


Isabelle Ripp-Baudot

IPHC Strasbourg : <http://www.iphc.cnrs.fr/>

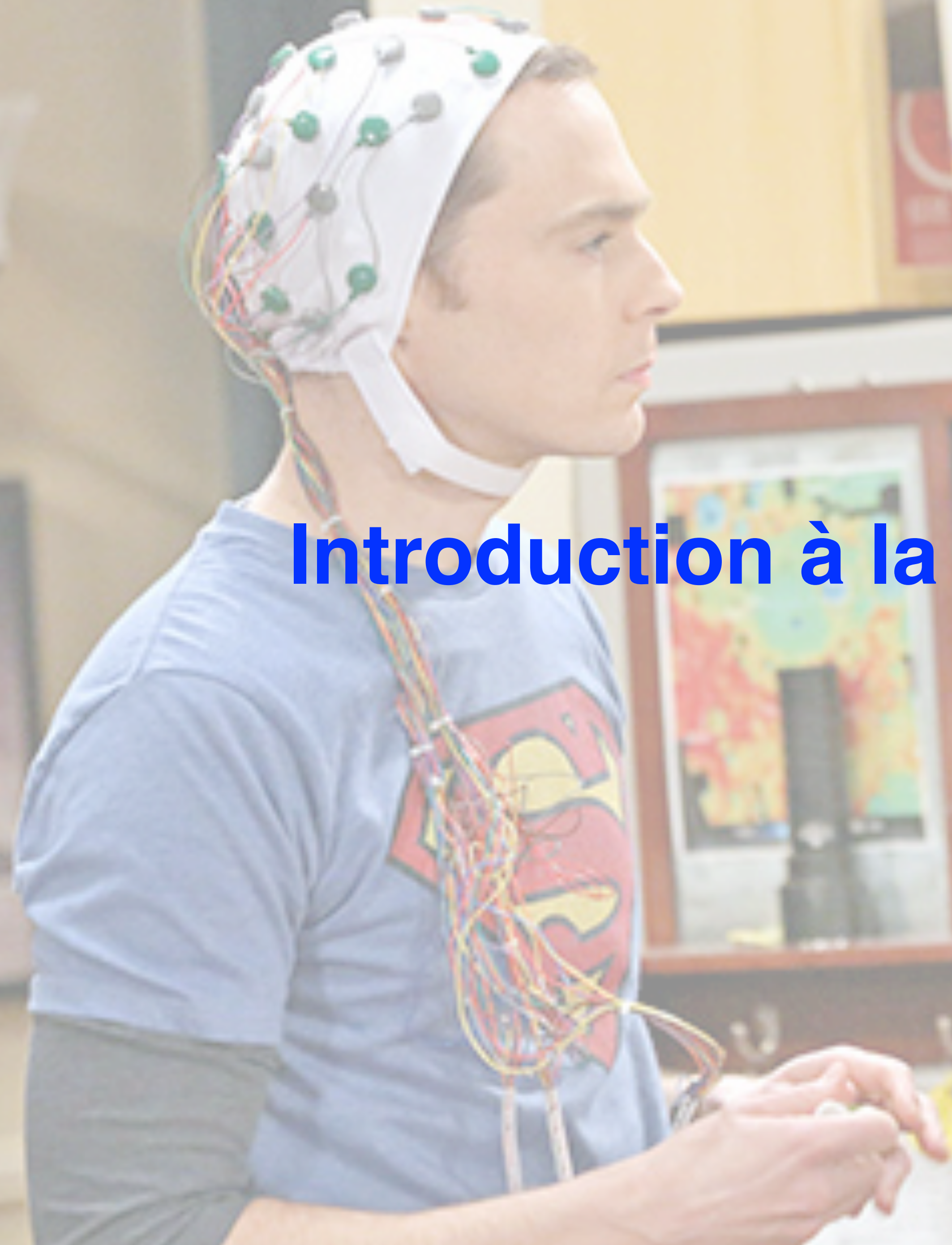
IN2P3 : [www.in2p3.cnrs.fr](http://www.in2p3.cnrs.fr)



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

11 mars 2025

# Introduction à la physique des particules



Whiteboard content:

$$V_{\text{scat}} = \frac{1}{r^2} |\mathbf{E}_{\text{scat}}|^2 \left( |\mathbf{k}'|^2 + |\mathbf{k}^{\text{in}}|^2 \right)$$
$$+ \frac{1}{2} \left( |\mathbf{k}'|^2 - |\mathbf{k}^{\text{in}}|^2 \right)^2$$

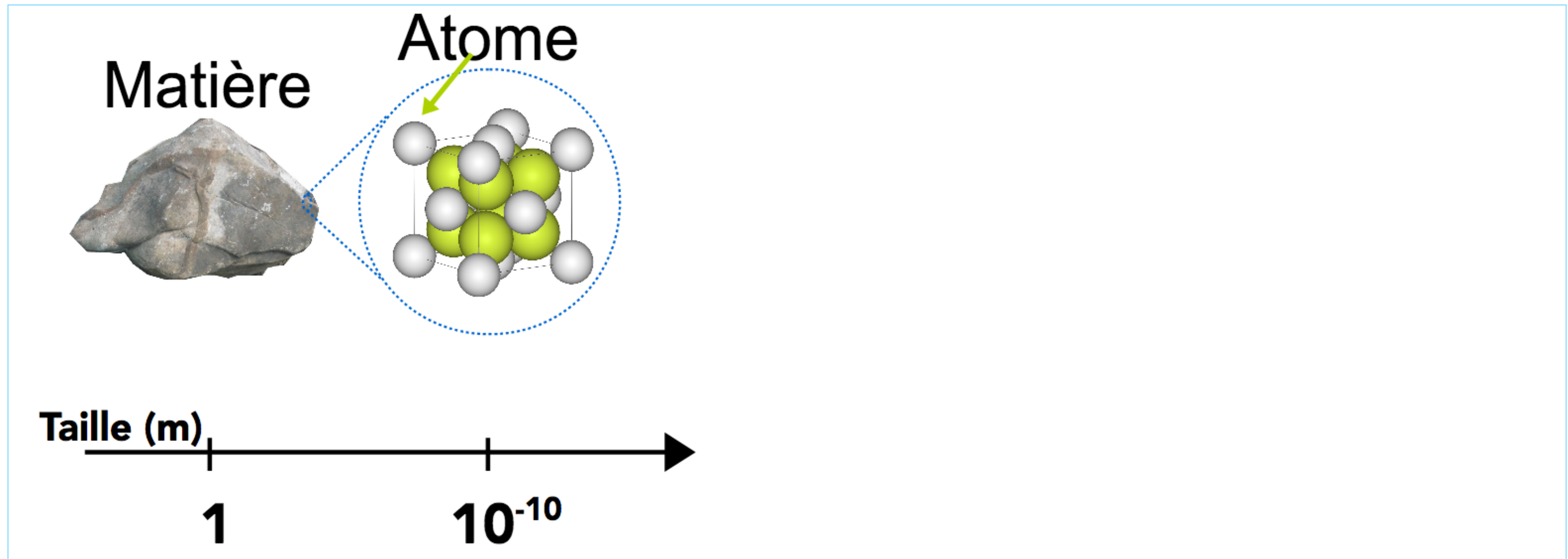
$\langle \sigma \rangle \neq 0$

Triple  
 $T(3)$

A Feynman diagram showing a triple vertex where three lines meet at a central point. The lines are labeled with 'g' and 'T'. The diagram is drawn in blue ink on the whiteboard.

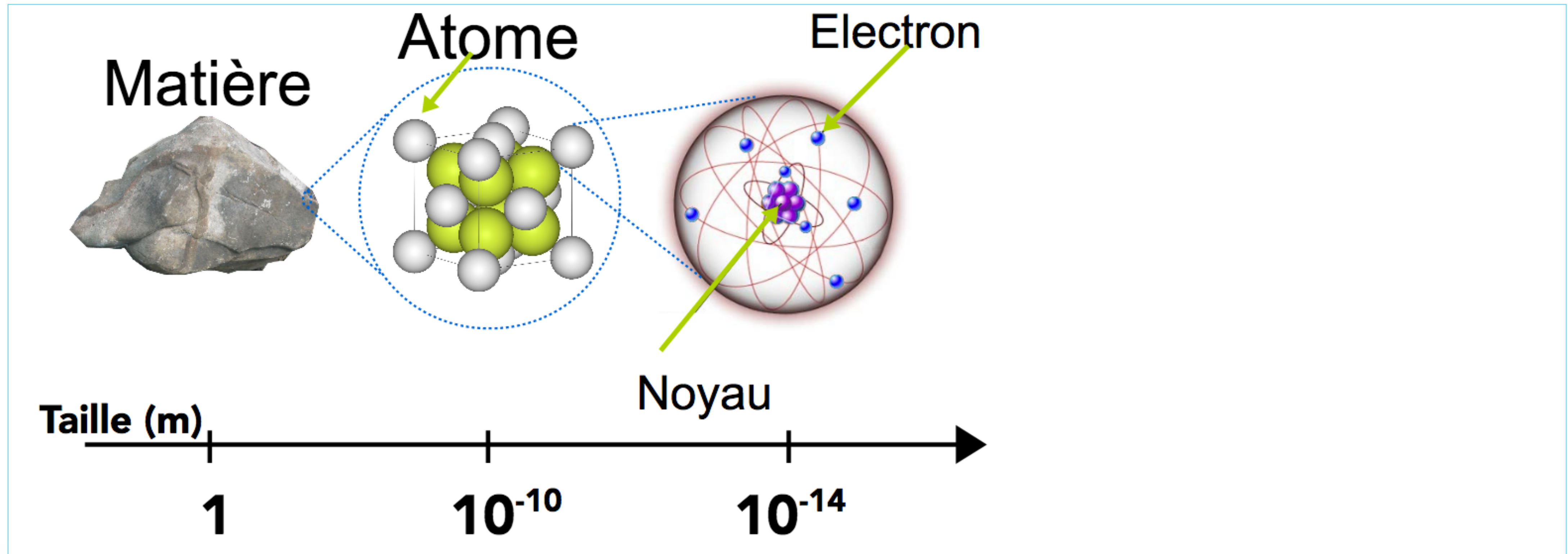
# L'éléментарité

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



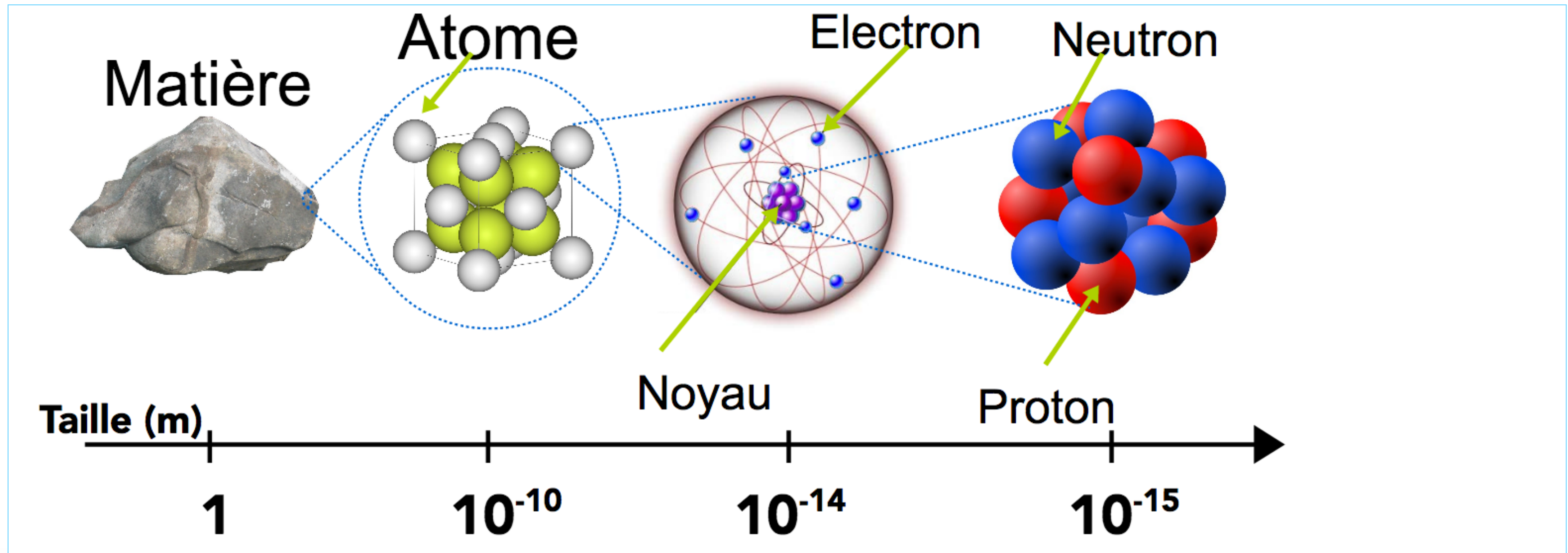
# L'éléментарité

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



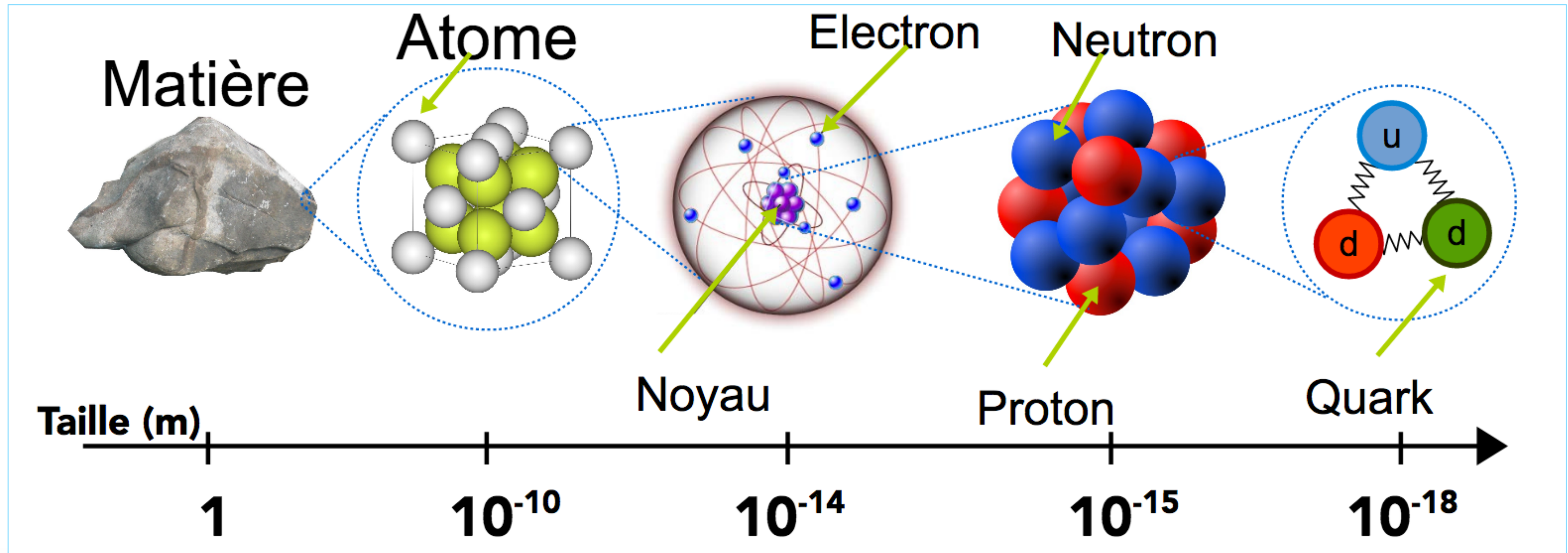
# L'élémentarité

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



# L'élémentarité

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



# Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter  
(fermions)

I

II

III

mass  
charge  
spin

QUARKS

LEPTONS

SCALAR BOSONS

GAUGE 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  
**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

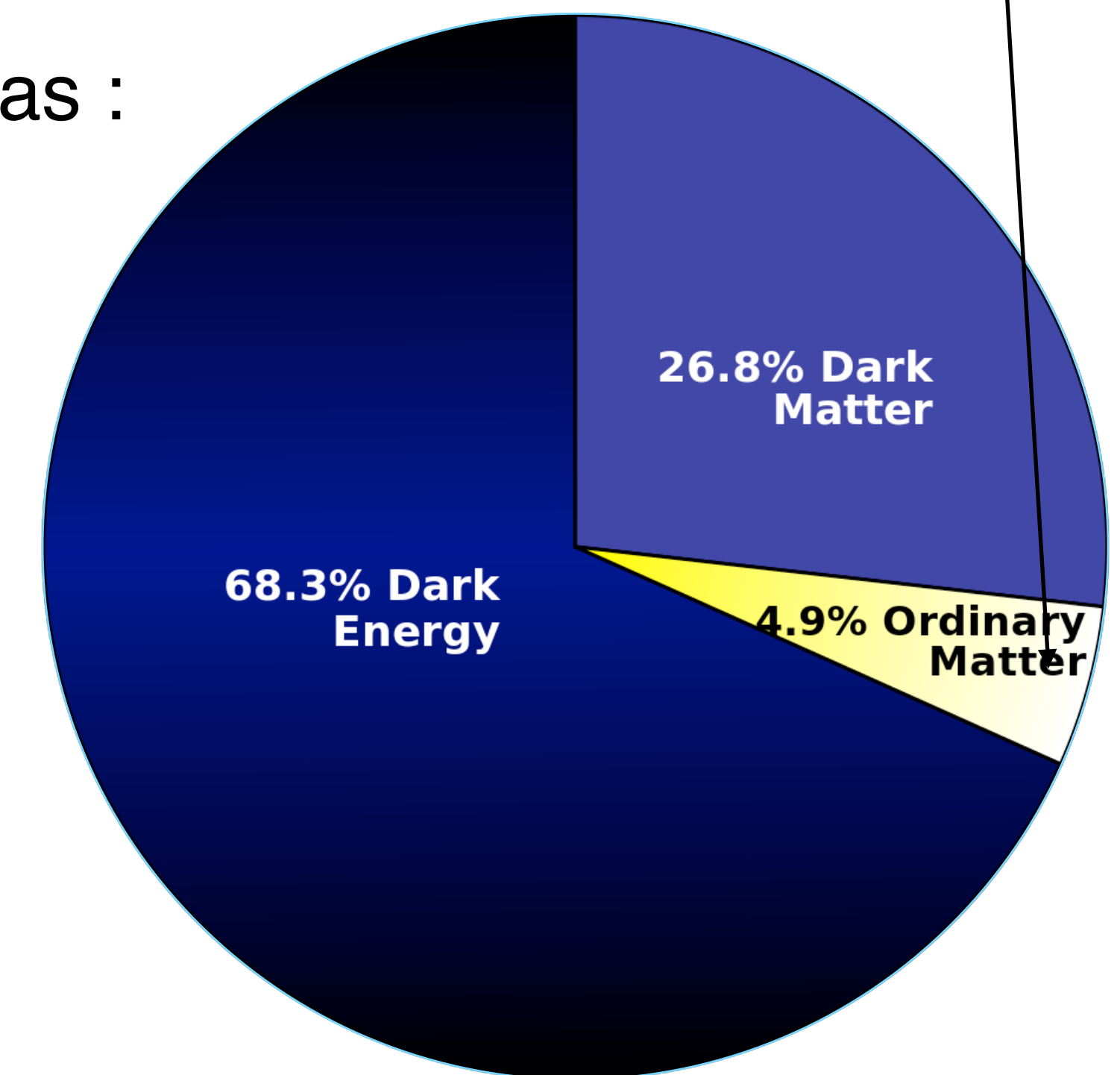
$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$   
0  
1/2  
 **$\nu_\tau$**   
tau  
neutrino

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

# Le modèle standard de la physique des particules

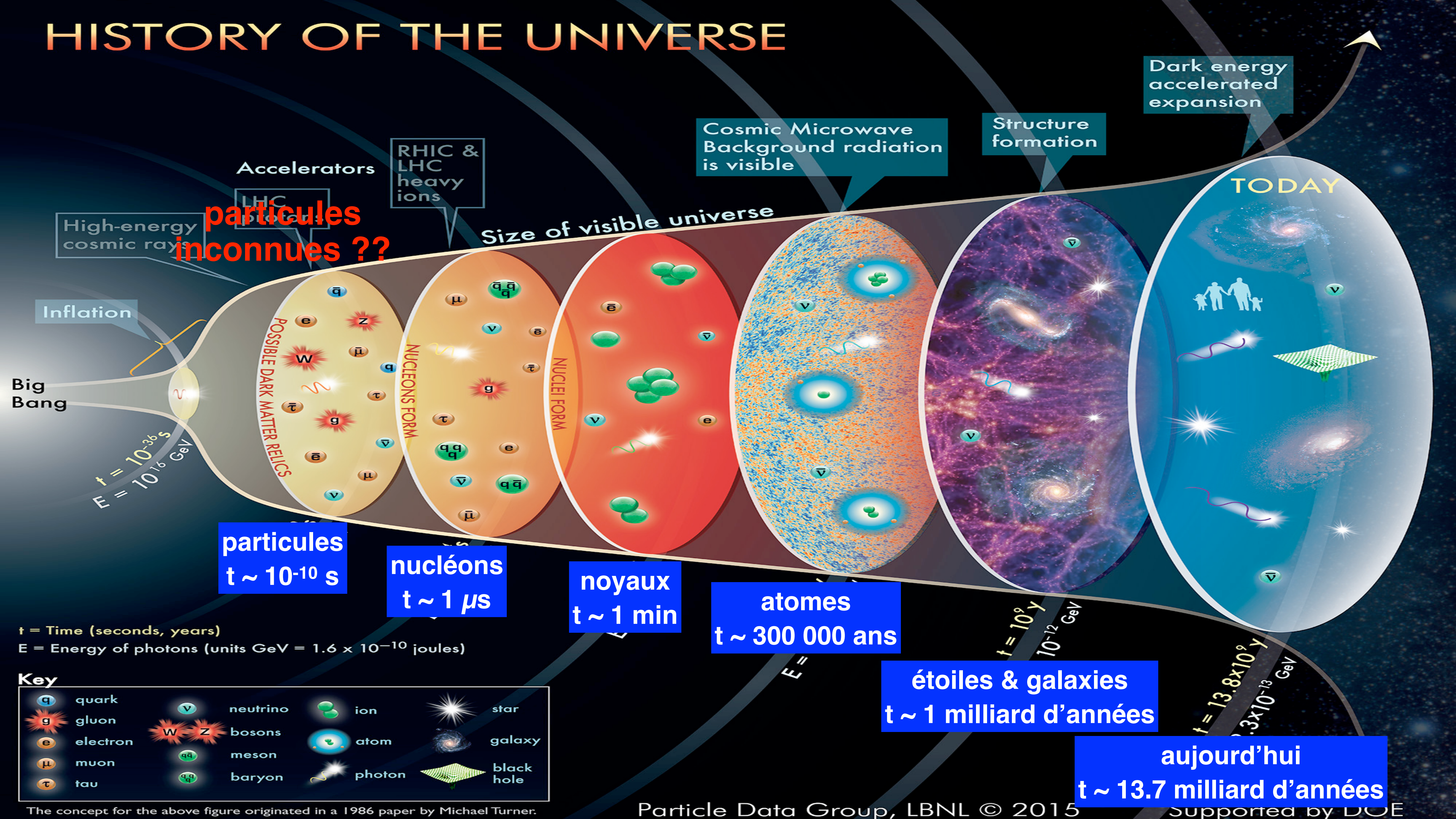
- ▶ Description des particules élémentaires de matière et de leurs interactions : théorie **quantique** et **relativiste**.
  - ▶ Testée avec une **grande précision**.
  - ▶ Mais ce n'est pas la « théorie du tout », par exemple elle n'explique pas :
    - Pourquoi l'anti-matière a disparu ?
    - Pourquoi 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 : ce que vous étudiez en cours de physique-chimie 😊





# HISTORY OF THE UNIVERSE



particules inconnues ??

particules  
t ~ 10<sup>-10</sup> s

nucléons  
t ~ 1 μs

noyaux  
t ~ 1 min

atomes  
t ~ 300 000 ans

étoiles & galaxies  
t ~ 1 milliard d'années

aujourd'hui  
t ~ 13.7 milliard d'années

t = Time (seconds, years)  
E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10<sup>-10</sup> joules)

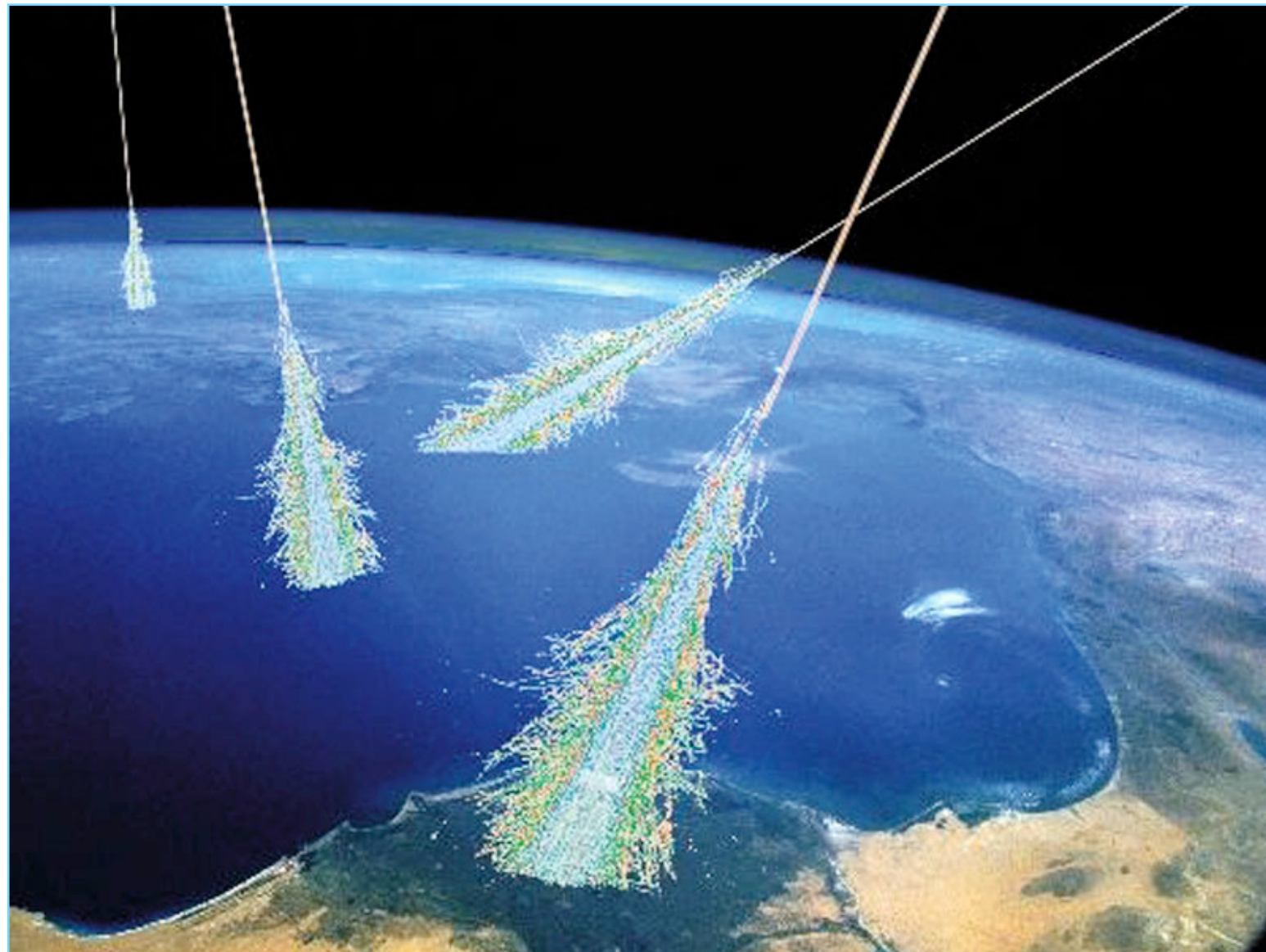
**Key**

quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

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

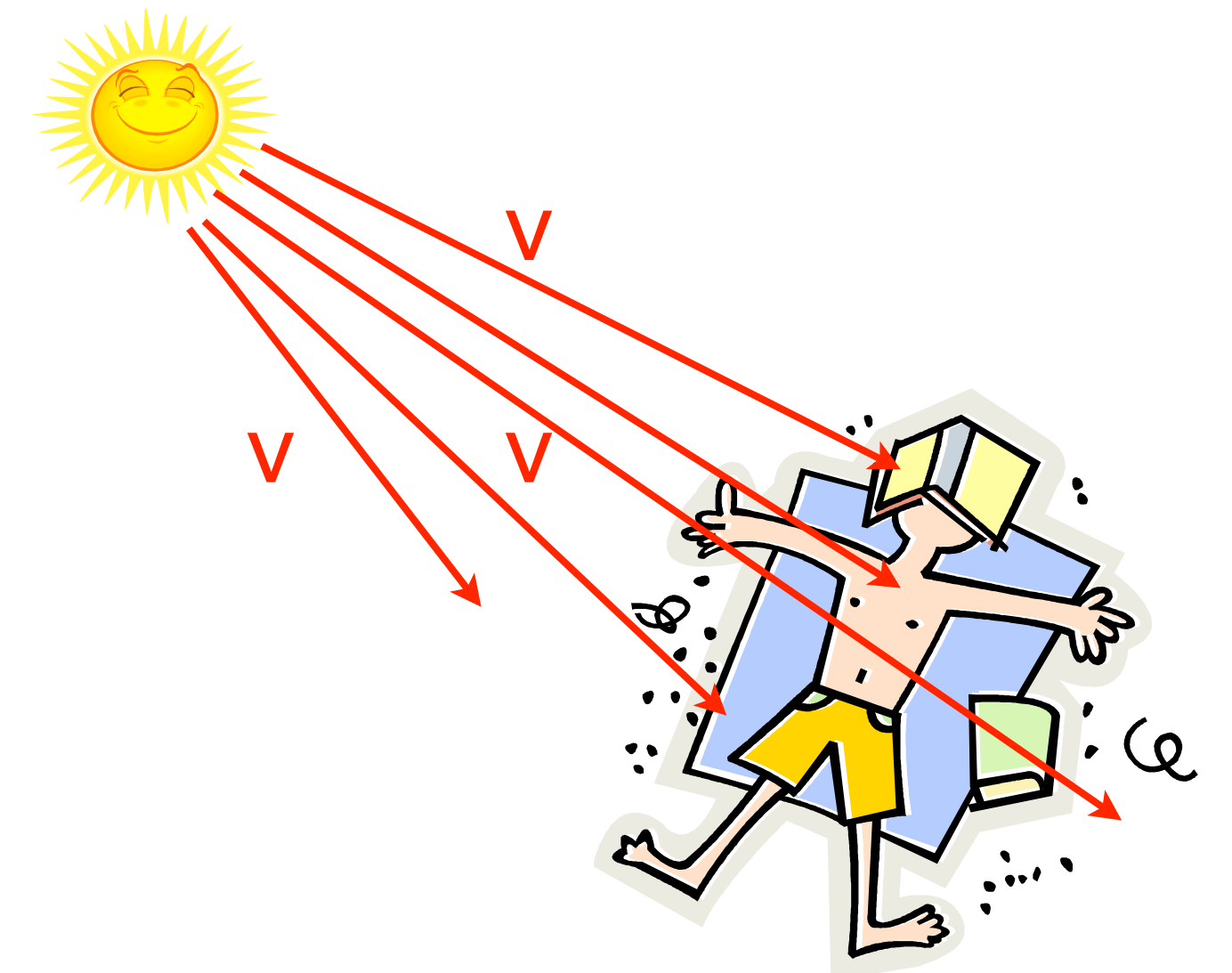
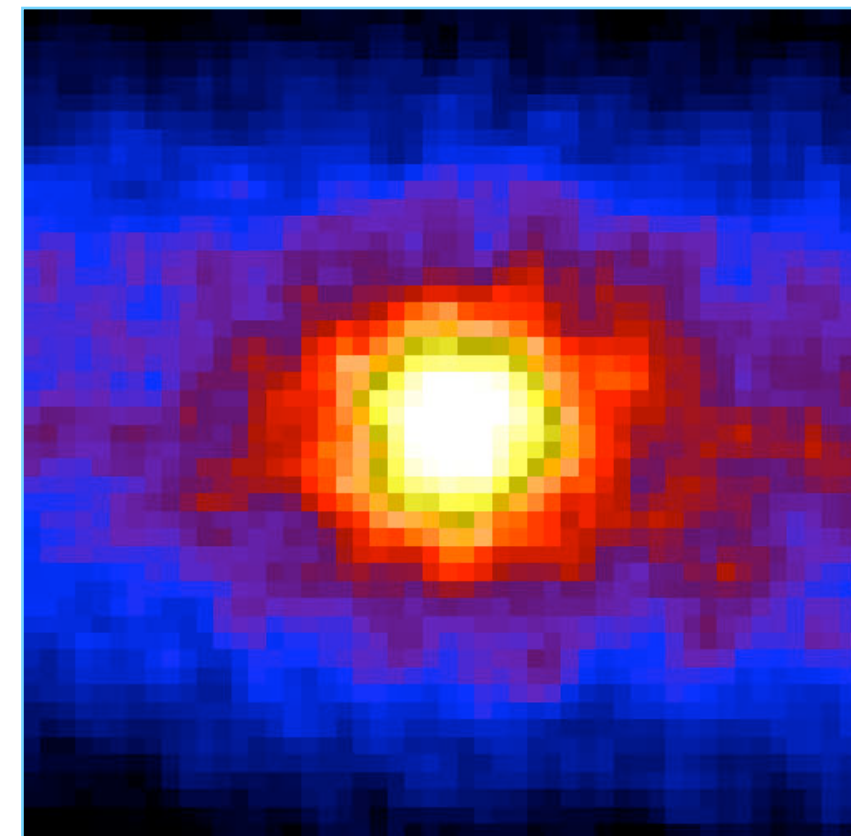
# Les particules élémentaires produites dans l'univers

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



- ▶ Des neutrinos  $\nu$  sont produits par: le soleil, les supernovae, le big-bang, les gerbes de rayons cosmiques, les réacteurs nucléaires, des faisceaux dédiés.
- ▶  $\sim 10^{14}$   $\nu_{\odot}$  nous traversent chaque seconde

Le soleil “vu en neutrinos”



$t \rightarrow W^+ b$

$$BR(t \rightarrow Wb) = \frac{\Gamma(t \rightarrow Wb)}{\Gamma(t \rightarrow Wb) + \Gamma(t \rightarrow Wc) + \Gamma(t \rightarrow Ws)}$$

# Les collisionneurs de particules et l'expérience Belle II



$$= \frac{(0.9745)^2}{(0.0094)^2 + (0.041)^2 + (0.9745)^2} = 99.82\%$$

FCNC



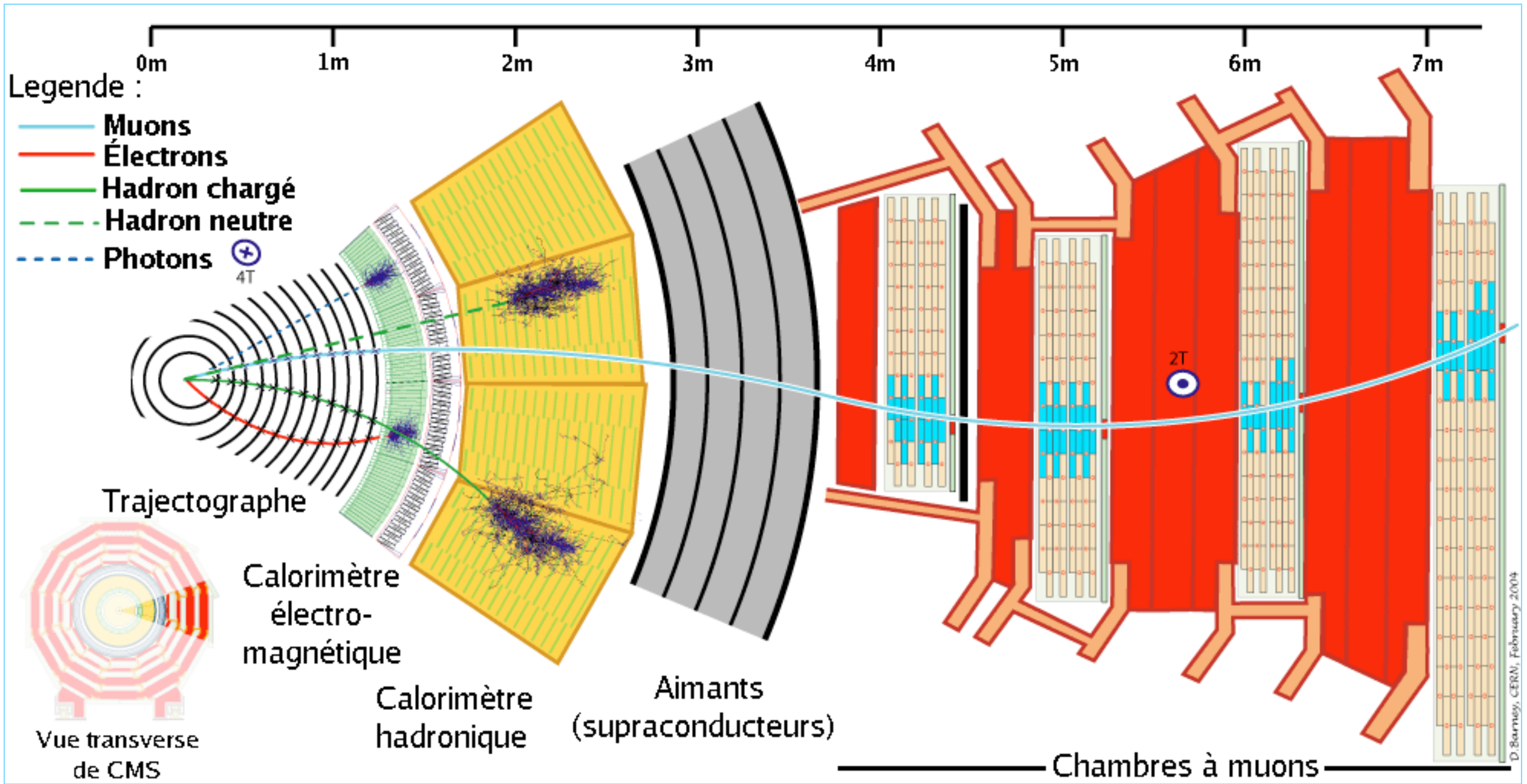
# Le collisionneur LHC (CERN, Europe)

- ▶ Collisions p-p, p-Pb, Pb-Pb à la plus haute énergie de collisions jamais produite : 13 TeV.
- ▶ Fonctionne depuis 2009, à 100 m sous terre.
- ▶ 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.
- ▶ Quatre points de collisions au LHC, instrumentés par 4 très gros détecteurs : ALICE, ATLAS, CMS, LHCb.



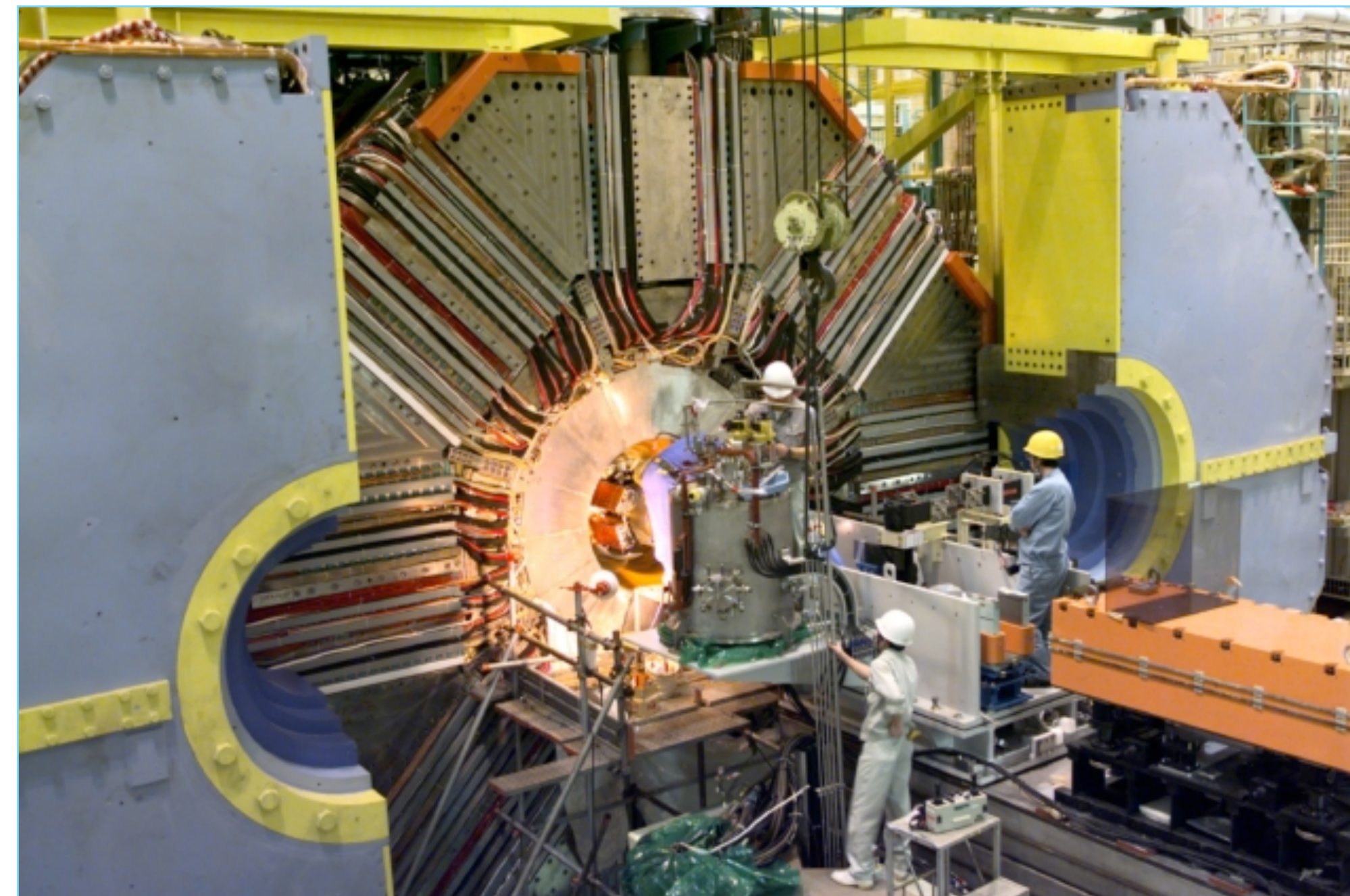
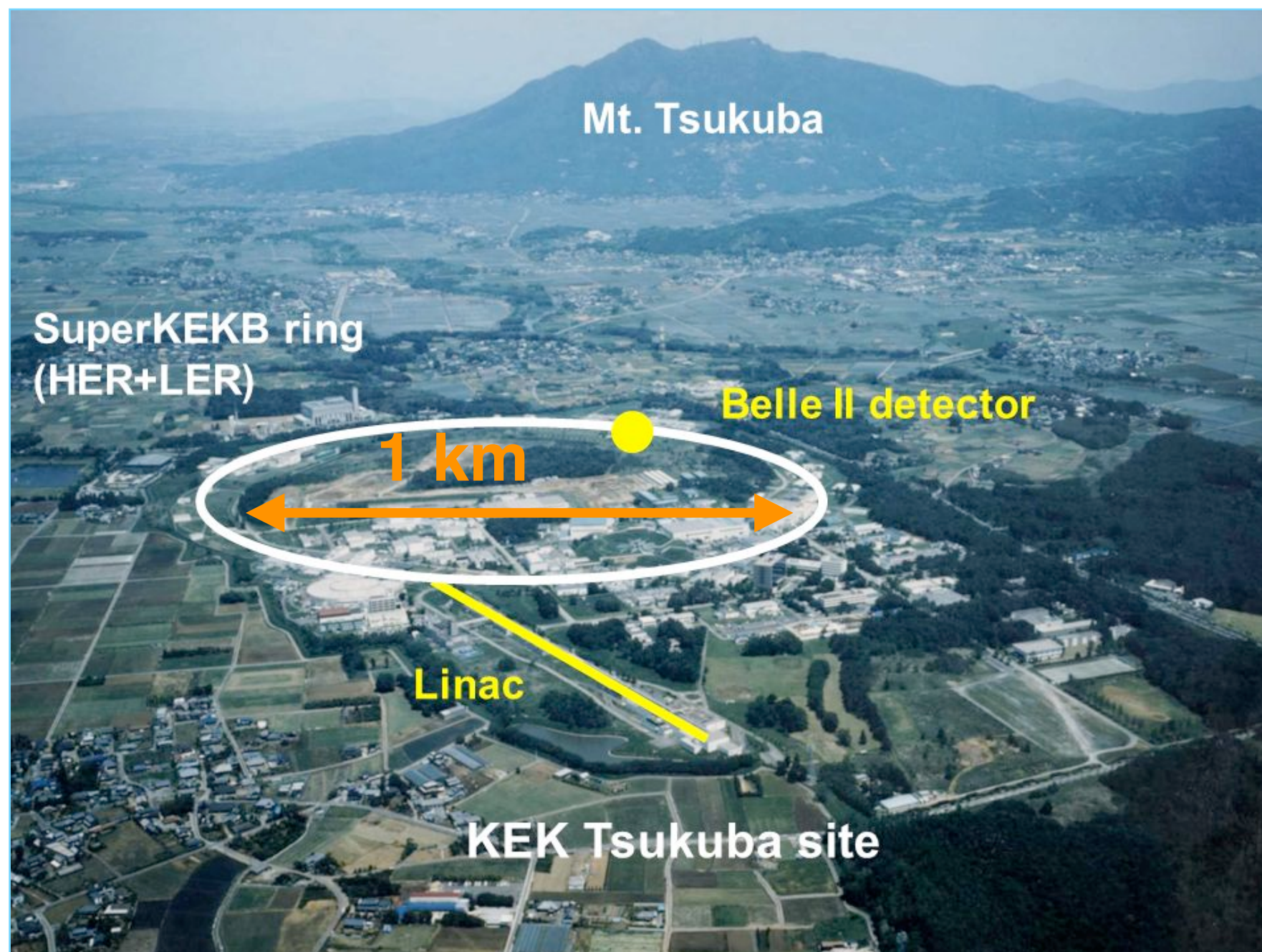
# La détection des particules

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



# L'expérience Belle II

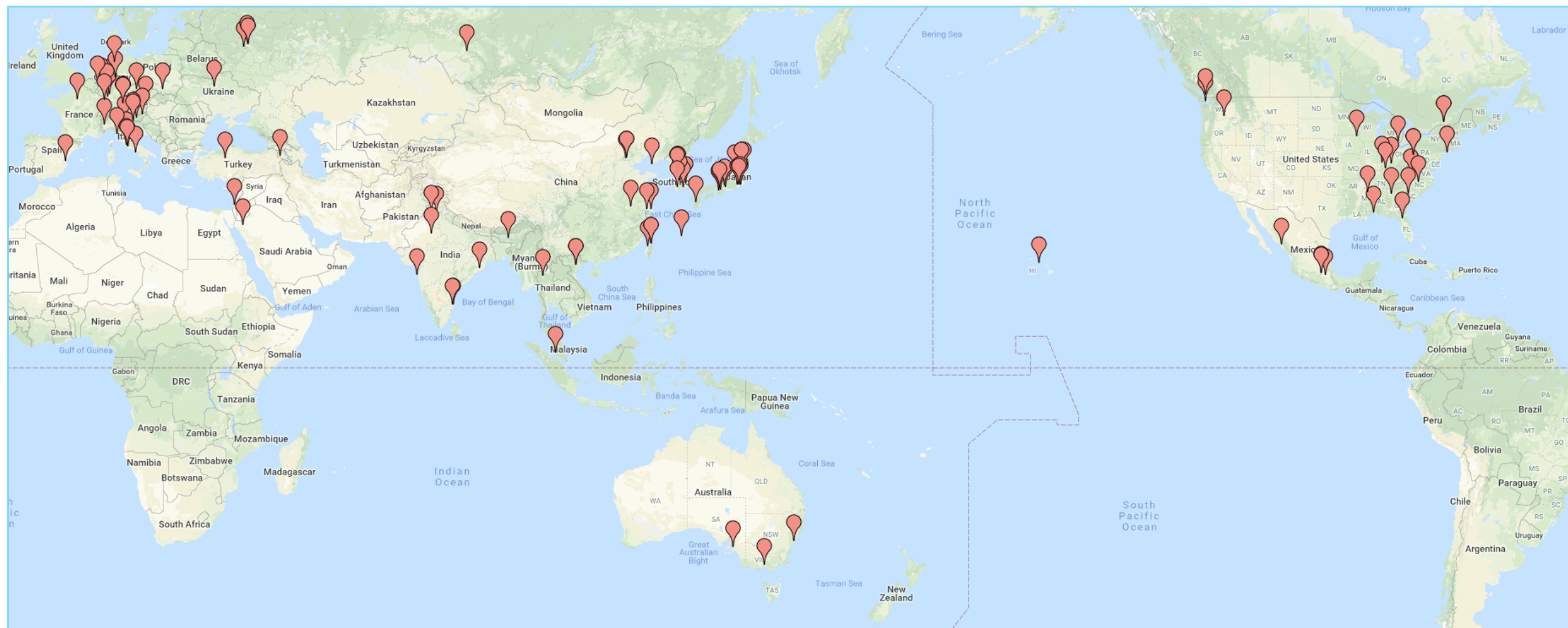
- ▶ Collisionneur  $e^+ e^-$  SuperKEKB : le plus intense au monde, situé au Japon. Ambition : produire 40x plus de collisions par seconde que LHC.
- ▶ Détecteur Belle II : enregistre les collisions de SuperKEKB depuis 2019.
- ▶ But de l'expérience : découvrir des manifestations quantiques de processus inconnus en physique.



Dimensions :  
 $7 \times 7 \times 7.5 \text{ m}^3$

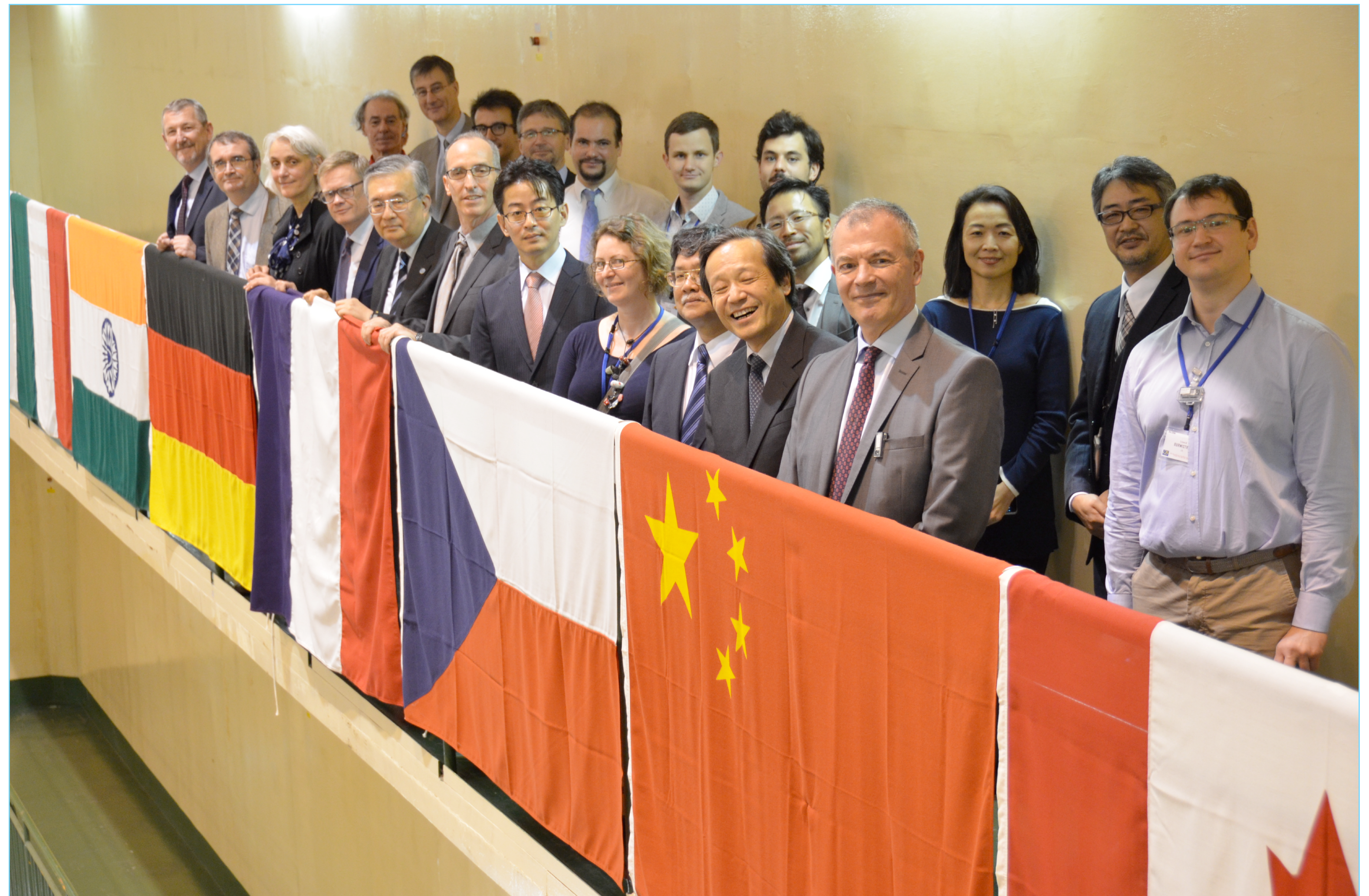
# La collaboration internationale Belle II

- ▶ ~ 700 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.





# Souvenirs de Belle II



ありがとうございます



Cosmology

DARK MATTER

Neutrino ~~CP~~

Proton Decay

AXIONS