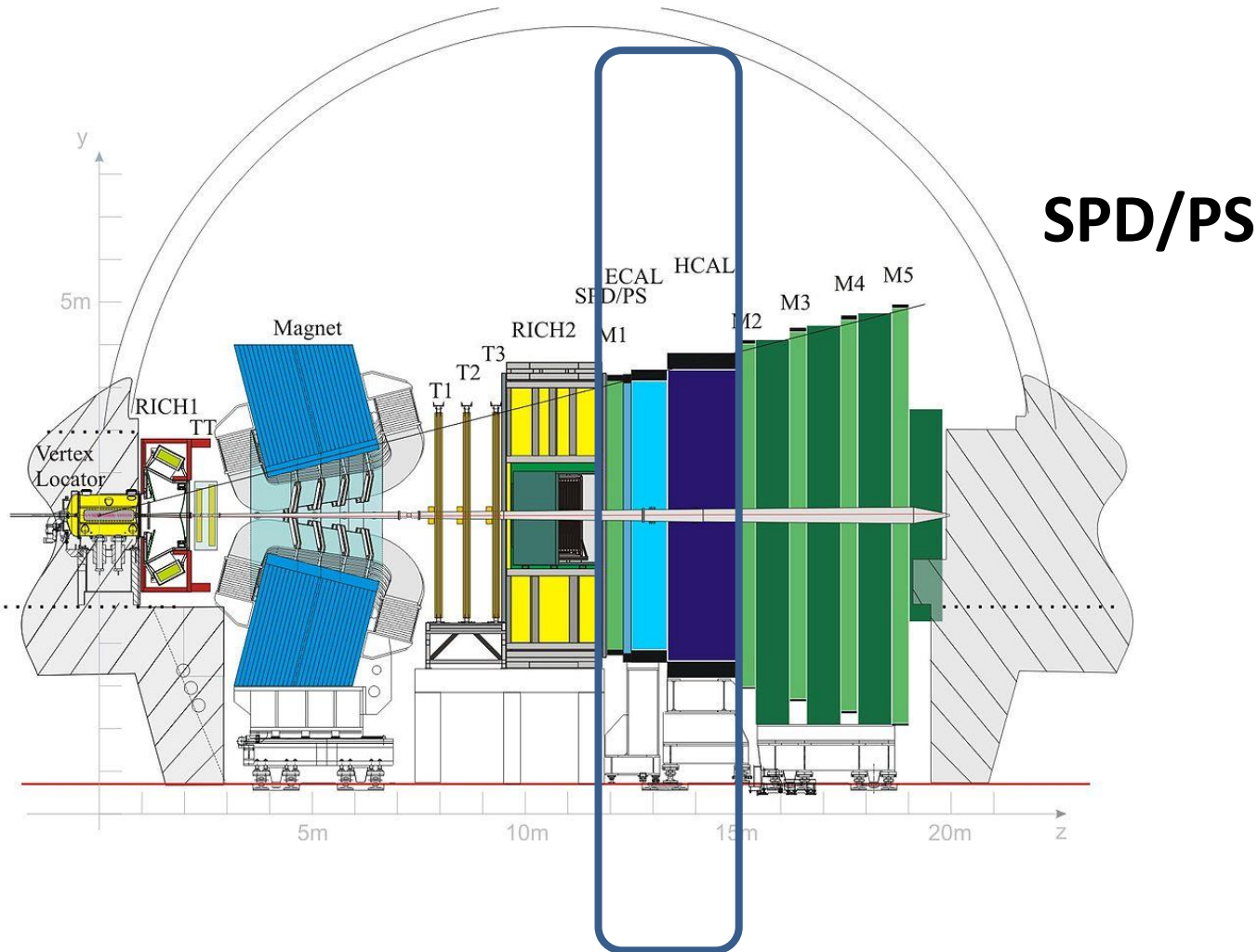
- Pour sélectionner les particules de beauté il faut une reconstruction au plus proche du faisceau. Temps de vol :  $b \leftrightarrow c$
- Les particules de beauté ont un **temps de vie très court** : nécessité de bien séparer le **lieu de production** du **lieu de désintégration**.
- Pour **distinguer les différentes particules** de beauté et identifier leurs voies de désintégration, ils faut identifier toutes les particules dans l'état final.



# LHCb

- Pour sélectionner les particules de beauté il faut une reconstruction au plus proche du faisceau. Temps de vol :  $b \leftrightarrow c$
- Les particules de beauté ont un **temps de vie très court** : nécessité de bien séparer le **lieu de production** du **lieu de désintégration**.
- Pour **distinguer les différentes particules** de beauté et identifier leurs voies de désintégration, il faut identifier toutes les particules dans l'état final.
- Reconstruire avec précision les **radiations** émises dans les désintégrations nécessite une **bonne calorimétrie**.

# LHCb : identification des particules



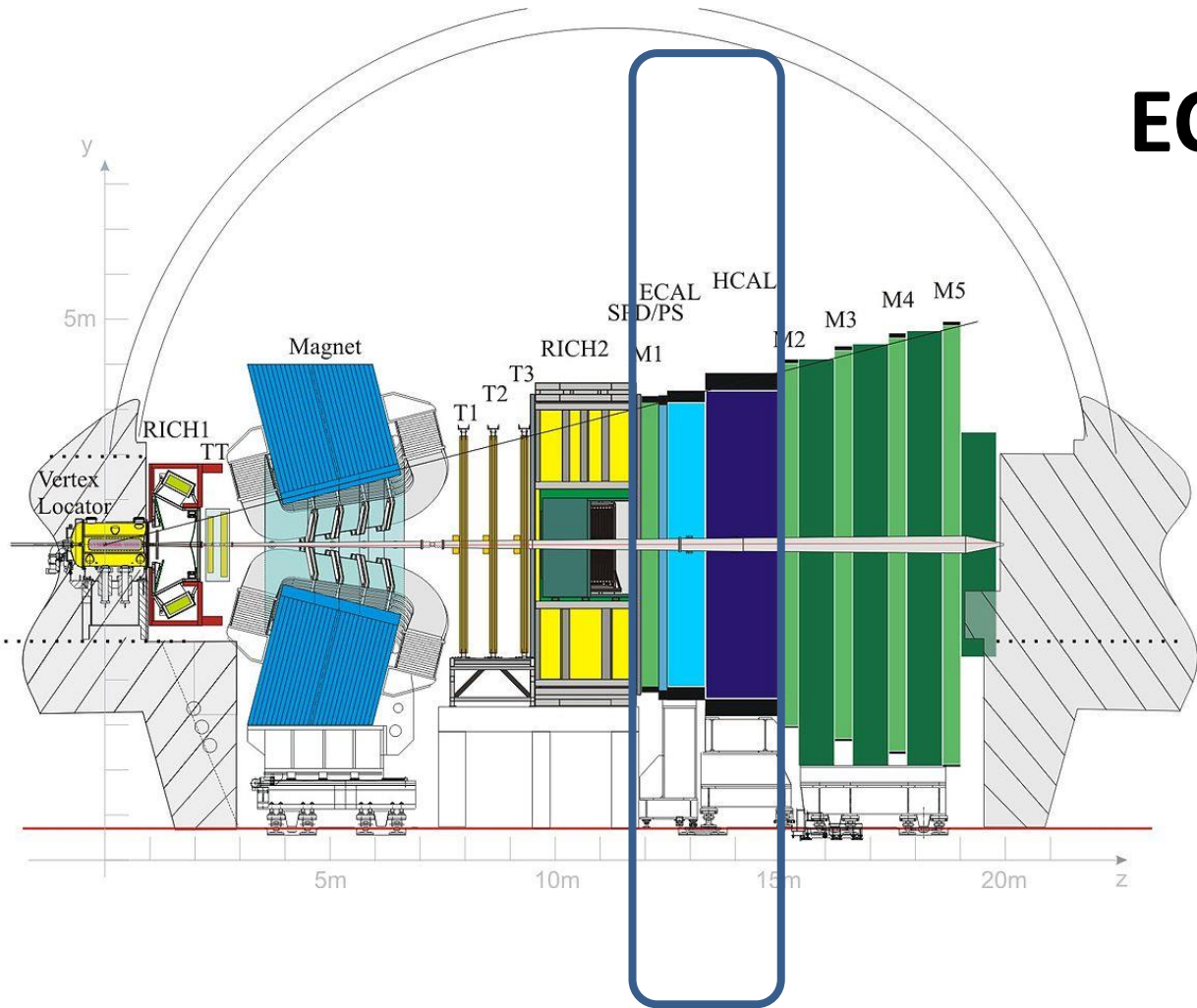
SPD (scintillating pad detector) and PS (Pre-shower detector)



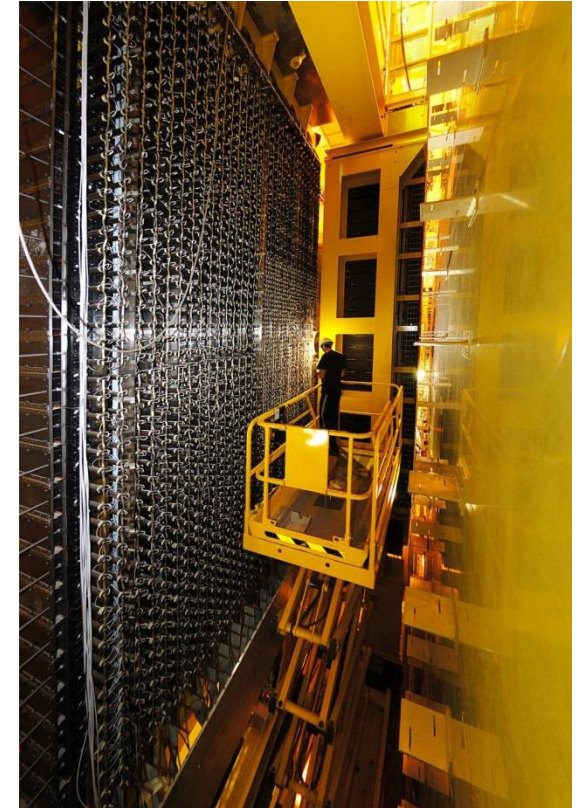
Fibres scintillantes et convertisseurs de plombs.

# LHCb : identification des particules

Shashlik : alternance de scintillateurs et tuiles de plomb

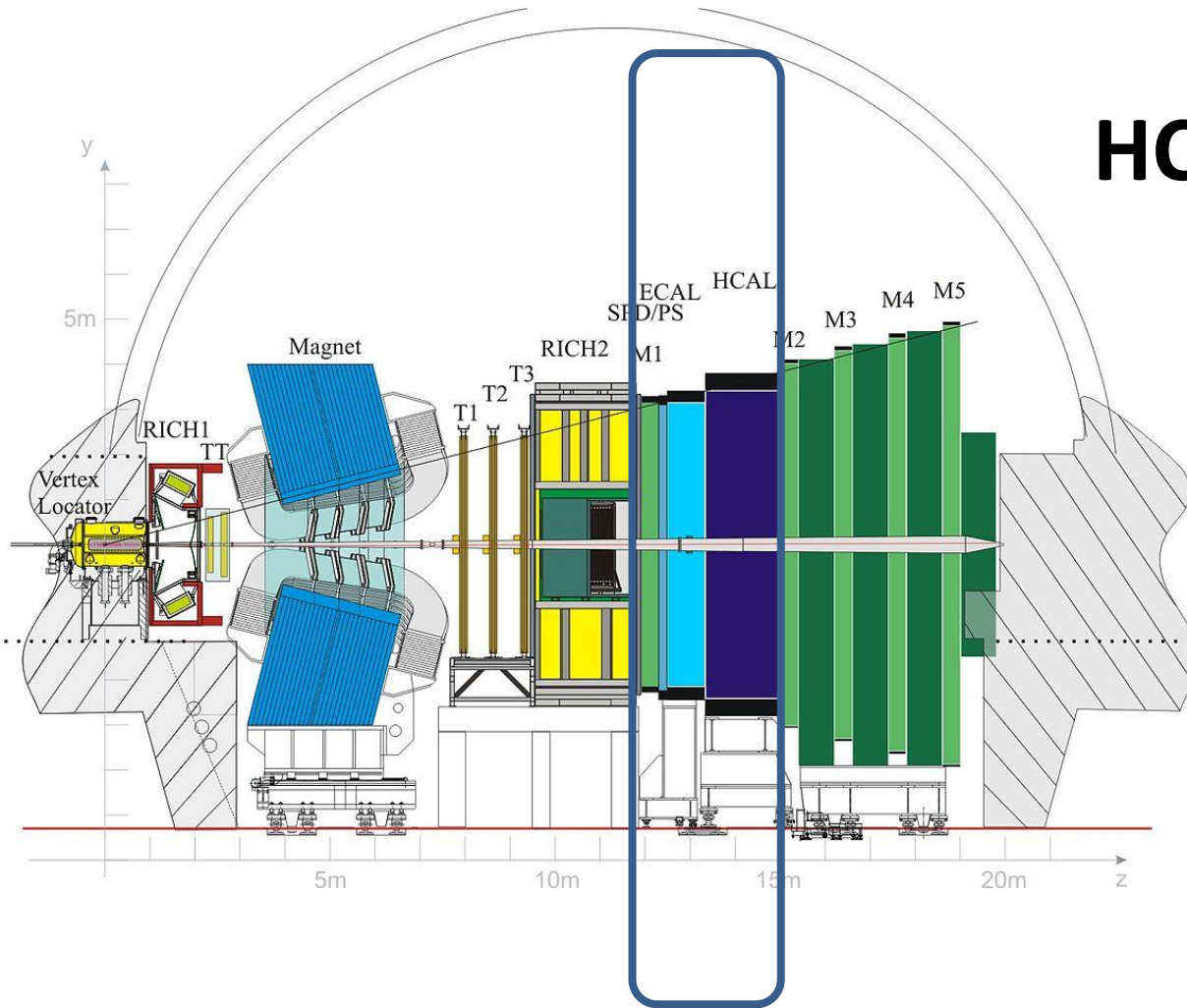


## ECAL



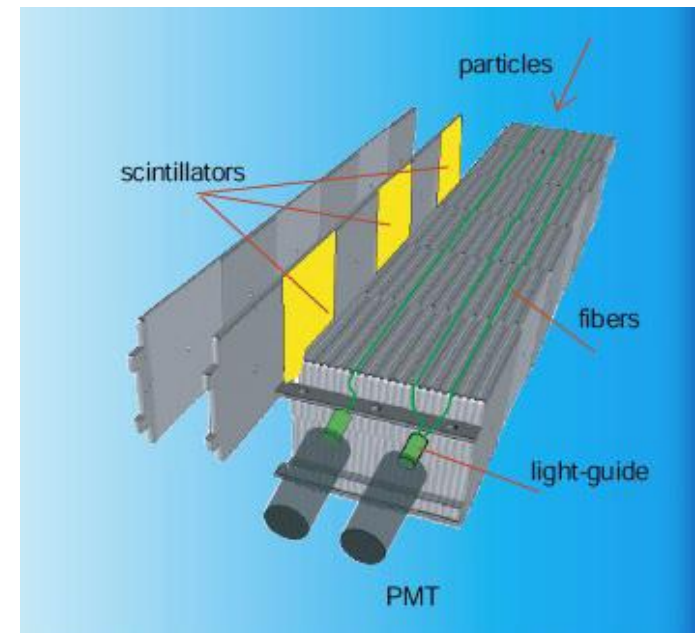


# LHCb : identification des particules



## HCAL

Plaques d'acier séparées par des scintillateurs lus par des PMT

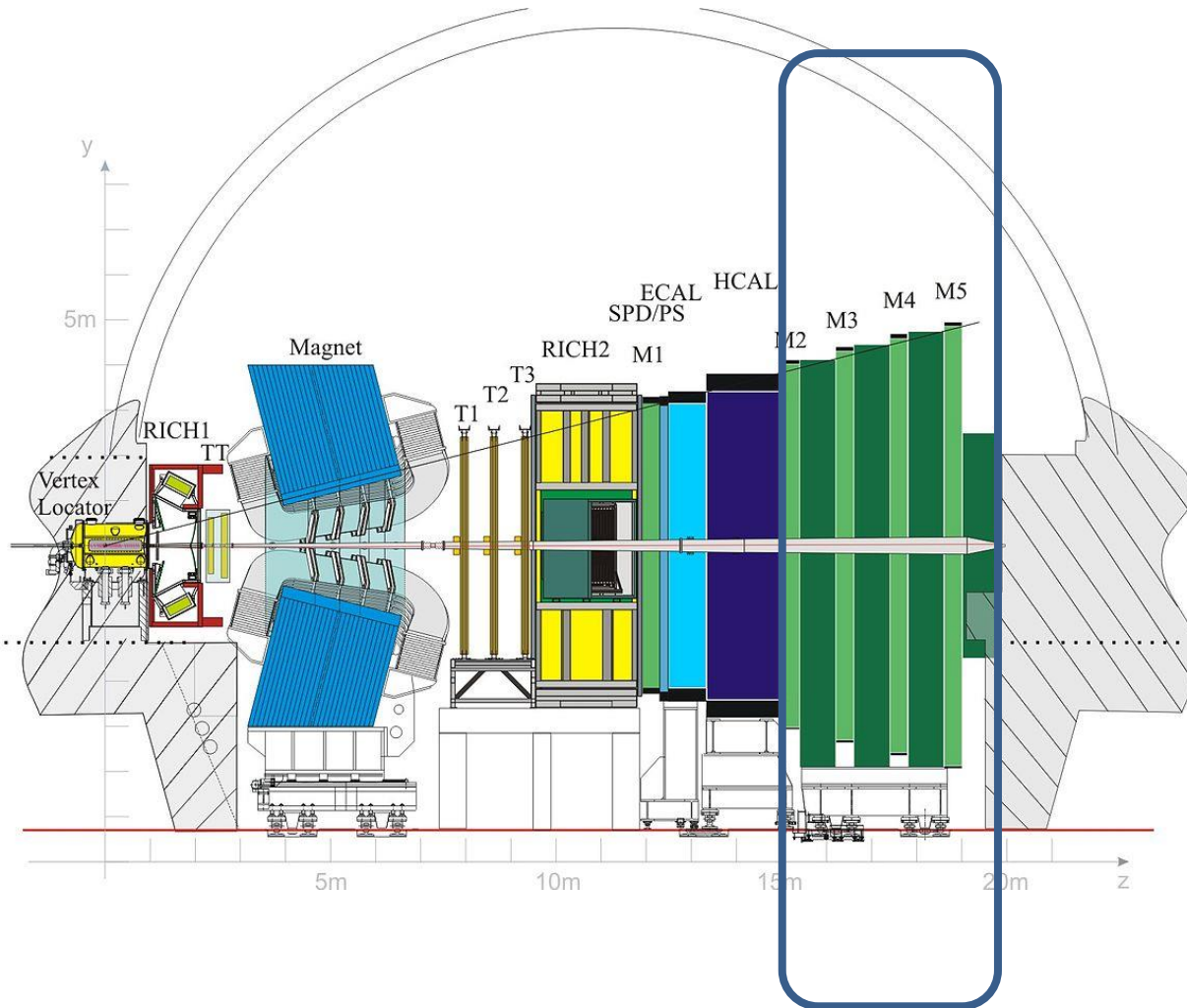


# LHCb

- Pour sélectionner les particules de beauté il faut une reconstruction au plus proche du faisceau. Temps de vol :  $b \leftrightarrow c$
- Les particules de beauté ont un **temps de vie très court** : nécessité de bien séparer le **lieu de production** du **lieu de désintégration**.
- Pour **distinguer les différentes particules** de beauté et identifier leurs voies de désintégration, ils faut identifier toutes les particules dans l'état final.
- Reconstruire avec précision les **radiations** émises dans les désintégration nécessite une **bonne calorimétrie**.
- Des chambres à muons

# LHCb : identification des particules

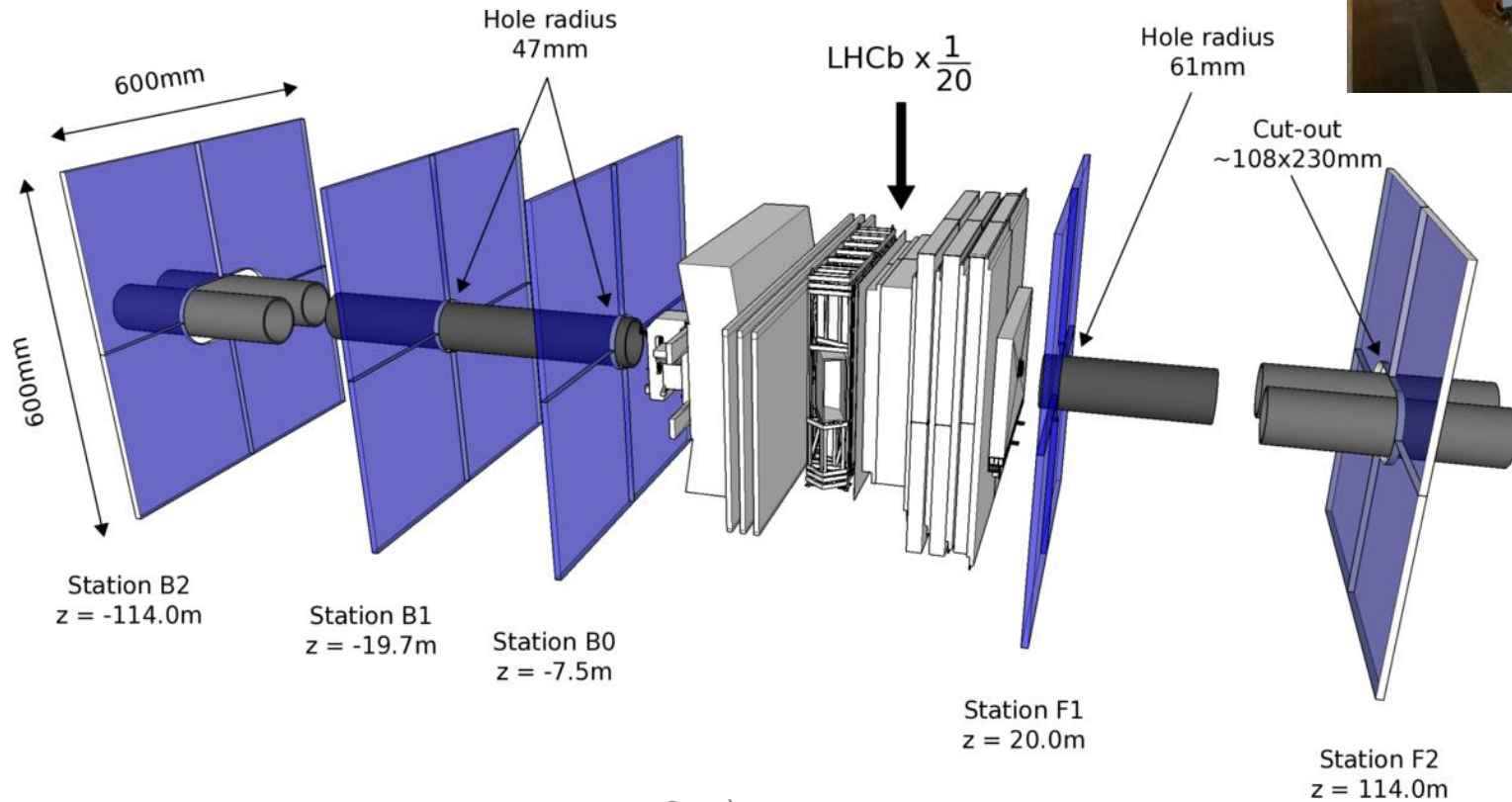
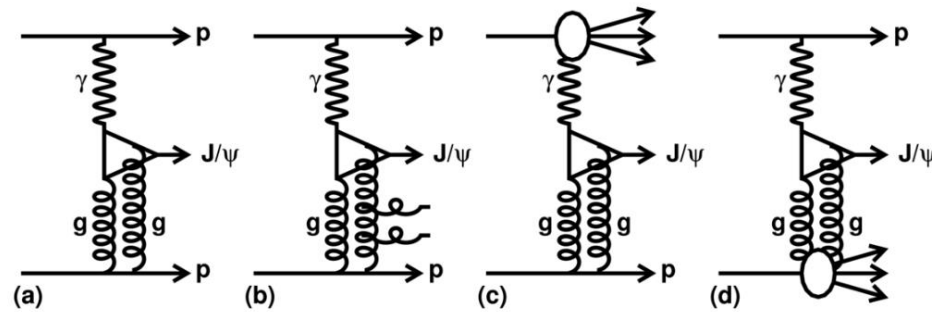
Quatre stations de  
chambres proportionnelles  
à gaz



LHCb

**HERSCHEL**

# LHCb + HeRSChel



LHCb

# FAITS MARQUANTS

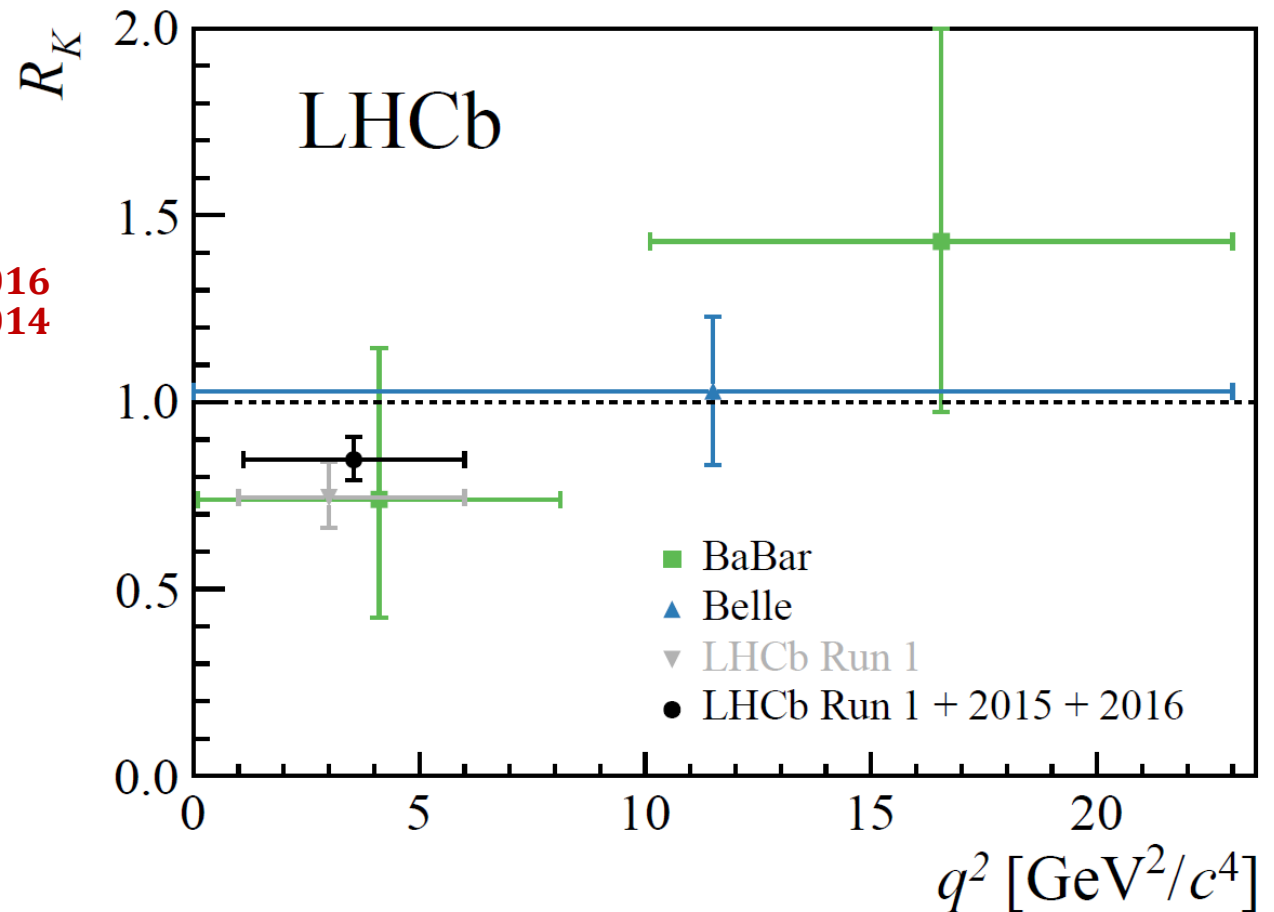
# Quelques résultats

- Universalité leptonique :

$$R_K(\text{SM}) = \frac{\text{Br}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{\text{Br}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)} = 1$$

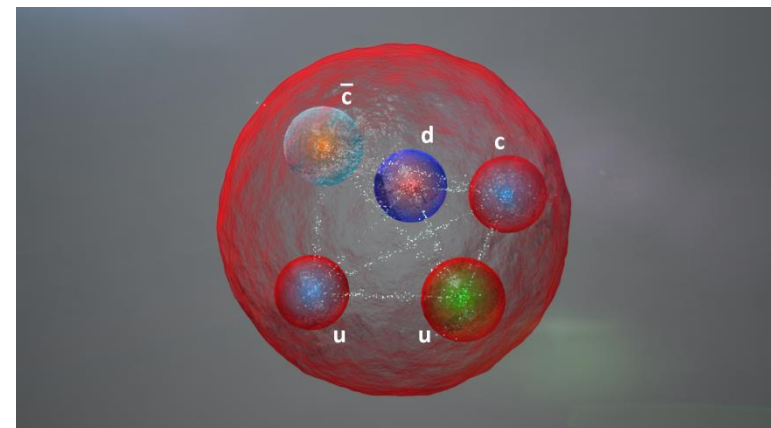
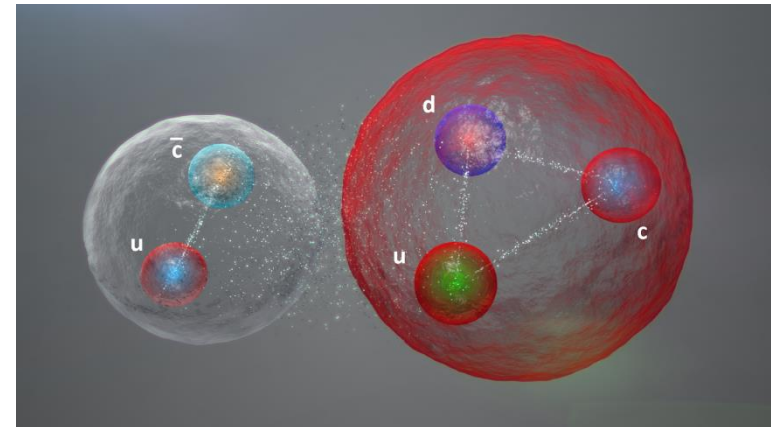
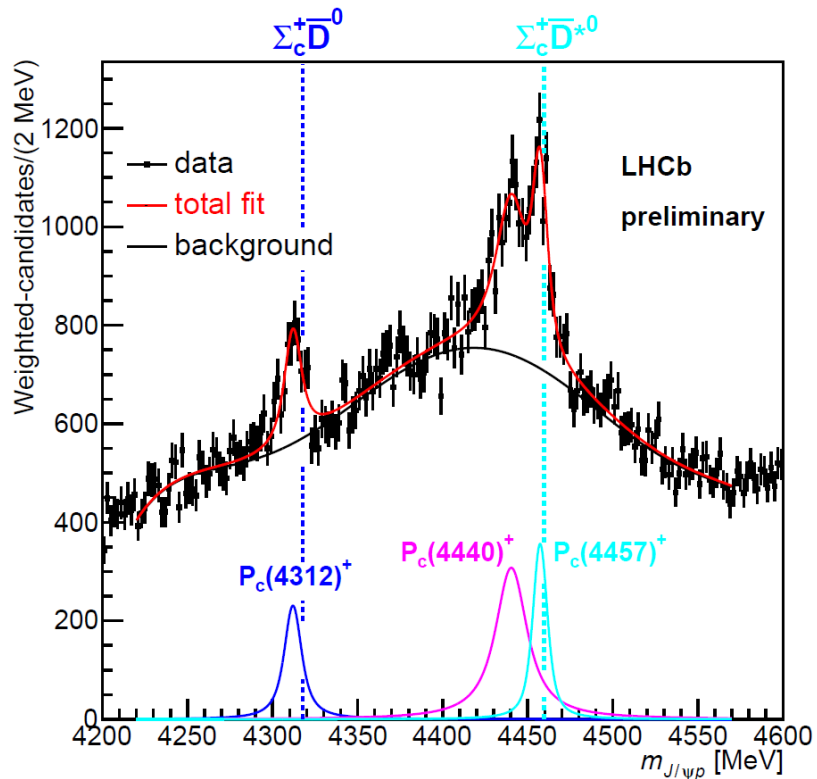
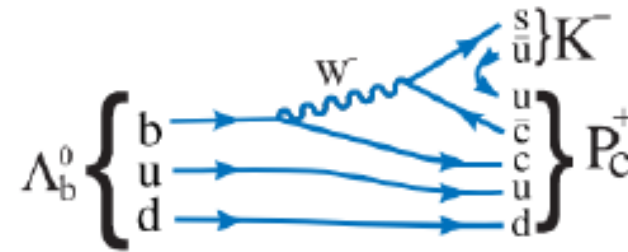
$$R_K(\text{LHCb}) = 0,846^{+0,060 +0,016}_{-0,045 -0,014}$$

**2,5 $\sigma$**



# Quelques résultats

- Découverte du pentaquark

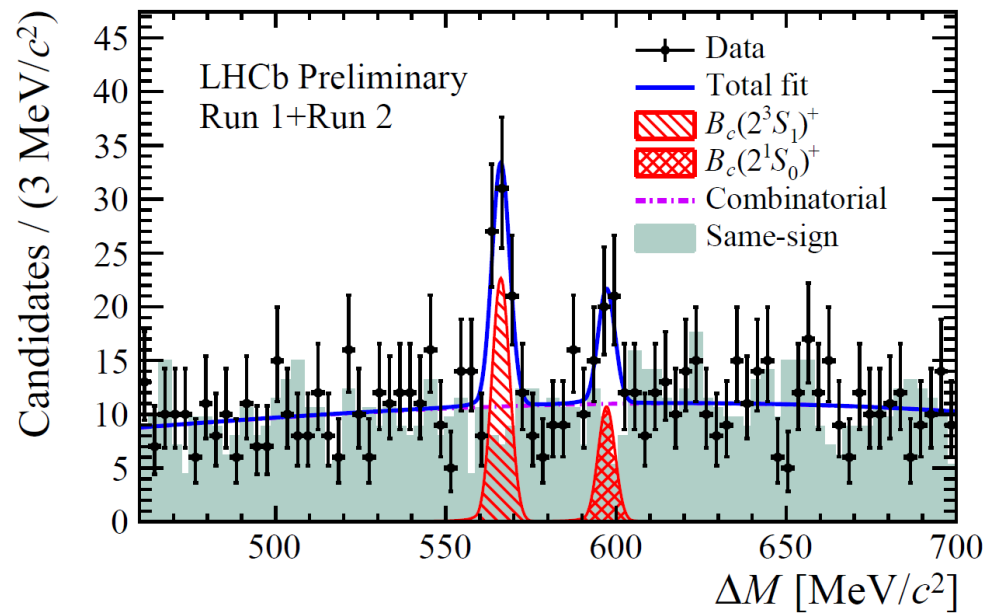
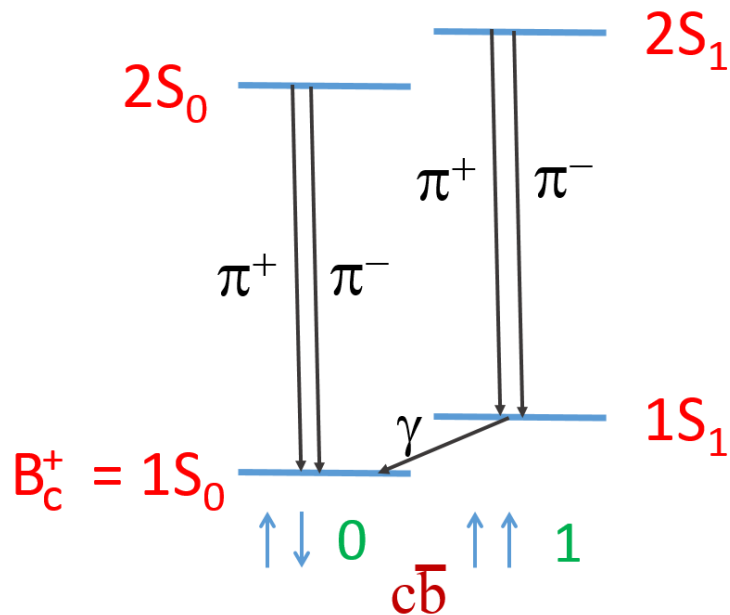




# Quelques résultats

- Spectroscopie les mésons beaux : états excités du  $B_c^+$

$$B_c^{+*} \rightarrow B_c^+ \pi^\pm \pi^\mp \rightarrow J/\psi (\pi^+ / K^+) \pi^\pm \pi^\mp$$



# Quelques résultats

- Evidence de la violation de CP chez les mésons charmés

$$D^0 = \begin{pmatrix} c \\ \bar{u} \end{pmatrix}$$

$$\bar{D}^0 = \begin{pmatrix} \bar{c} \\ u \end{pmatrix}$$

$$D^{*+} \rightarrow \pi^+ D^0 \rightarrow \pi^+ (\pi^+ \pi^- / K^+ K^-)$$

$$D^{*-} \rightarrow \pi^- \bar{D}^0 \rightarrow \pi^- (\pi^- \pi^+ / K^- K^+)$$

$$B^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{D}^0 \rightarrow \mu^+ \nu_\mu (\pi^- \pi^+ / K^- K^+)$$

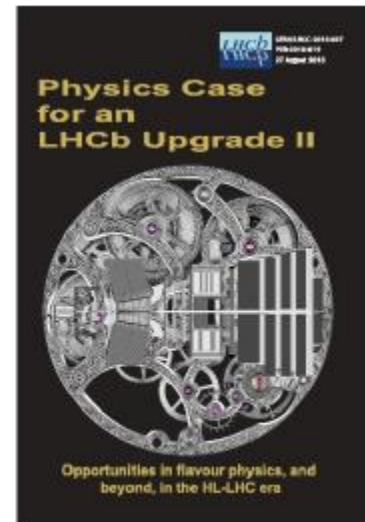
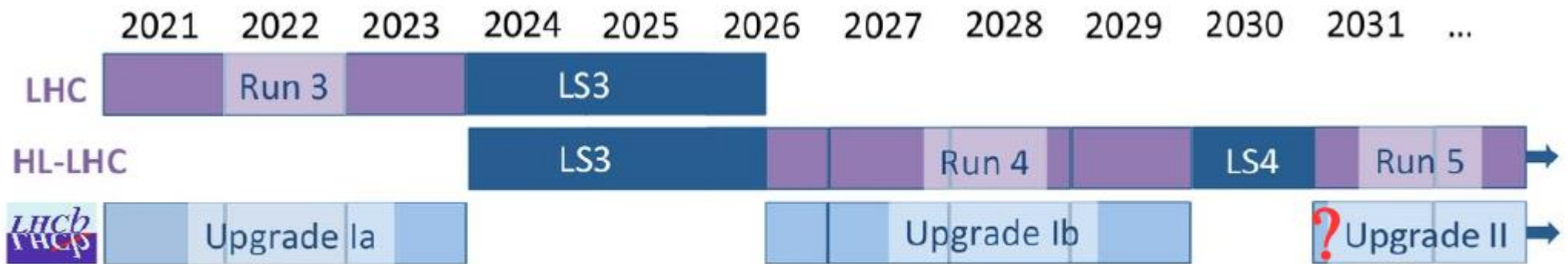
$$B^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu D^0 \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu (\pi^+ \pi^- / K^+ K^-)$$

$$A_{CP} = (-0,154 \pm 0.029)\%$$

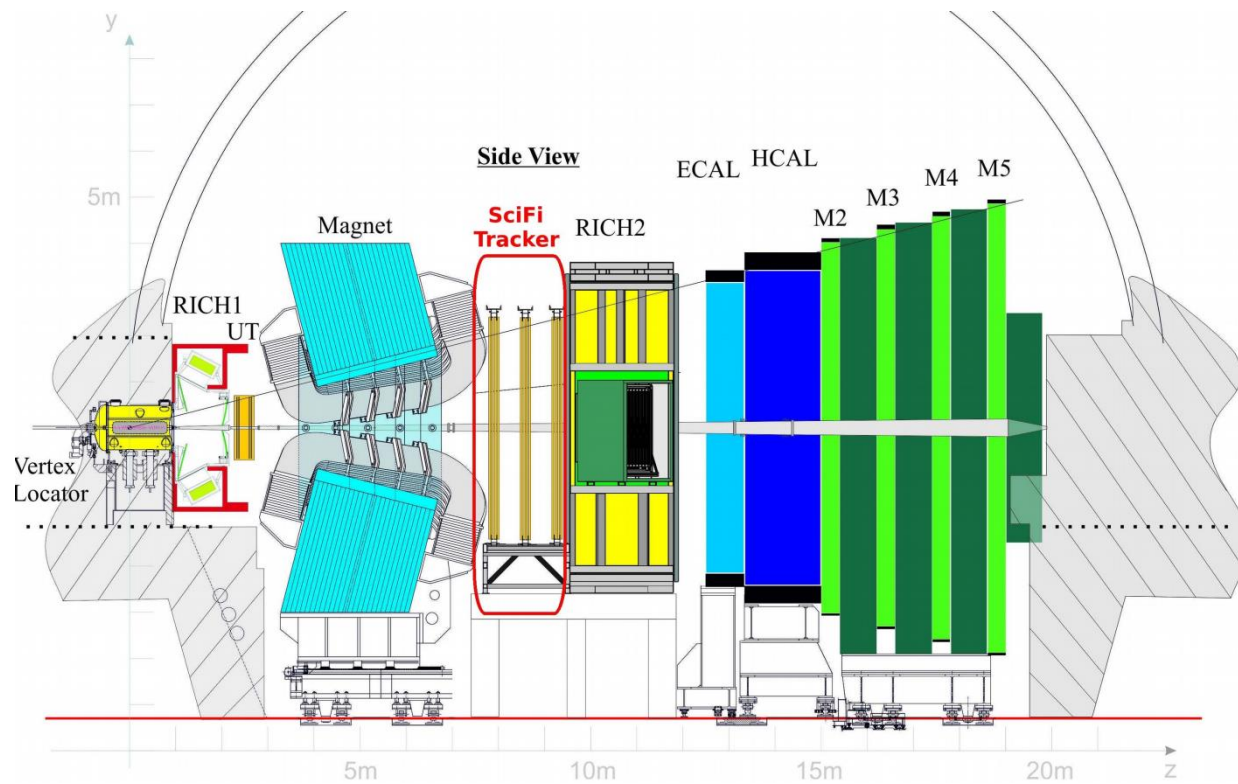
LHCb

# UNE EVOLUTION

# LHCb : Upgrade



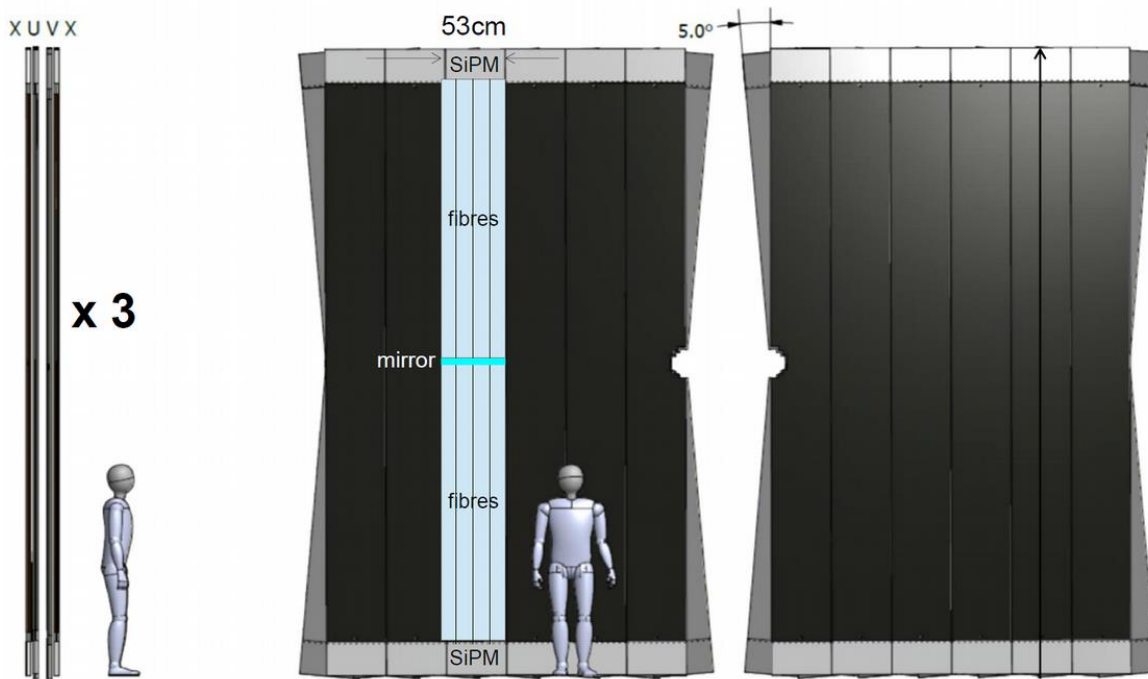
# LHCb : Upgrade



Phase de haute luminosité :

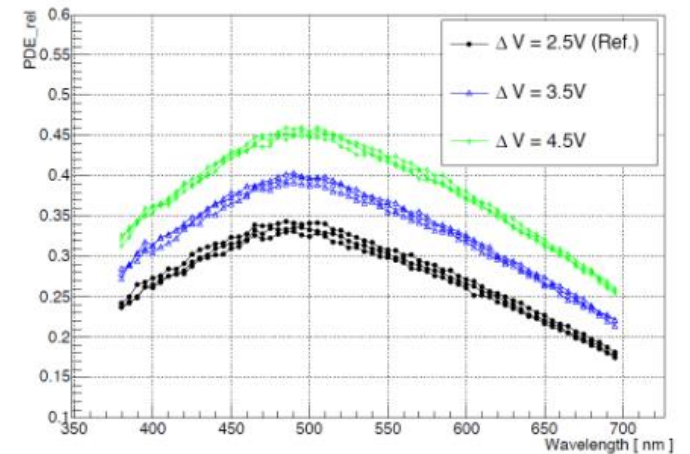
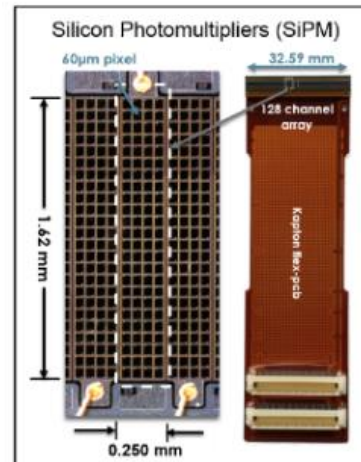
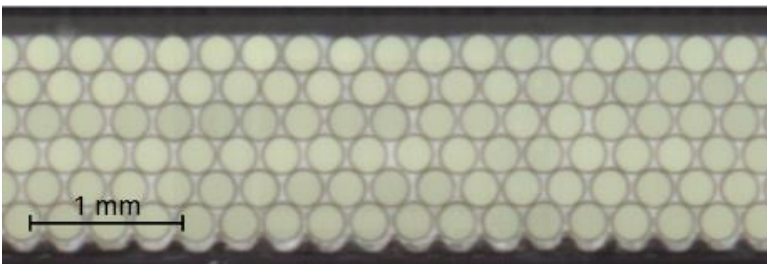
- Problème de tenue aux radiations
- Vitesse de déclenchement

# LHCb : SciFi

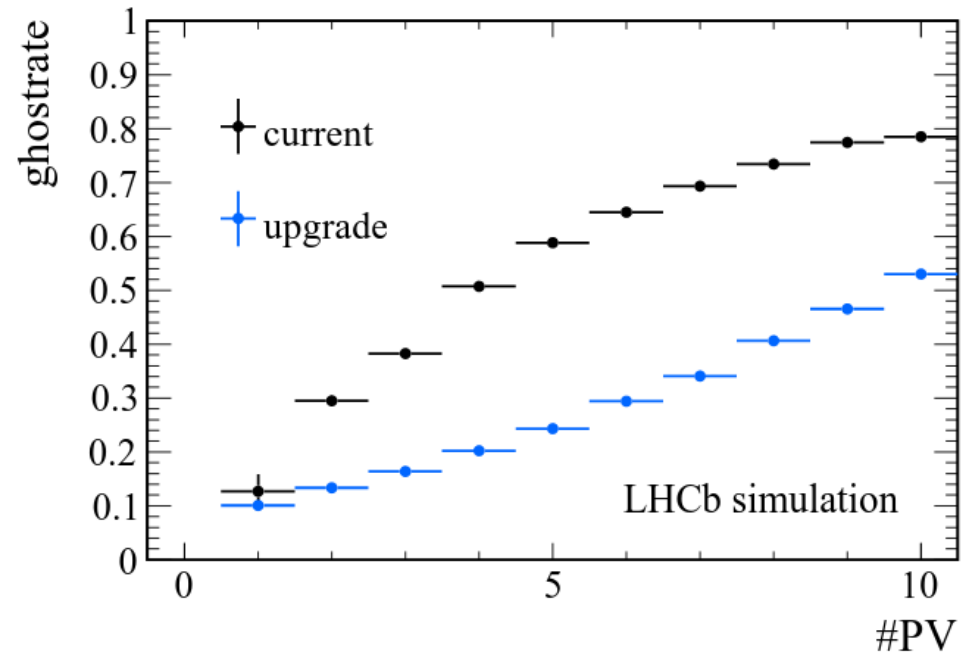
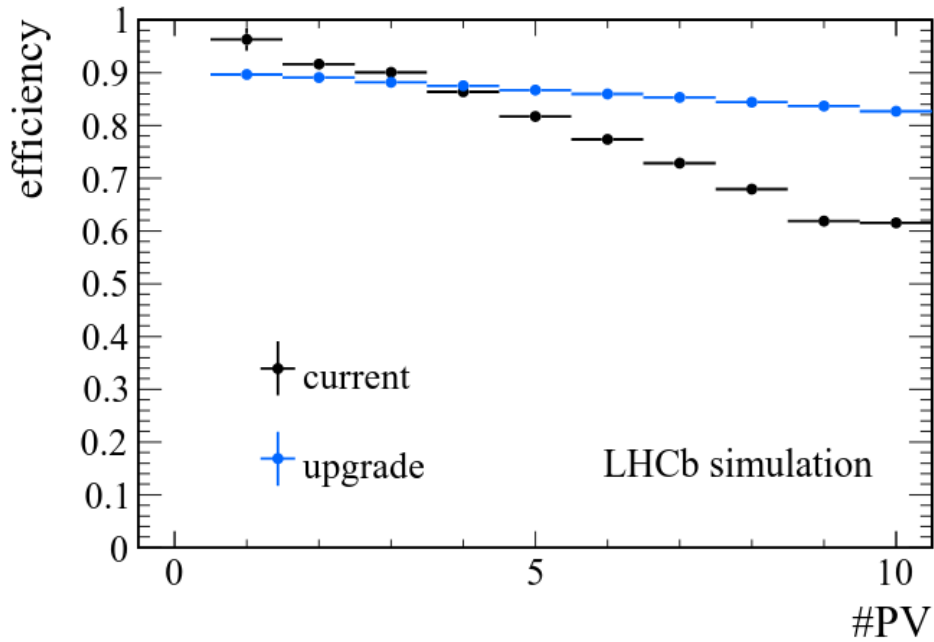


Phase de haute luminosité :

- Scintillateurs
- SiPMT



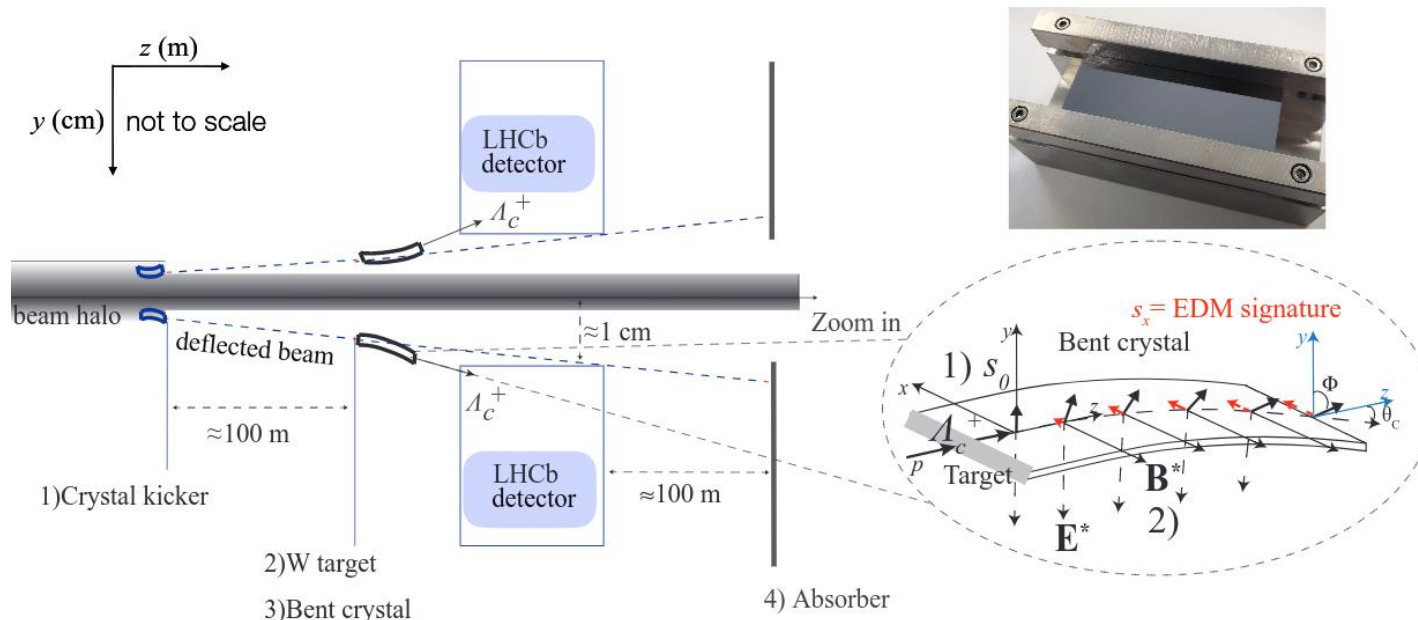
# LHCb : SciFi



# LHCb : cibles fixes

Détermination des moments magnétiques et électrique dipolaires des mésons

- Un premier cristal extrait des protons du faisceau
- pour les envoyer sur une cible fixe où un champ magnétique intense provoque la précession du moment des particules produites





# LHCb



