



# **Masterclasses de physique des particules : l'expérience Belle II Auprès du collisionneur SuperKEKB**

# Introduction à la physique des particules

Whiteboard content:

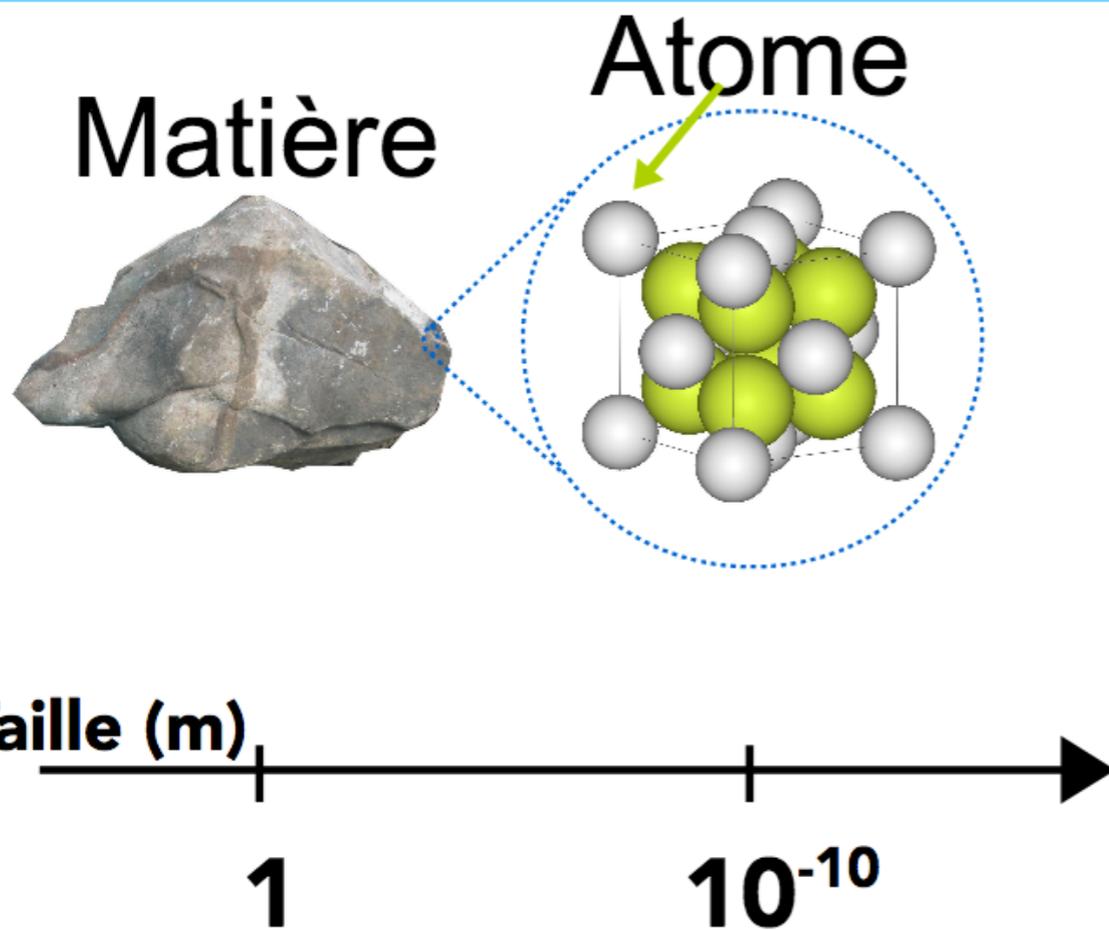
$$V_{S^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{|S^2|} \left( |S^1|^2 + |S^3|^2 \right)$$
$$+ \frac{1}{2} \left( |S^1|^2 - |S^3|^2 \right)$$

$\langle \psi | S^1 | \psi \rangle \neq 0 \Rightarrow \langle \hat{v} \rangle \neq 0$

Diagram: A U-shaped curve with a blue line and an orange line.

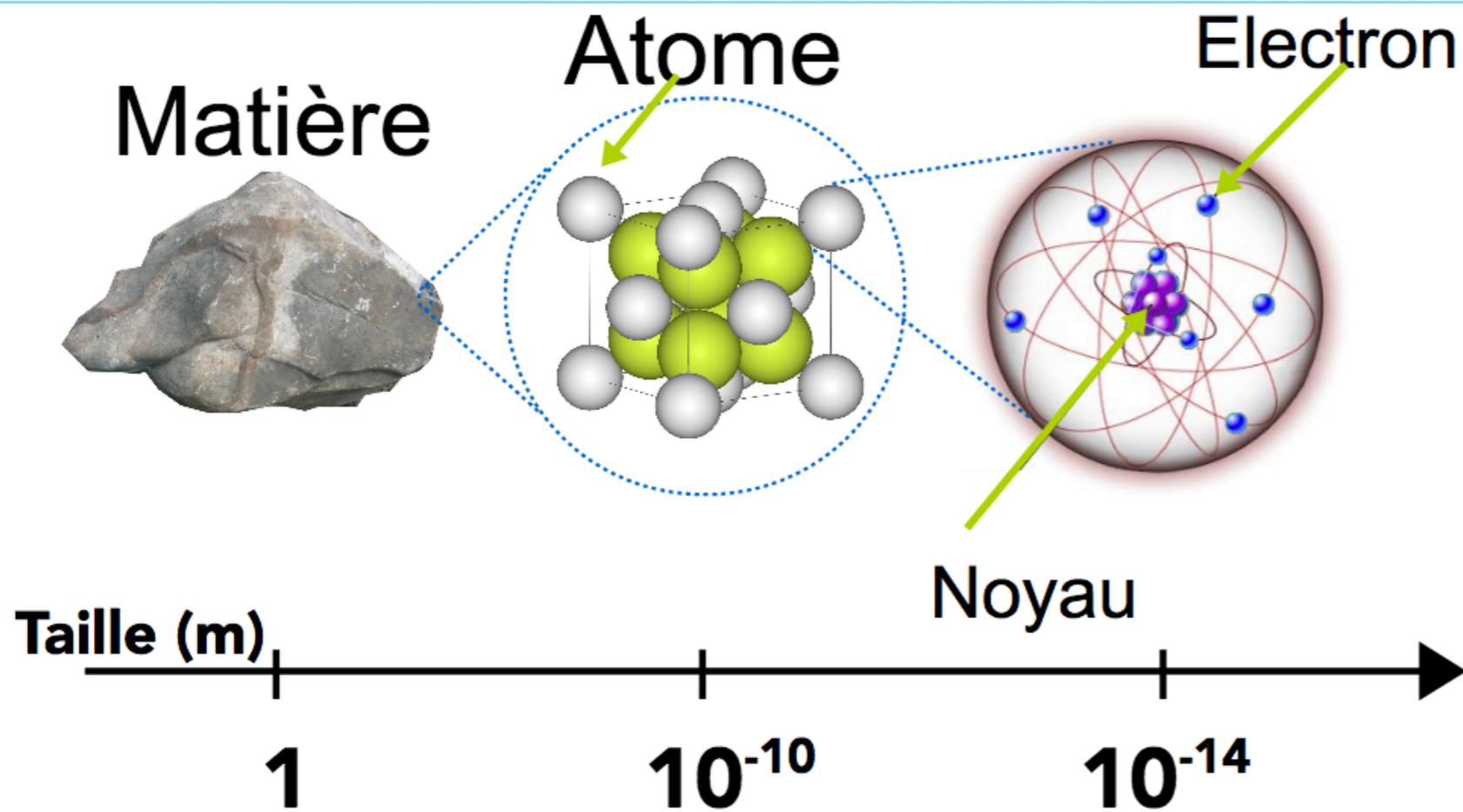
Diagram: A Feynman diagram showing a central vertex with a dashed line and a solid line, and two external lines.

- ❖ Notion dépendant des moyens expérimentaux → varie avec l'époque.
- ❖ 19<sup>ème</sup> siècle : modèle atomique.



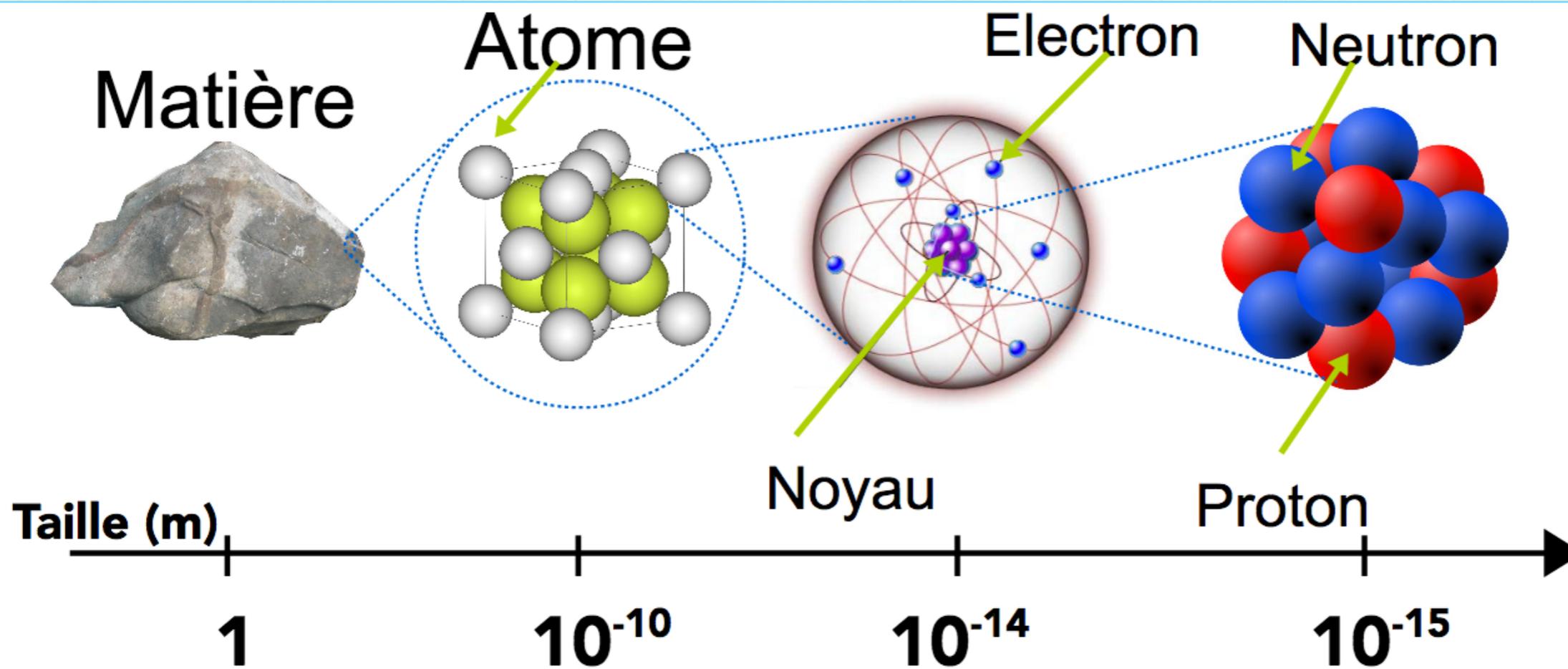
# L'élémentarité

- ❖ Découverte de l'électron (1897) et du noyau (1911).



# L'élémentarité

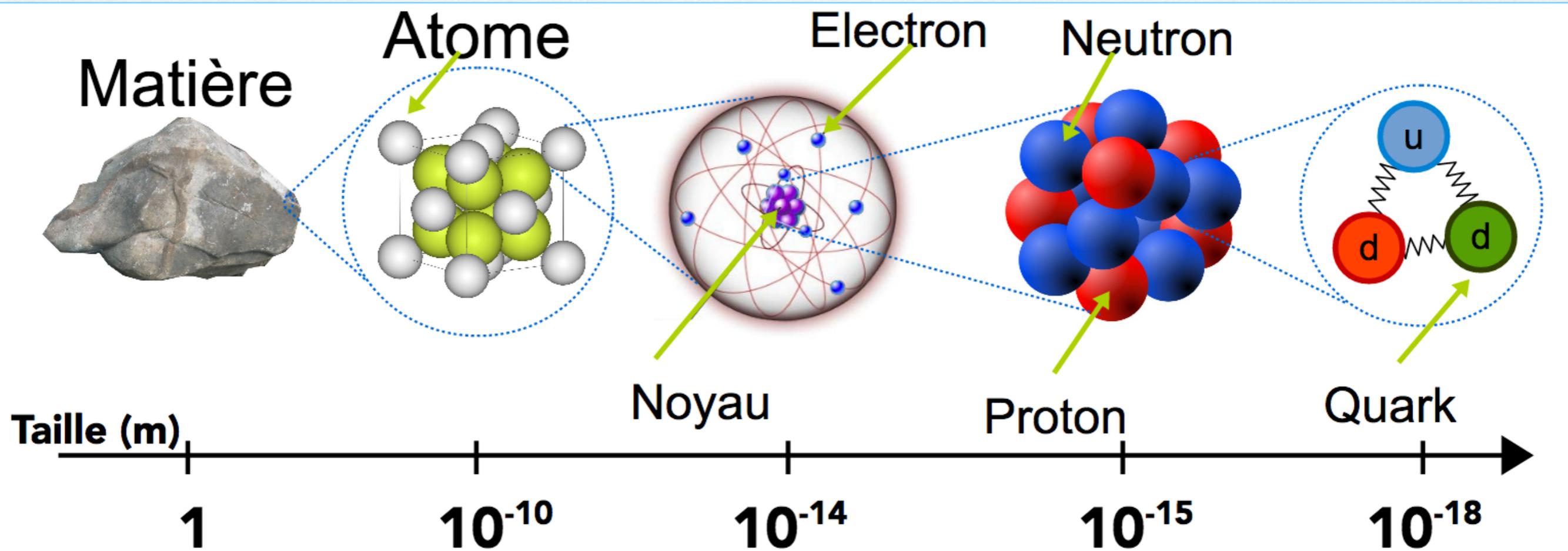
- ❖ Découverte du proton (1913) et neutron (1932).



# L'élémentarité



- ❖ Découverte des quarks (1960s) : sans sous-structure observée jusqu'à présent.



masse  $\sim 10^{-25}$ - $10^{-30}$  kg

# Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter  
(fermions) + 12 anti-particles)

I II III

mass  
charge  
spin

QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS

SCALAR BOSONS

$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$   
2/3  
1/2  
**u**  
up

$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$   
2/3  
1/2  
**c**  
charm

$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$   
2/3  
1/2  
**t**  
top

0  
0  
1  
**g**  
gluon

$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$   
0  
0  
0  
**H**  
Higgs

$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$   
-1/3  
1/2  
**d**  
down

$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$   
-1/3  
1/2  
**s**  
strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$   
-1/3  
1/2  
**b**  
bottom

0  
0  
1  
 **$\gamma$**   
photon

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$   
-1  
1/2  
**e**  
electron

$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$   
-1  
1/2  
 **$\mu$**   
muon

$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$   
-1  
1/2  
 **$\tau$**   
tau

$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$   
0  
1  
**Z**  
Z boson

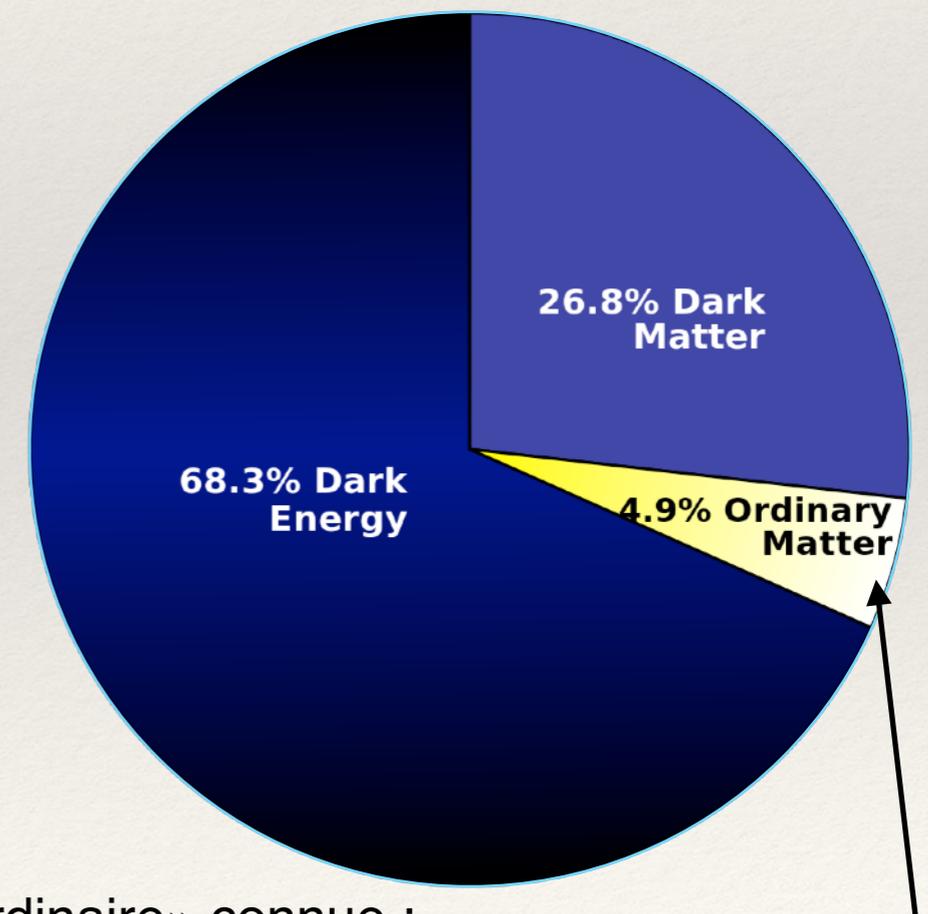
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$   
0  
1/2  
 **$\nu_e$**   
electron neutrino

$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$   
0  
1/2  
 **$\nu_\mu$**   
muon neutrino

$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$   
0  
1/2  
 **$\nu_\tau$**   
tau neutrino

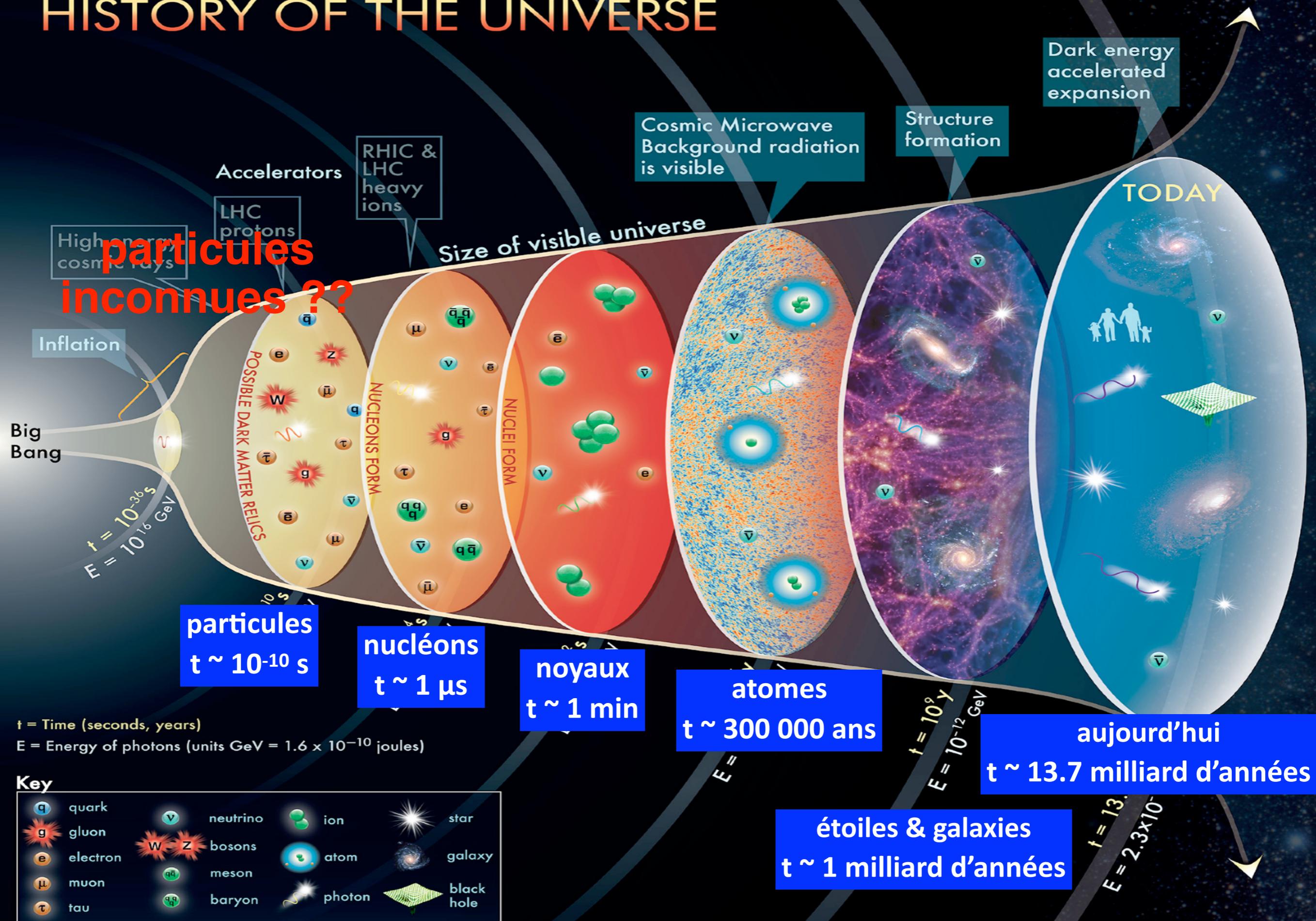
$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$   
 $\pm 1$   
1  
**W**  
W boson

- ❖ Description des particules élémentaires de matière et de leurs interactions : théorie **quantique** et **relativiste**.
  - ❖ Testée avec une **grande précision**.
  - ❖ Très nombreux prix Nobel.
  - ❖ Mais ce n'est pas la « théorie du tout », par exemple elle n'explique pas :
    - ❖ Pourquoi l'anti-matière a disparu ?
    - ❖ Pourquoi 3 familles de particules de matière ?
    - ❖ Nature de la matière noire ?
    - ❖ Nature de l'énergie noire ?
- recherche d'une **nouvelle physique** au-delà du modèle standard.



Matière «ordinaire» connue :

# HISTORY OF THE UNIVERSE



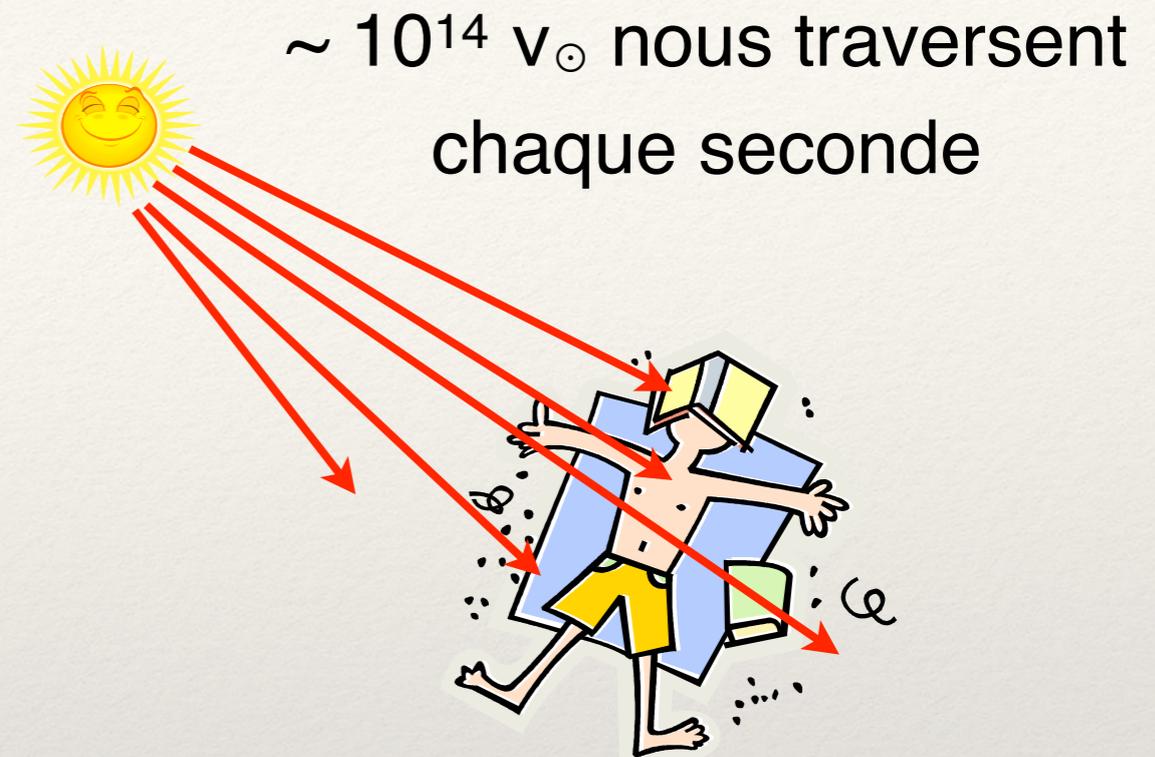
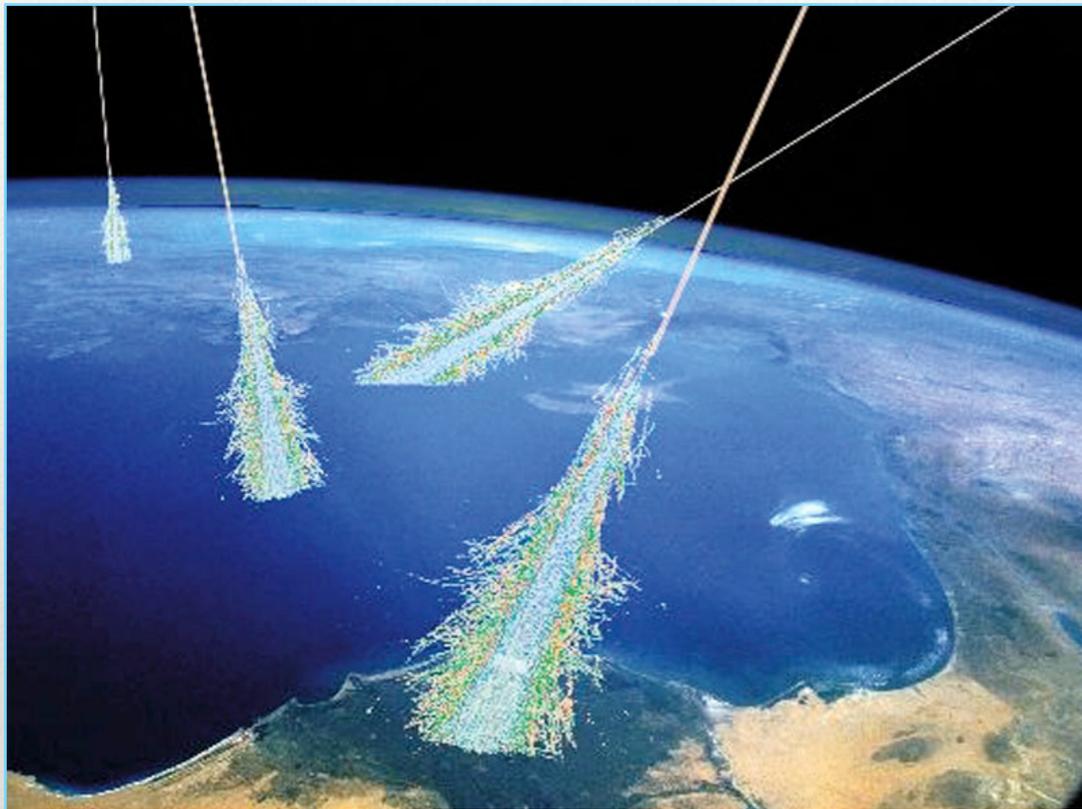
t = Time (seconds, years)  
E = Energy of photons (units GeV =  $1.6 \times 10^{-10}$  joules)

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

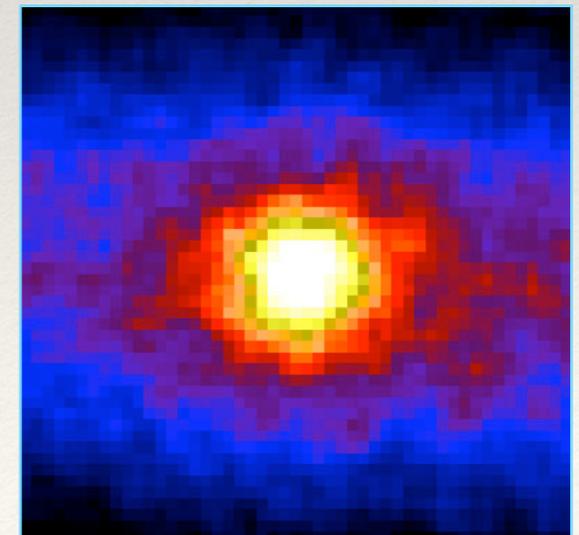
# Les particules élémentaires nous traversent



Des gerbes de  $\mu$ ,  $e$ ,  $\nu$ ,  $p$ , ...  
produites par des rayons  
cosmiques nous traversent :



Le soleil "vu en neutrinos"



- ❖ Des neutrinos  $\nu$  sont produits par:  
le soleil, les supernovae, le big-bang, les gerbes de  
rayons cosmiques, les réacteurs nucléaires, des  
faisceaux dédiés.

$$t \rightarrow W^+ b$$

$$BR(t \rightarrow Wb) = \frac{\Gamma(t \rightarrow Wb)}{\Gamma(t \rightarrow Wq)}$$

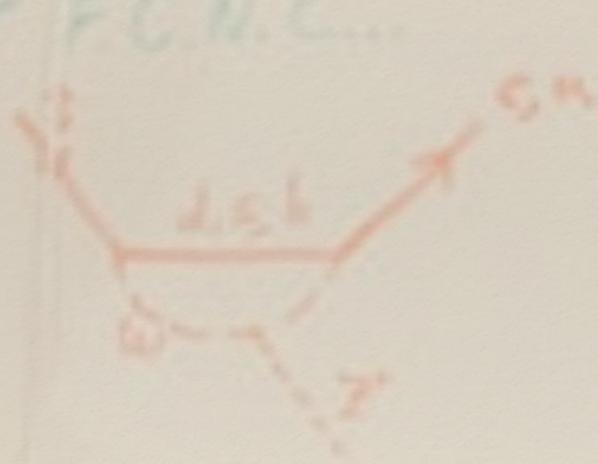
$$= \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2}$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{0.0094}{0.0418}\right)^2 + \left(\frac{0.9745}{0.0418}\right)^2}$$

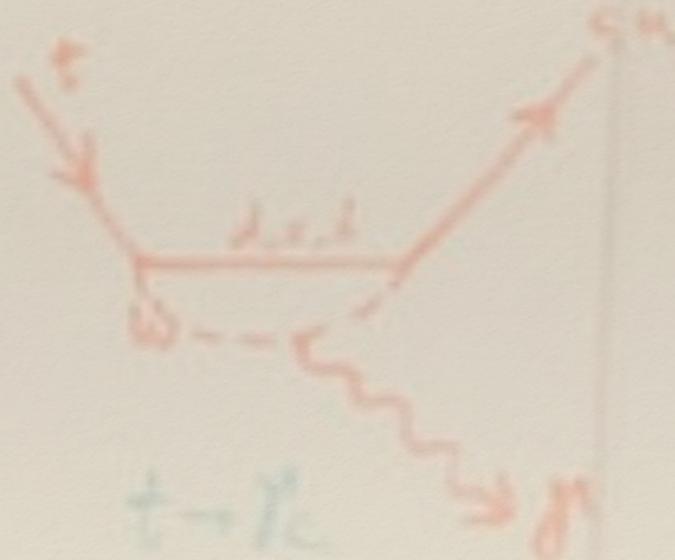
$$= \frac{1}{1 + 0.052 + 5.5} = \frac{1}{6.552} \approx 0.153$$

# Les collisionneurs de particules et l'expérience Belle II

but F.C.N.C...



$$t \rightarrow Zc$$
$$t \rightarrow Zs$$



$$t \rightarrow \gamma c$$
$$t \rightarrow \gamma s$$

# Le collisionneur LHC (CERN, Europe)



- ❖ Collisions p-p, p-Pb, Pb-Pb à la plus haute énergie de collisions jamais produite : 13 TeV.
- ❖ Fonctionne depuis 2009.
- ❖ Plusieurs milliers de milliards de protons lancés à 99.9999991 % de la vitesse de la lumière. Chaque seconde, ils font 11 000 fois le tour des 27 km de l'anneau.
- ❖ 40 millions de collisions ont lieu chaque seconde.
- ❖ Tube de faisceau plus vide que le système solaire :  $10^{-13}$  atm.  
Plus froid que l'espace : 1.9 K = -271 °C.

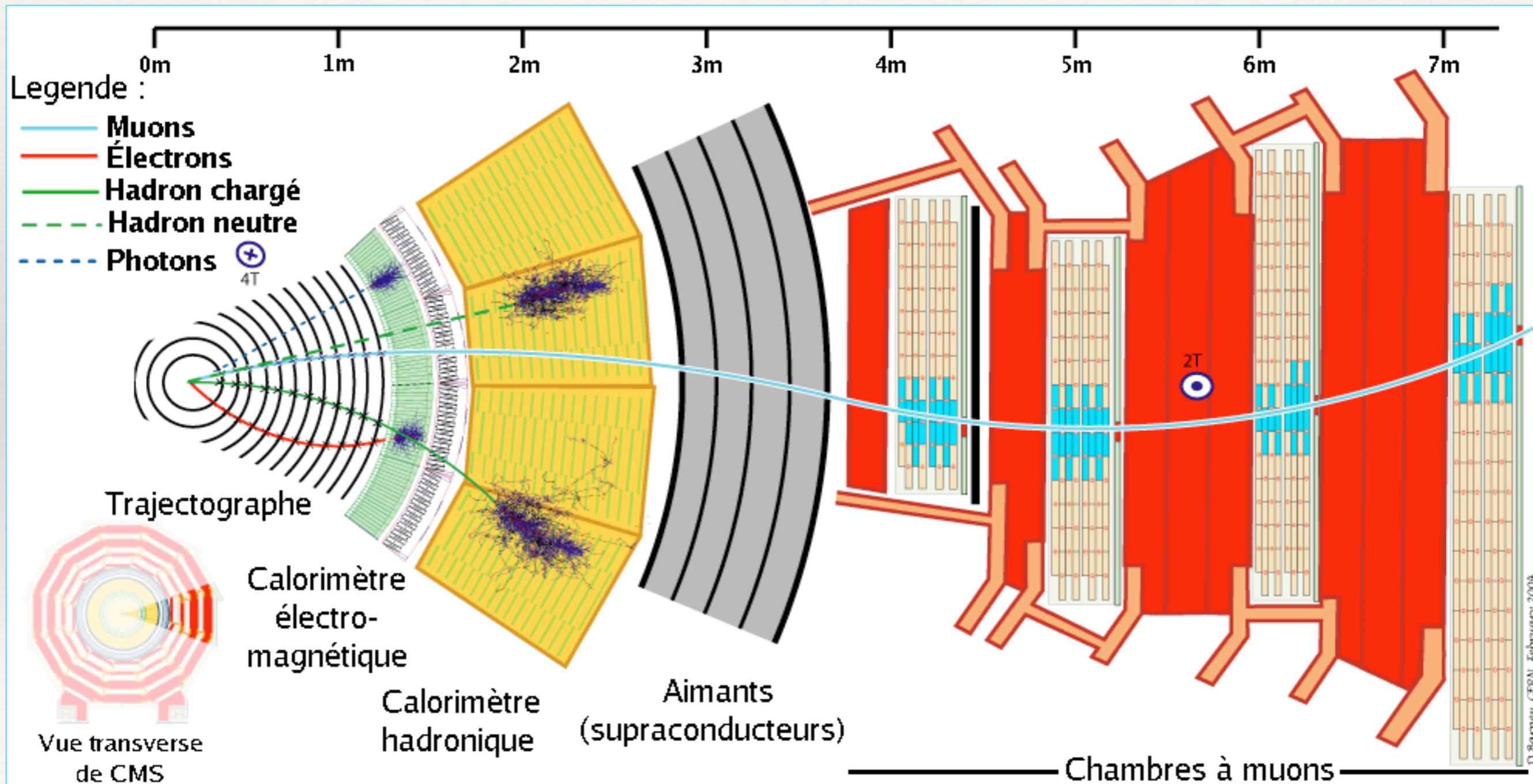


100 m sous terre

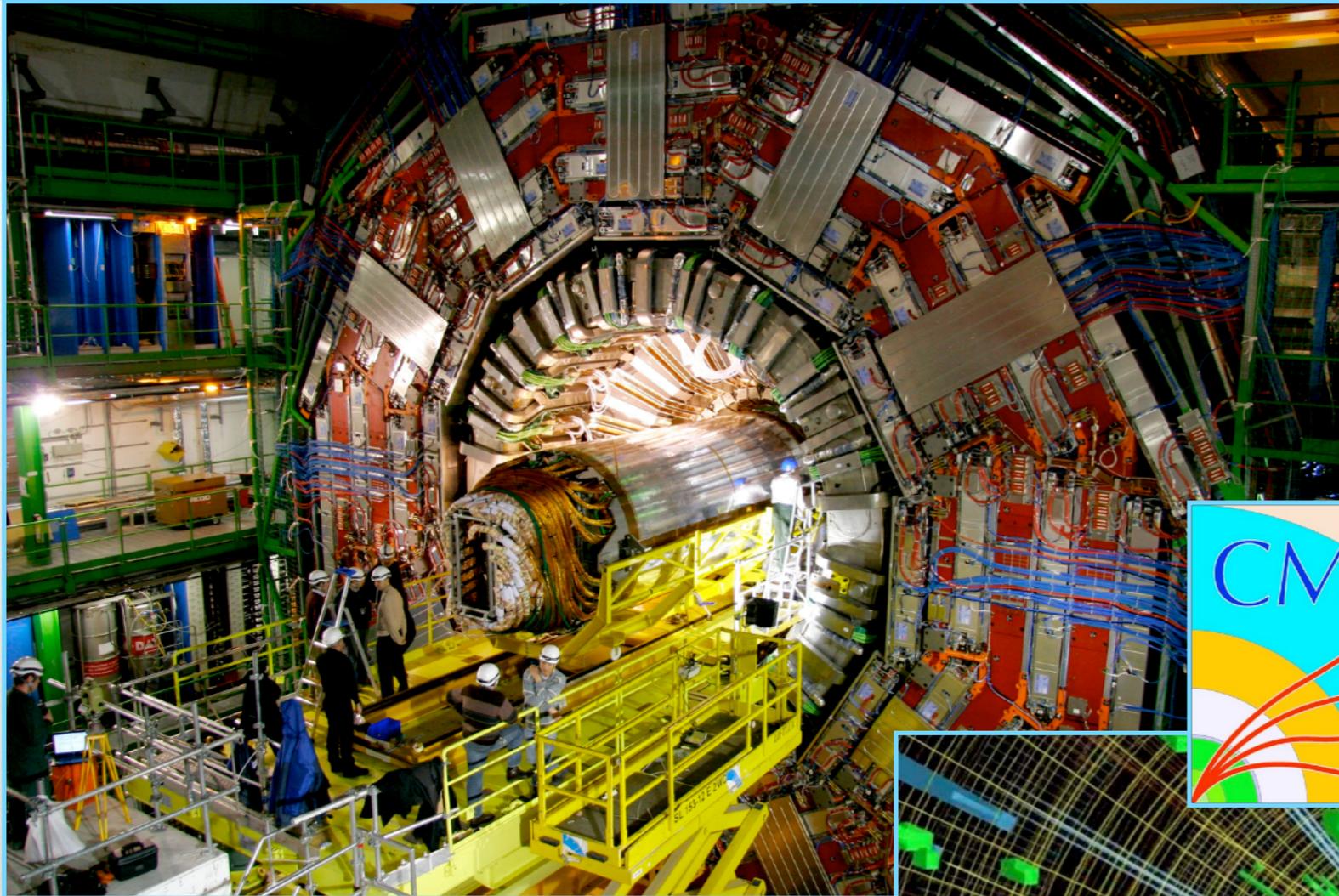
# La détection des particules



- ❖ On veut reconstruire leur trajectoire, les identifier, mesurer leur énergie et leur quantité de mouvement, grâce à différentes techniques de détection, empilées en cylindres.

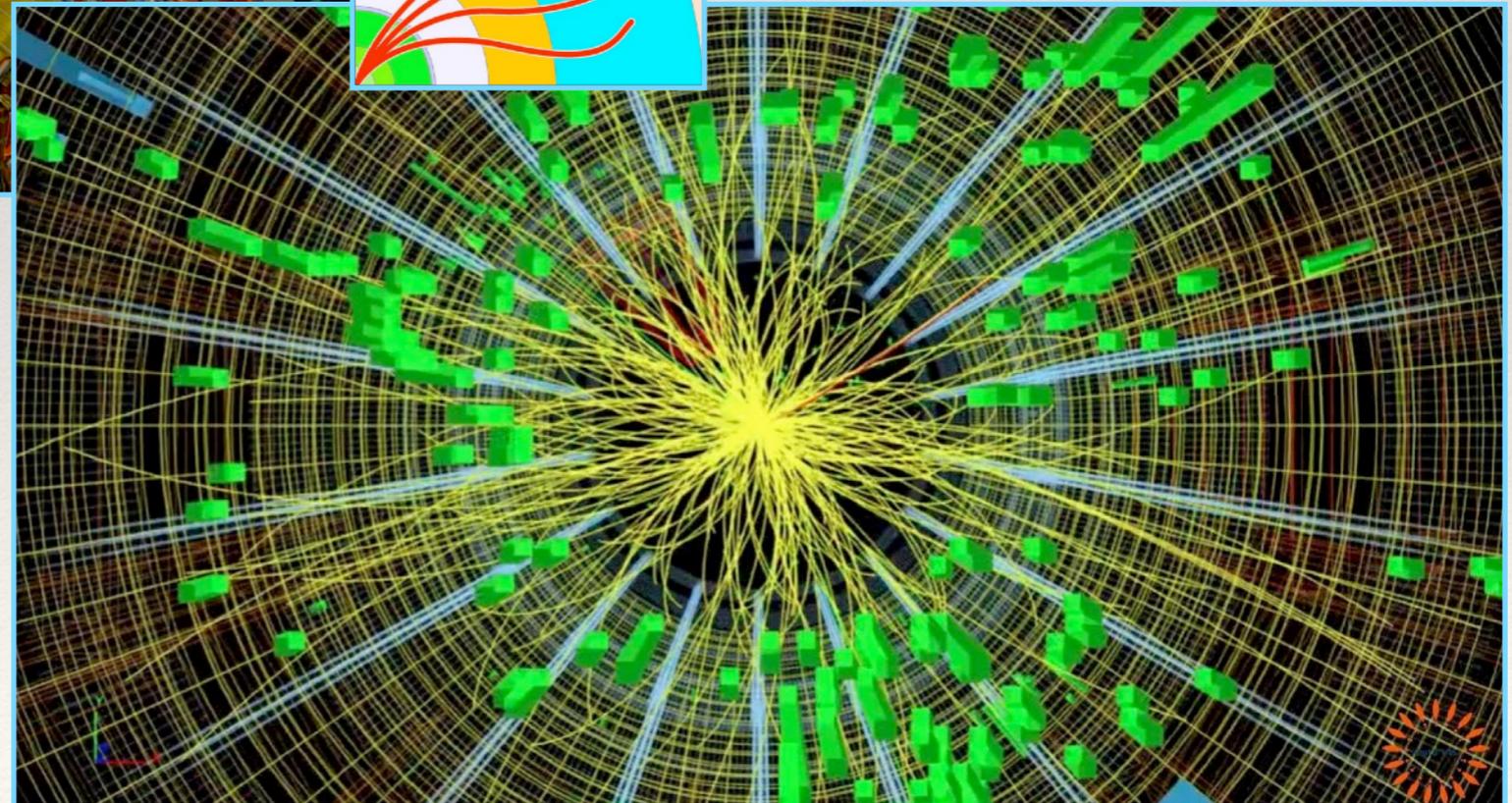


# Le détecteur CMS au LHC



Dimensions : 21.5 x 15 x 15 m<sup>3</sup>

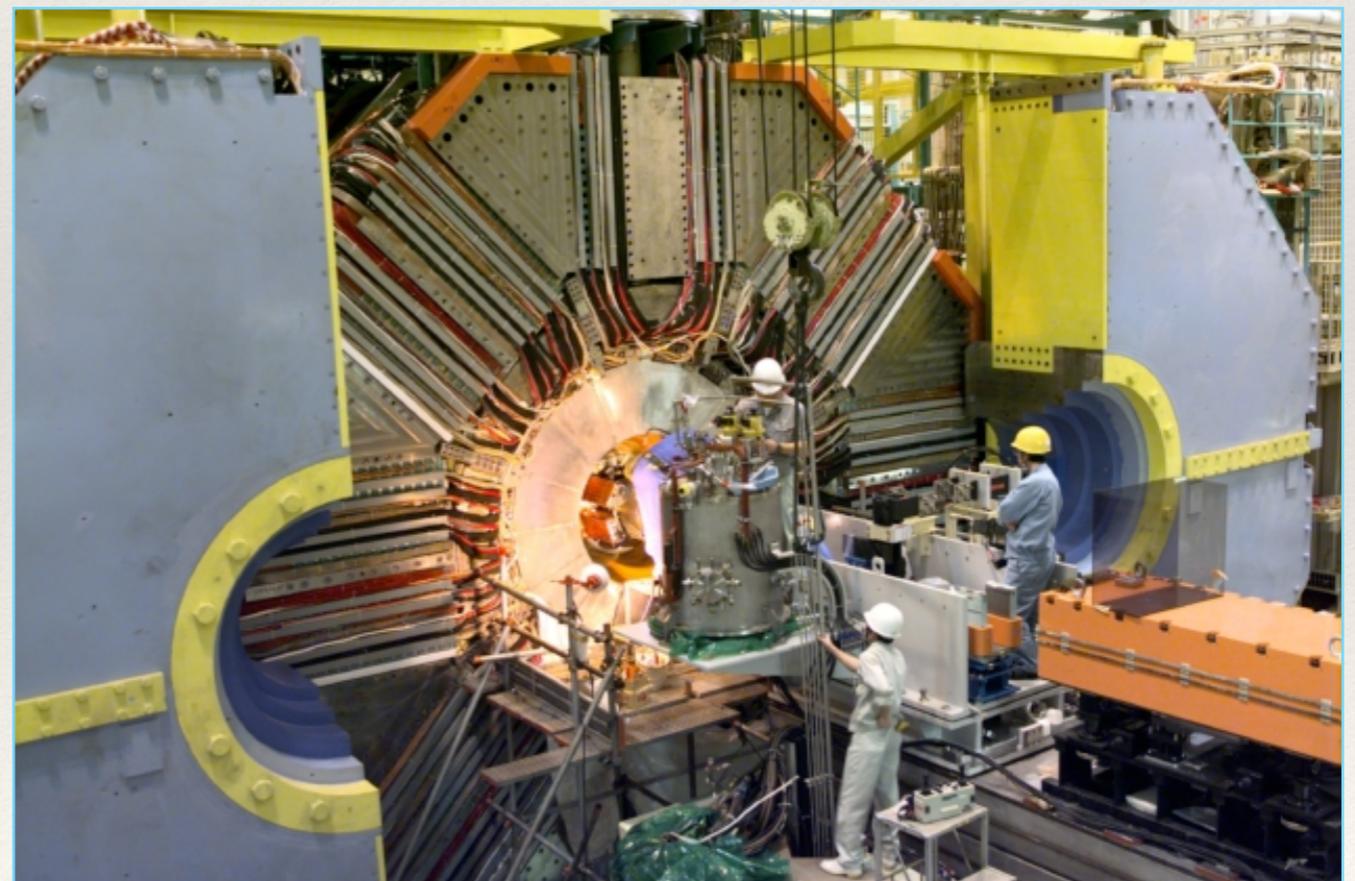
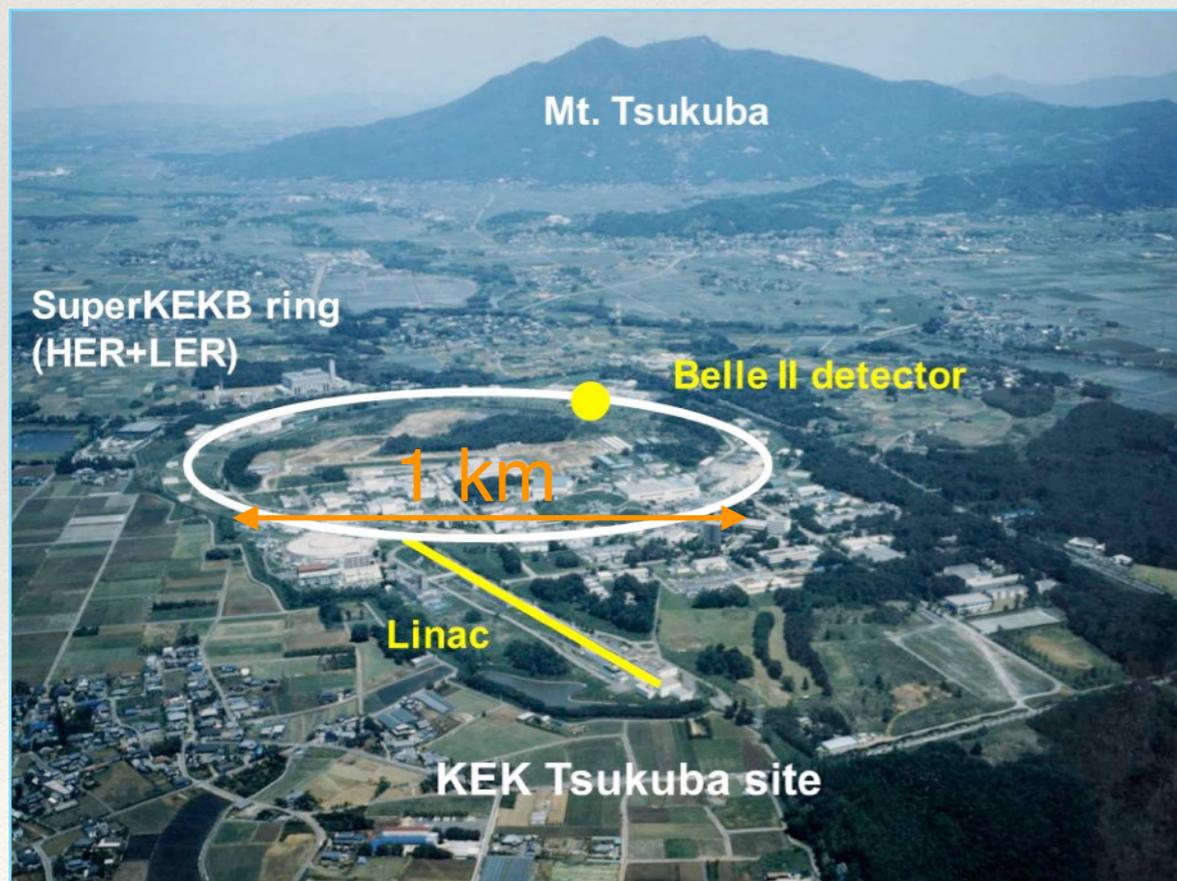
Poids : 12 500 tonnes



# L'expérience Belle II



- ❖ **Collisionneur  $e^+ e^-$  SuperKEKB** : le plus intense au monde.  
But : produire 40× plus de collisions par seconde que LHC.
- ❖ **Détecteur Belle II** : enregistre les collisions de SuperKEKB, au Japon.
- ❖ But de l'expérience : **découvrir des manifestations quantiques de processus inconnus en physique** (au-delà du Modèle Standard).

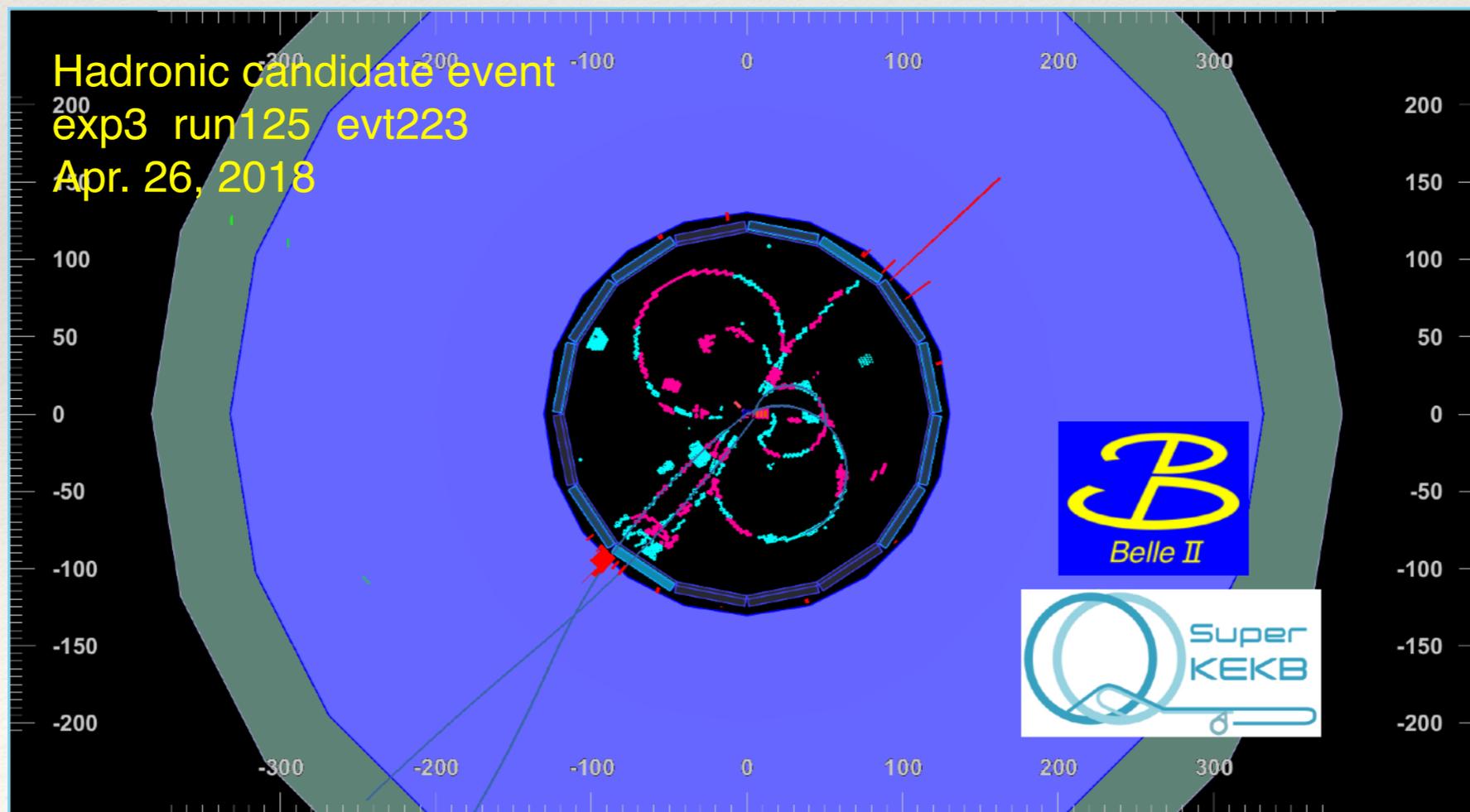


Dimensions : 7 x 7 x 7.5 m<sup>3</sup>

# Calendrier de Belle II



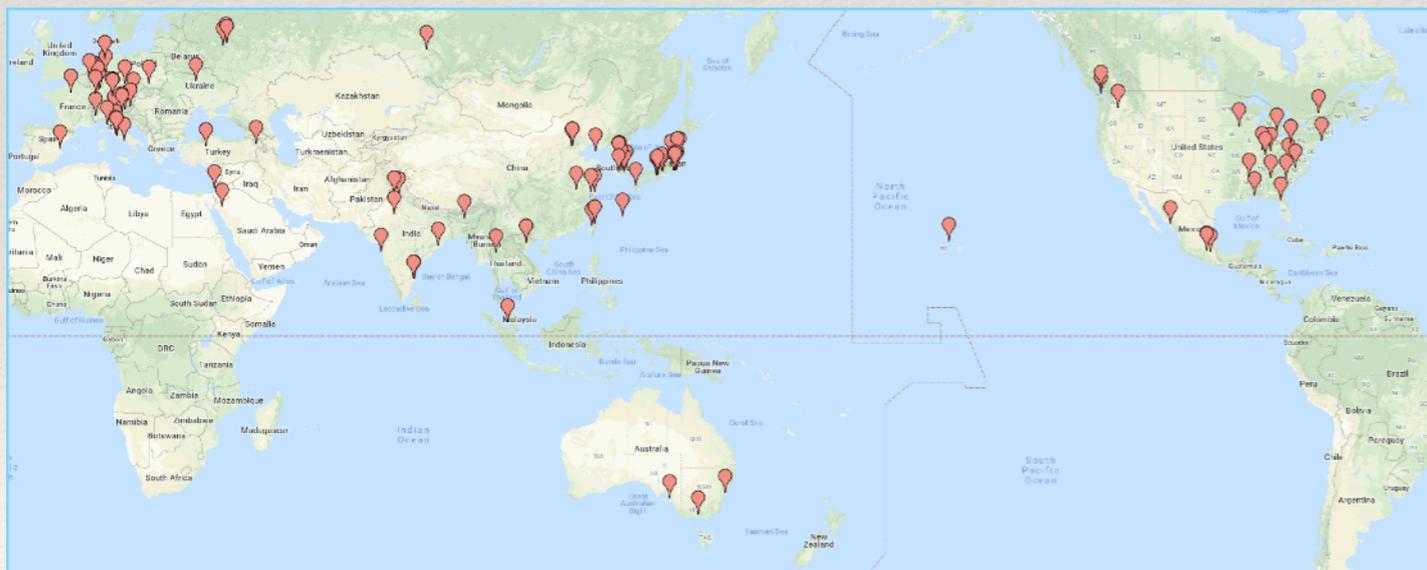
- ❖ La mise en route de Belle II a eu lieu en 2018 (*commissioning*).  
Le programme de physique a **démarré en mars 2019**.  
Il va se poursuivre pendant au moins 10 ans.
- ❖ L'expérience va permettre d'étudier **plus de 50 milliards d'événements de chaque type de fermion-antifermion**, dont ceux qui nous intéressent : paires de quarks b anti-b (mésons B), c anti-c (mésons D), et de leptons  $\tau^+ \tau^-$ .



# La collaboration internationale Belle II



- ❖ ~ 1000 membres de **27 pays** travaillent ensemble dans Belle II : chercheurs, post-doctorants, doctorants, étudiants de Master, ingénieurs et techniciens.
- ❖ 3 réunions communes par an au Japon, en plus de très nombreuses réunions par vidéo chaque semaine.
- ❖ La conception de l'expérience a commencé en 2008, puis la construction vers 2012, et enfin l'installation du détecteur complet au point d'interaction des collisions en 2018.



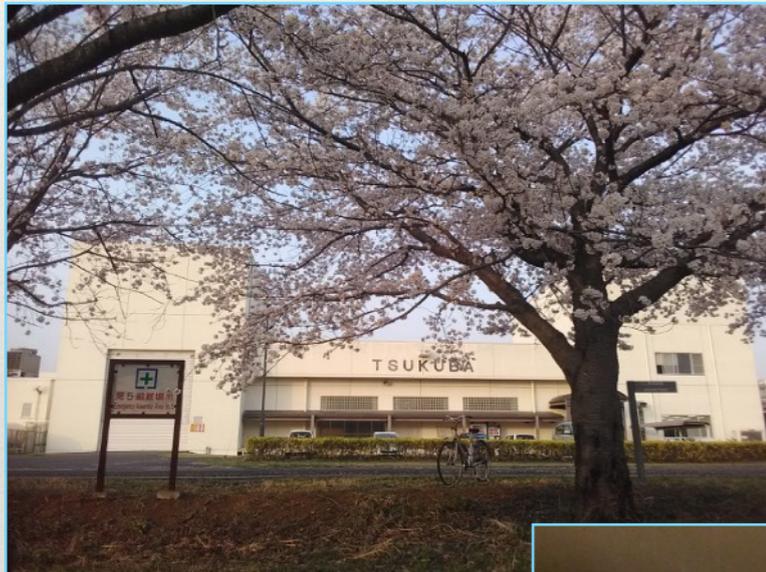
# La France dans Belle II



La France est devenue membre de la collaboration Belle II en 2017.



# Travailler dans Belle II c'est aussi ça :



2018 © Benny Ph.

ありがとうございます



Cosmology

DARK MATTER

Neutrino ~~CP~~

Proton Decay

AXIONS