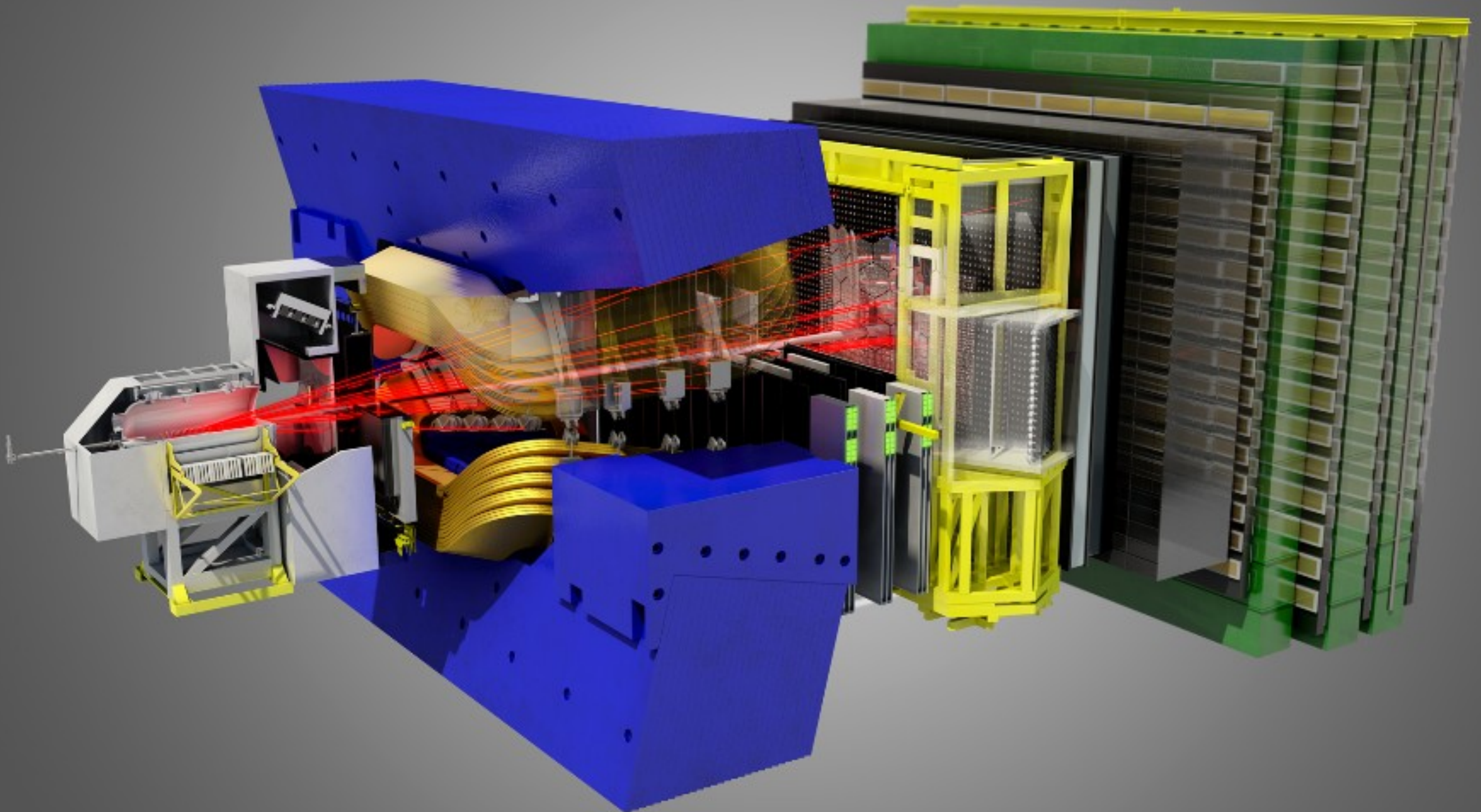


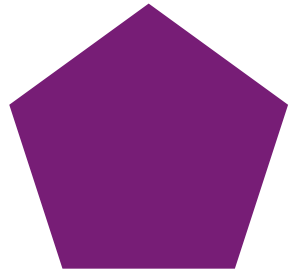
# LHCb Masterclass

---

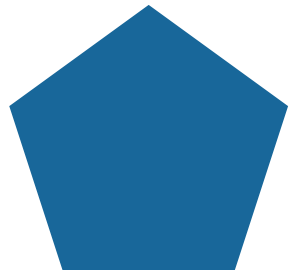
Yasmine Amhis, Raoul Henderson, Carolina Arata, February 2026



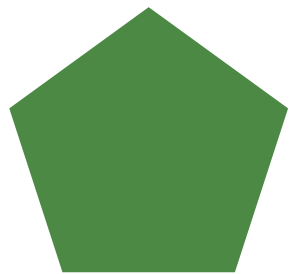
# DE QUOI ALLONS-NOUS PARLER ?



Introduction : Le méson  $D^0$  et pourquoi il est intéressant

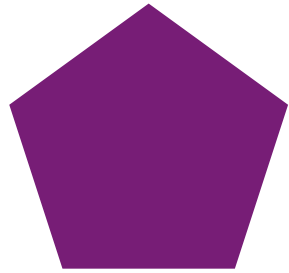


Mesurer les propriétés des particules avec LHCb

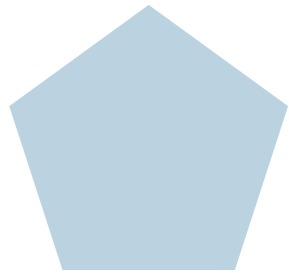


Votre mission !

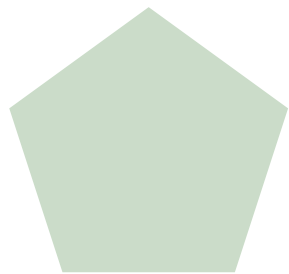
DE QUOI ALLONS-NOUS PARLER ?



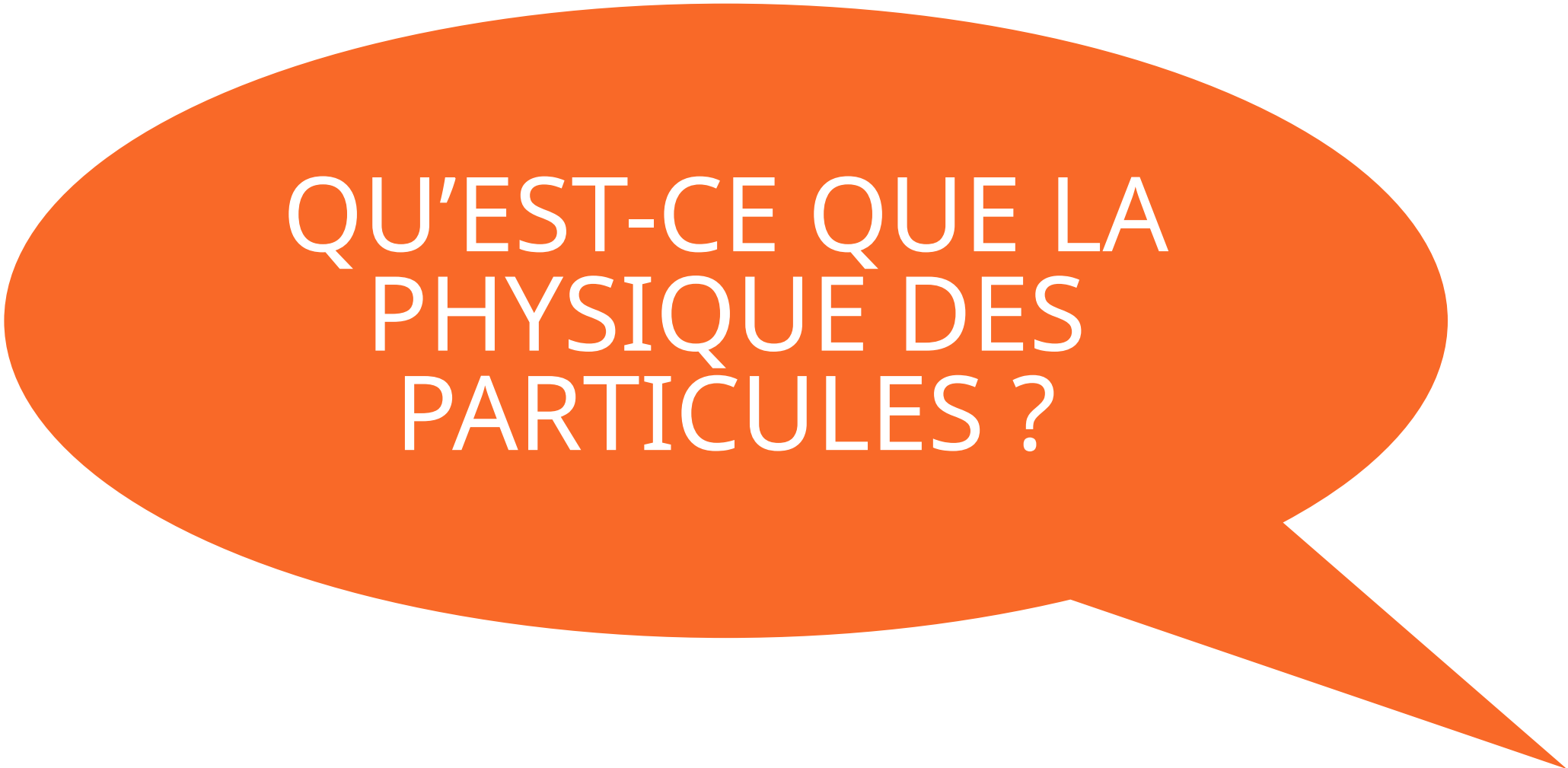
Introduction : Le méson  $D^0$  et pourquoi il est intéressant



Mesurer les propriétés des particules avec LHCb



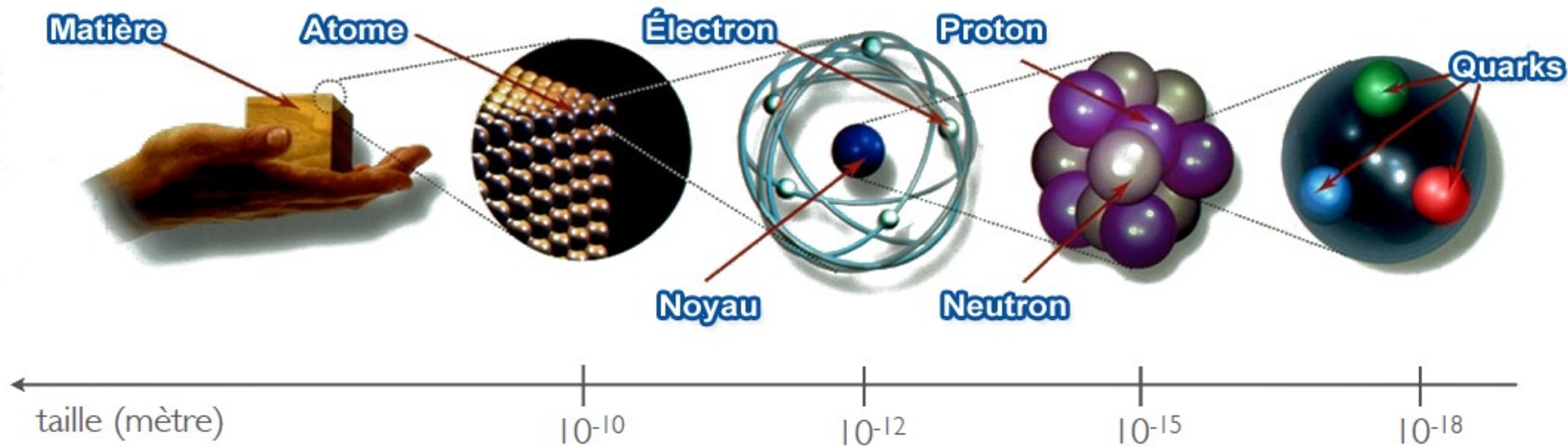
Votre mission !

An orange speech bubble with a white question inside.

QU'EST-CE QUE LA  
PHYSIQUE DES  
PARTICULES ?

# QU'EST-CE QUE LA PHYSIQUE DES PARTICULES ?

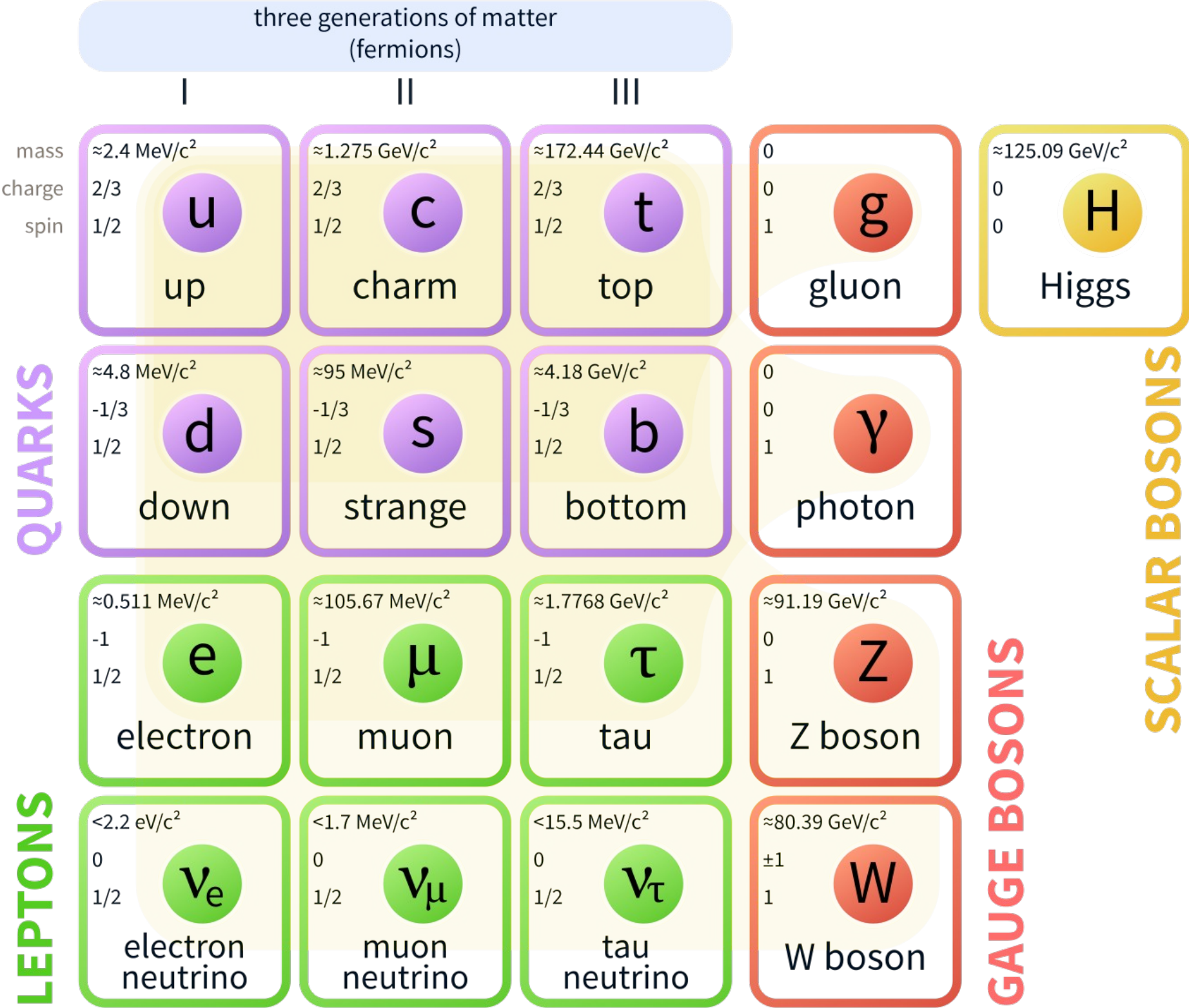
L'étude des composants élémentaires de la matière et de leurs interactions





LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

Standard Model of Elementary Particles

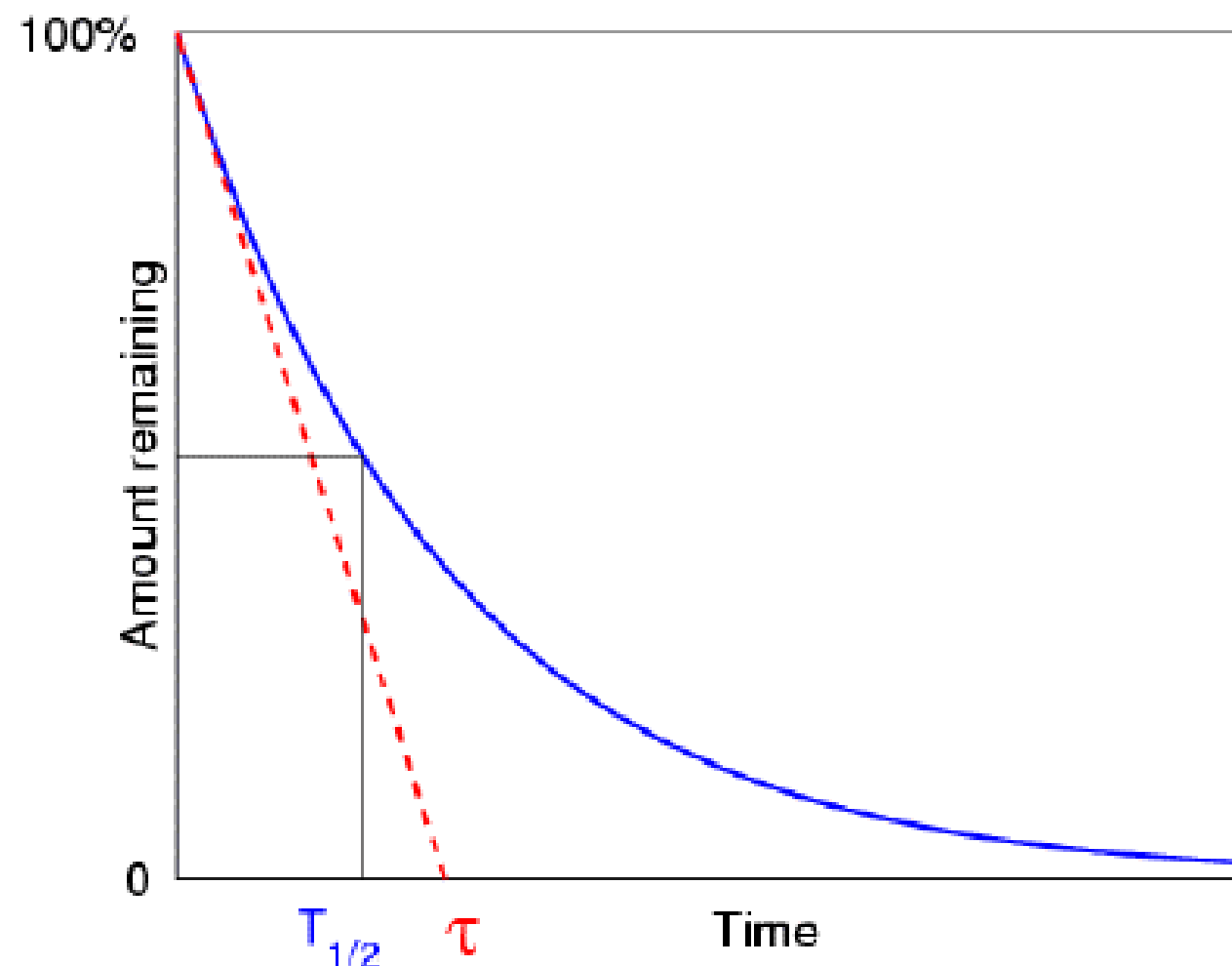


An orange speech bubble with a tail pointing towards the bottom right corner of the image. Inside the bubble, the text "COMBIEN DE TEMPS VIT UNE PARTICULE ?" is written in white, uppercase letters, centered horizontally and vertically.

COMBIEN DE TEMPS  
VIT UNE  
PARTICULE ?

## TEMPS DE VIE D'UNE PARTICULE

La probabilité qu'une particule se désintègre au bout d'un temps  $t$  suit une loi exponentielle de moyenne  $\tau$  (comme pour les désintégrations nucléaires)





TEMPS DE VIE DE PLUSIEURS PARTICULES

| Type   | Name                  | Symbol                | Mass (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            |

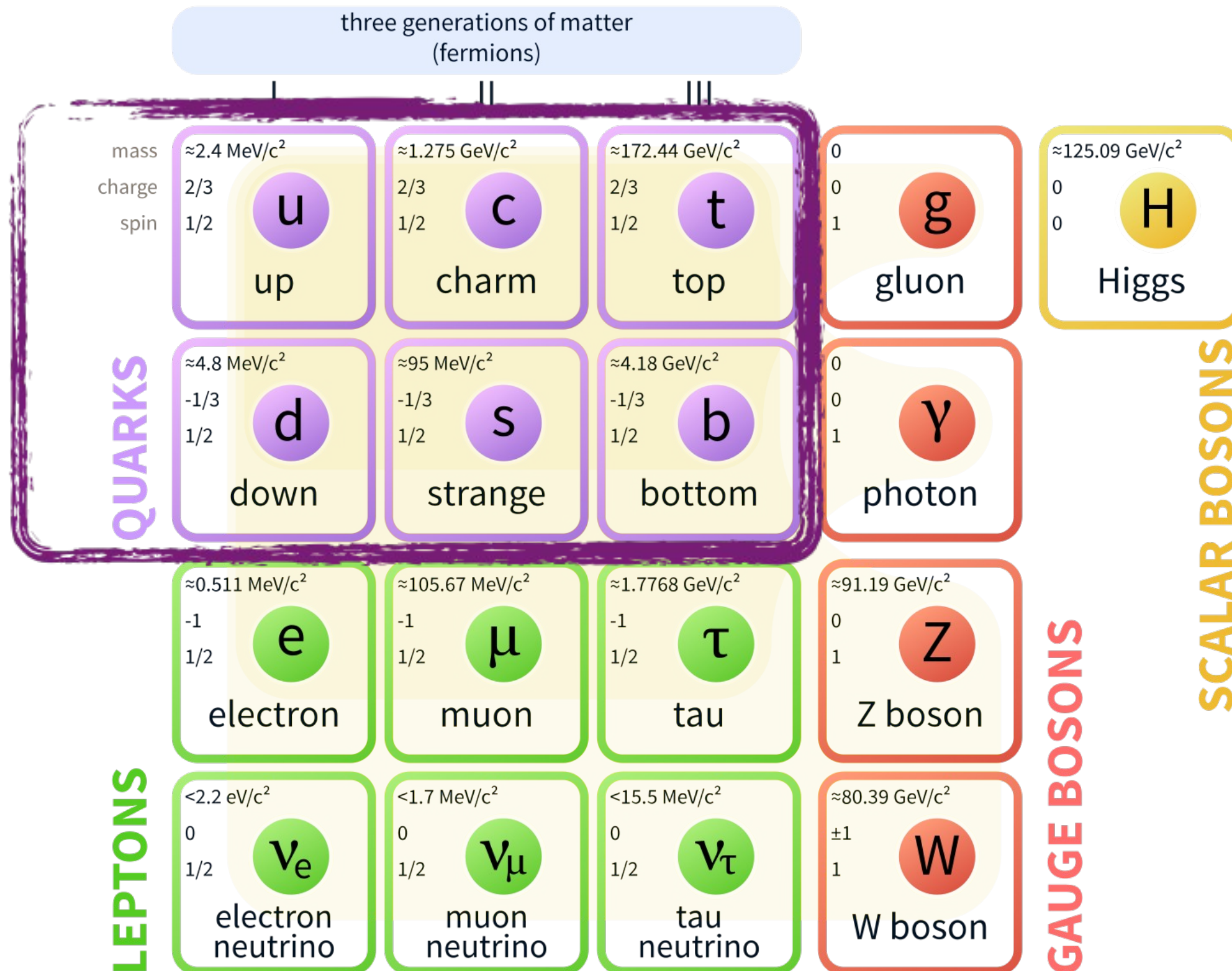
TEMPS DE VIE DE PLUSIEURS PARTICULES

| Type   | Name                  | Symbol                | Mass (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            |

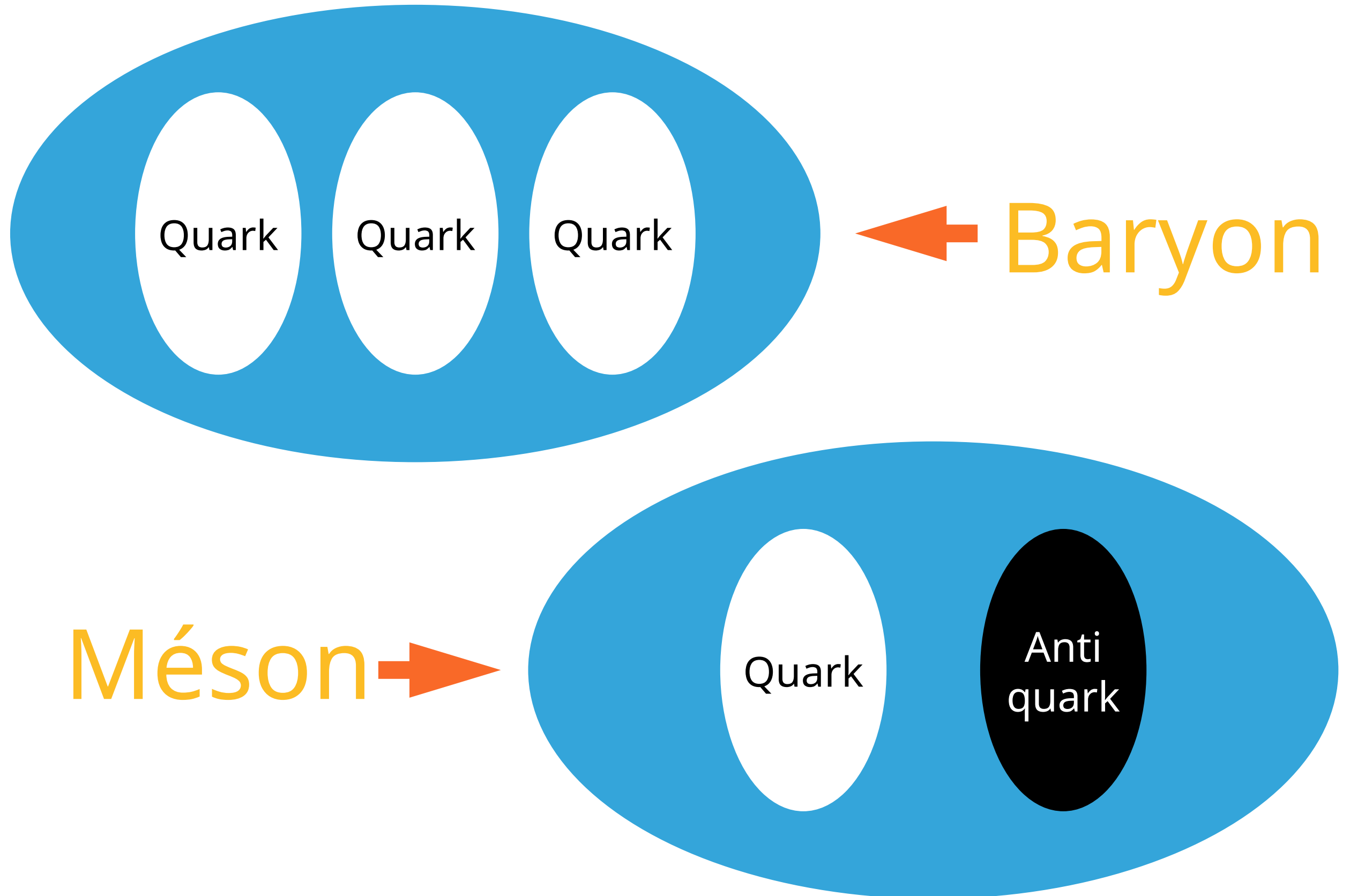
TEMPS DE VIE DE PLUSIEURS PARTICULES

| Type   | Name                  | Symbol                | Mass (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            |

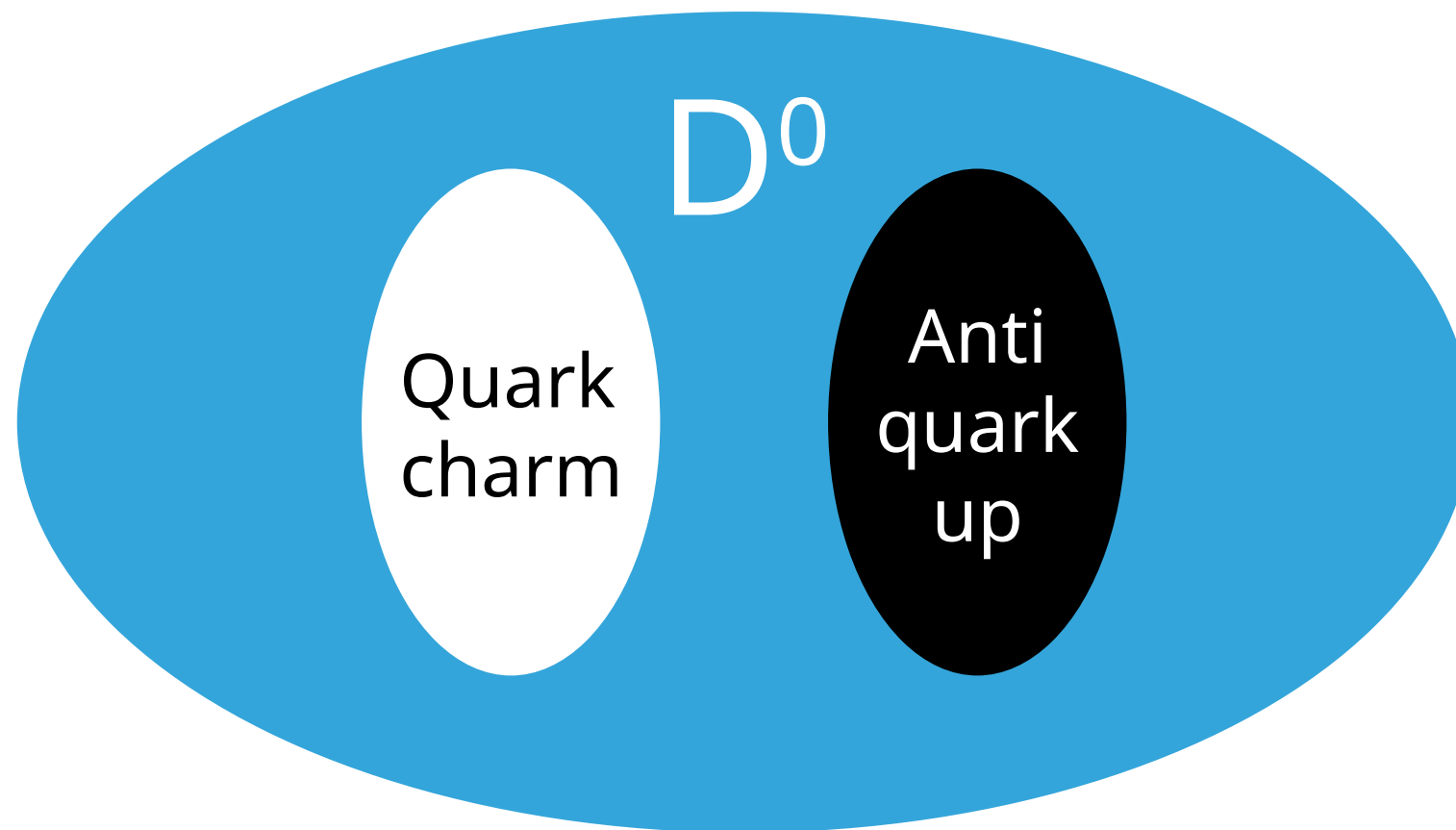
## Standard Model of Elementary Particles



## DEUX TYPES DE STRUCTURES À BASE DE QUARKS



# LA PARTICULE QUI VA NOUS INTÉRESSER : LE MÉSON D<sup>0</sup>

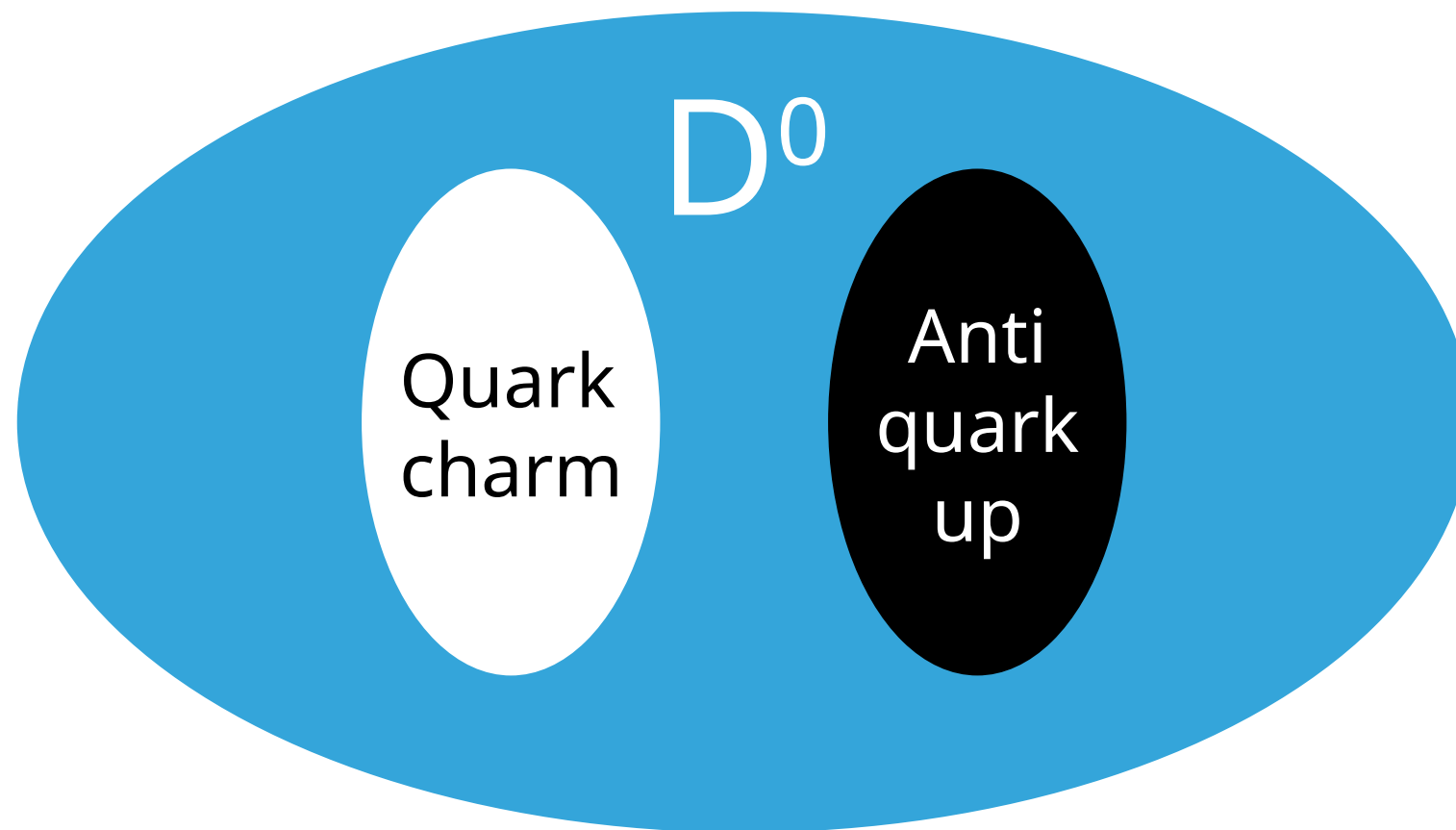




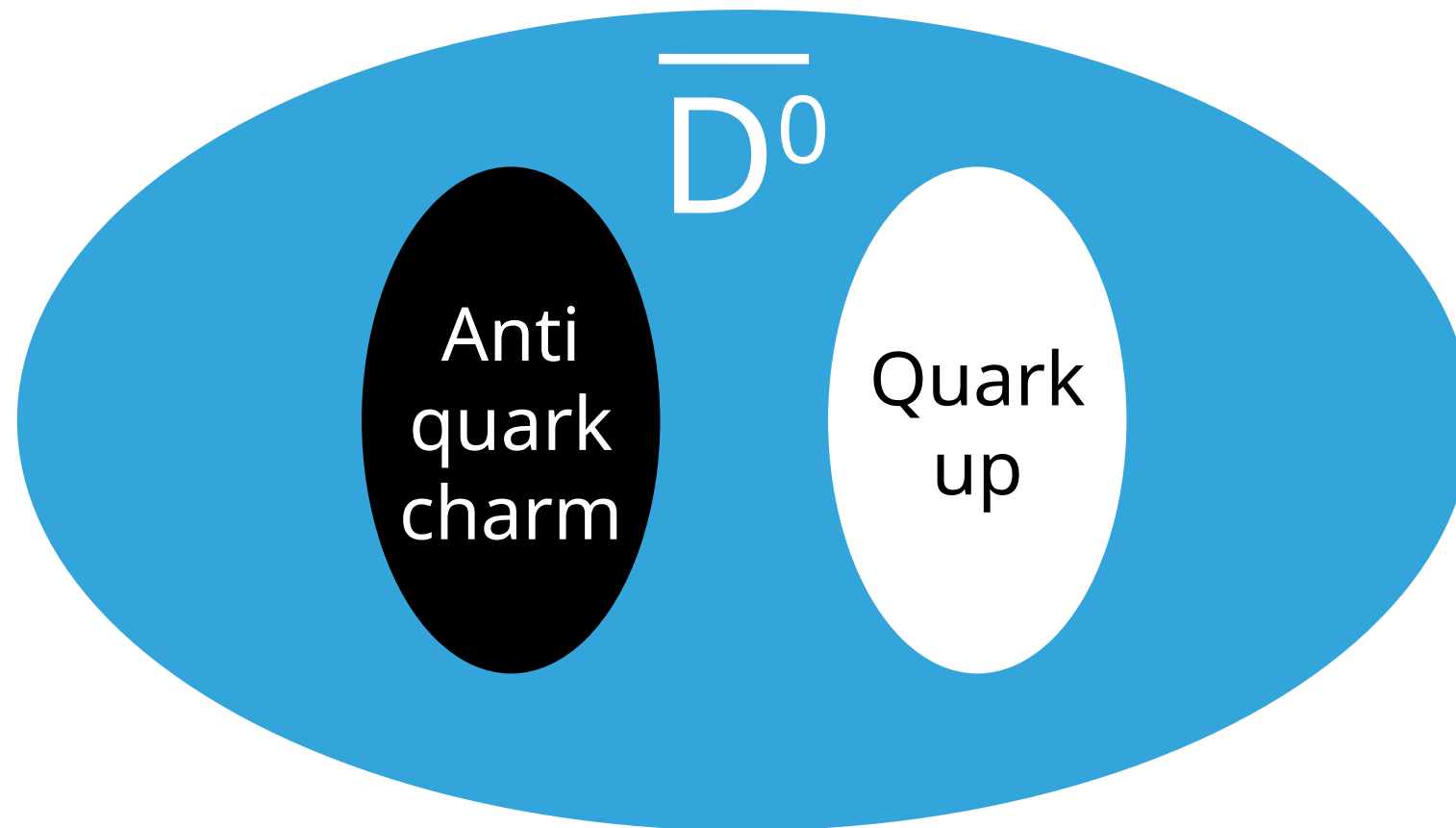


POURQUOI  
S'INTÉRESSE-T-ON  
AU  $D^0$  ?

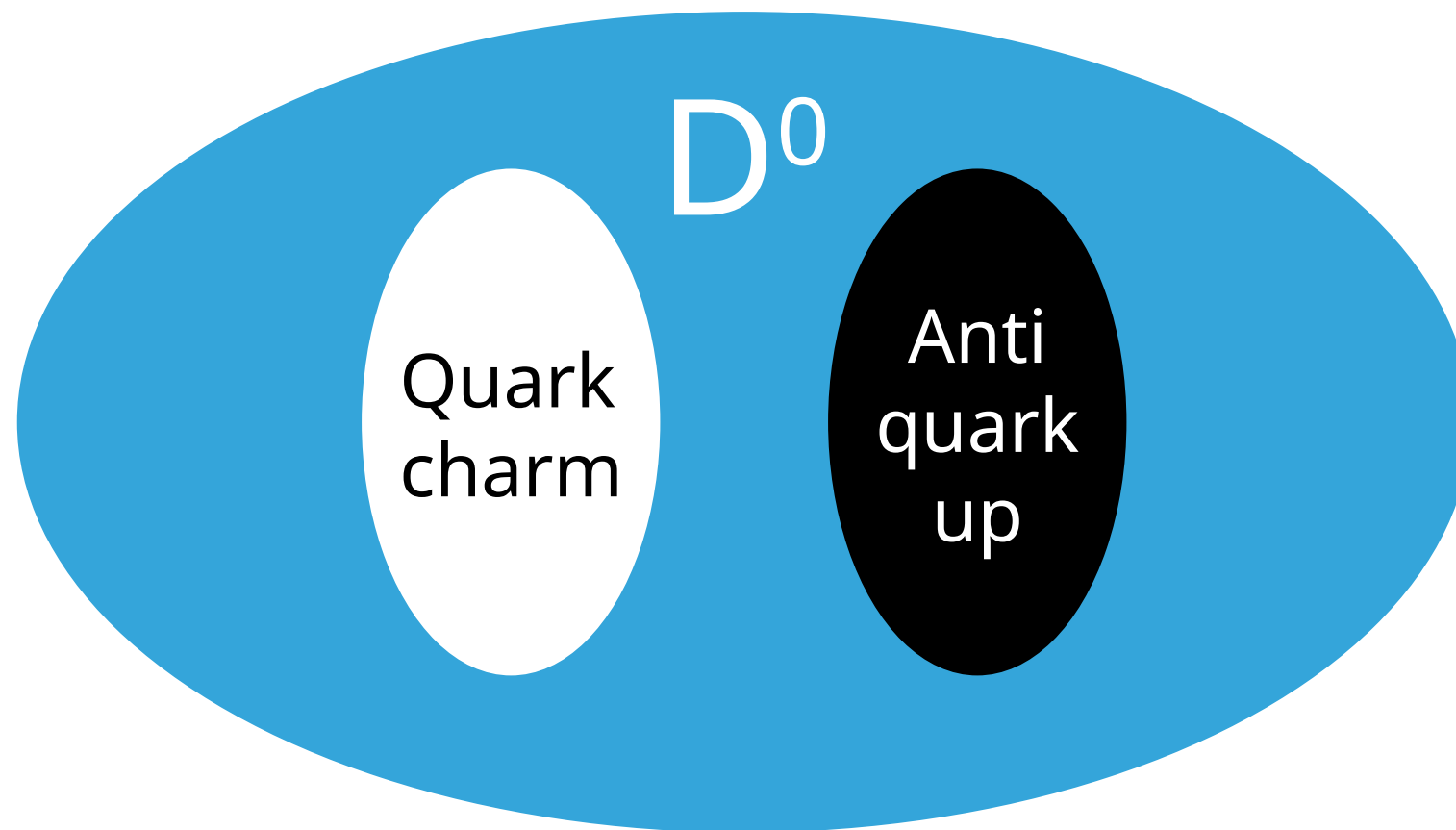
# LA PARTICULE QUI VA NOUS INTÉRESSER : LE MÉSON D<sup>0</sup>



# LA PARTICULE QUI VA NOUS INTÉRESSER : LE MÉSON D<sup>0</sup>

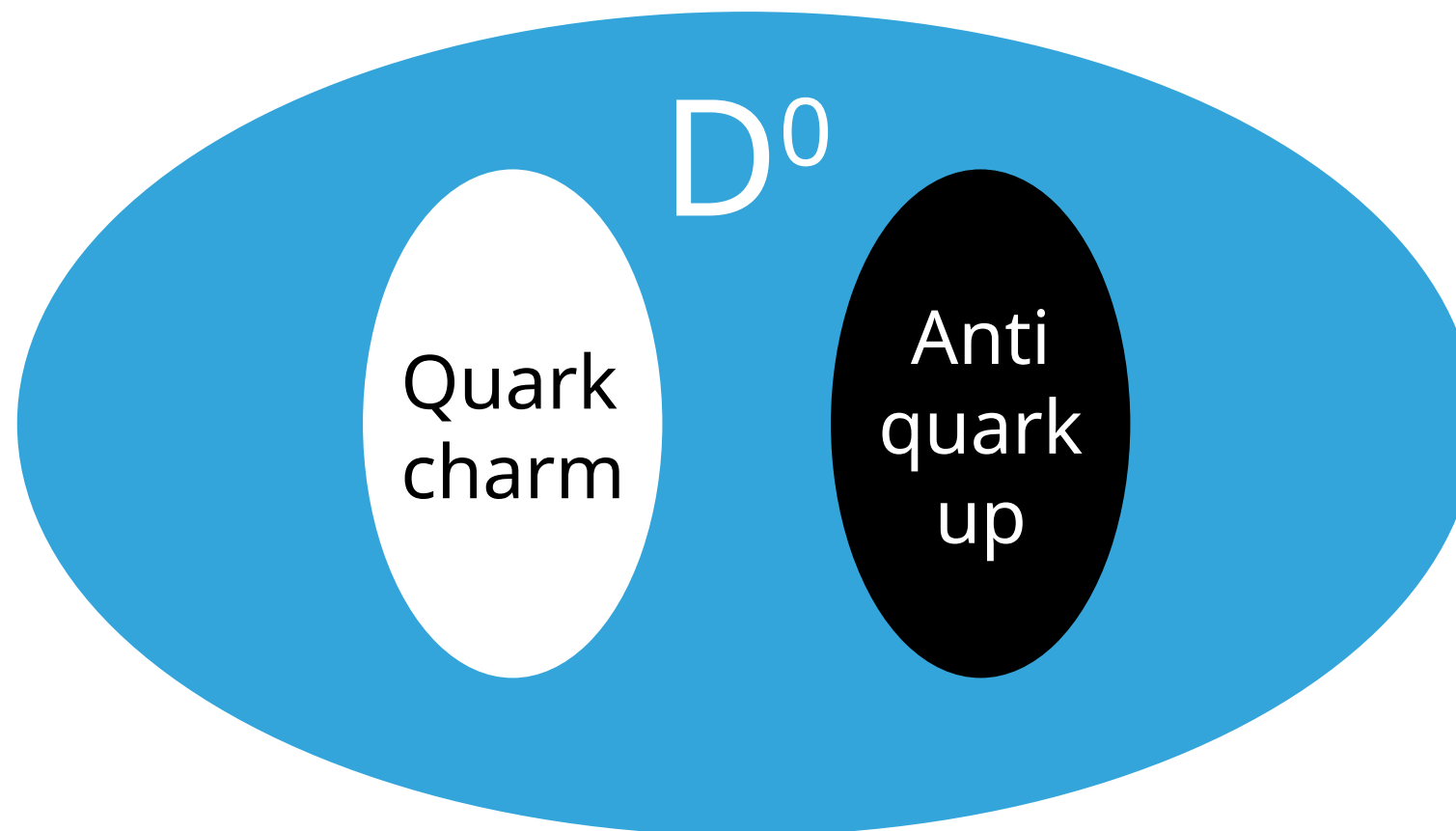


# LA PARTICULE QUI VA NOUS INTÉRESSER : LE MÉSON D<sup>0</sup>

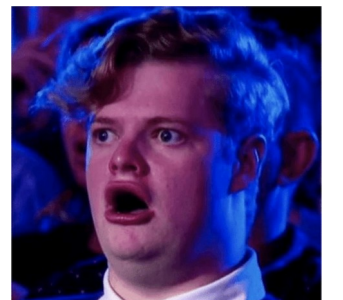


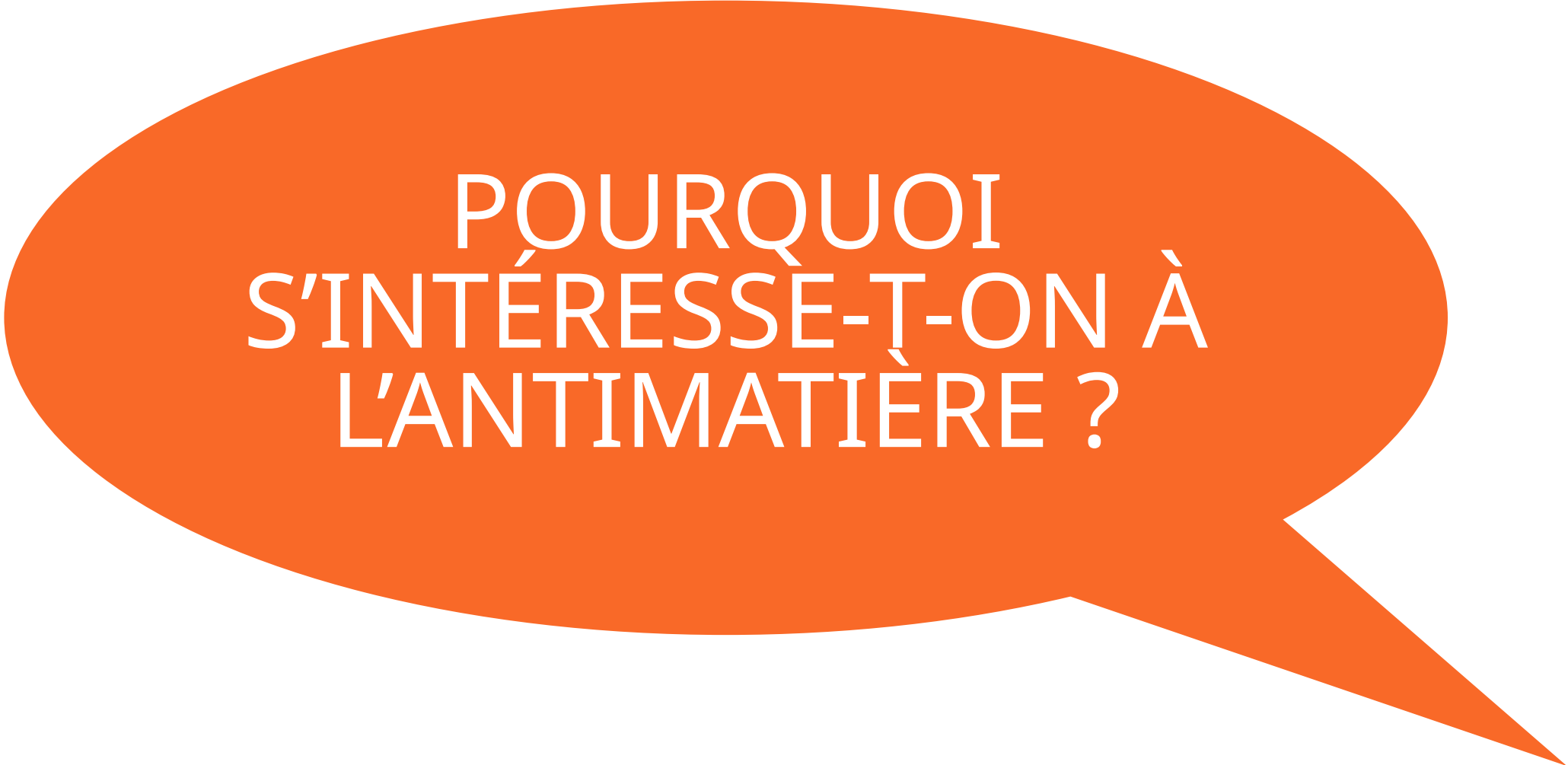
LA PARTICULE QUI VA NOUS INTÉRESSER : LE MÉSON  $D^0$

IL OSCILLE !



Le  $D^0$  est une particule neutre : il peut osciller entre matière et antimatière avant de se désintégrer !



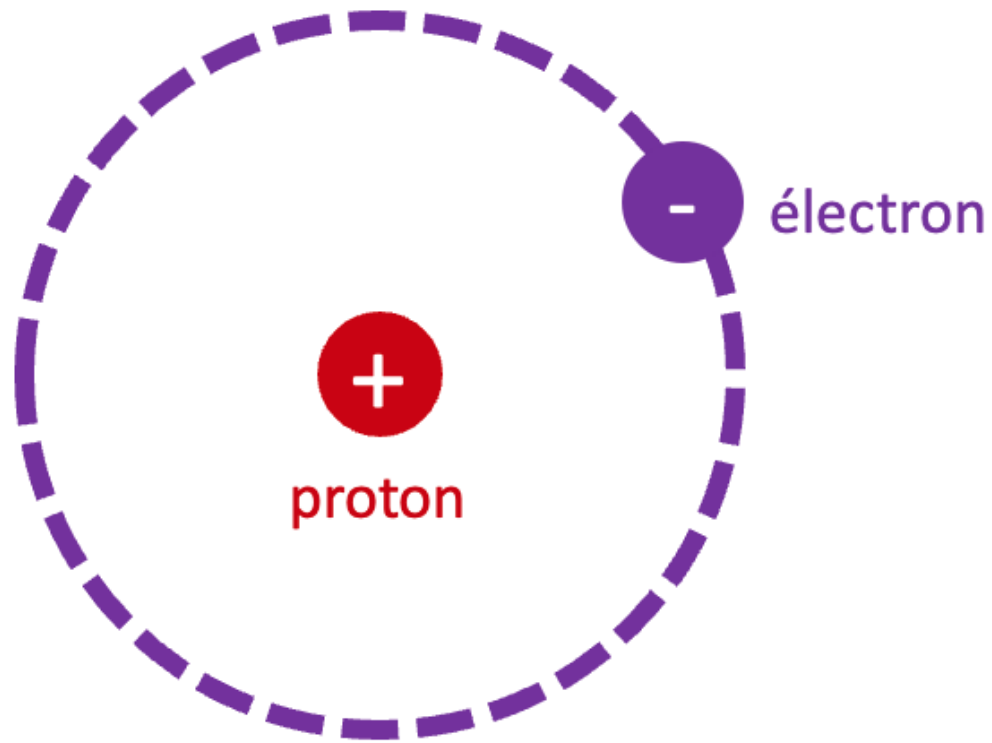
An orange speech bubble with a white question inside.

POURQUOI  
S'INTÉRESSE-T-ON À  
L'ANTIMATIÈRE ?

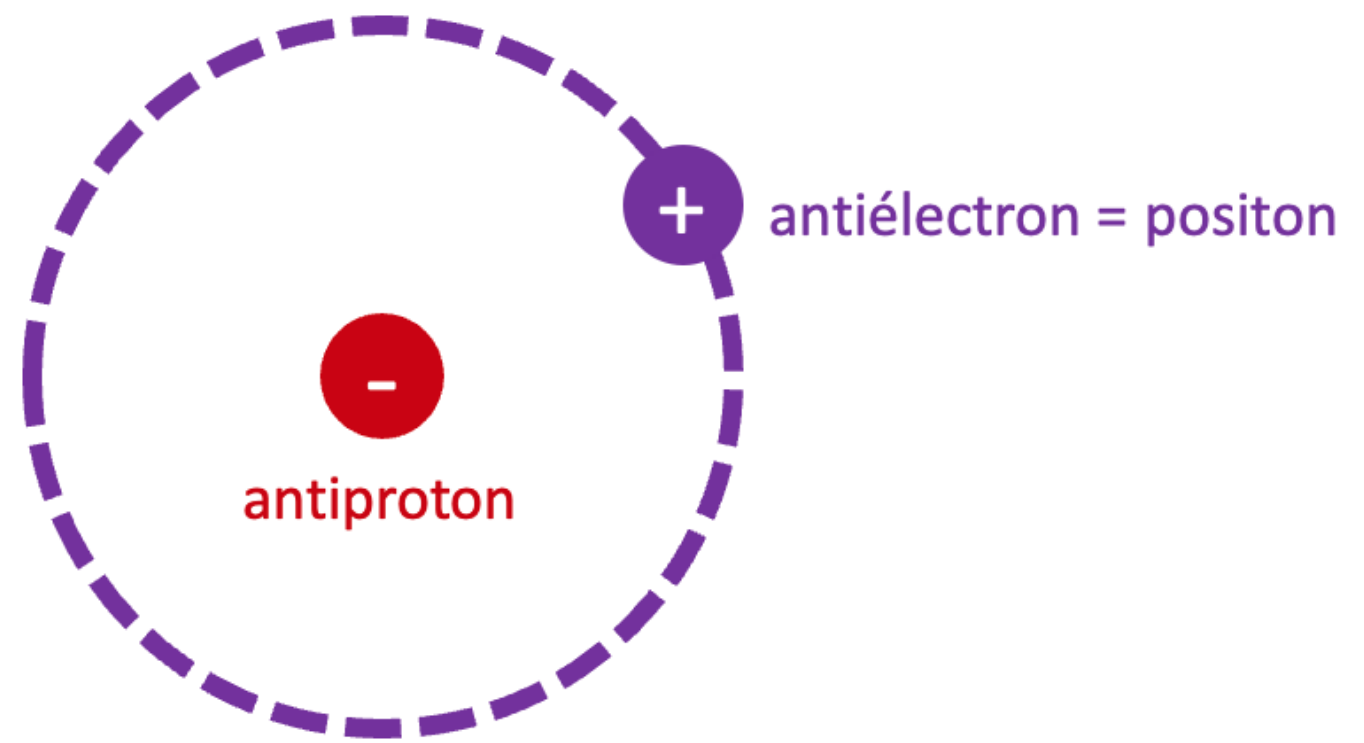


# MATIÈRE ET ANTIMATIÈRE

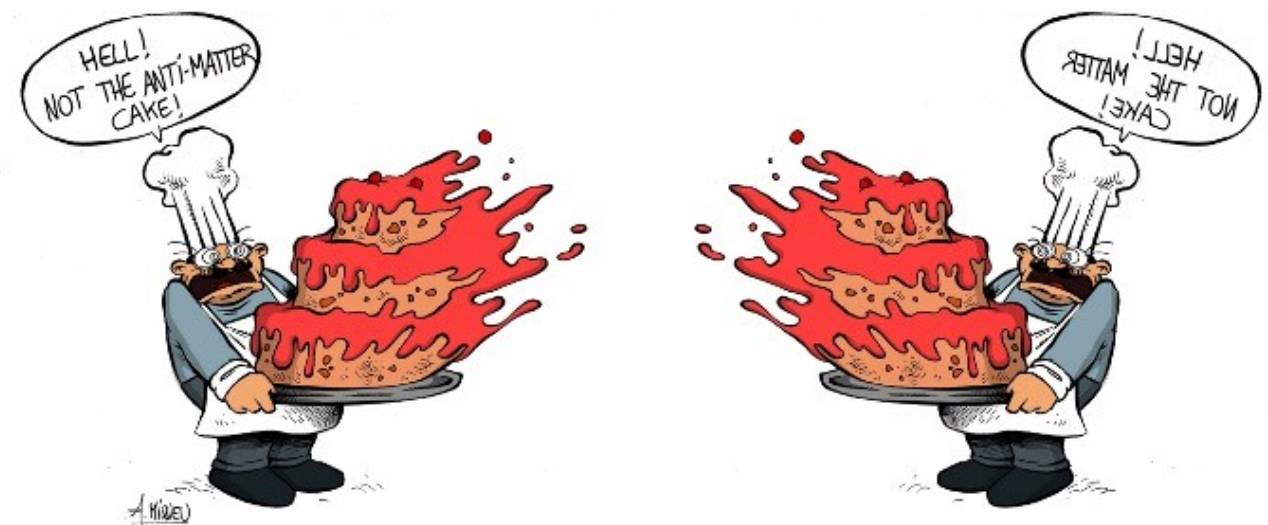
## Atome d'hydrogène



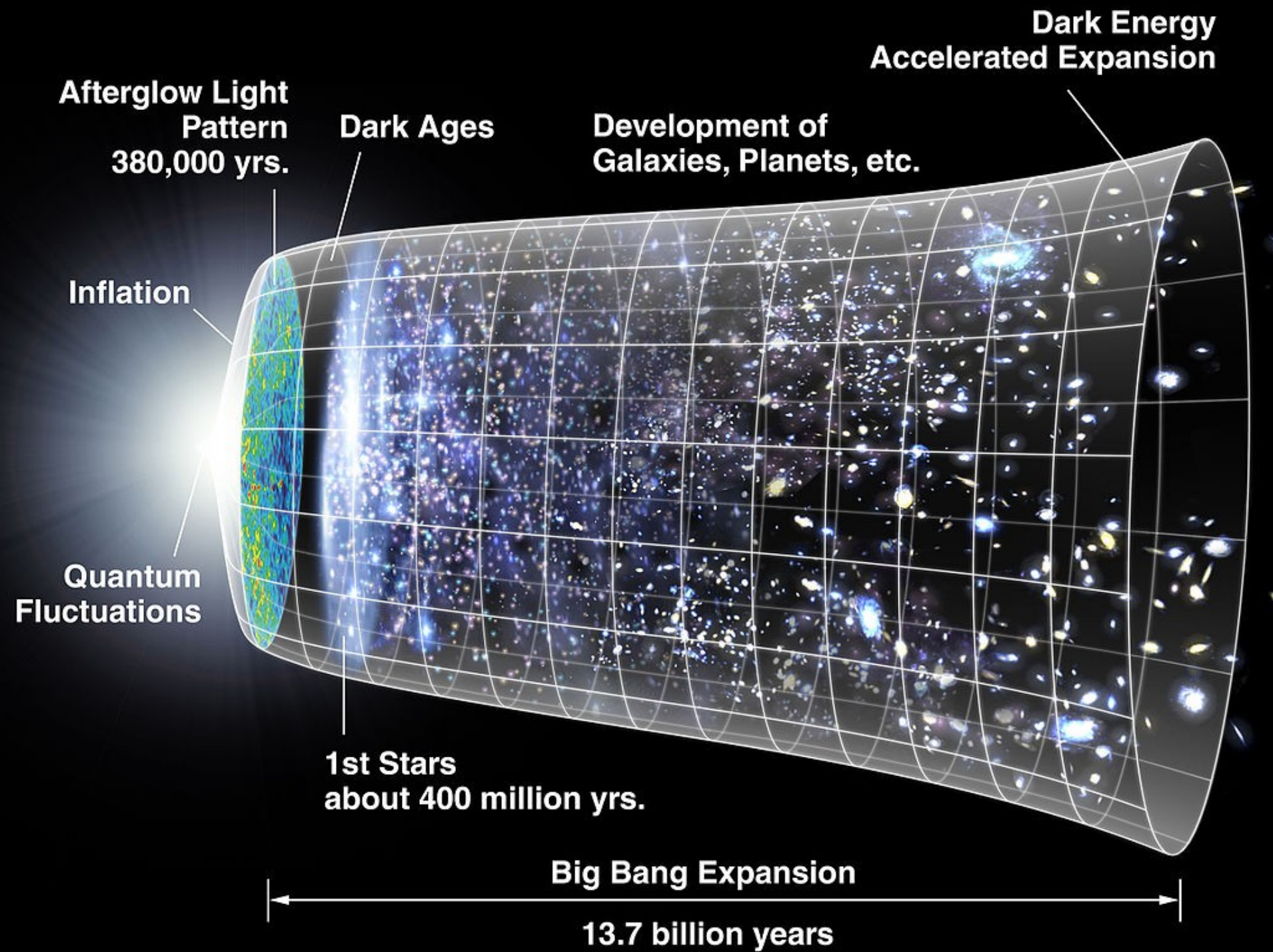
## Atome d'antihydrogène



- ▶ Même masse, mais charges électriques opposées.
- ▶ Matière et antimatière semblent donc parfaitement symétriques.
- ▶ Quand matière et antimatière se rencontrent: BOOM!

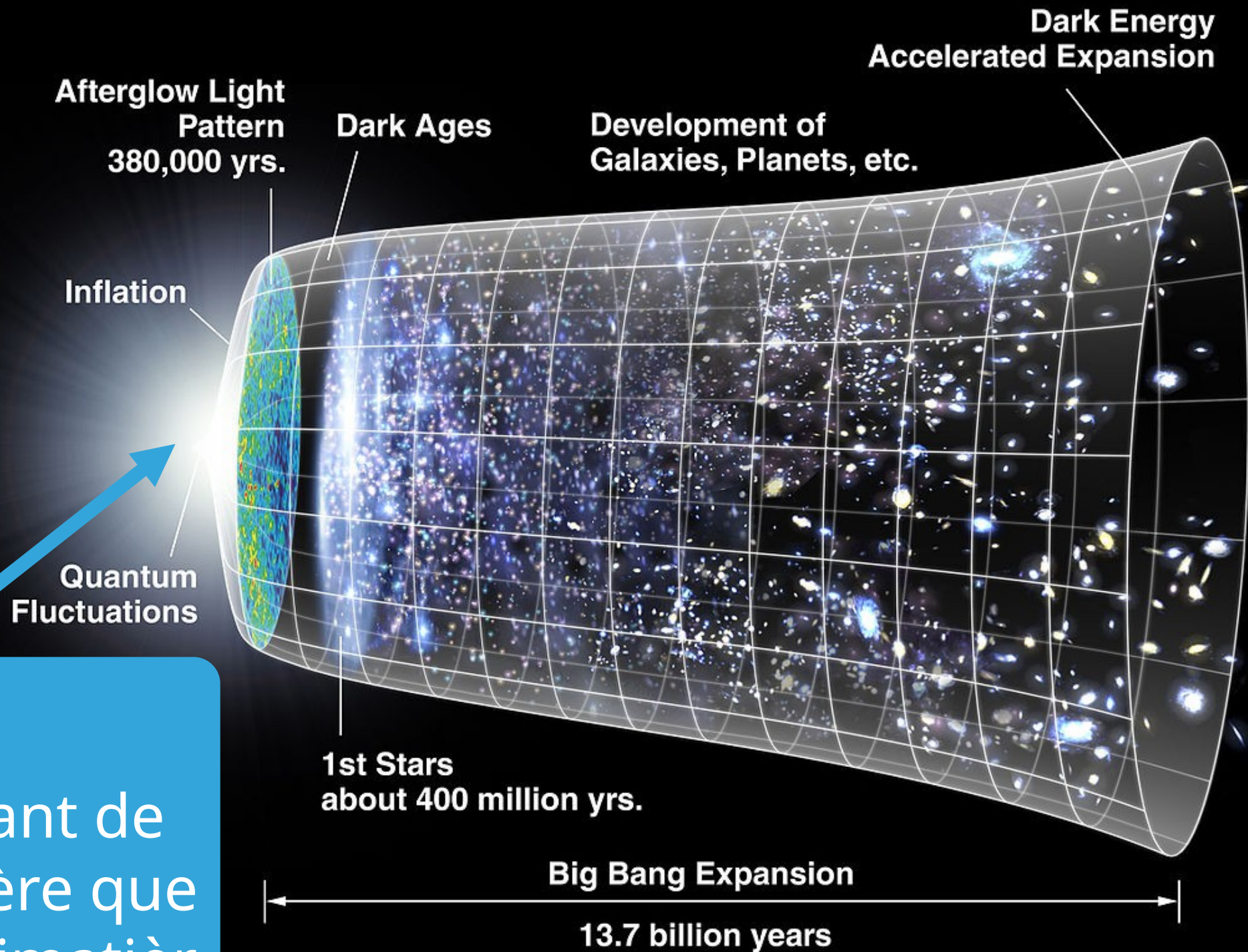


# L'ÉNIGME DE L'ANTIMATIÈRE





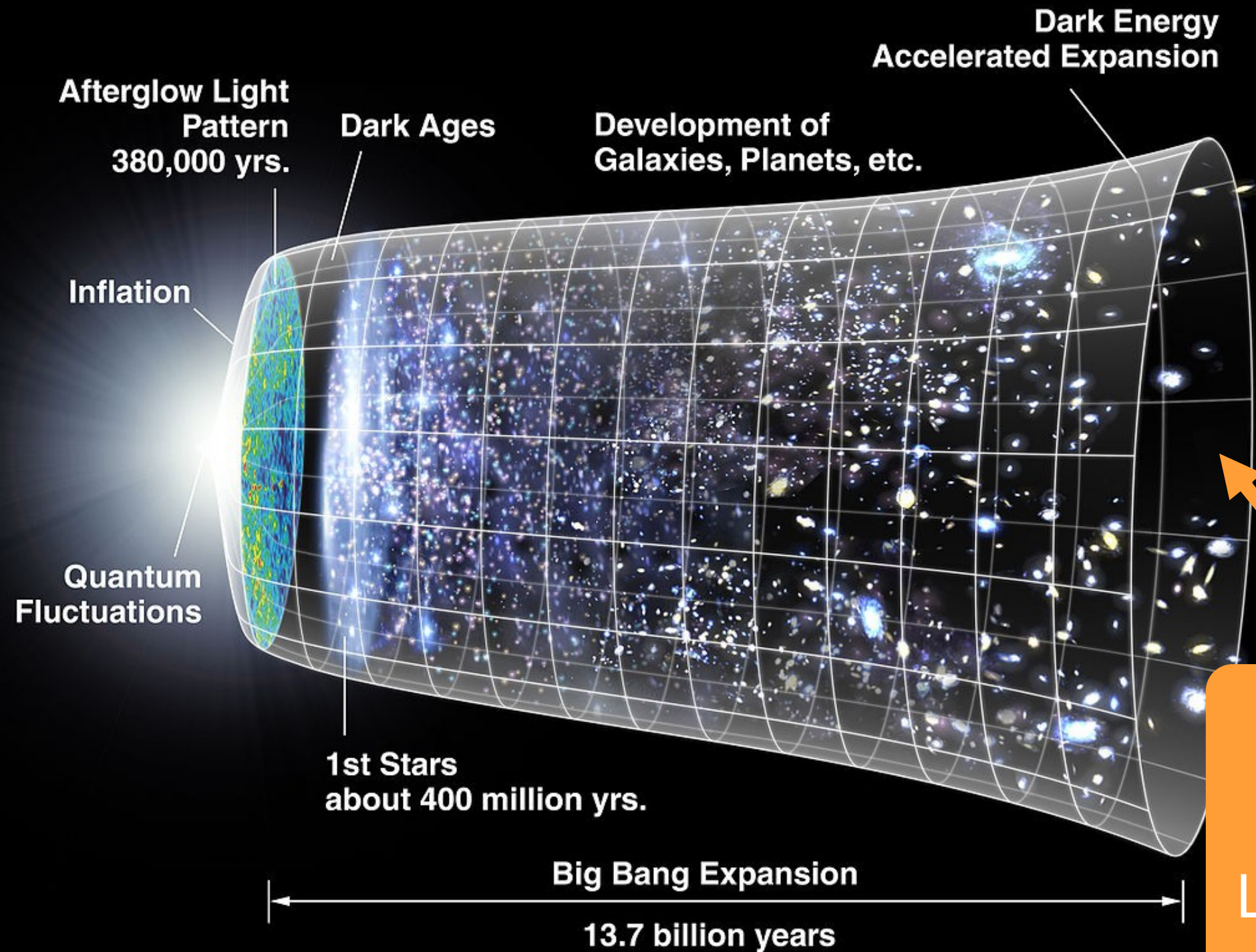
# L'ÉNIGME DE L'ANTIMATIÈRE



Autant de  
matière que  
d'antimatièr  
e

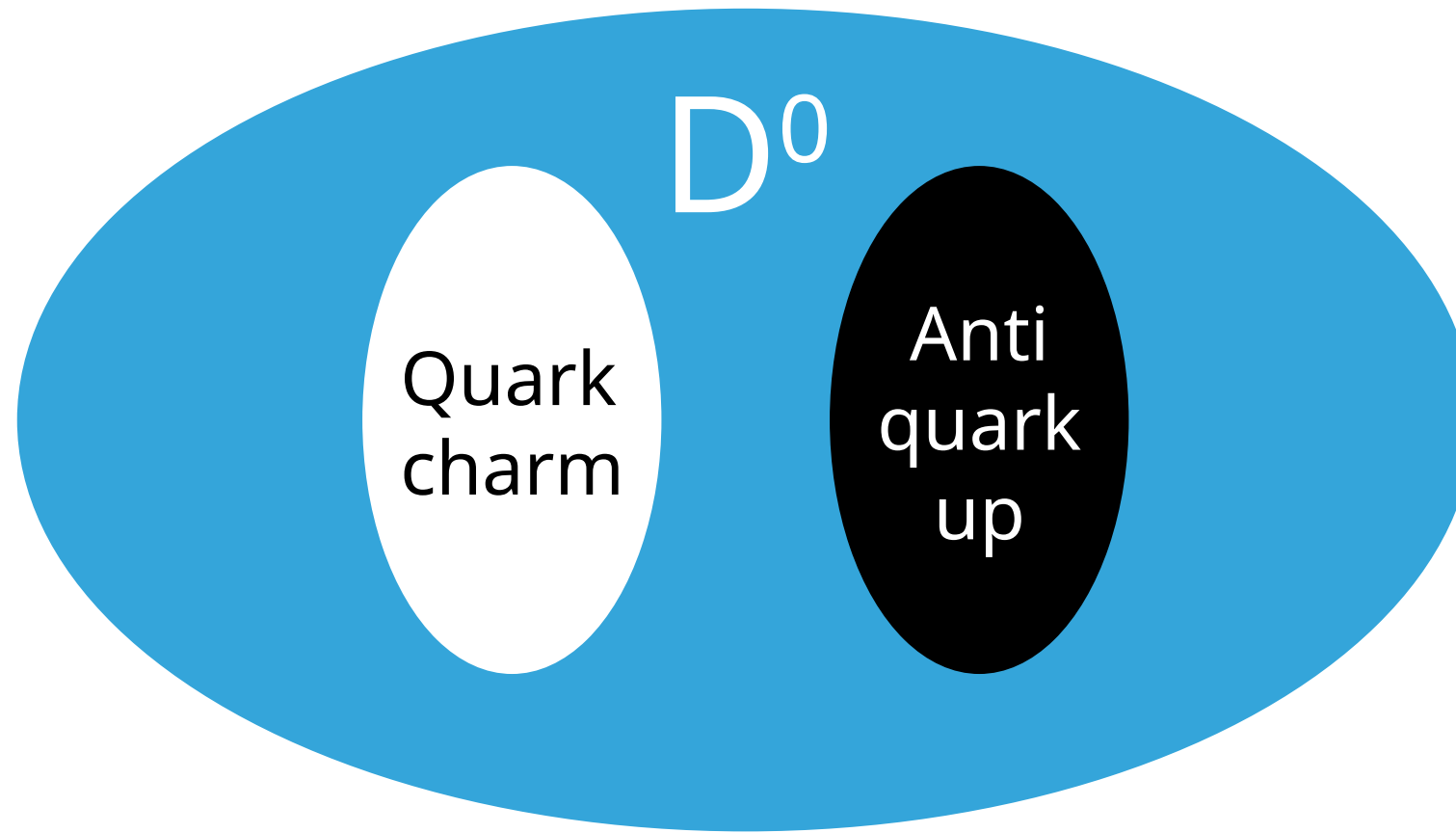


# L'ÉNIGME DE L'ANTIMATIÈRE



L'antimatière a disparu !

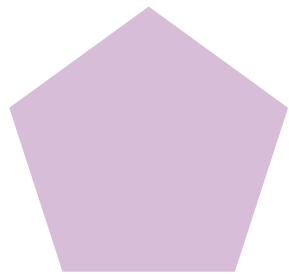
## LA PARTICULE QUI VA NOUS INTÉRESSER : LE MÉSON $D^0$



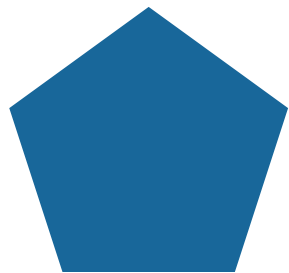
Le  $D^0$  peut nous donner des indices sur ce qui fait la différence entre la matière et l'antimatière !

On appelle ce phénomène la violation CP, la brisure de symétrie entre matière et antimatière!

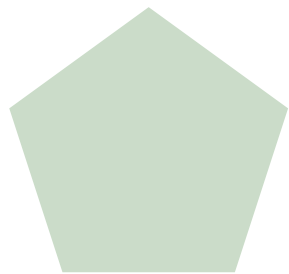
# DE QUOI ALLONS-NOUS PARLER ?



Introduction : Le méson  $D^0$  et pourquoi il est intéressant



Mesurer les propriétés des particules avec LHCb



Votre mission !

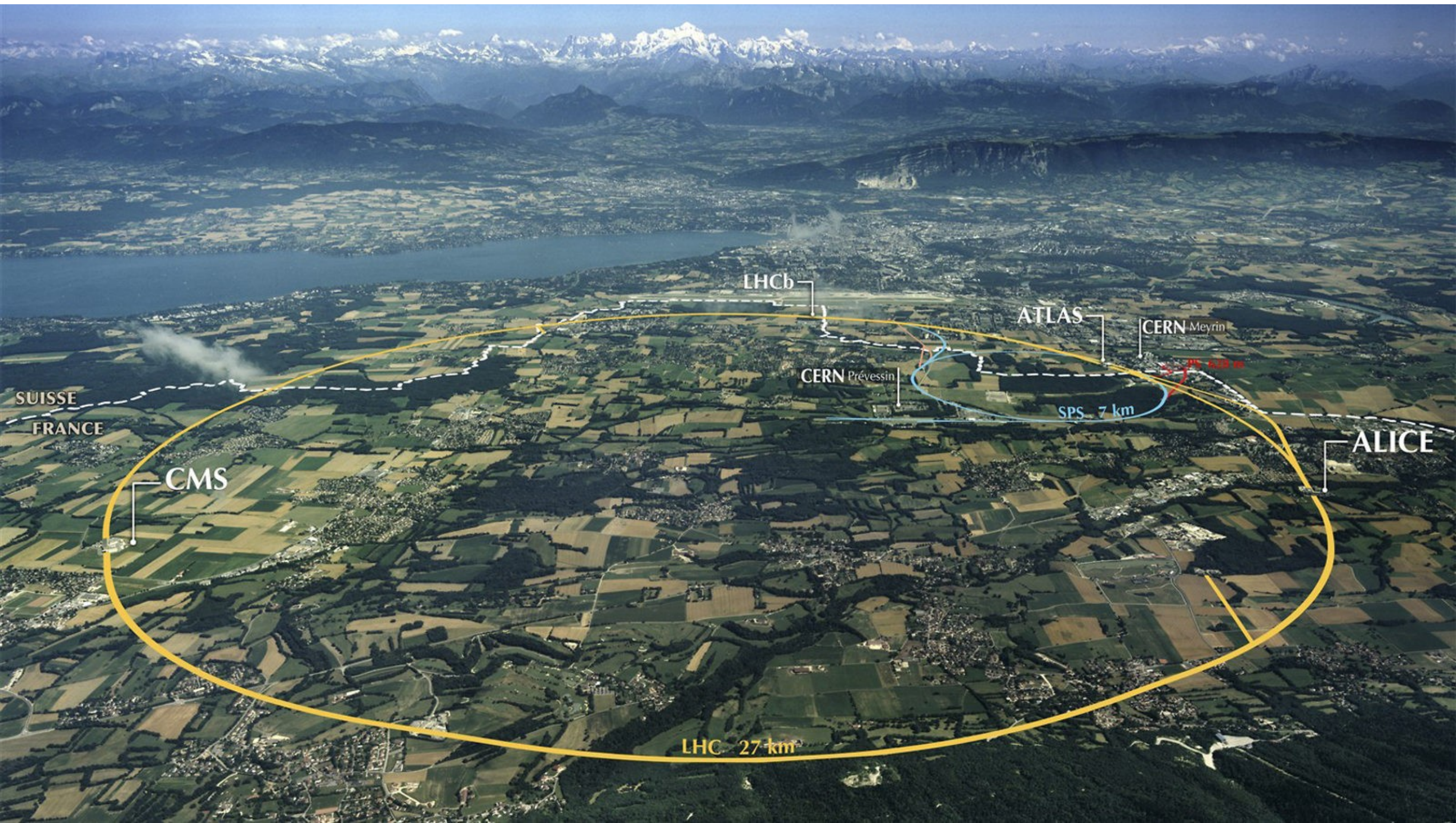
An orange speech bubble with a tail pointing towards the bottom-left corner. Inside the bubble, the text "COMMENT FAIT-ON POUR PRODUIRE TOUTES CES PARTICULES ?" is written in white, uppercase, sans-serif font, centered.

COMMENT FAIT-ON  
POUR PRODUIRE  
TOUTES CES  
PARTICULES ?



UNE MACHINE POUR ACCÉLÉRER DES LES PROTONS ET FAIRE DES COLLISIONS

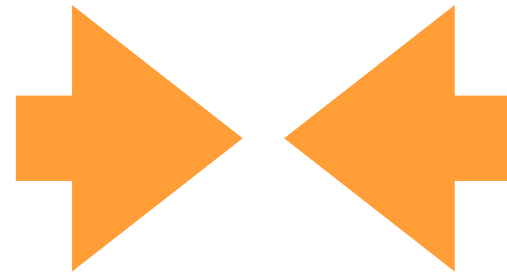
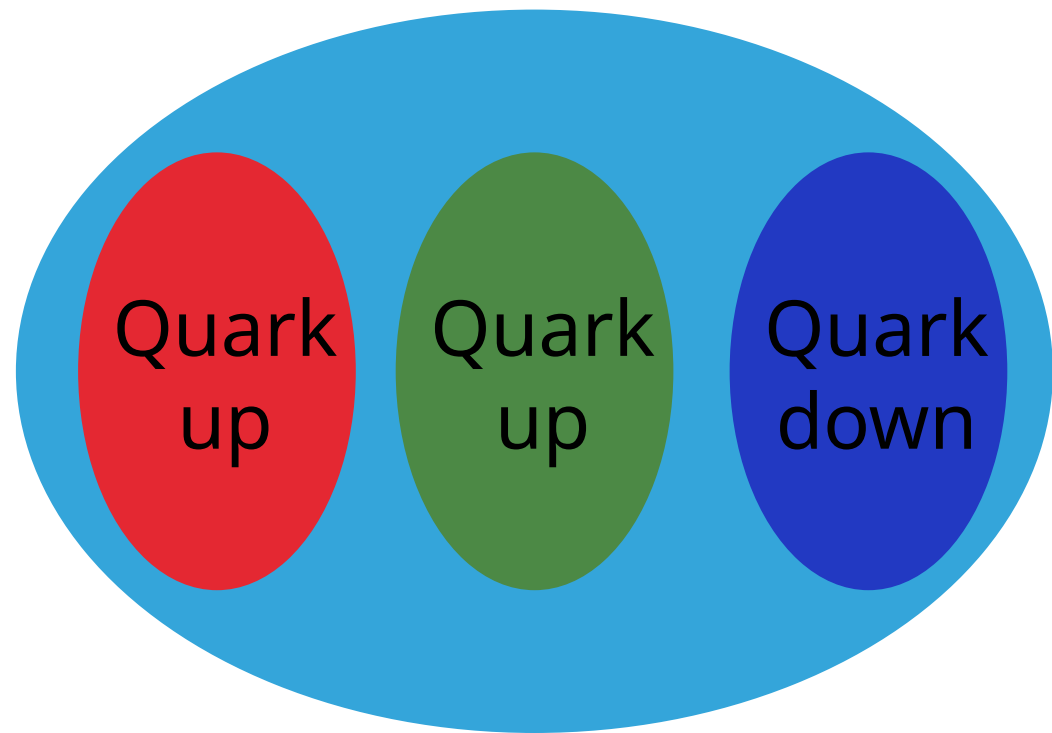
## Le LHC : Large Hadron Collider



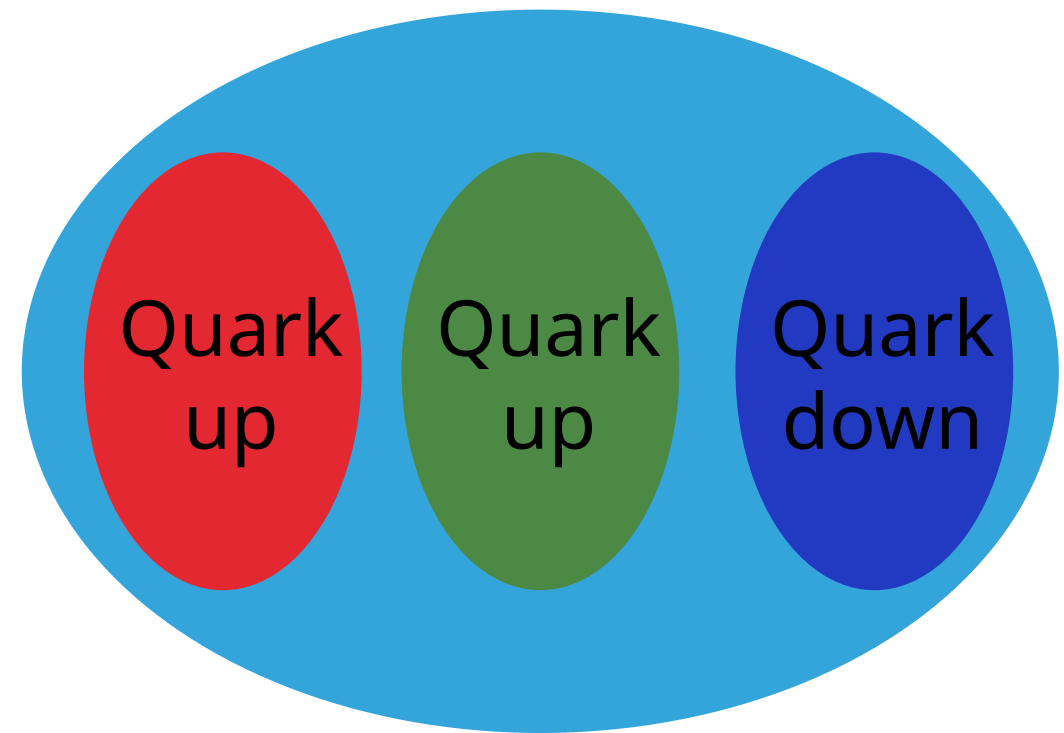


# COLLISION DE PROTONS À TRÈS HAUTE ÉNERGIE

## Proton

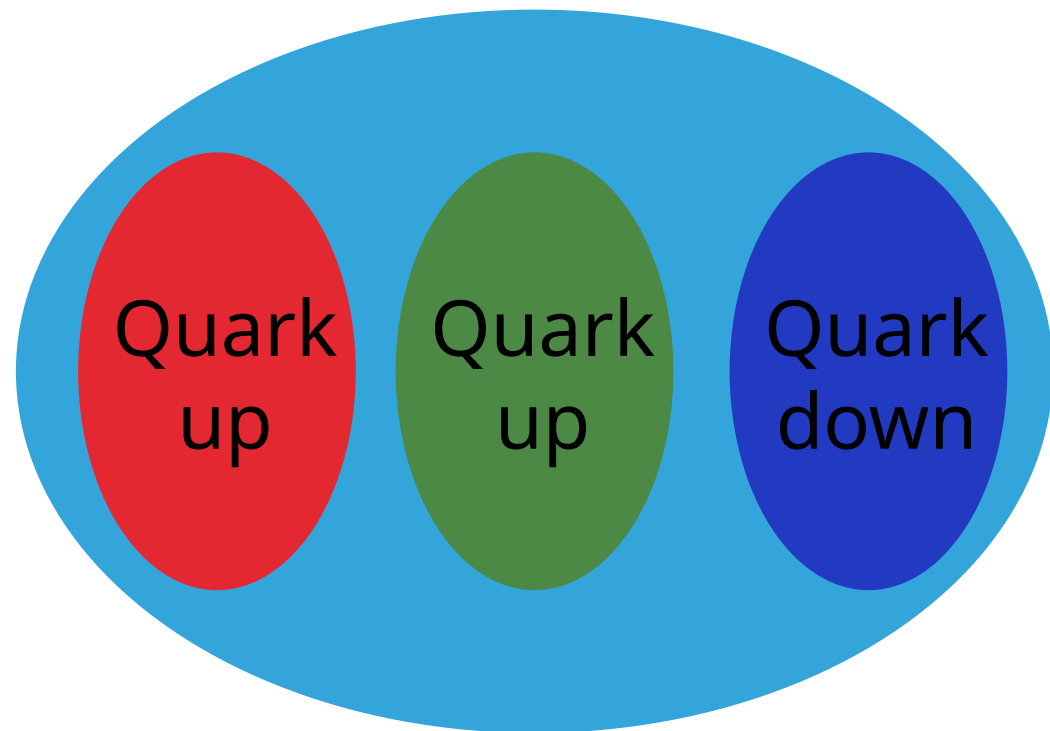


## Proton

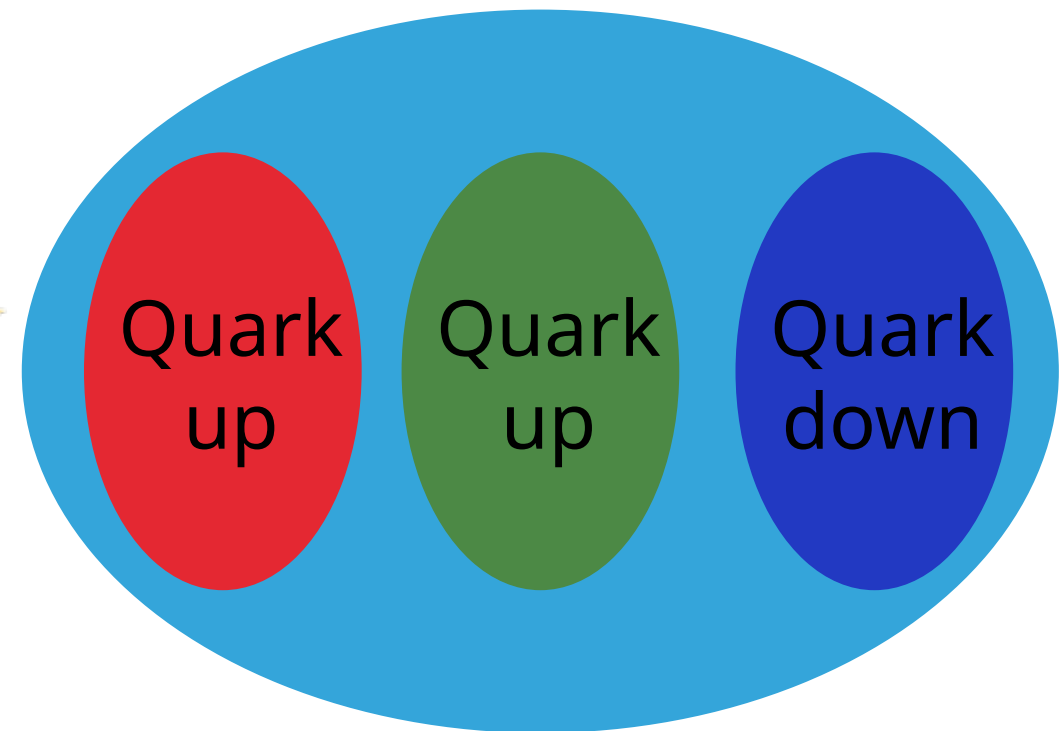


# COLLISION DE PROTONS À TRÈS HAUTE ÉNERGIE

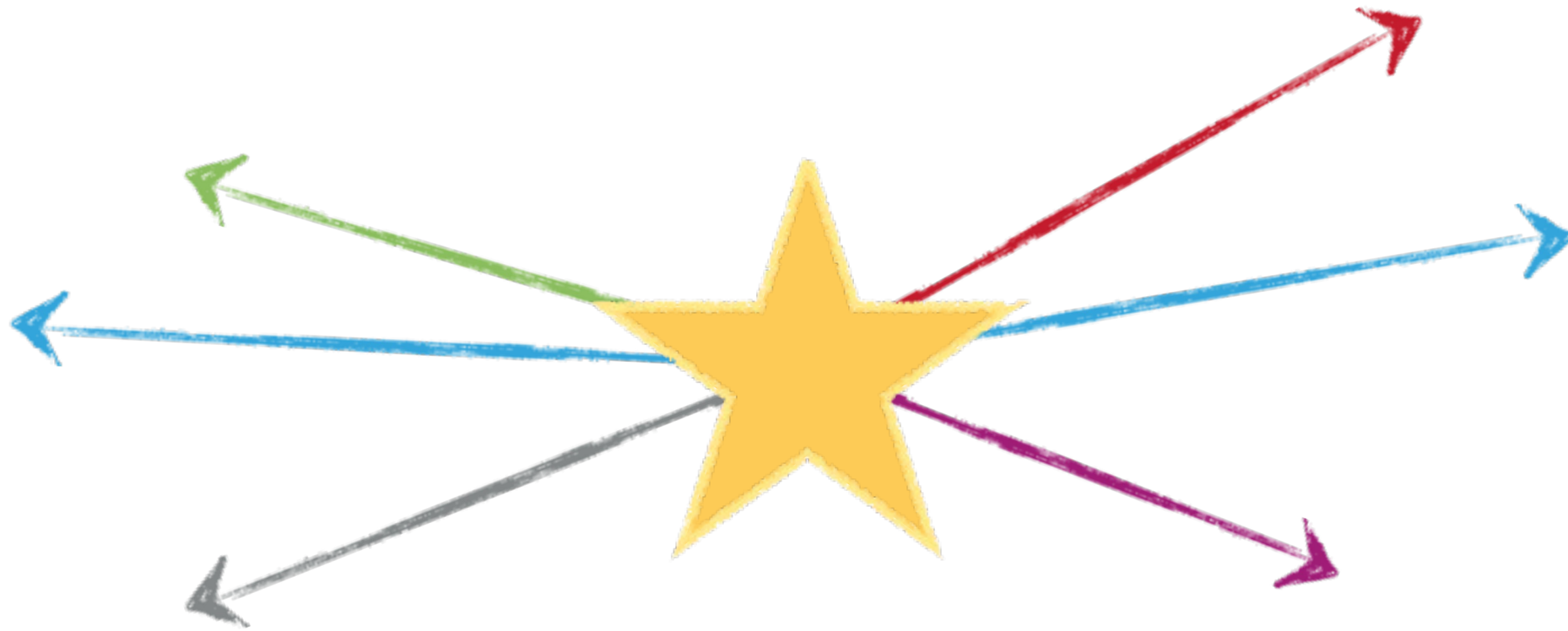
## Proton



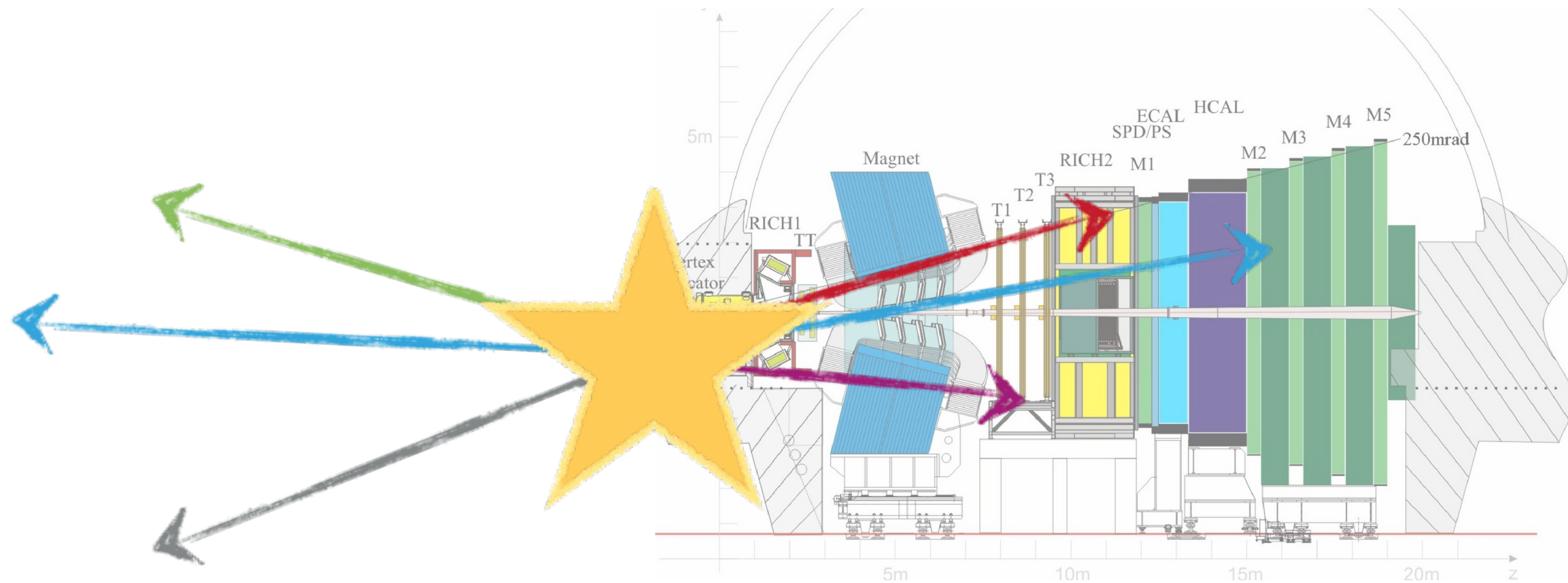
## Proton



DE NOMBREUX PRODUITS DE DÉSINTÉGRATION



# LES DÉTECTEURS SONT PLACÉS PRÈS DES POINTS DE COLLISION





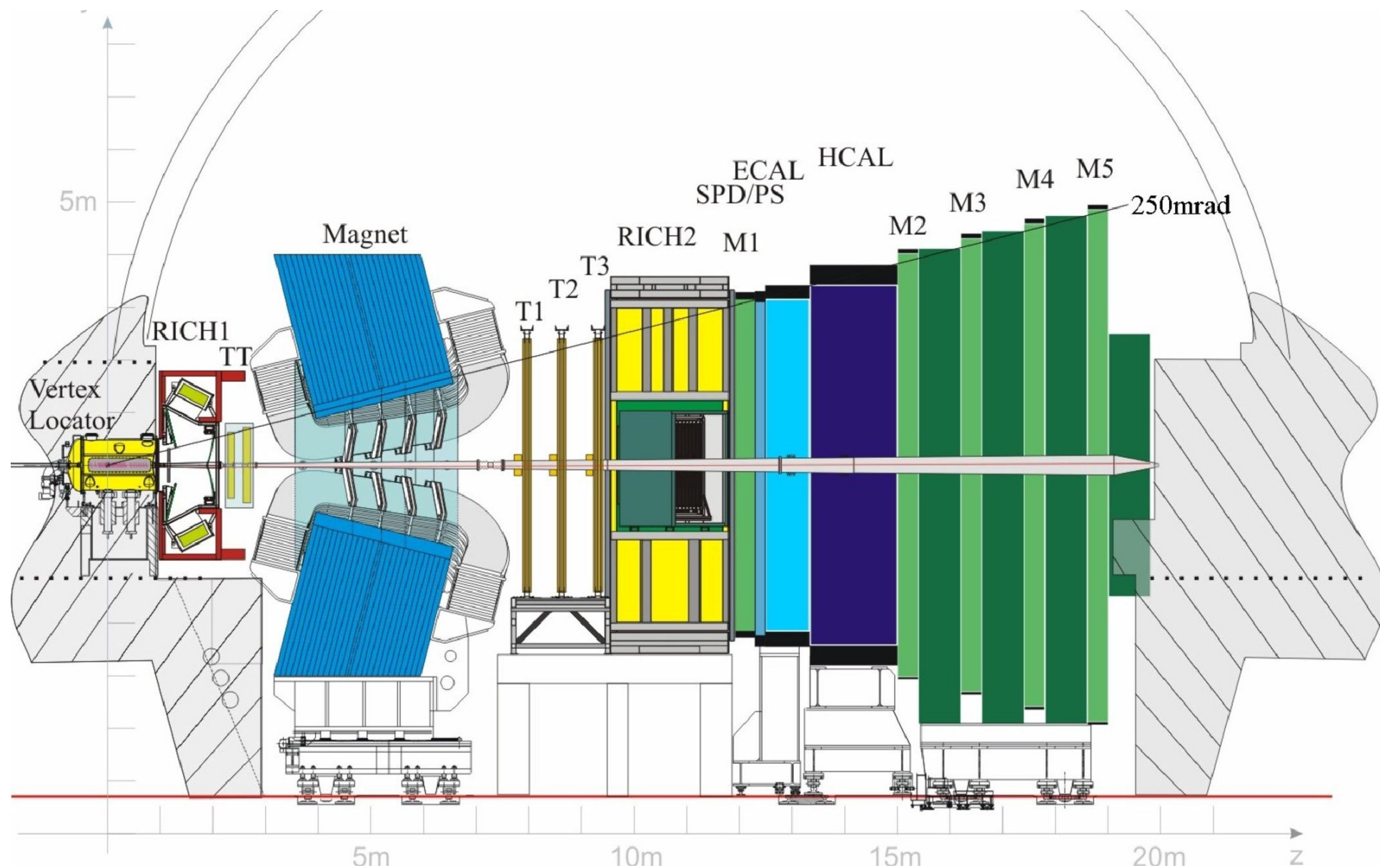
An orange speech bubble with a white question inside.

COMMENT  
DÉTECTE-T-ON LES  
PARTICULES ?

# LE DÉTECTEUR LHCb : MESURER LES PROPRIÉTÉS DES PARTICULES

LHCb peut :

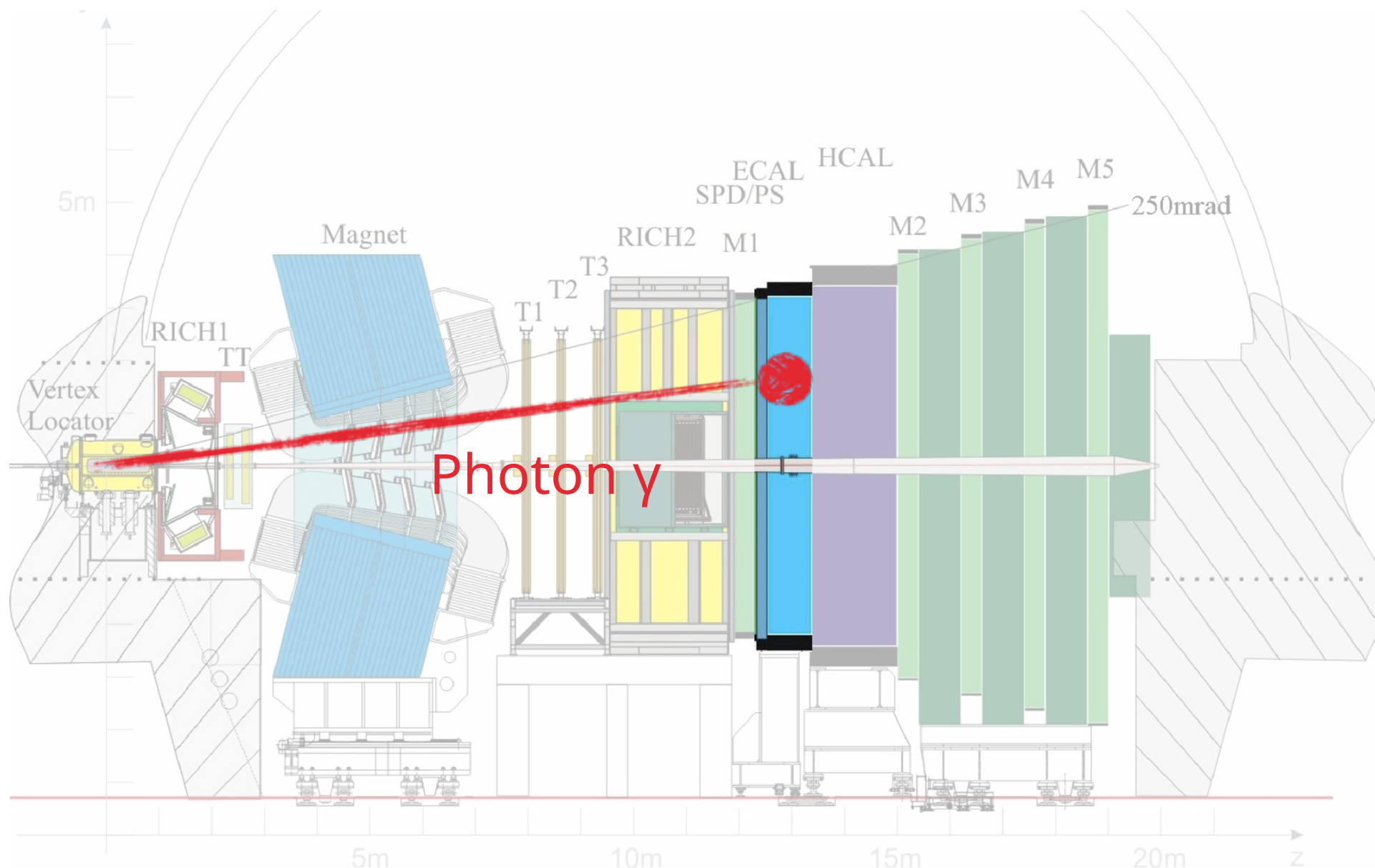
- mesurer l'énergie des photons, des électrons et des hadrons
- détecter les trajectoires des particules chargées
- identifier certaines particules



# LE DÉTECTEUR LHCb : MESURER LES PROPRIÉTÉS DES PARTICULES

LHCb peut :

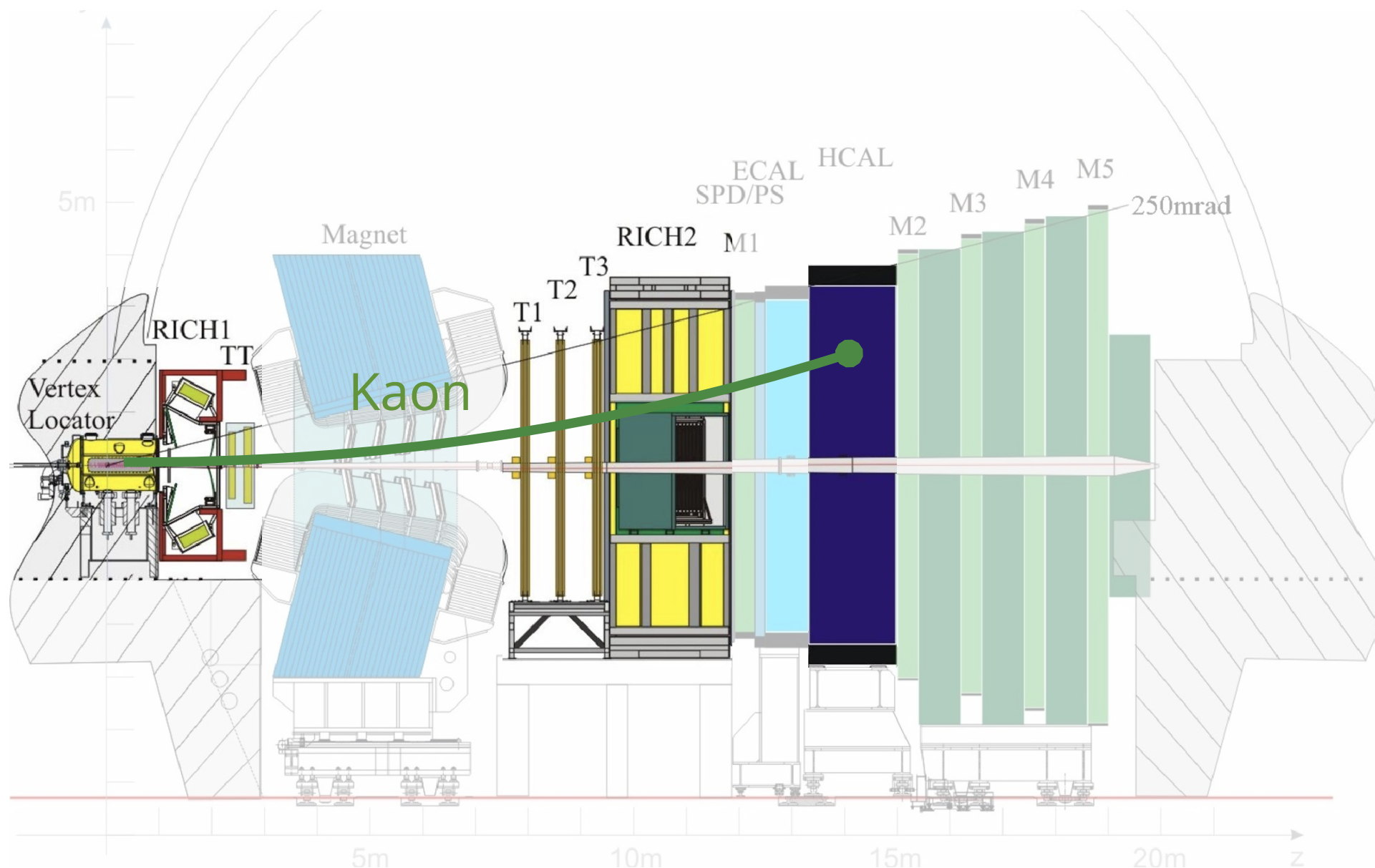
- mesurer l'énergie des photons, des électrons et des hadrons
- détecter les trajectoires des particules chargées
- identifier certaines particules

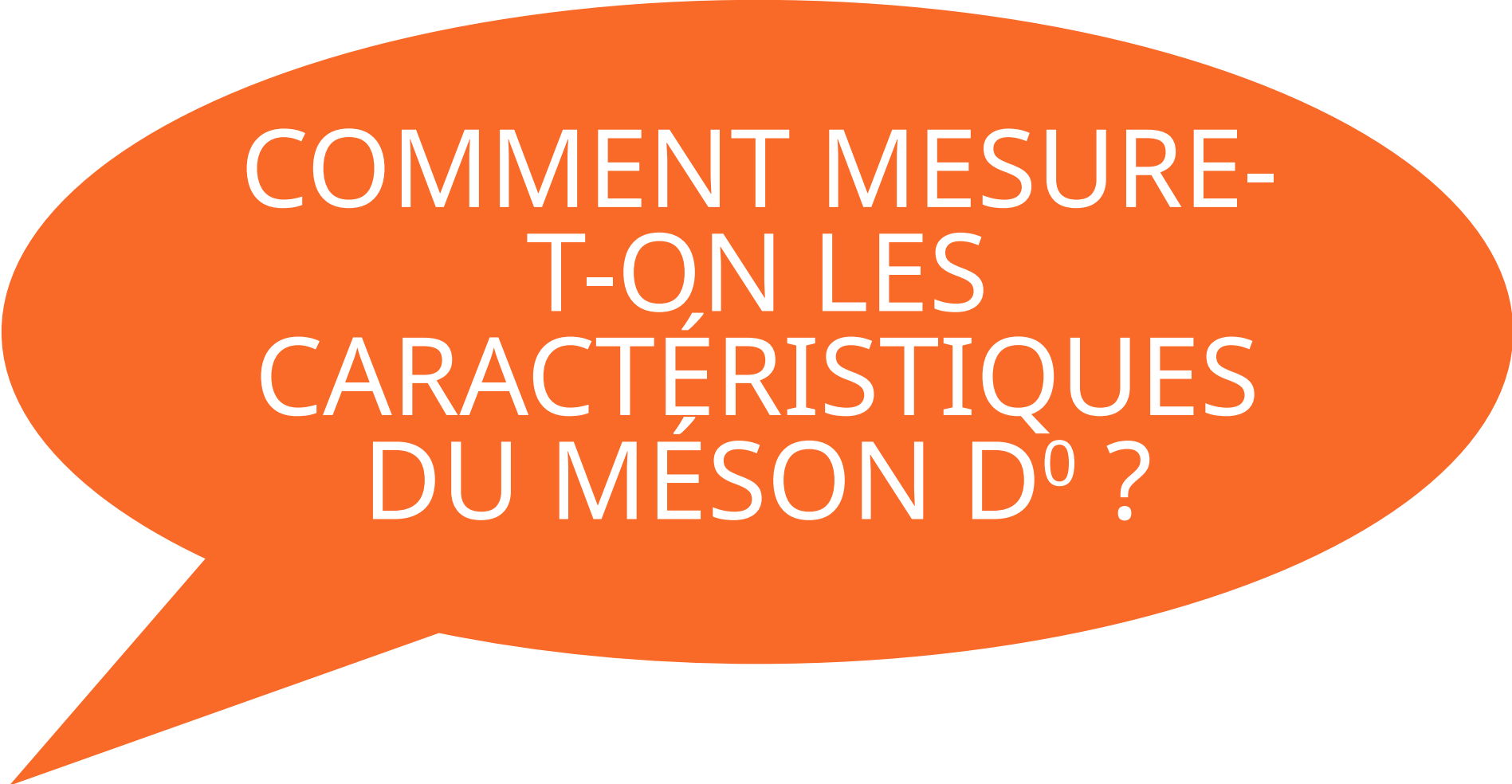


# LE DÉTECTEUR LHCb : MESURER LES PROPRIÉTÉS DES PARTICULES

LHCb peut :

- mesurer l'énergie des photons, des électrons et des hadrons
- détecter les trajectoires des particules chargées
- identifier certaines particules





COMMENT MESURE-  
T-ON LES  
CARACTÉRISTIQUES  
DU MÉSON  $D^0$  ?



## MESURER UNE MASSE AVEC LHCB

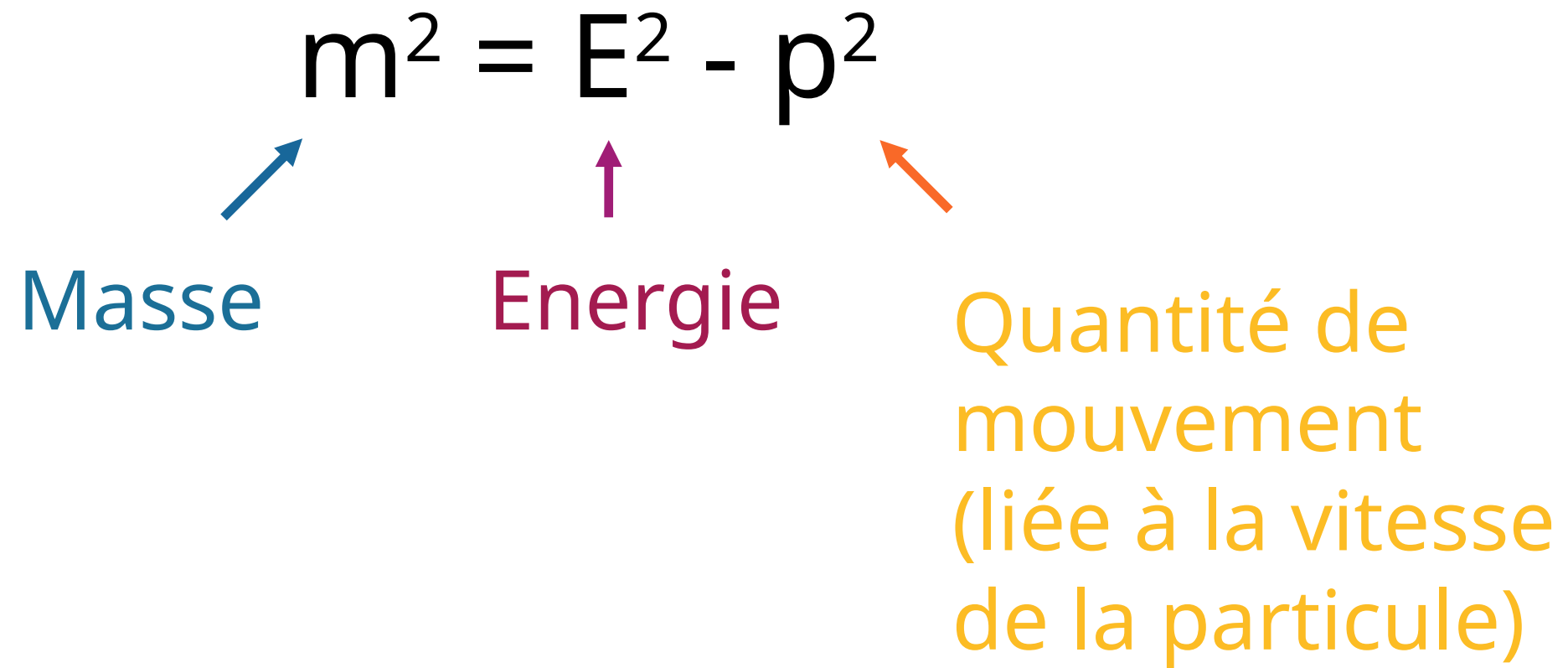
Einstein vient à la rescousse :

$$m^2 = E^2 - p^2$$

Masse

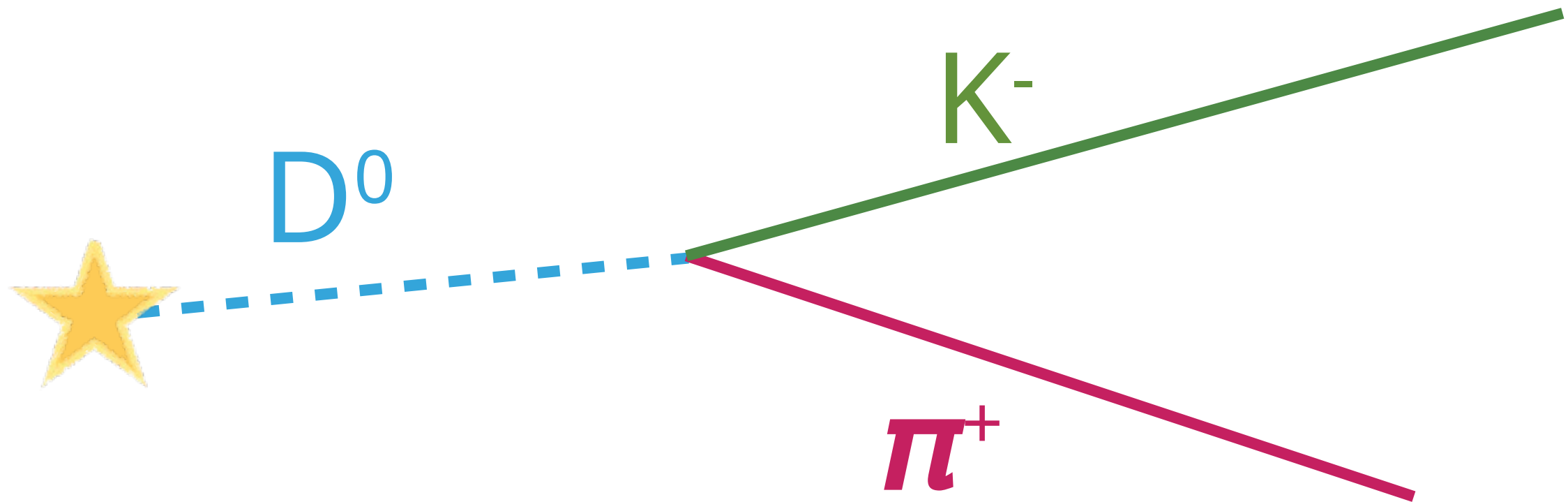
Energie

Quantité de mouvement  
(liée à la vitesse de la particule)

The diagram illustrates the relativistic energy-momentum equation. The equation  $m^2 = E^2 - p^2$  is centered at the top. Below it, three labels are positioned: 'Masse' in blue on the left, 'Energie' in purple in the center, and 'Quantité de mouvement (liée à la vitesse de la particule)' in orange on the right. Three arrows point from these labels to the equation: a blue arrow from 'Masse' to  $m^2$ , a purple arrow from 'Energie' to  $E^2$ , and an orange arrow from 'Quantité de mouvement' to  $p^2$ .

$$m^2 = E^2 - p^2$$

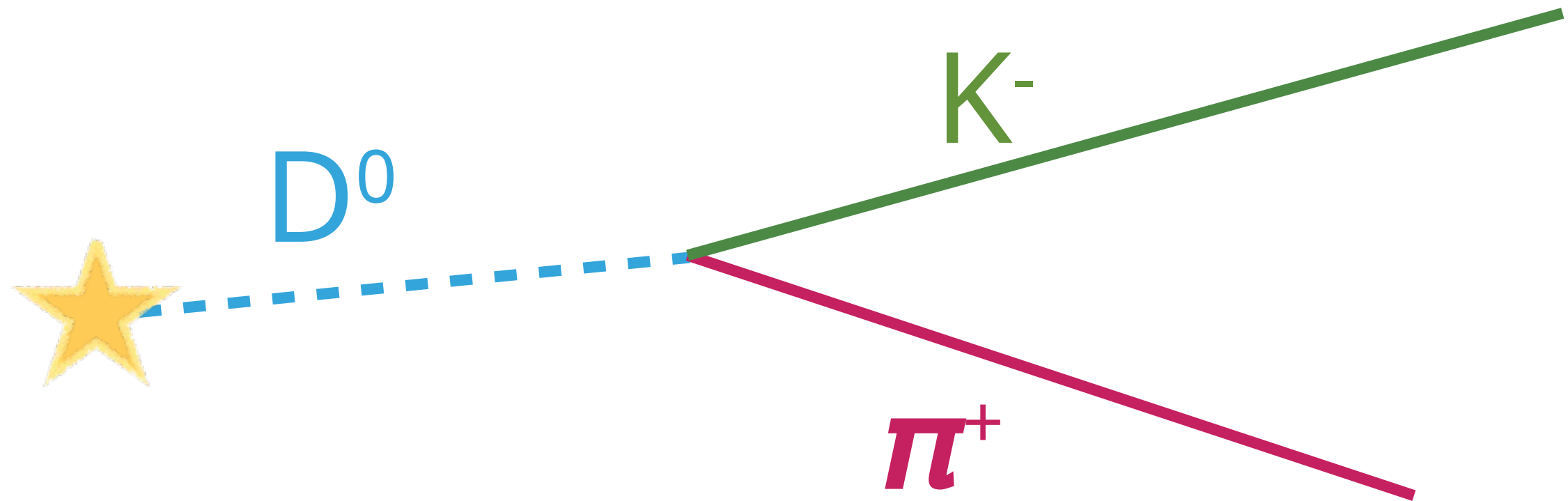
Pour connaître  $E$  et  $p$ , on utilise le fait que ces deux quantités sont conservées quand le  $D^0$  se désintègre.



Ainsi, pour mesurer la masse du  $D^0$ , il suffit de mesurer les énergies et quantités de mouvement des particules  $K^-$  et  $\pi^+$

## MESURER UN TEMPS AVEC LHCB

On utilise la distance parcourue par le  $D^0$  et sa quantité de mouvement

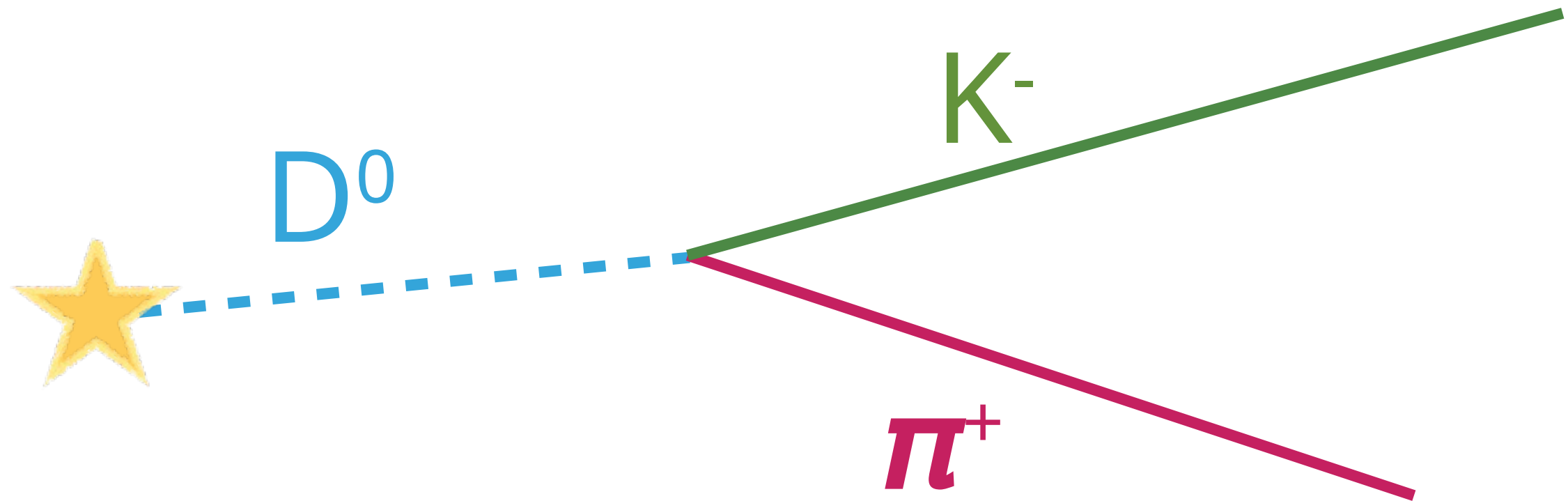


Exemple :

Pour une particule qui vit pendant  $10^{-12}$  s  
et qui va à la vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8$  m/s),  
alors avec les lois de Newton, elle parcourt 0.3 mm !

## MESURER UN TEMPS AVEC LHCB

On utilise la distance parcourue par le  $D^0$  et sa quantité de mouvement



Exemple :

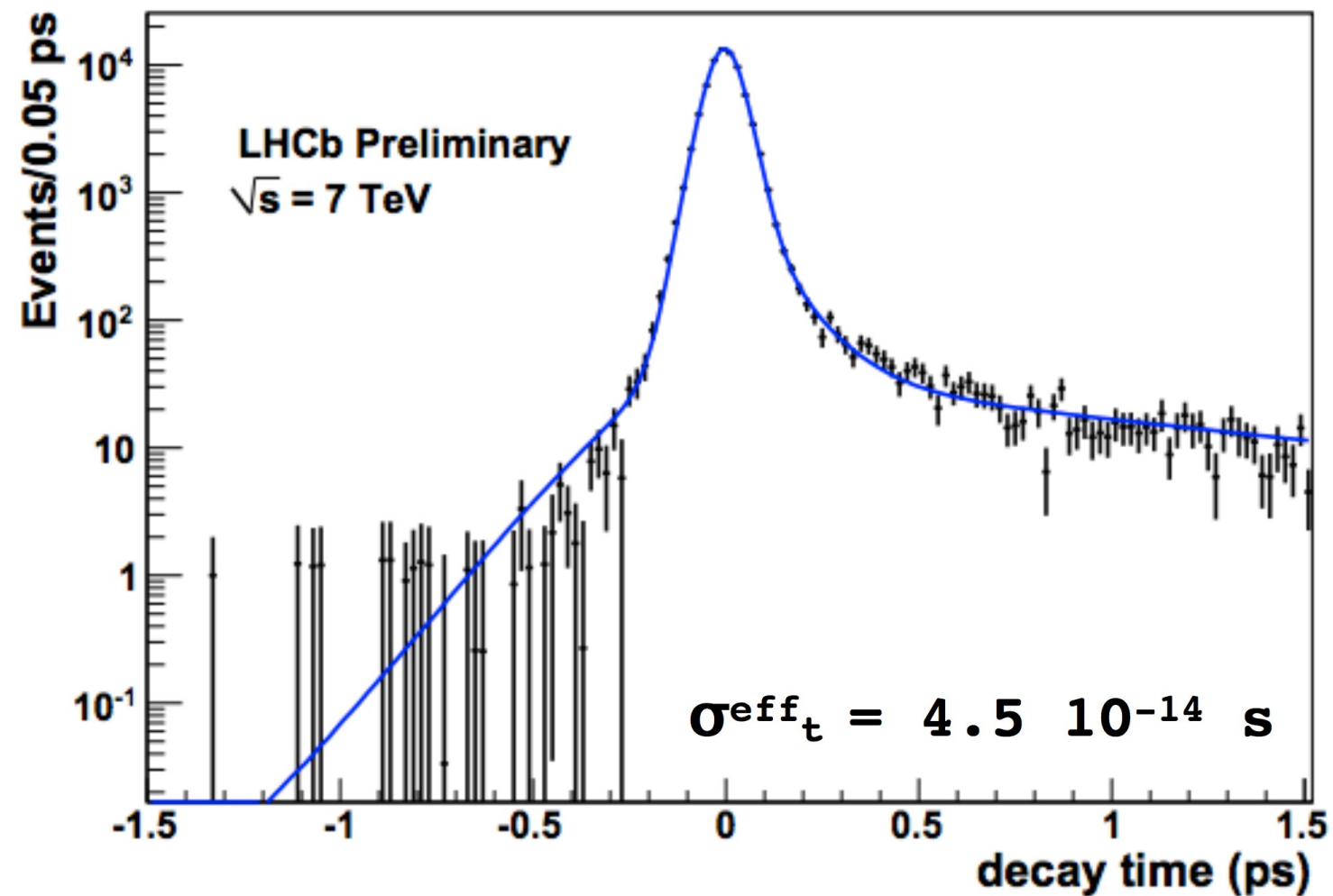
Avec les lois de Newton : 0.3 mm !

Mais il faut prendre en compte **la relativité** :

En réalité une telle particule parcourrait **~1cm** !

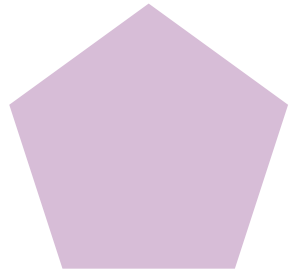
## MESURER UN TEMPS AVEC LHCb

Avec LHCb, on peut aller jusqu'à  $10^{-14}$  s !

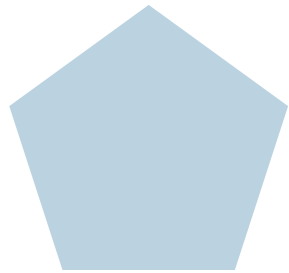




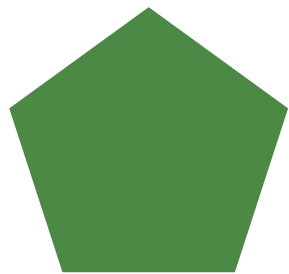
# DE QUOI ALLONS-NOUS PARLER ?



Introduction : Le méson  $D^0$  et pourquoi il est intéressant



Mesurer les propriétés des particules avec LHCb



Votre mission !



## L'OBJECTIF

**Mesurer le temps de vie  
du méson  $D^0$  avec LHCb**

QUE CONNAÎT-ON DÉJÀ À PROPOS DU MÉSON  $D^0$  ?

La mesure du temps de vie a été faite dans de multiples expériences

D'après le livret du Particle Data Group :

### $D^0$ MEAN LIFE

Measurements with an error  $> 10 \times 10^{-15}$  s have been omitted from the average.

VALUE ( $10^{-15}$  s)

**410.1  $\pm$  1.5**

EVTS

**OUR AVERAGE**

DOCUMENT ID

TECN

**PDG**  
particle data  
group

PRÉCISI  
ON :  
0.35%

QUE CONNAÎT-ON DÉJÀ À PROPOS DU MÉSON D<sup>0</sup> ?

La mesure du temps de vie a été faite dans de multiples expériences

D'après le livret du Particle Data Group :

### D<sup>0</sup> MEAN LIFE

Measurements with an error  $> 10 \times 10^{-15}$  s have been omitted from the average.

| VALUE ( $10^{-15}$ s) | EVTS        | DOCUMENT ID | TECN |
|-----------------------|-------------|-------------|------|
| 410.1 $\pm$ 1.5       | OUR AVERAGE |             |      |

**PDG**  
particle data  
group

PRÉCISI  
ON :  
0.35%

COMMENT  
ATTEINDRE DE  
TELLES  
PRÉCISIONS ?

## PRÉCISION D'UNE MESURE

Il n'y a pas de règle absolue.

Dans le cas de N événements de signal sans bruit de fond :

$$\text{Précision} \sim 100/\sqrt{N} \%$$

Nombre d'événements et précision atteignable :

100 événements : 10.0% de précision

1 000 000 événements : 0.10% de précision



## PRÉCISION D'UNE MESURE

Il n'y a pas de règle absolue.

Dans le cas de  $N$  événements de signal sans bruit de fond :

$$\text{Précision} \sim 100/\sqrt{N} \%$$

Nombre d'événements et précision atteignable :

100 événements : 10.0% de précision

1 000 000 événements : 0.10% de précision

100 000 000 événements : 0.01% de précision ← LHCb

# Mesurer le temps de vie du méson $D^0$ avec LHCb

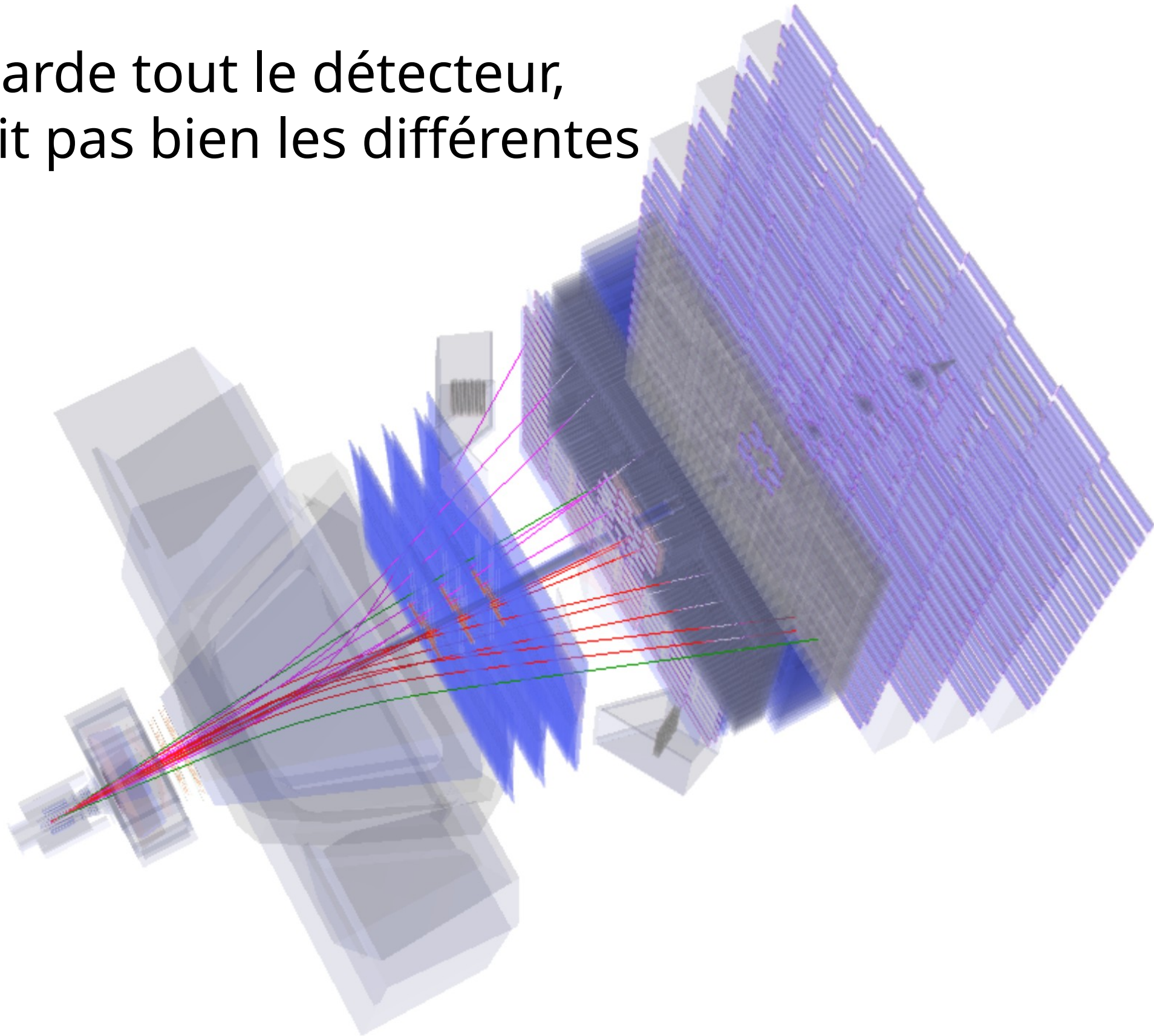
On travaillera avec un échantillon de données réduit

L'essentiel :

- Comprendre comment fonctionne la mesure
- Comprendre les limites de la mesure (erreurs systématiques)

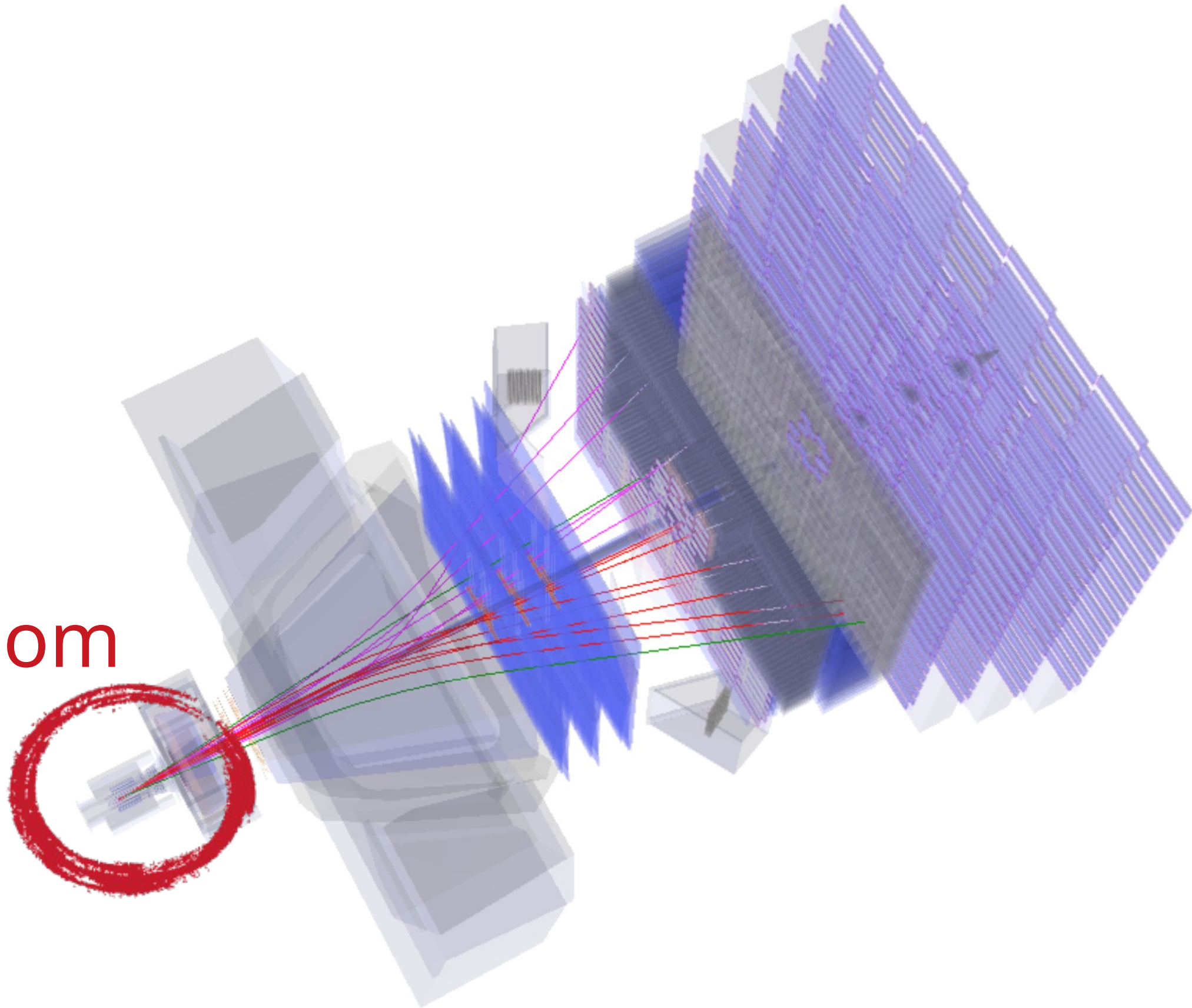
## 1) TROUVER DES $D^0$

Si on regarde tout le détecteur,  
on ne voit pas bien les différentes  
traces



1) TROUVER DES  $D^0$

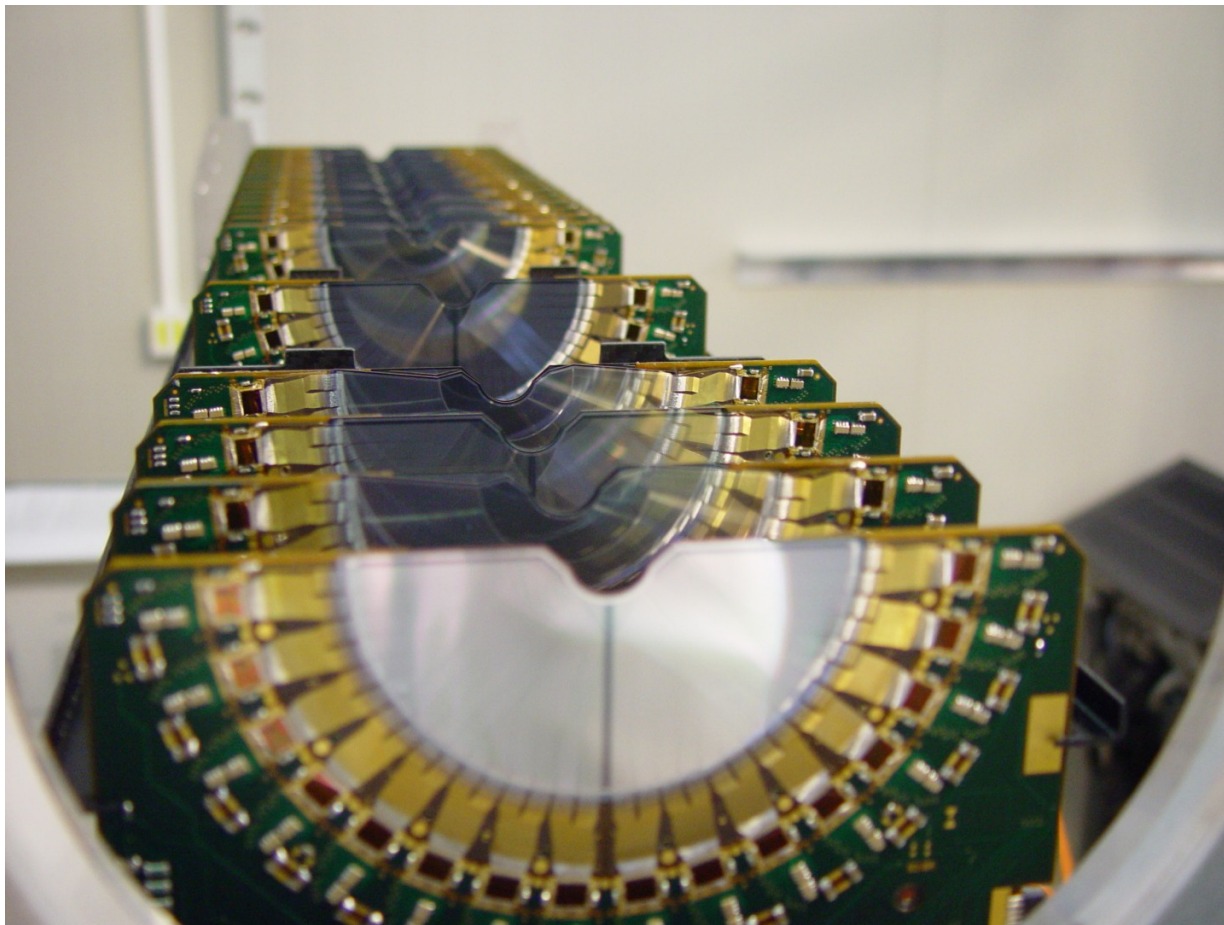
Zoom





## 1) TROUVER DES $D^0$

En zoomant, on s'intéresse aux informations d'un détecteur très important à LHCb! Le VErtext LOcator (appelé VELO, rien à voir avec une bicyclette).



Le but du VELO est de trouver les positions où une particule se désintègre pour former d'autres particules. On appelle ces positions des VERTEX.



# 1) TROUVER DES $D^0$

## L'interface de visualisation

**Eve Main Window**

**Event Control**

Start  
Combination 1

**View**  
   
☐ Hide Geometry ☒ Transparency

**Event manager**  
Event number: 7

**Particle Info**  
Name:   
Mass:  MeV/c<sup>2</sup>  
E:  MeV  
q:   
chi2:   
px:  MeV/c  
py:  MeV/c  
pz:  MeV/c

**My Particles**  
  
   
Mass:

**Histogram**

**Legend**  
K- —  
K+ —  
pi- —  
pi+ —  
D0 —

**Help**

Zoom gives you closer look at collision

Click on the track to find out about particle properties

Carefully choose particles you want to save, because out of them you get a new mass which might not be right!

Add and Draw your results on histogram. Don't forget to save histogram when you finish!

**View**  
    
☒ Hide Geometry ☐ Transparency

**Event manager**  
Event number: 3

**Particle Info**  
Name: pi+  
Mass: 139.57 MeV/c<sup>2</sup>  
E: 9498.92 MeV  
q: 1.00  
chi2: 0.59  
px: -125.11 MeV/c  
py: 649.90 MeV/c  
pz: 9458.96 MeV/c

**My Particles**  
My particle: K-  
My particle: pi+  
   
Mass: 1821.14

**Histogram**

Fullscreen shows the full view of LHCb detector and particle tracks

Transparent view gives you a better look at particle tracks and the LHCb detector

You can hide the geometry to see all the particle tracks.

1) TROUVER DES  $D^0$

Zoom sur un évènement simple

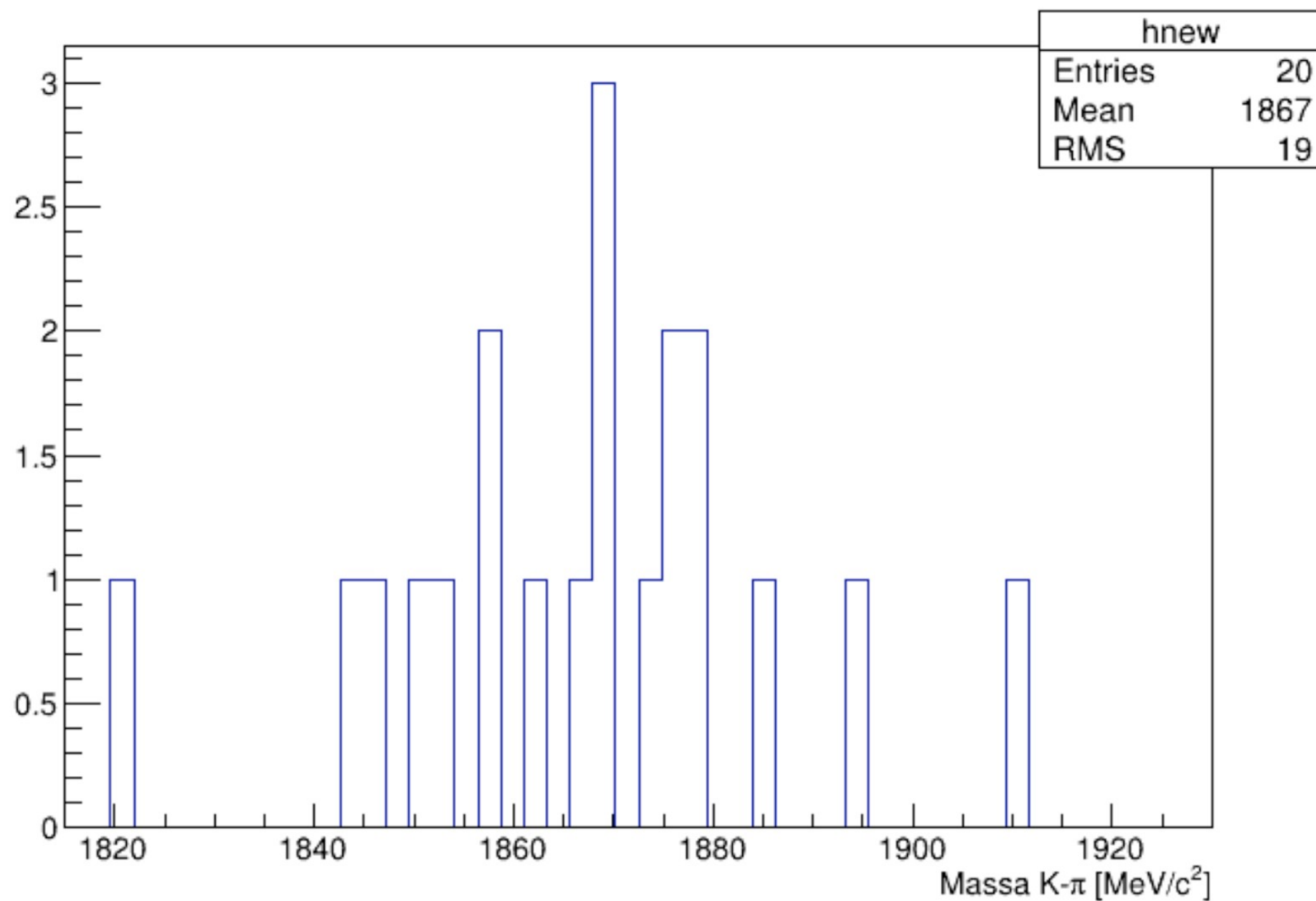


1) TROUVER DES  $D^0$

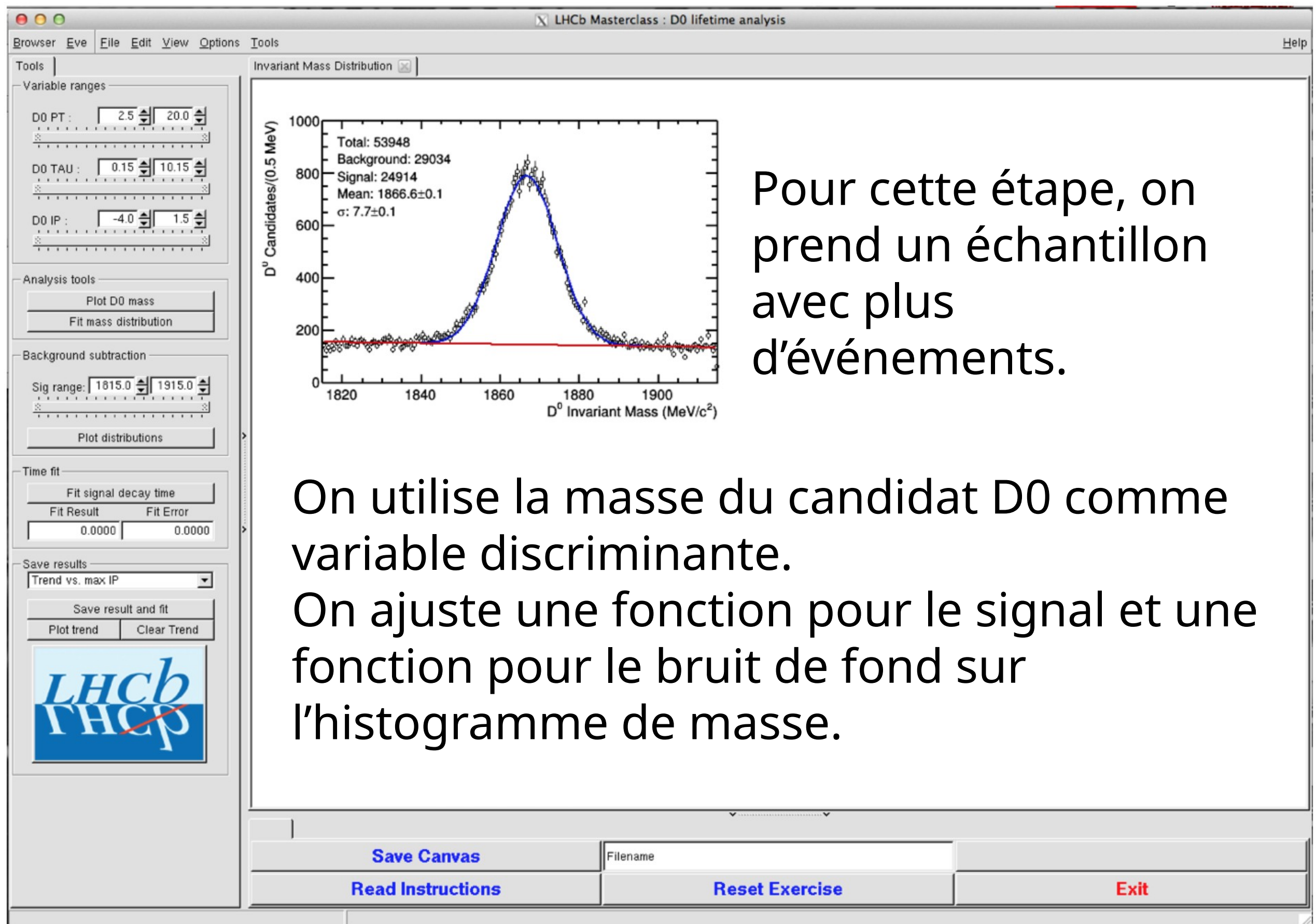
Zoom sur un évènement complexe



## 2) REMPLIR L'HISTOGRAMME DE MASSE



### 3) SÉPARER LE SIGNAL DU BRUIT DE FOND

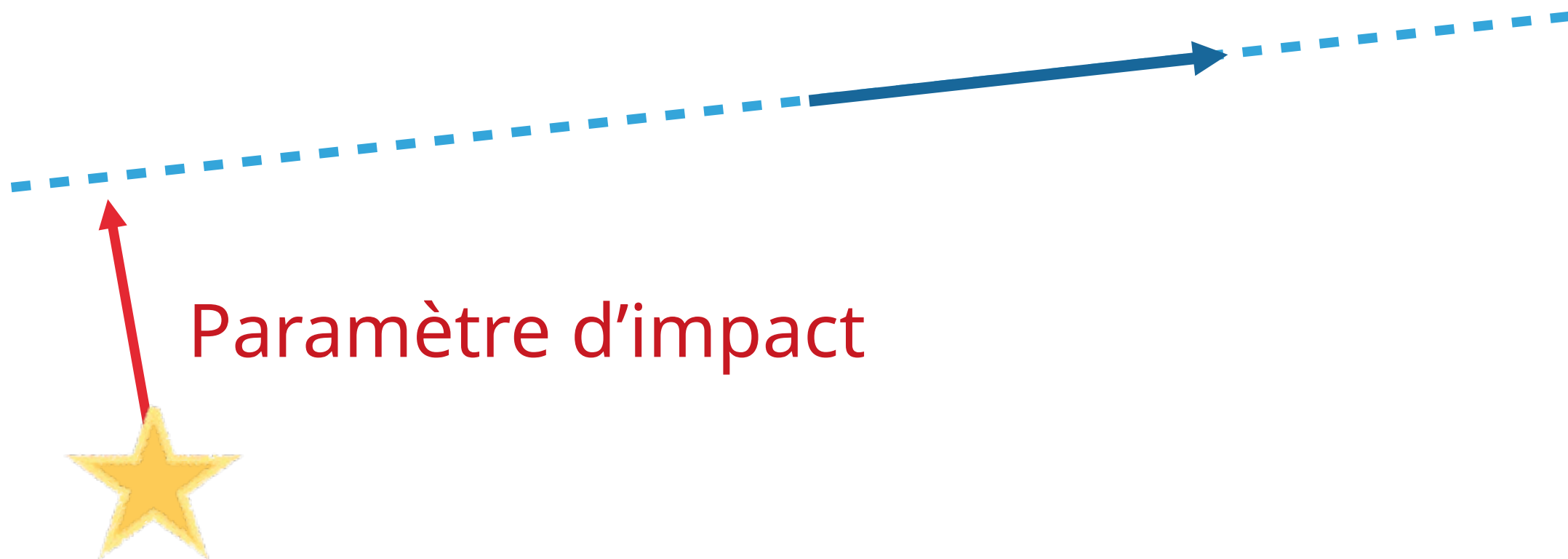




# EXEMPLE DE VARIABLES DISCRIMINANTES

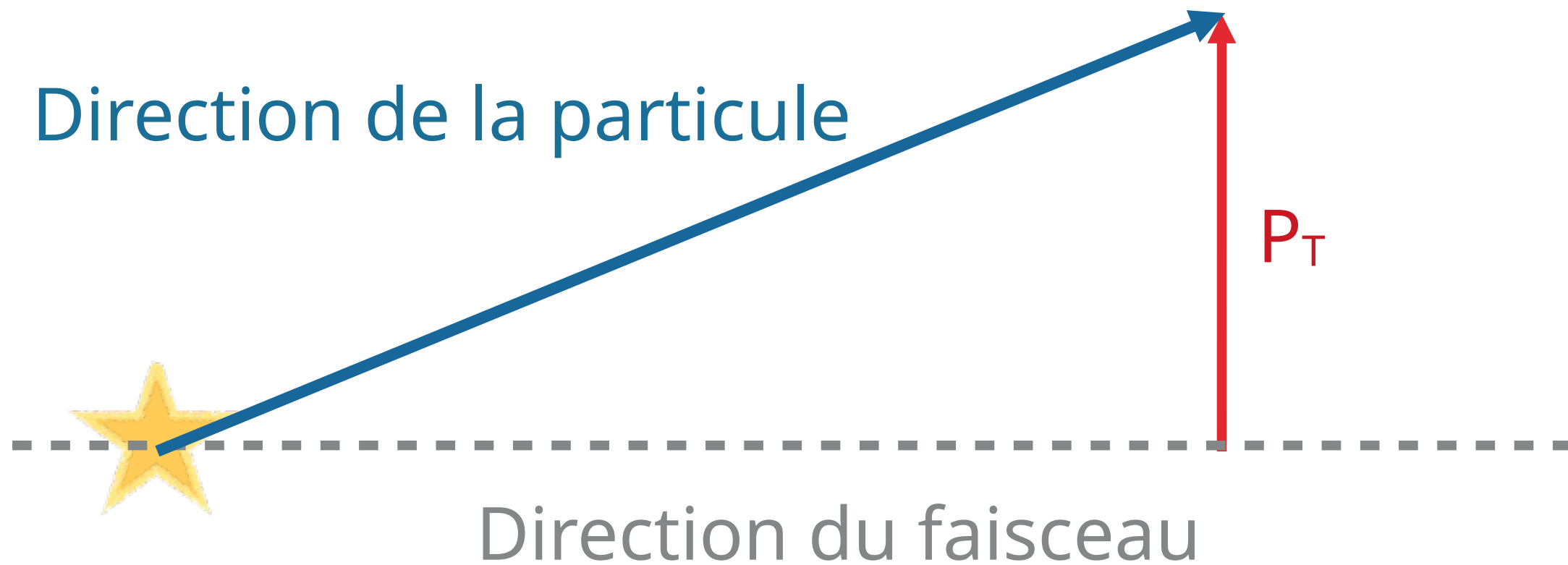
Paramètre d'impact

Direction de la particule

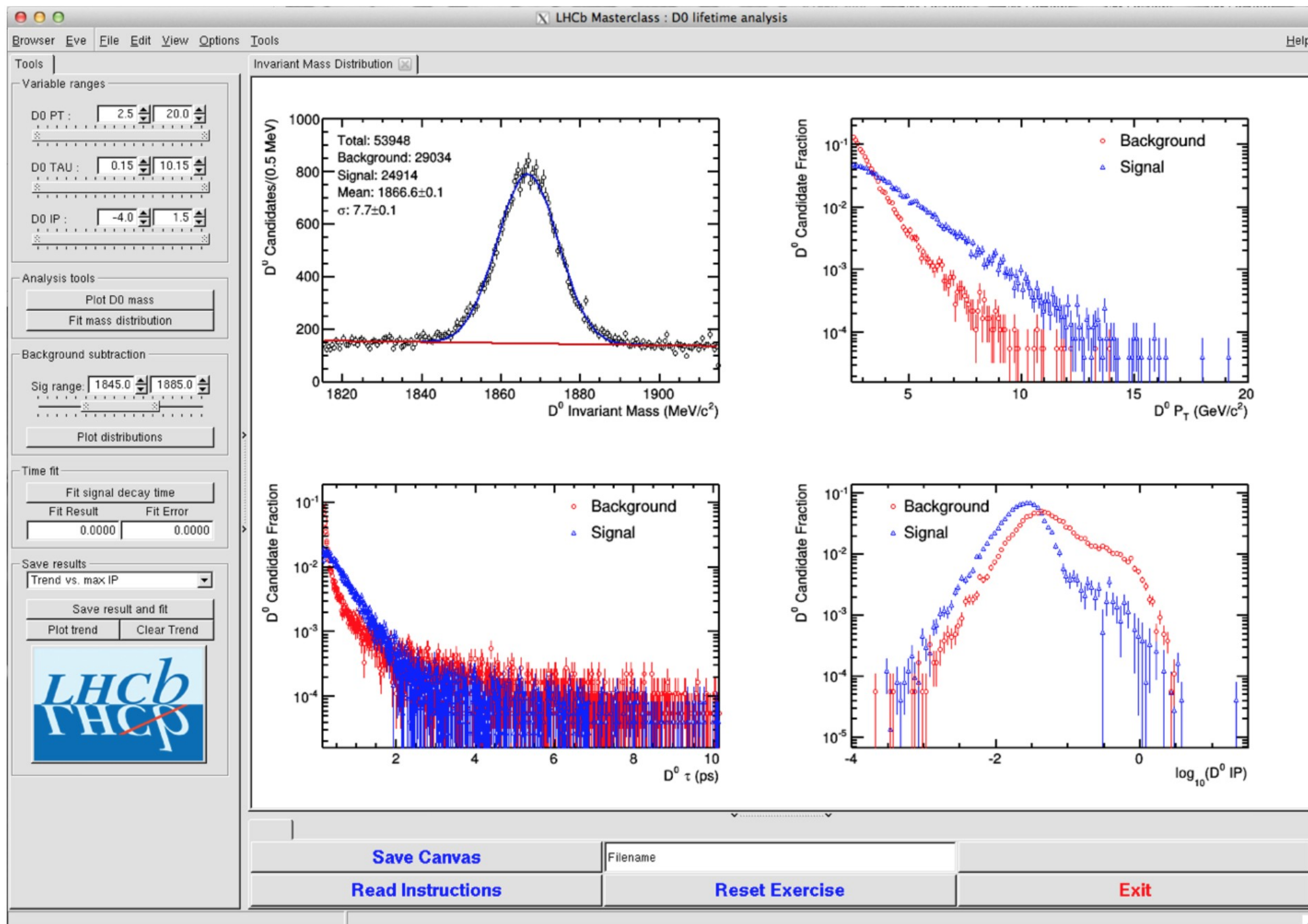


# EXEMPLE DE VARIABLES DISCRIMINANTES

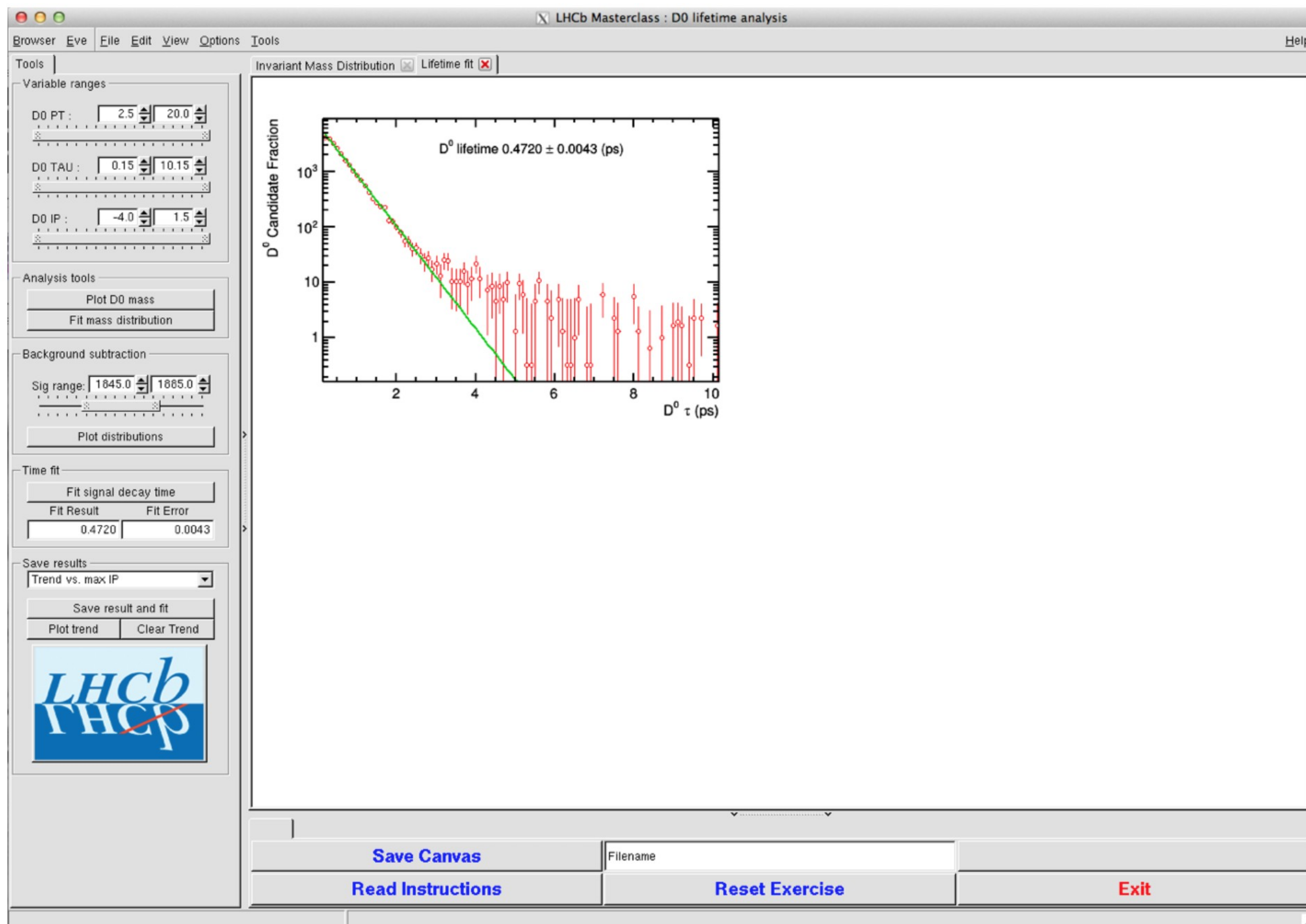
## Impulsion transverse



## 4) DESSINER LES HISTOGRAMMES POUR LE SIGNAL ET LE BRUIT DE FOND



## 5) TROUVER LE TEMPS DE VIE !

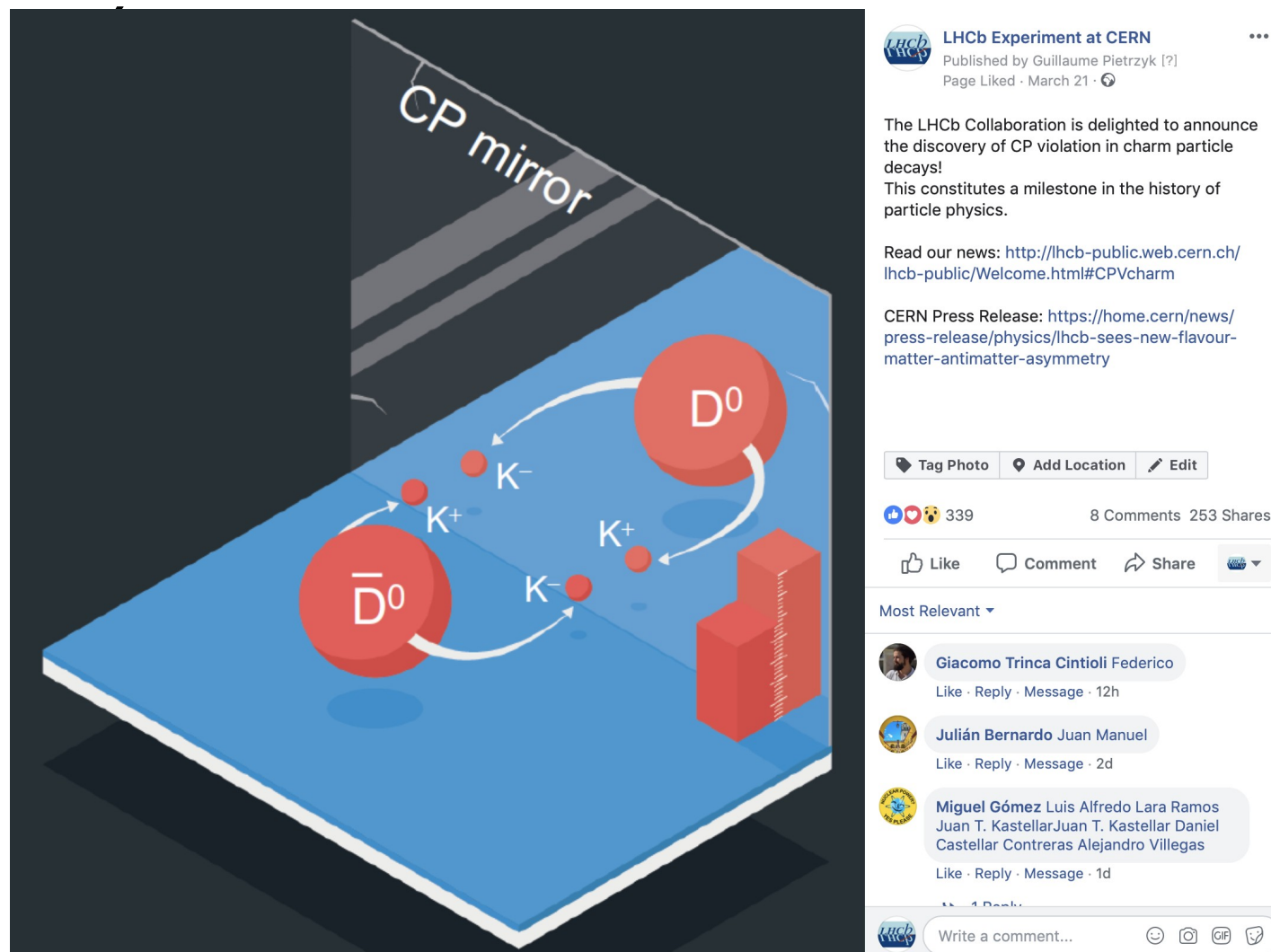




# LA PARTICULE QUI VA NOUS INTÉRESSER : LE MÉSON D<sup>0</sup>

Ce que vous allez faire est en rapport direct avec le programme de recherche de nombreux physiciens de la collaboration LHCb!

En effet, il y a 5 ans la collaboration LHCb a annoncé la découverte de la violation CP (asymétrie entre matière et antimatière) dans le secteur des particules charmées! Ces physiciens ont étudié une quantité phénoménale de





À VOUS DE  
JOUER !



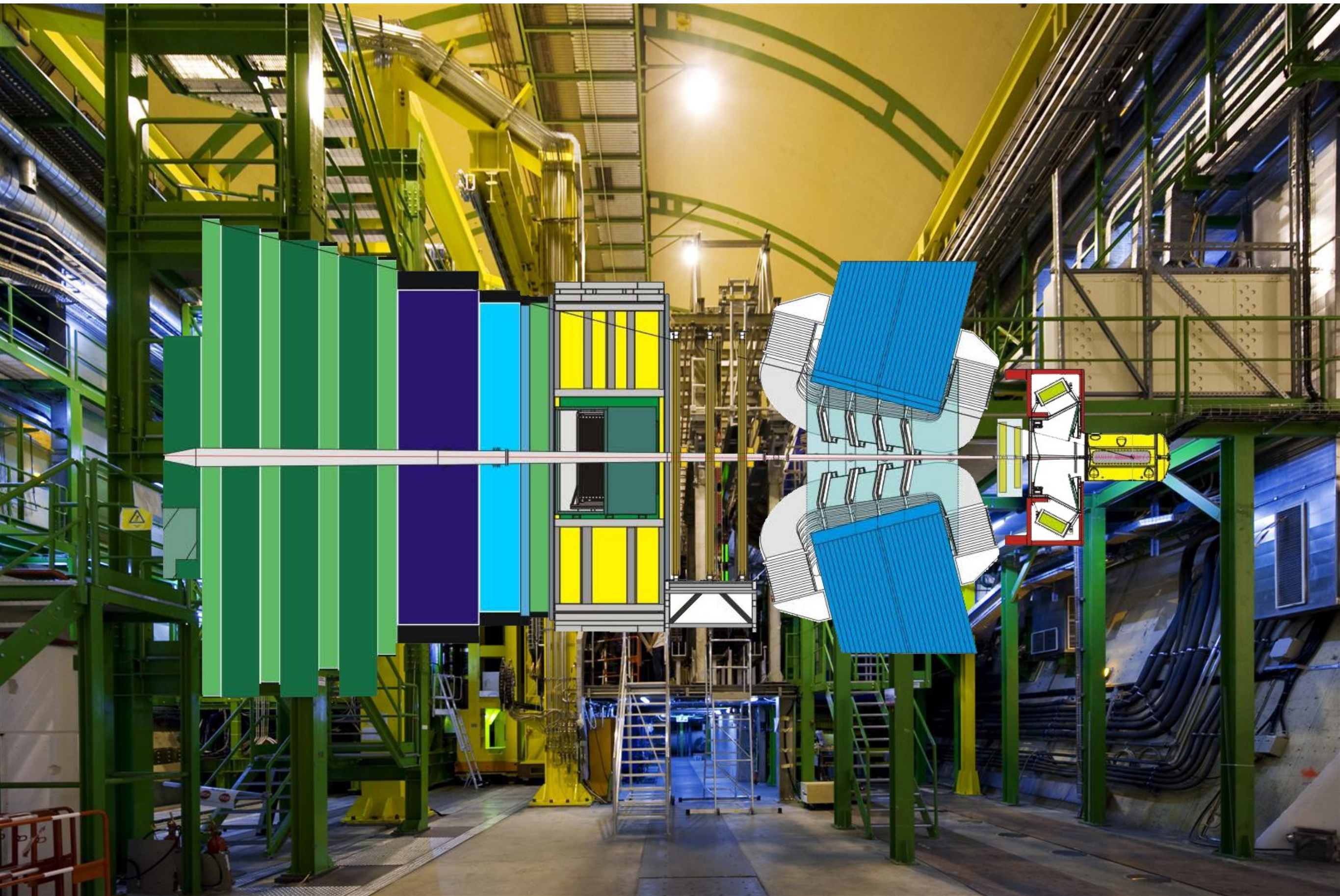


## DES EXEMPLES TIRÉS DE LA VIE RÉELLE - LHCB





## DES EXEMPLES TIRÉS DE LA VIE RÉELLE - LHCB

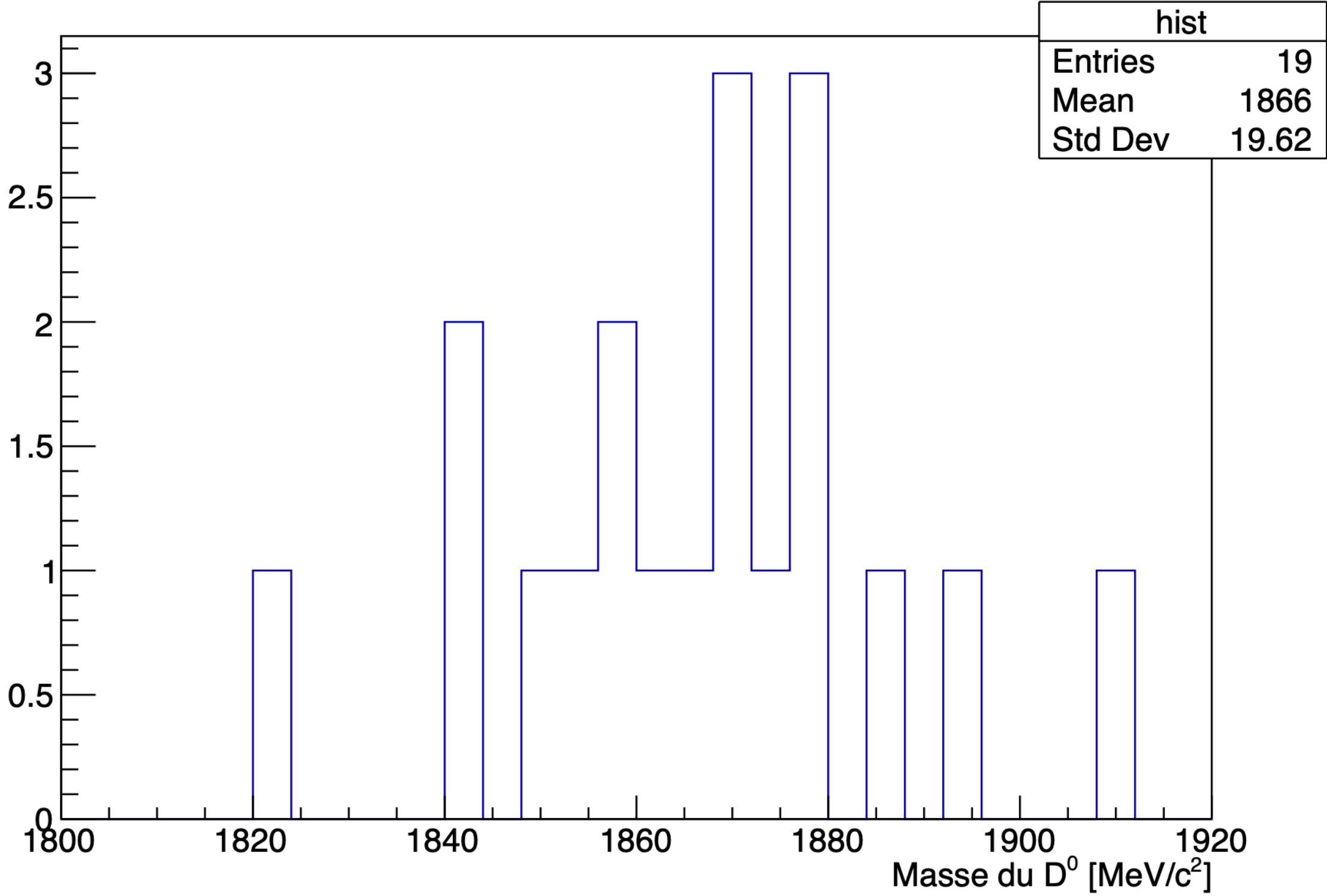




# INFORMATION

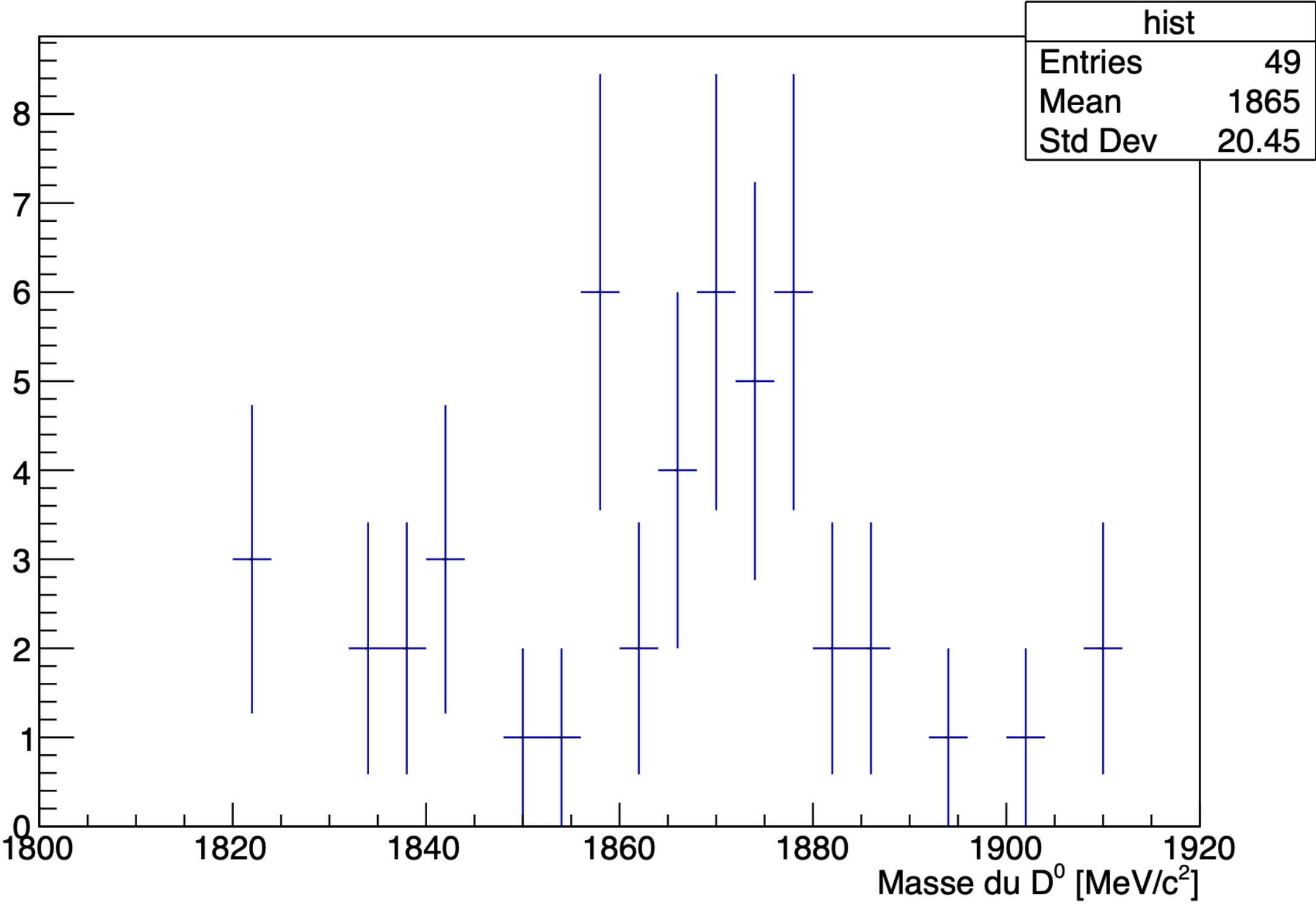
- ▶ Vous avez chacun un numero de poste (**Exemple:** 3)
- ▶ Cliquez sur “not-listed?”
- ▶ User: imc3
- ▶ Password: imc3\$
- ▶ Ouvrez le navigateur et allez sur le site: <https://lhcb-d0.web.cern.ch/>
- ▶ Indiquez un prénom, nom, votre classe (grade), et le numéro de la combinaison doit correspondre au numéro de votre poste
- ▶ Cliquez sur Save et puis sur “Event display”
- ▶ Collectez une dizaine de
- ▶ Une fois que c’est fait, revenez sur <https://lhcb-d0.web.cern.ch/> et sélectionnez “D0 lifetime”

# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS



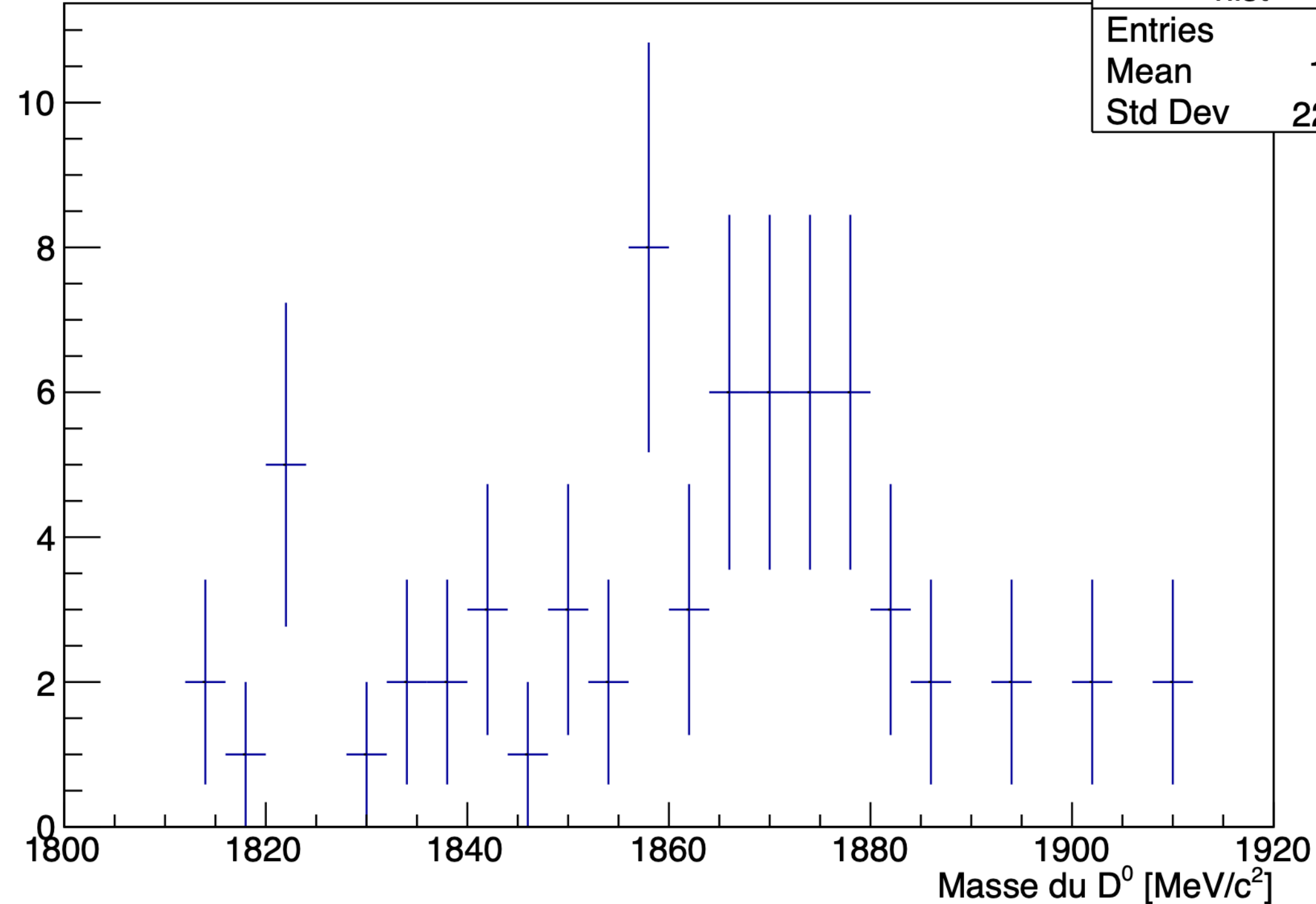


# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS



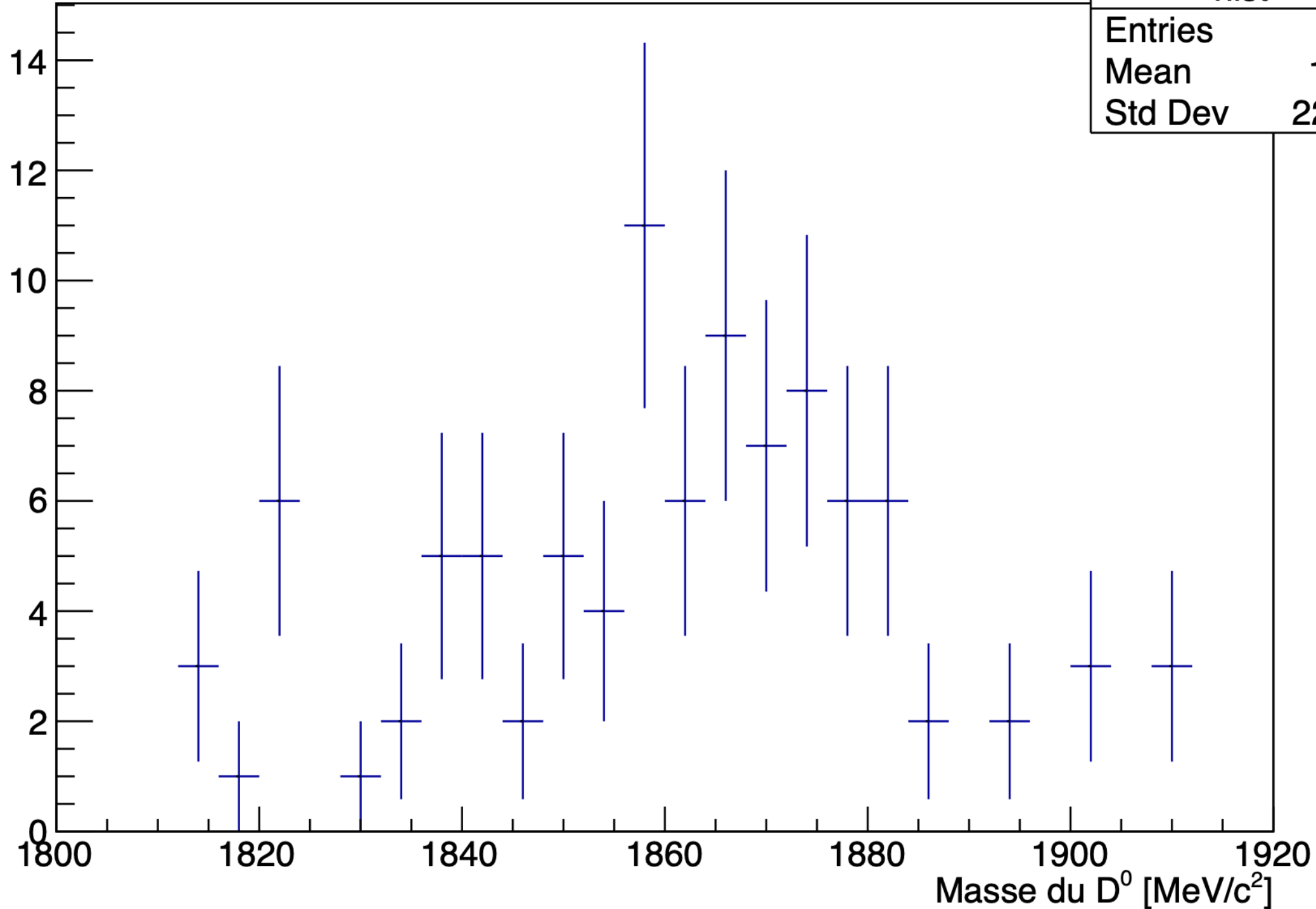
# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 68    |
| Mean    | 1861  |
| Std Dev | 22.77 |



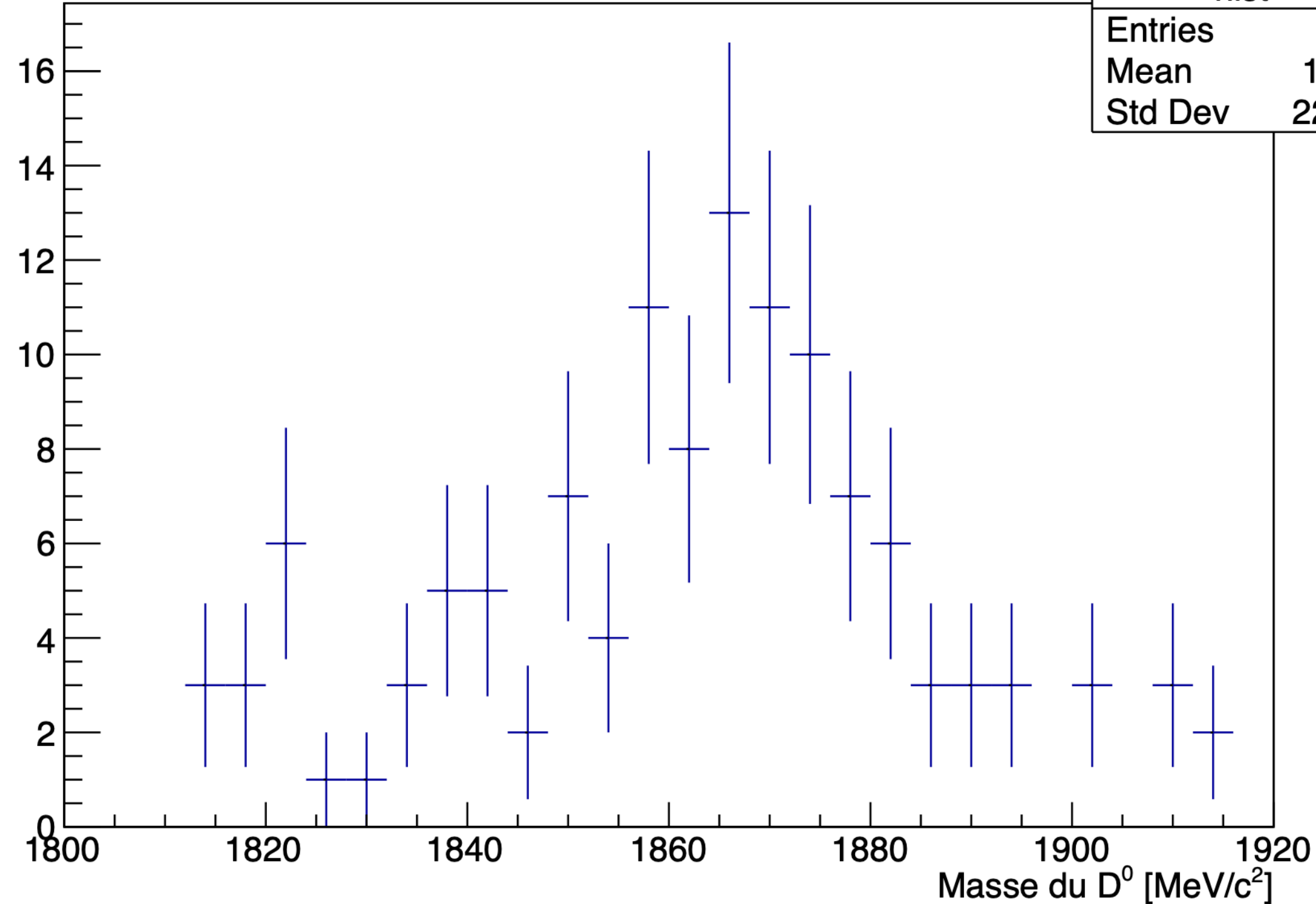
COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 97    |
| Mean    | 1861  |
| Std Dev | 22.15 |



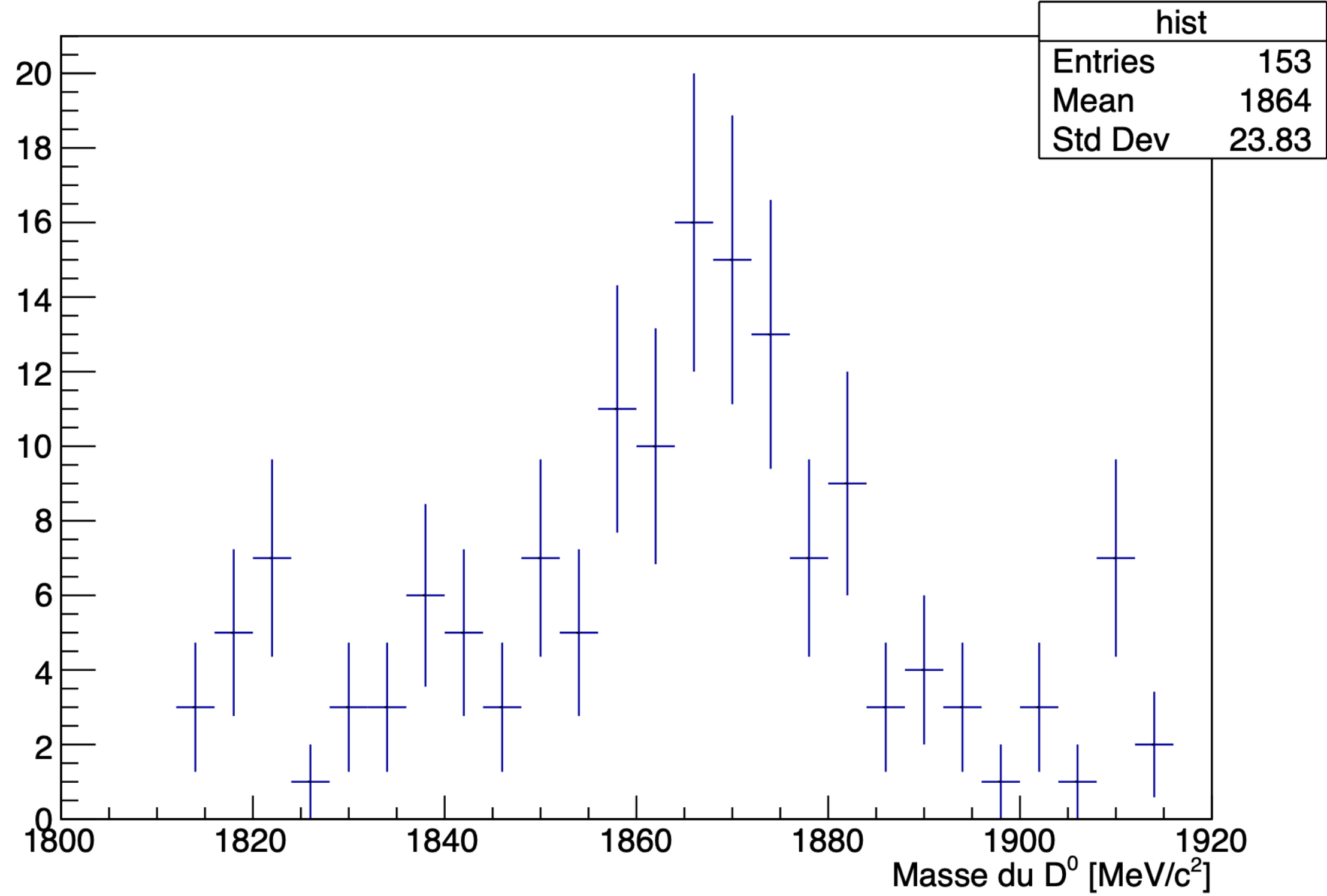
# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 123   |
| Mean    | 1862  |
| Std Dev | 22.86 |

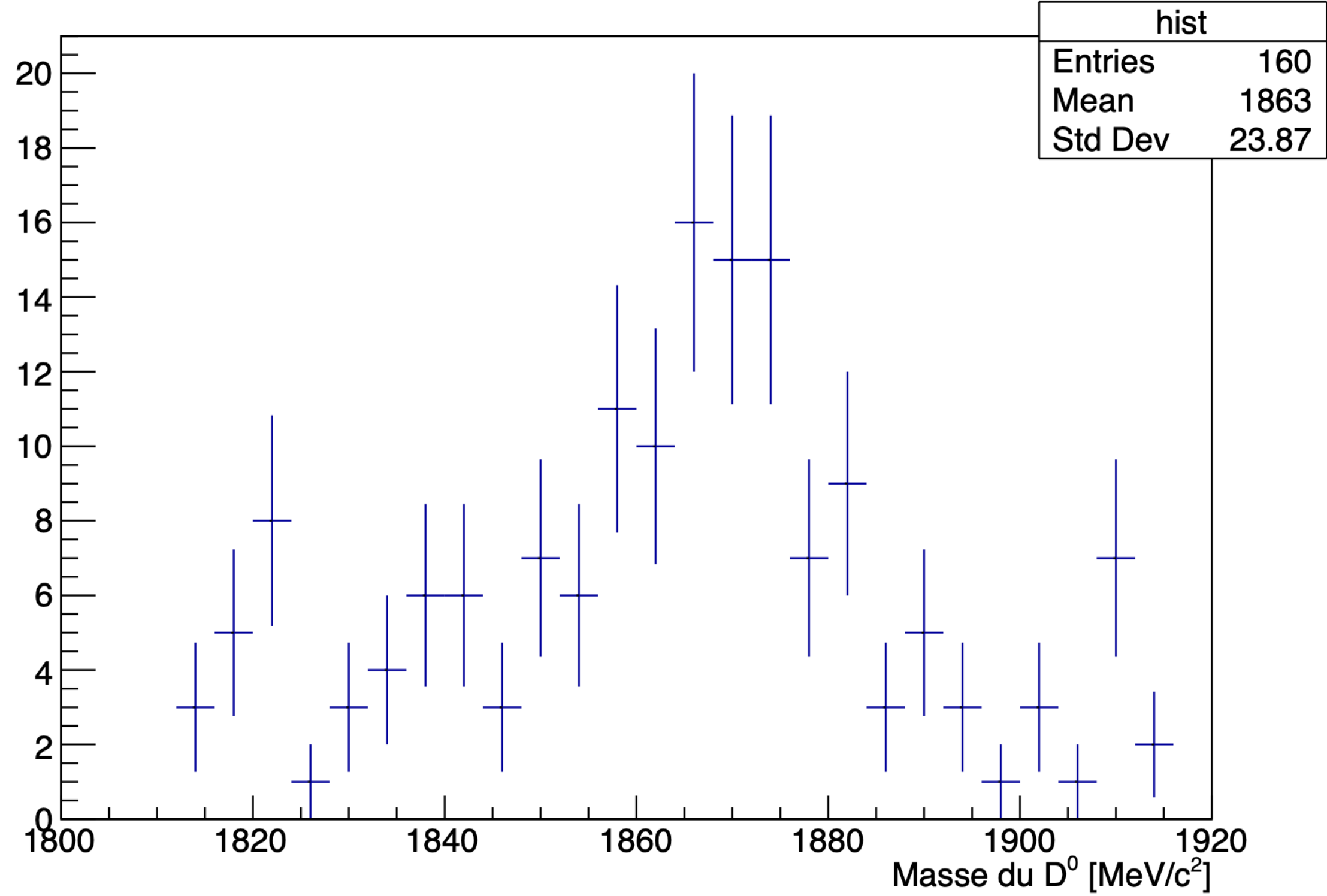




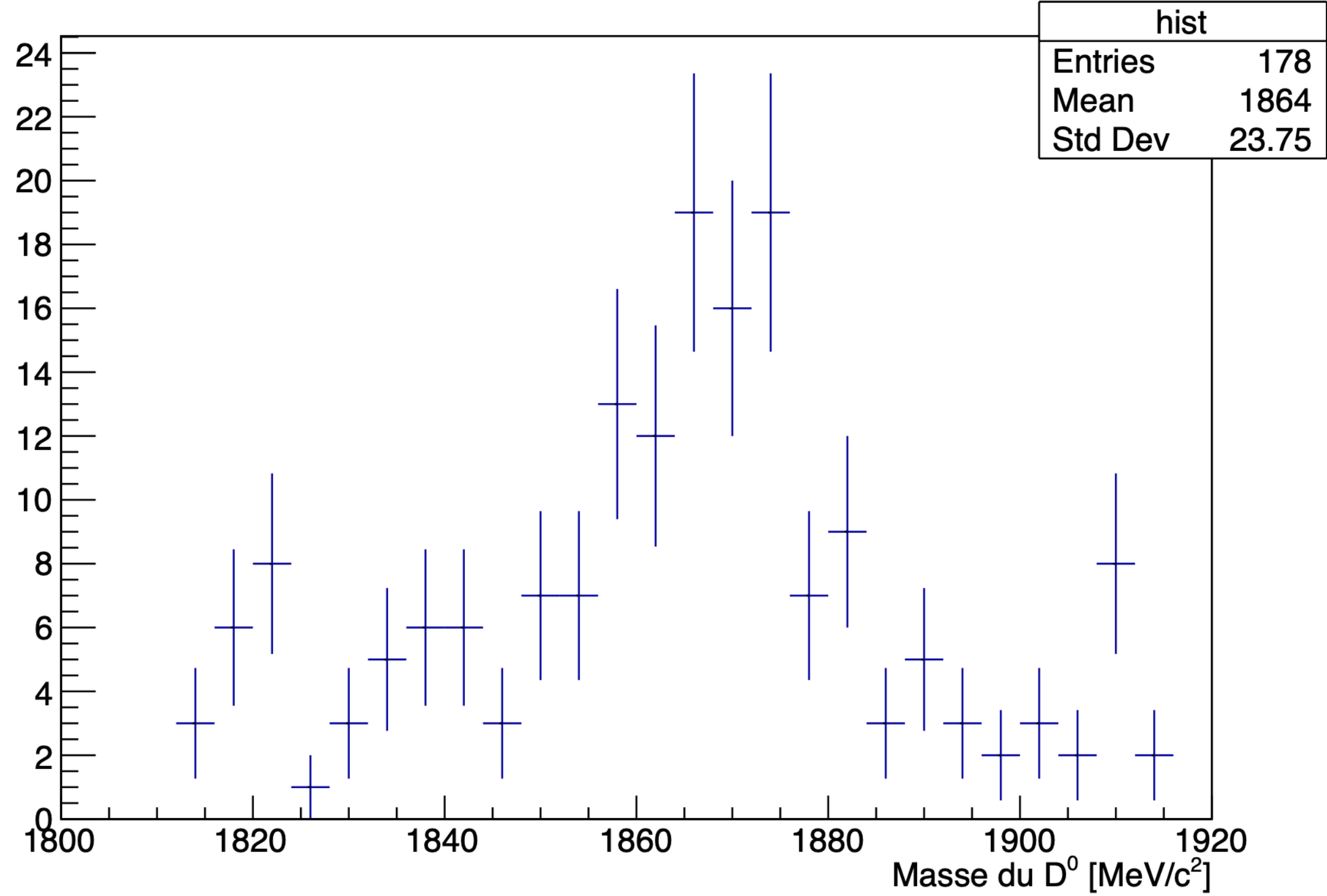
# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS



# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

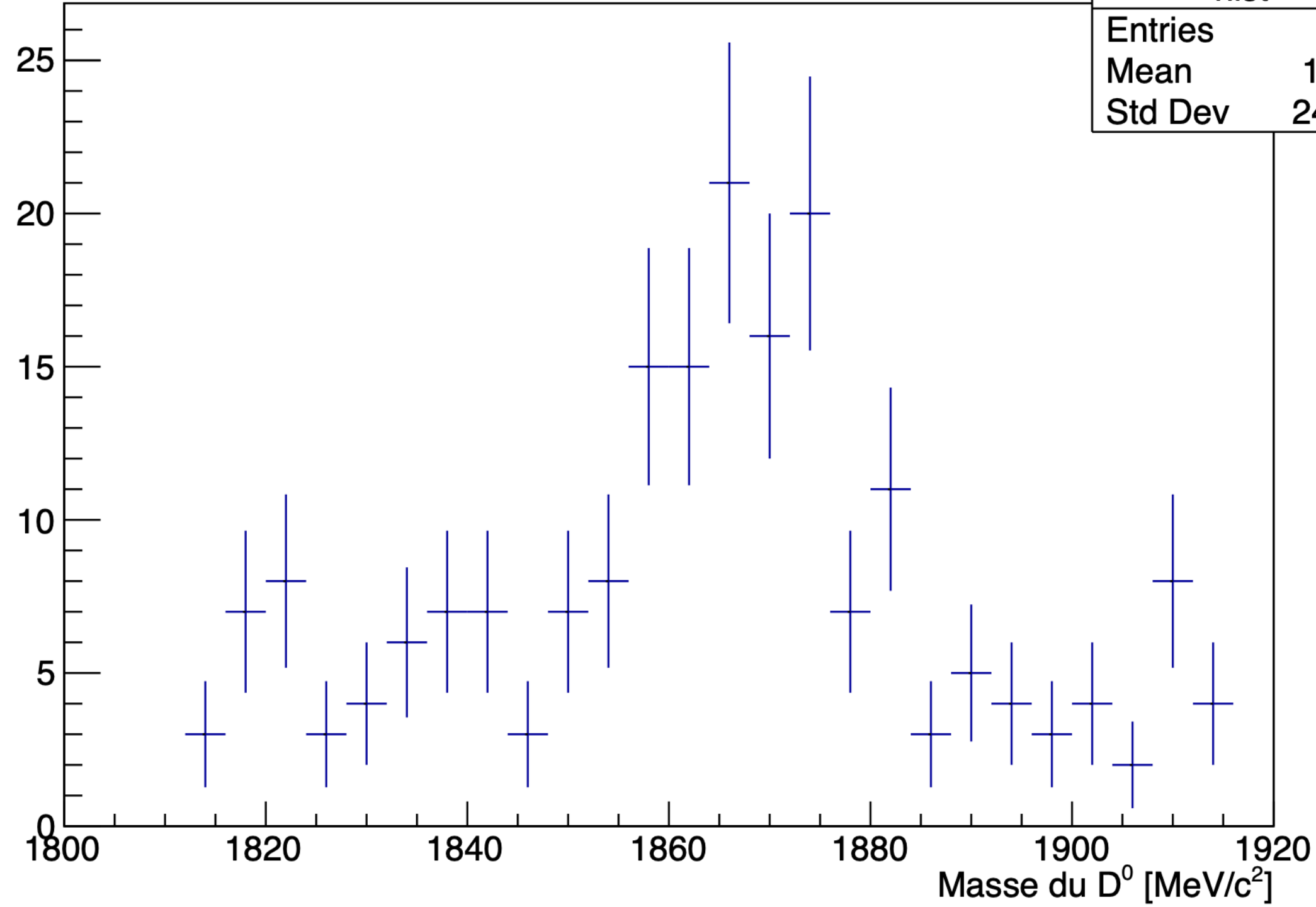


# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS



# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

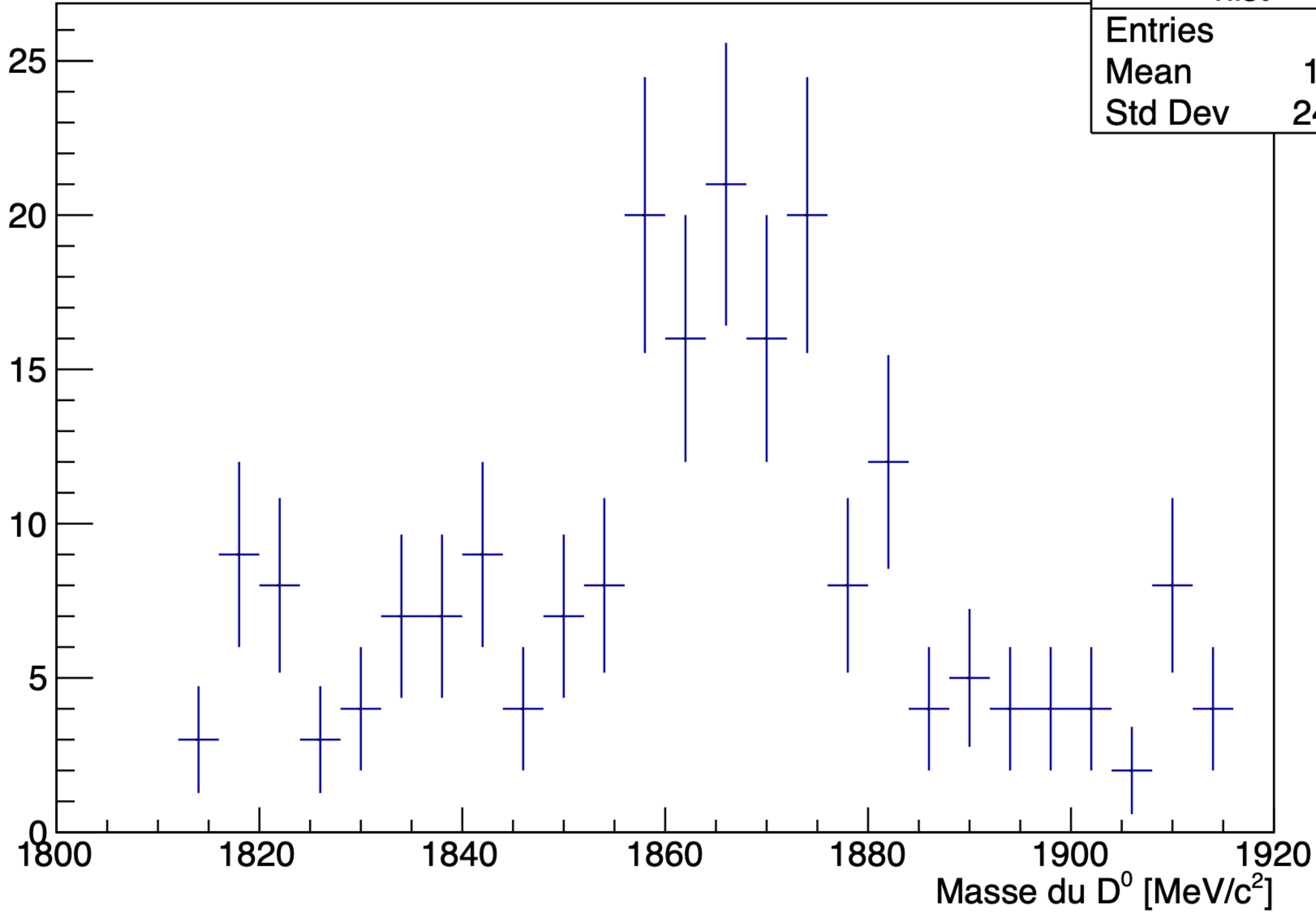
| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 201   |
| Mean    | 1864  |
| Std Dev | 24.23 |





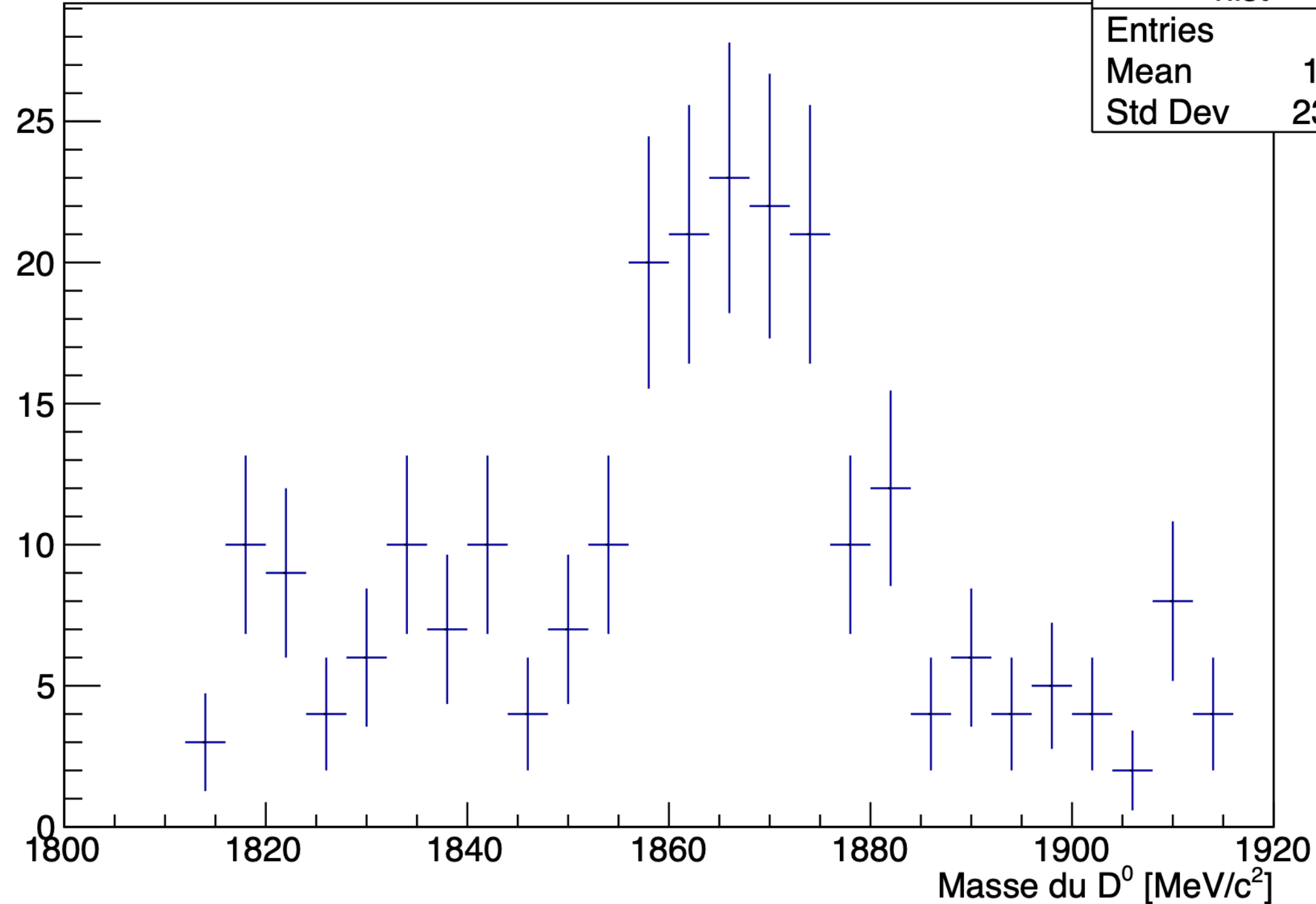
# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 217   |
| Mean    | 1863  |
| Std Dev | 24.18 |

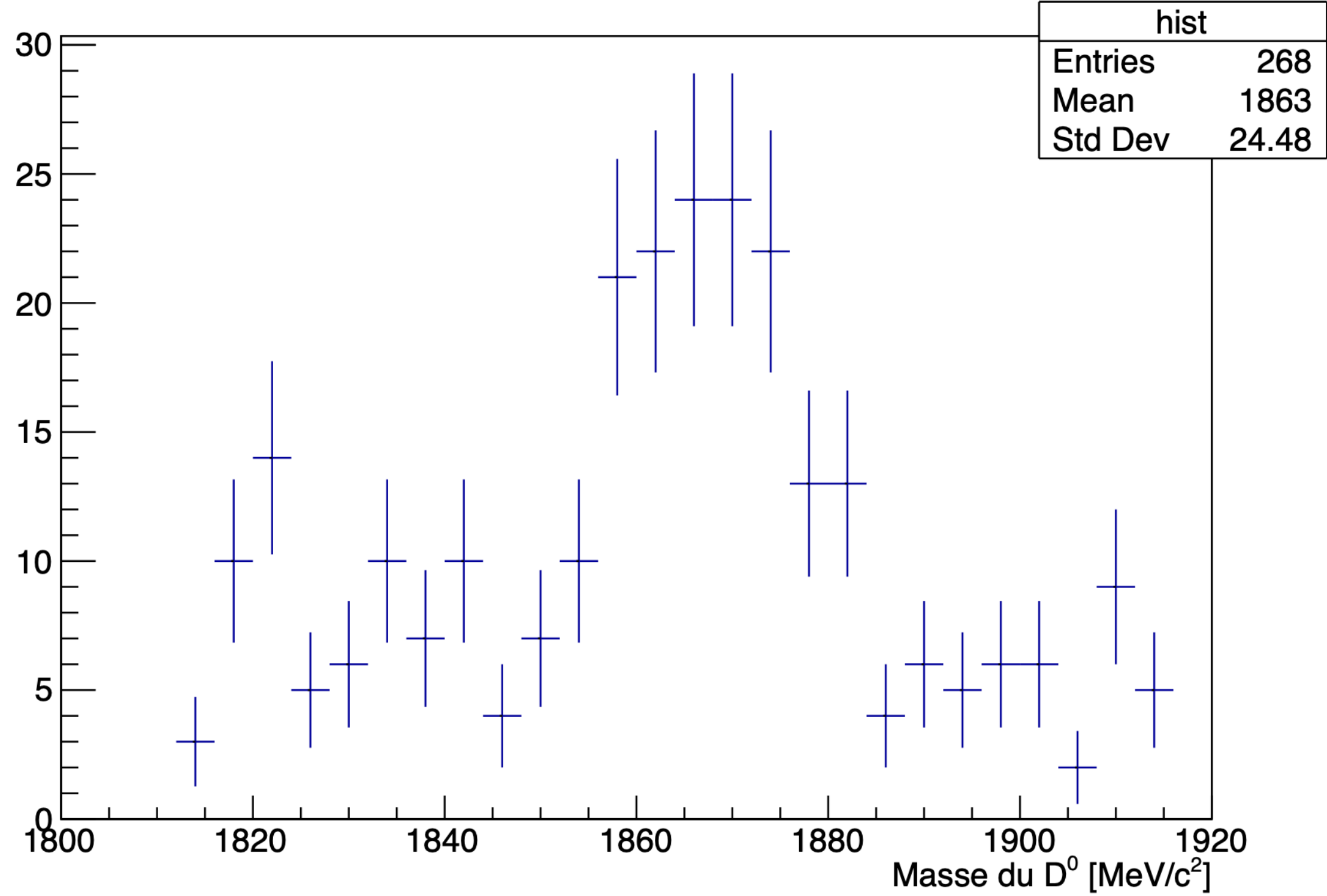


# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 246   |
| Mean    | 1862  |
| Std Dev | 23.84 |

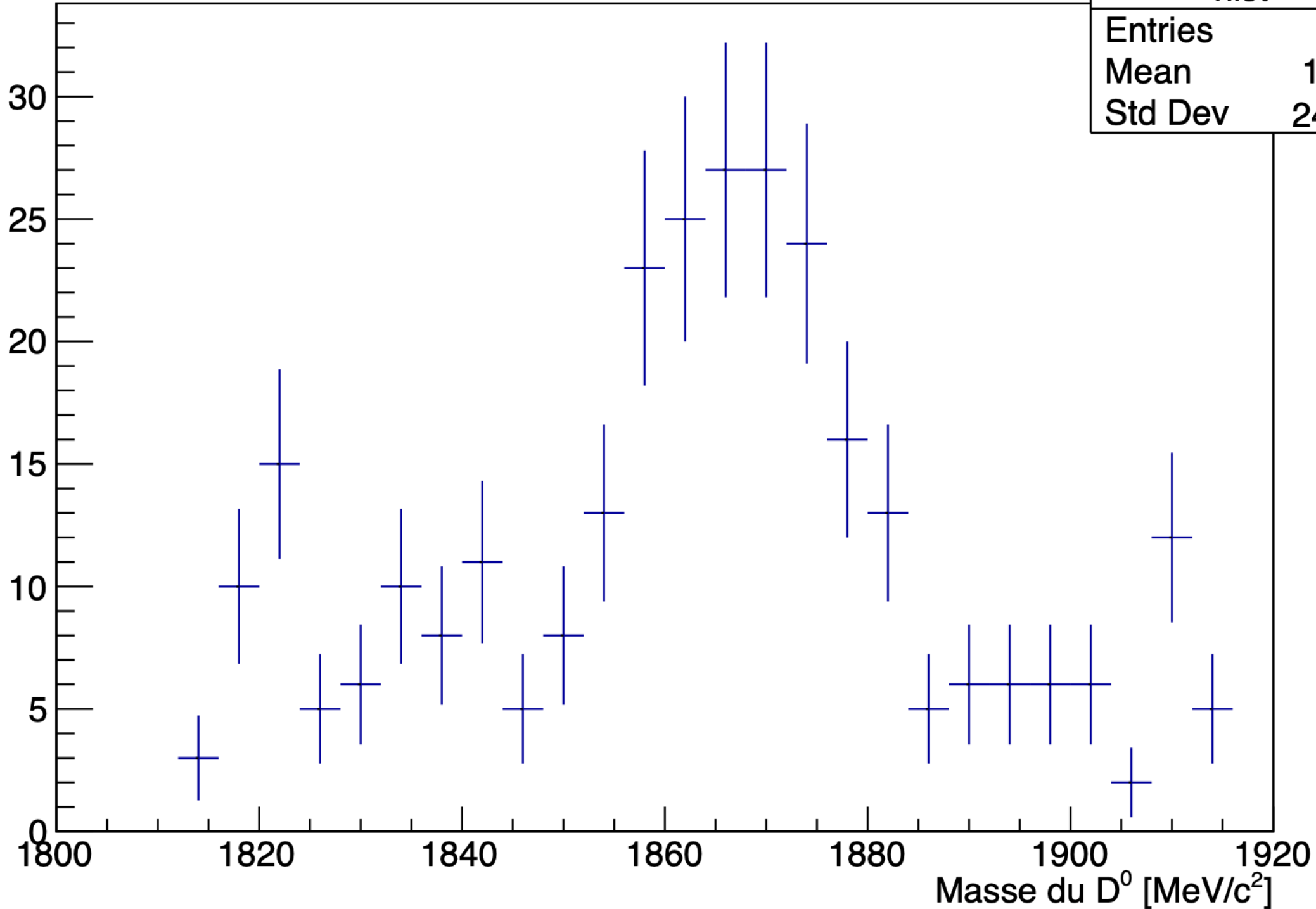


# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS



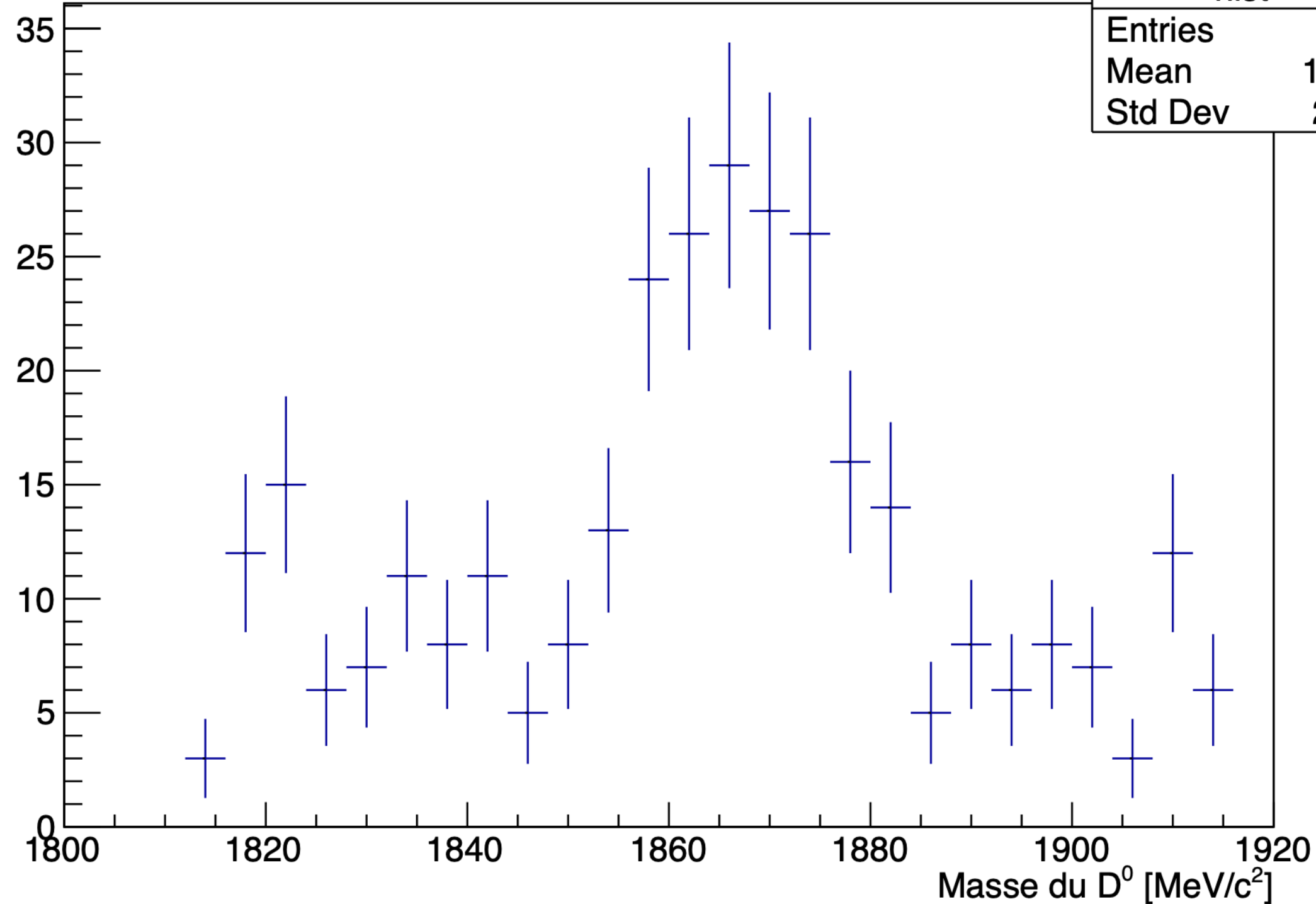
# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 297   |
| Mean    | 1863  |
| Std Dev | 24.17 |



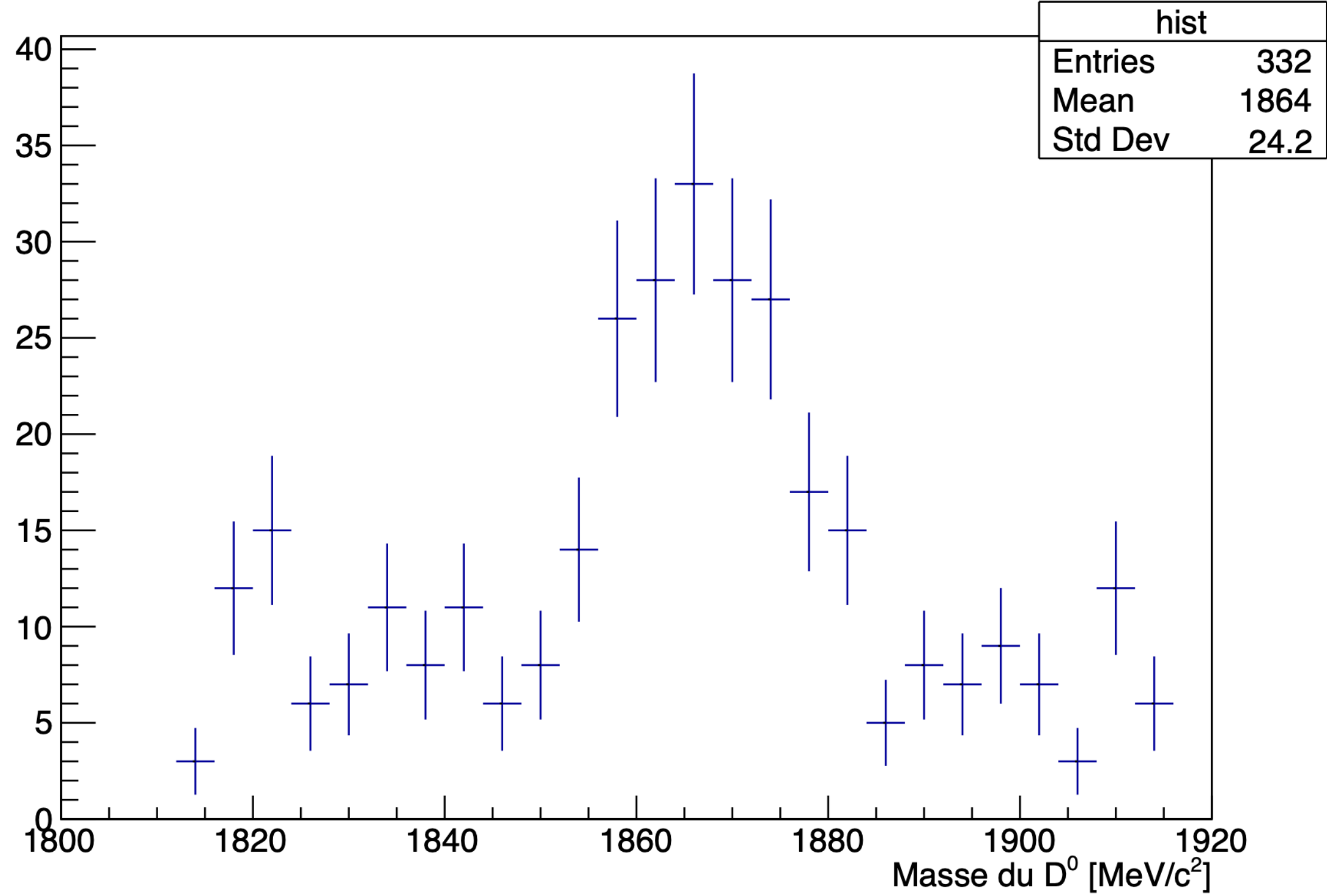
# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |      |
|---------|------|
| Entries | 316  |
| Mean    | 1864 |
| Std Dev | 24.6 |



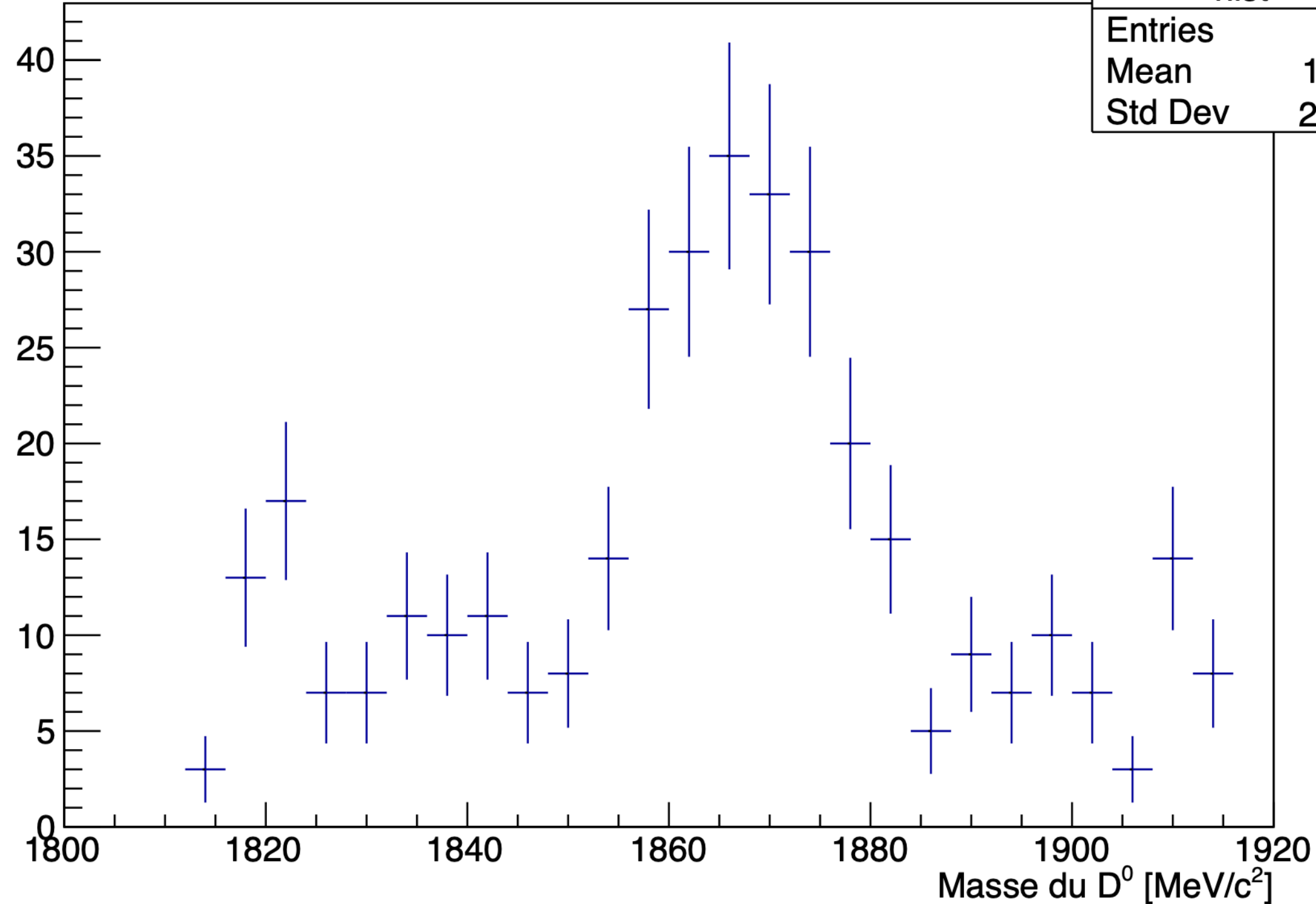


# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS



COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

| hist    |       |
|---------|-------|
| Entries | 361   |
| Mean    | 1864  |
| Std Dev | 24.41 |



# COLLECTION DES ÉVÉNEMENTS

