

Introduction à la physique des particules et aux expériences du LHC

Zaida Conesa del Valle
IJCLab (CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay)
Masterclass ALICE, 24 mars 2026



Un Univers de particules et d'interactions...



Brève introduction à la physique des particules

Préambule

- **La Physique Nucléaire et des Hautes-Energies :**
 - **Cherche à comprendre de quoi est faite la matière**
 - ses constituants
 - les interactions entre constituants
 - **Avoir une description du monde qui nous entoure (une interprétation)**
 - **Ces connaissances peuvent aboutir à des applications (ex: médecine nucléaire, sécurité)**
 - **Développements technologiques annexes :**
 - développement d'électronique, de détecteurs
 - Web !
 - **Résultats heurtent notre sens commun.**
Domaine d'application en dehors de l'expérience quotidienne.



Un univers de particules...



... une question de taille

A savoir: les propriétés chimiques des éléments dépendent des **interactions** entre les constituants

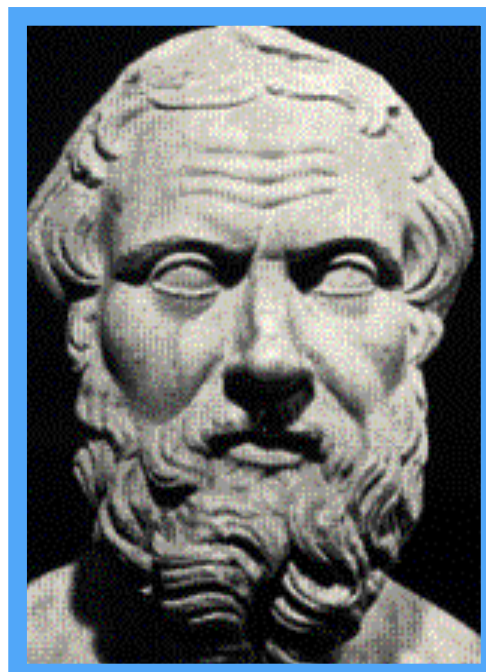
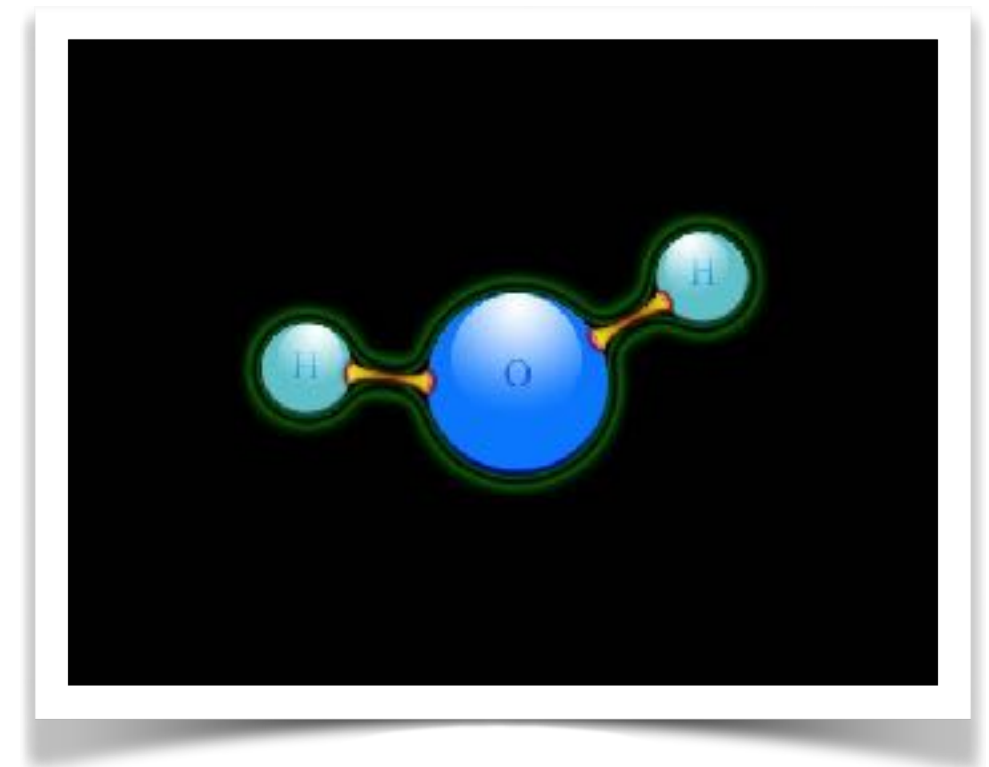


Commençons par un peu de chimie



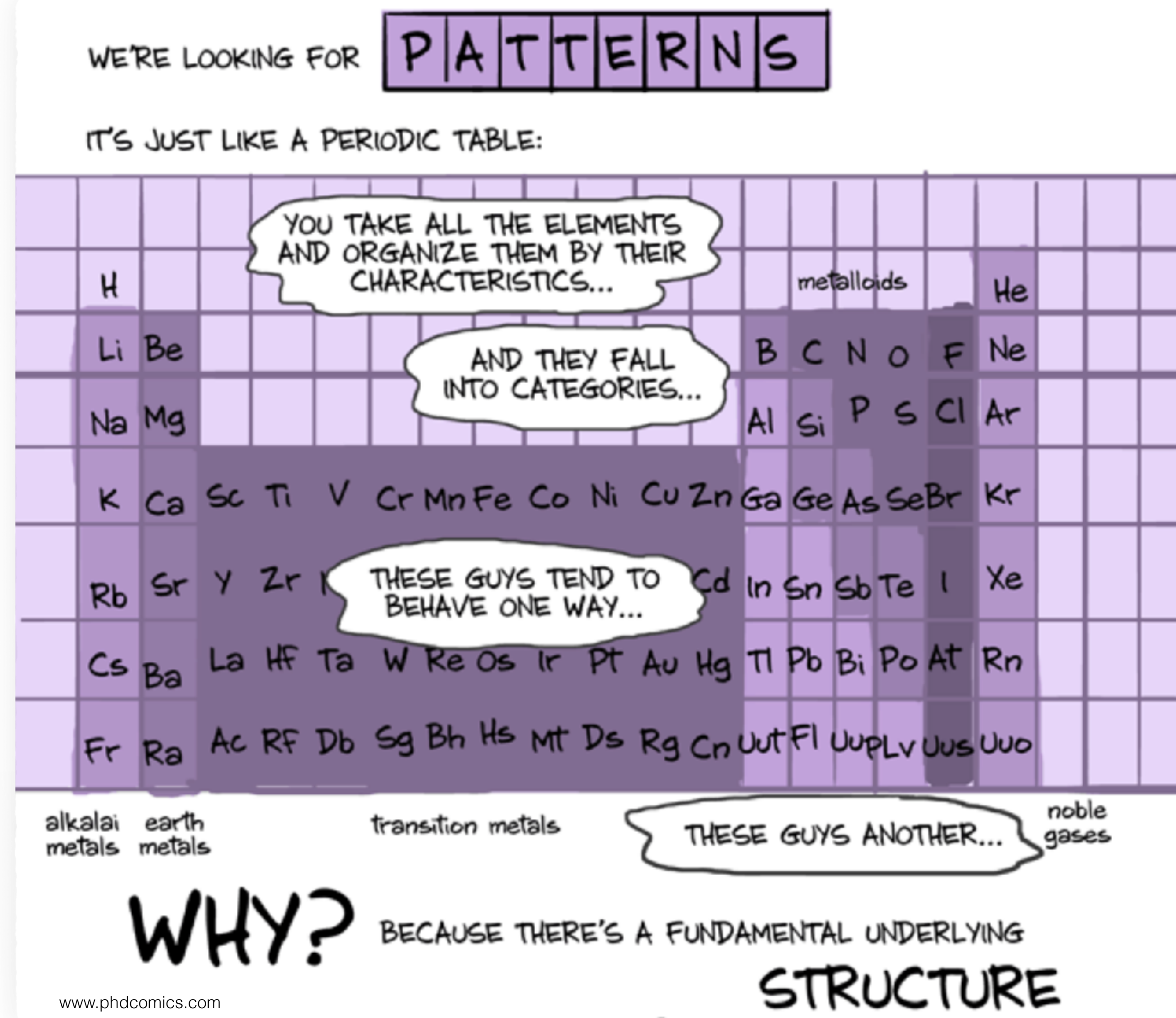
- Prenons une goutte d'eau, la plus petite partie sera une **molécule** d'eau (H_2O)

- Cette molécule peut être décomposée en éléments plus petits : **les atomes**. Dans notre exemple 2 d'hydrogène pour 1 d'oxygène

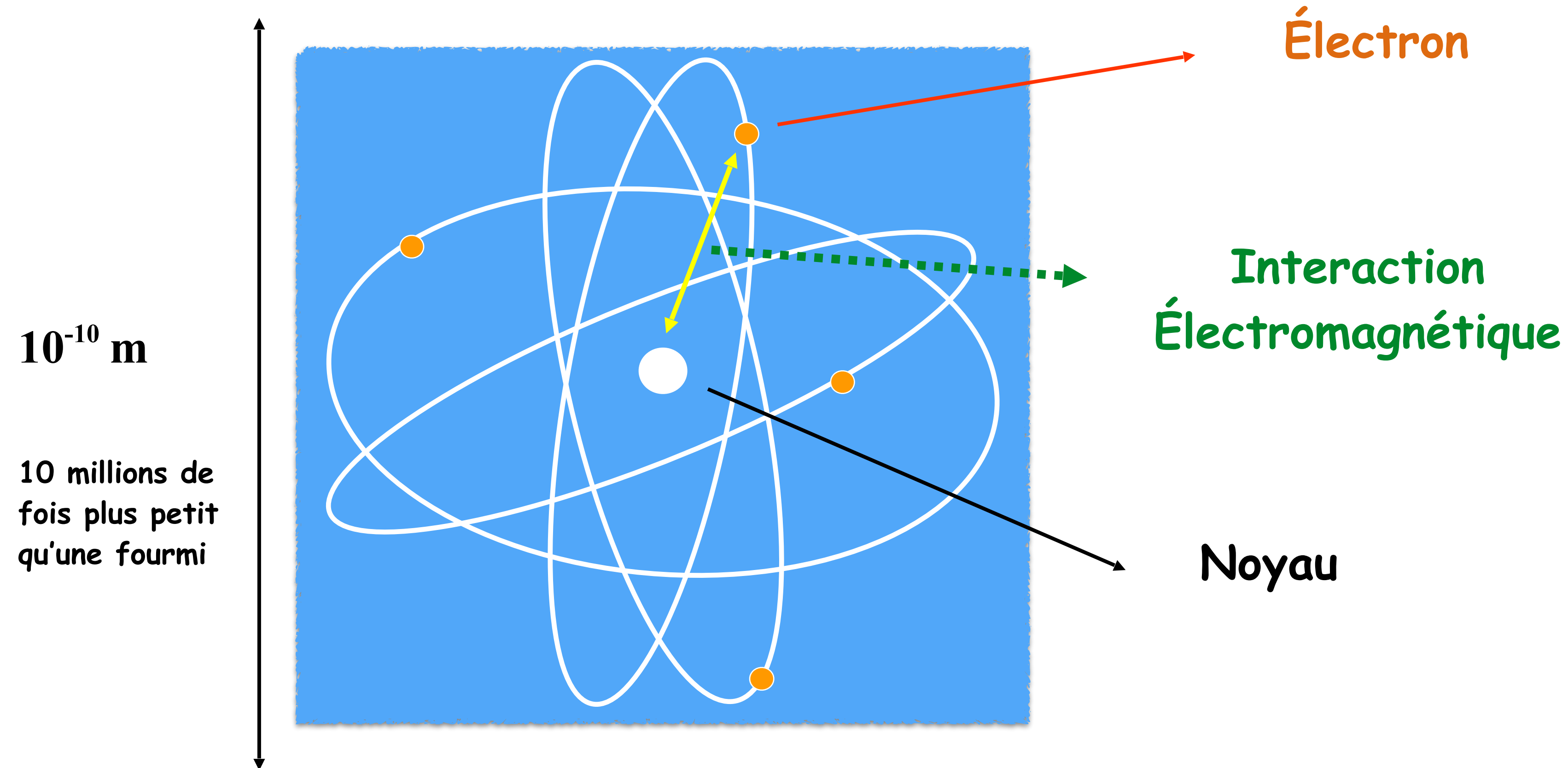


- Démocrite (-500 av. JC):
Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide : **atomos**

Le tableau périodique des éléments

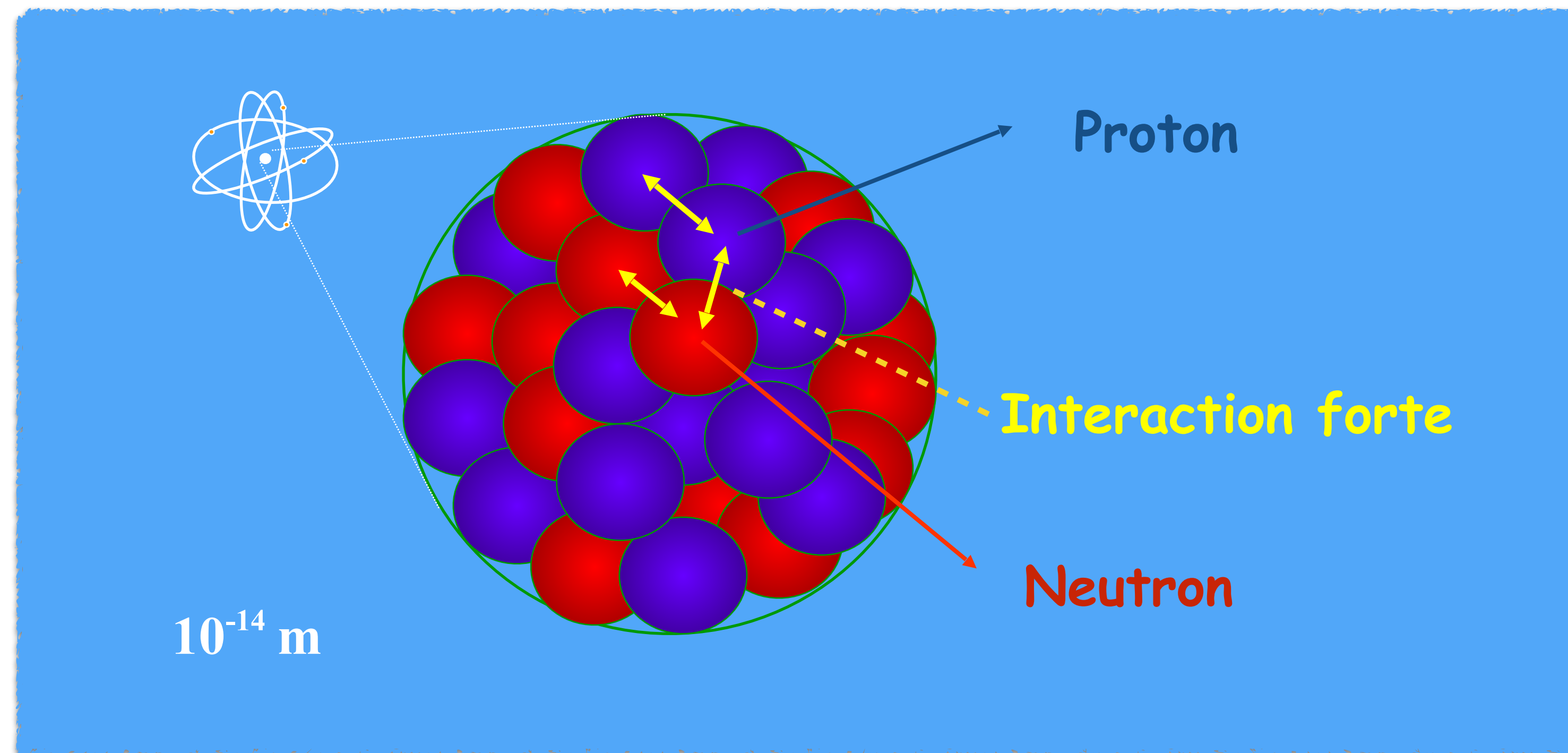


L'atome



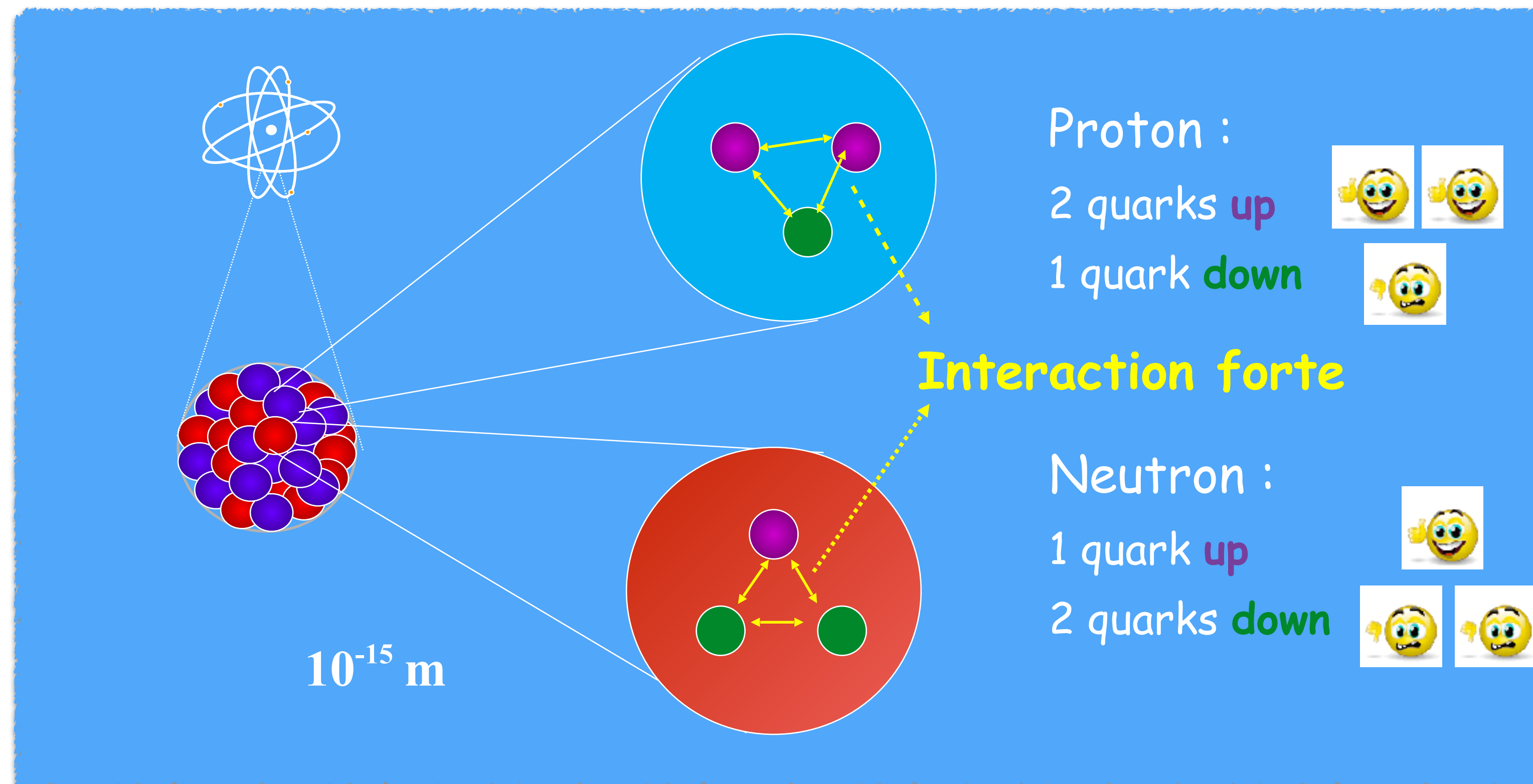
- L'atome est composé d'un noyau chargé positivement et d'**électrons** chargés négativement et qui gravitent autour du **noyau**.

Le noyau de l'atome



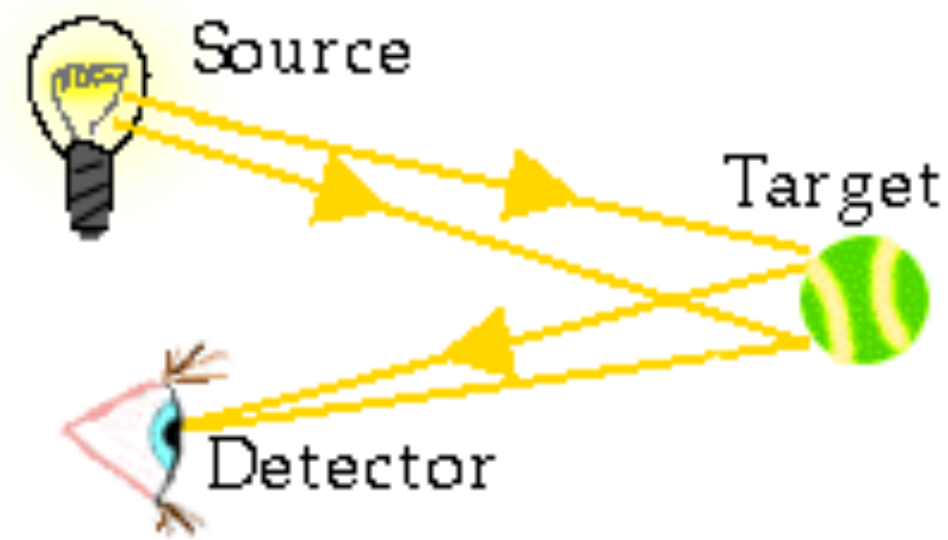
- Le noyau de l'atome est composé par des **hadrons**, des **protons** (chargés positivement) et des **neutrons** (de charge neutre).

Les protons et neutrons

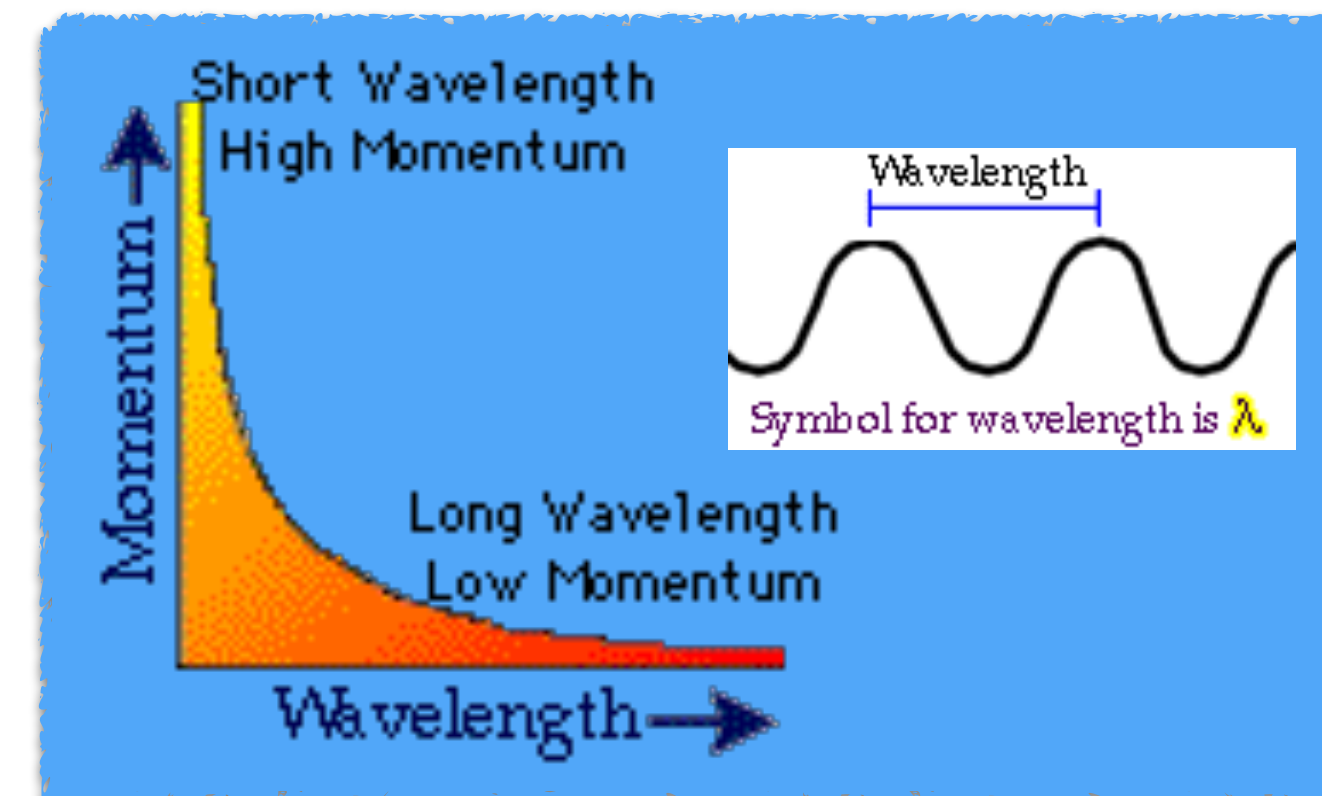
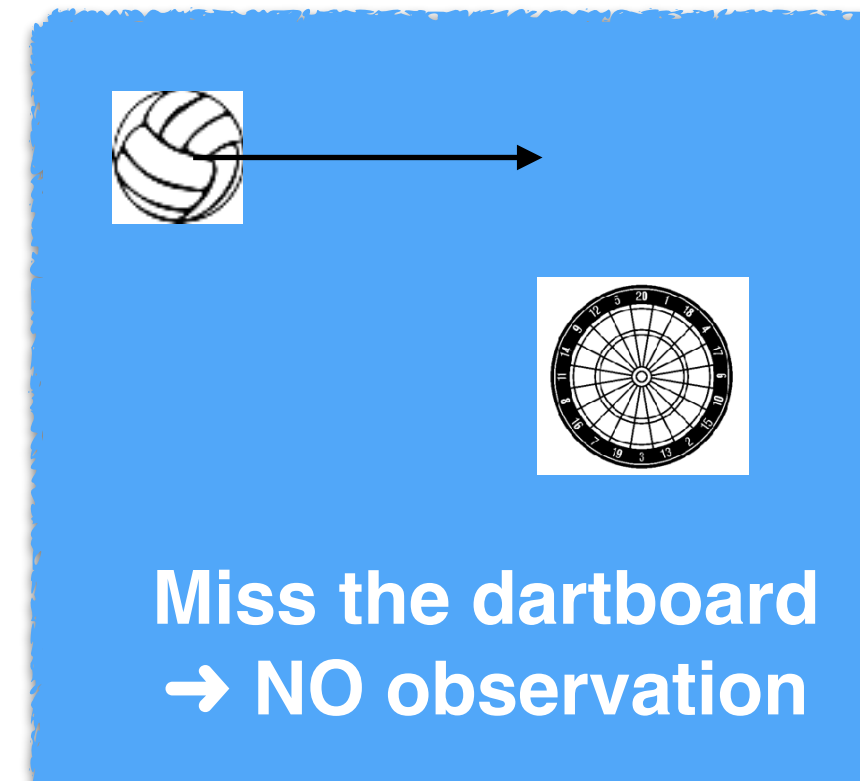
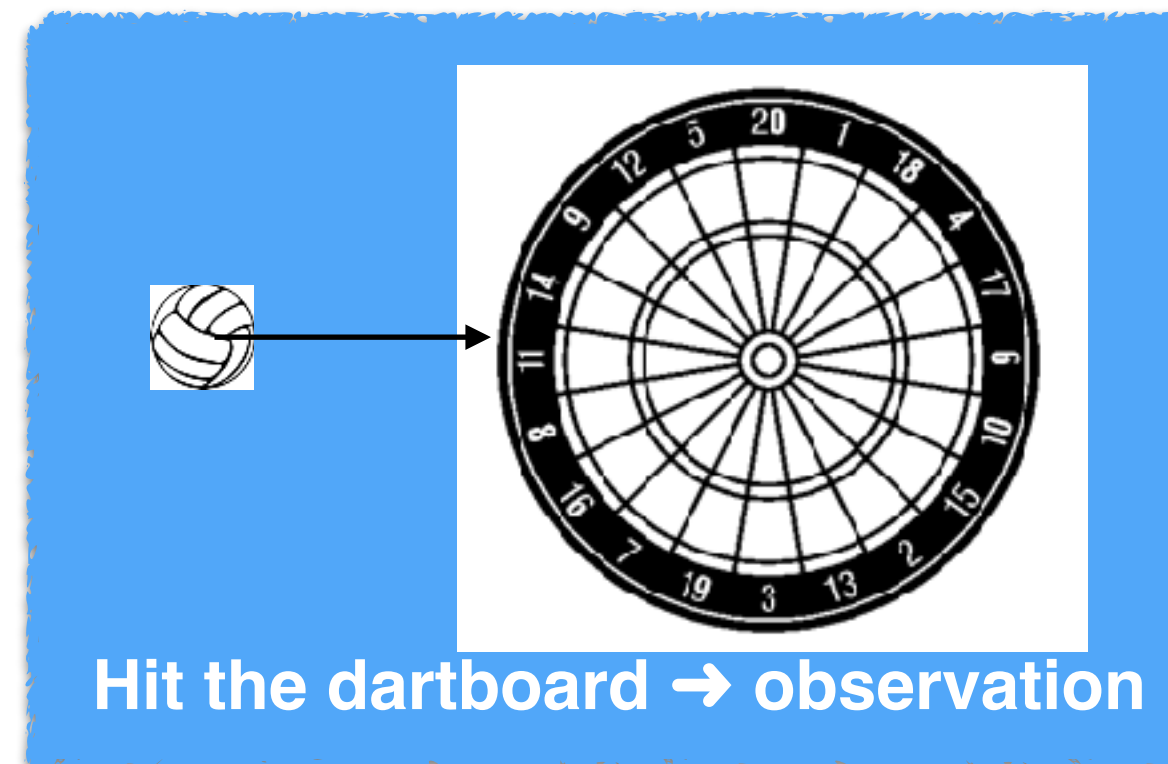


- Les hadrons sont particules composés par de **quarks**.

Comment les étudier s'ils sont si petits?



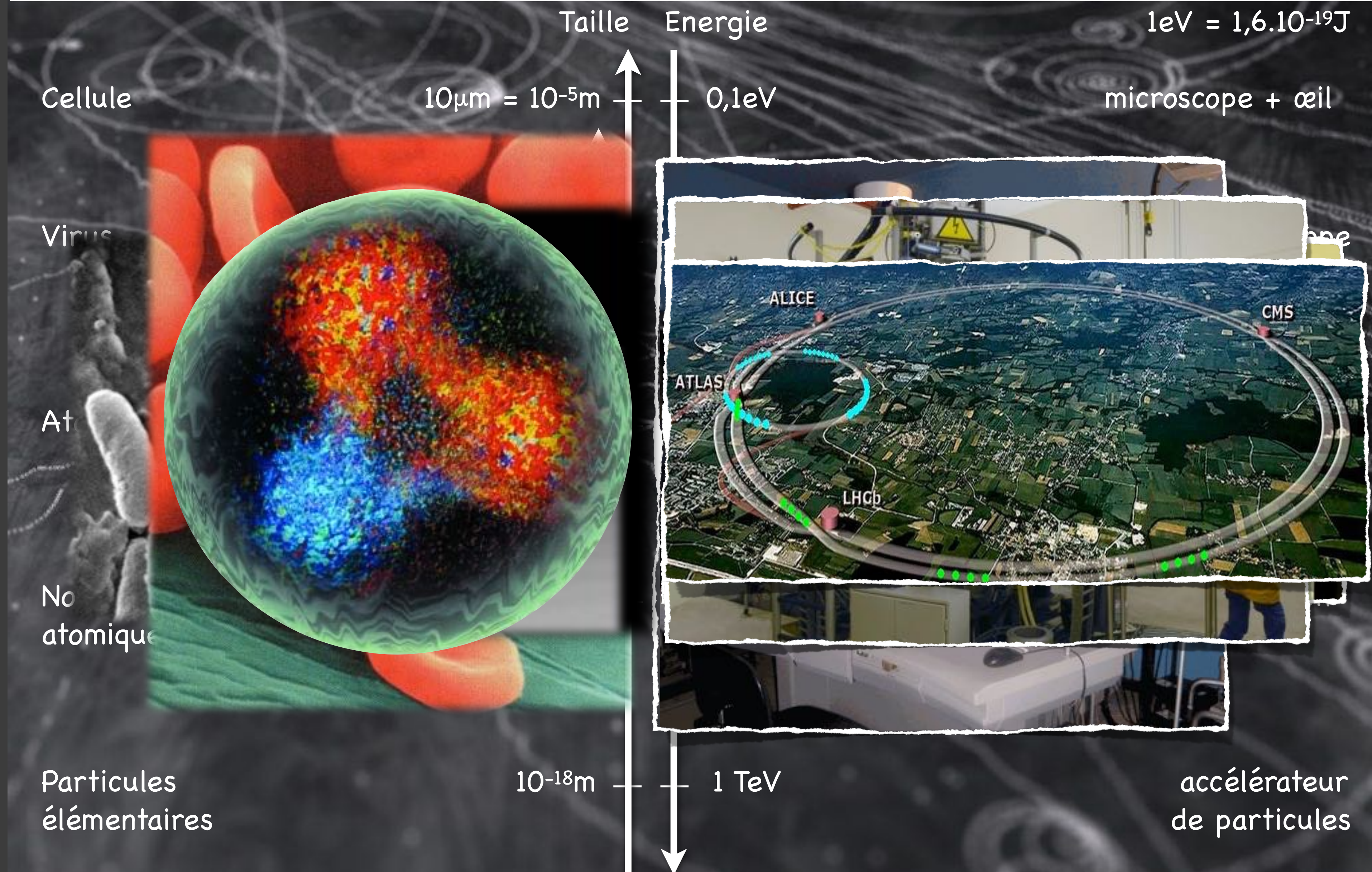
- Comment: une **source** (e.g. lumière) pour visualiser la **cible** (objet) qu'on observe avec un **détecteur** (e.g. l'oeil).



- Mais... la **longueur d'onde** de la source doit être plus petite que celle de la cible. Au plus l'impulsion (énergie) de la particule est grande, plus petite sera sa longueur d'onde.

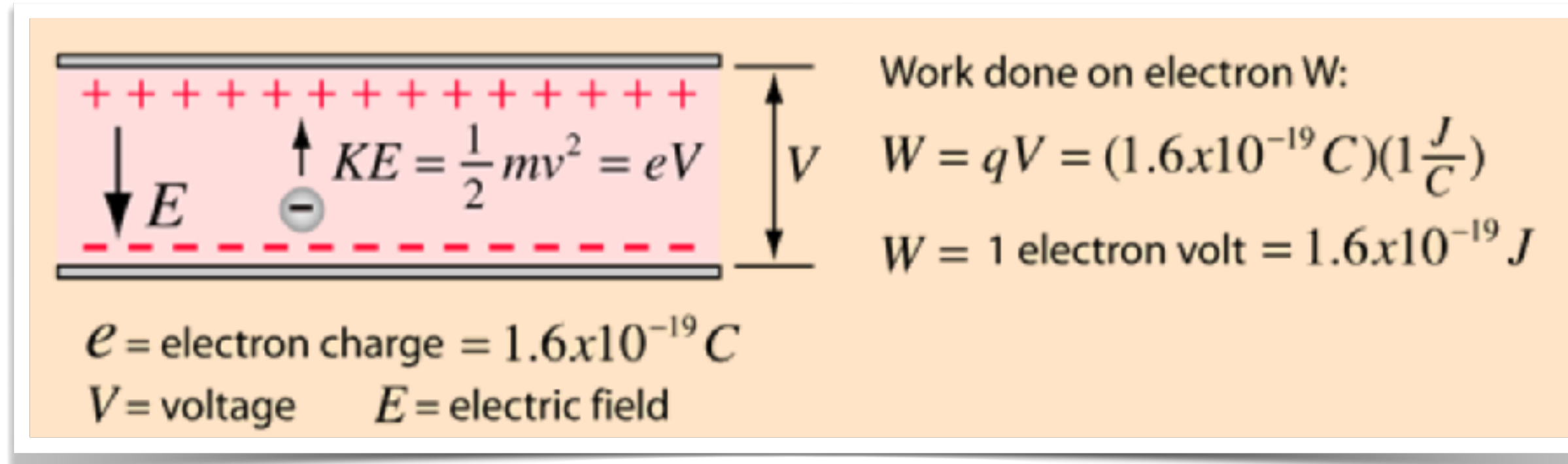


Échelles de taille et d'énergie



Quelques concepts en physique de particules

- **L'énergie** est mesurée en **électron Volt**.
- 1 électron Volt (**eV**) = énergie donnée à un électron en l'accélérant avec une différence de potentiel électrique de 1 Volt.
- Pour la physique des hautes énergies en multiple de l'eV : keV (10^3 eV), MeV (10^6 eV), GeV (10^9 eV), TeV (10^{12} eV)



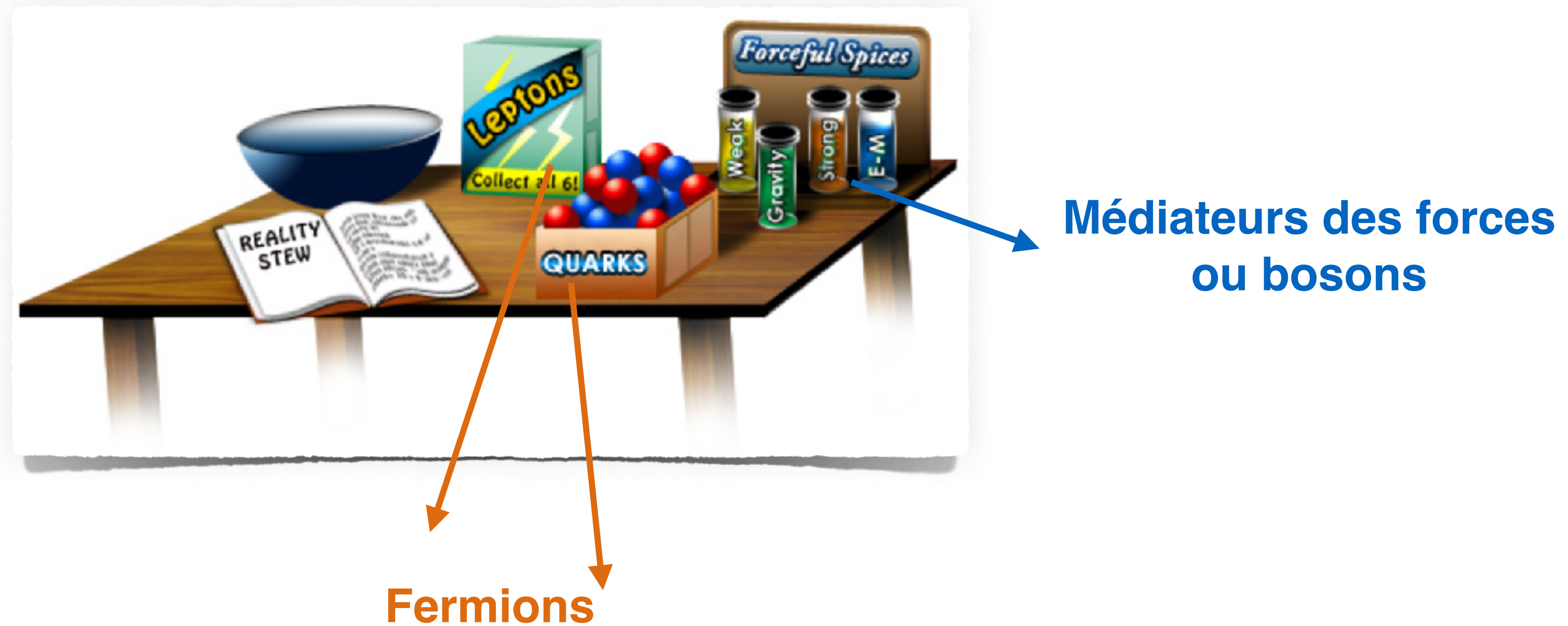
- Qq chiffres:
 - $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$
 - $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{12} \text{ Joules} = 1.6 \times 10^{-7} \text{ Joules}$
 - **1 TeV = énergie cinétique d'un moustique de 2 mg lancé à 0.4 m/s !**
 $\frac{1}{2} m v^2 = 1.6 \times 10^{-7} \text{ Joules}$ ($m = 2 \times 10^{-6} \text{ kg}$, $v = 0.4 \text{ m/s}$)



La taille typique du moustique est d'environ 5 mm.
Le proton est 2 000 milliards de fois plus petit.

- Oui, mais **au LHC**, cette énergie est concentrée dans un volume extrêmement petit :
le proton ($r = 0.8 \text{ fm} = 0.8 \cdot 10^{-15} \text{ m}$) soit un volume de 150 000 fois plus petit que celui d'un atome d'hydrogène ($r = 53 \text{ pm} = 53 \cdot 10^{-12} \text{ m}$) et 2 000 milliards de fois plus petit qu'un moustique ($\sim 5 \text{ mm}$)
→ **la densité d'énergie est gigantesque !**

Le modèle standard en bref



- La matière est composée par des “**briques**” élémentaires ou **fermions** (soit des quarks ou des leptons) qui interagissent à travers des particules **médiateurs des interactions** ou **bosons**.

Les “briques” élémentaires (zoologie)

Les fermions («briques» élémentaires) :

et leurs anti-particules

Les leptons :

Les quarks :

	Electron	Muon	Tau	Up	Charm	Top	
$Q = -e$							$+\frac{2}{3} e$
$Q = 0$							$-\frac{1}{3} e$
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Down	Strange	Beauty	
	masse →			masse →			

Les bosons (média-teurs des interactions ≈ «ciment») :

Electro-Magnétisme :

Photon



Interaction Faible :

Z^0



$W^\pm$



Interaction Forte :

Gluons

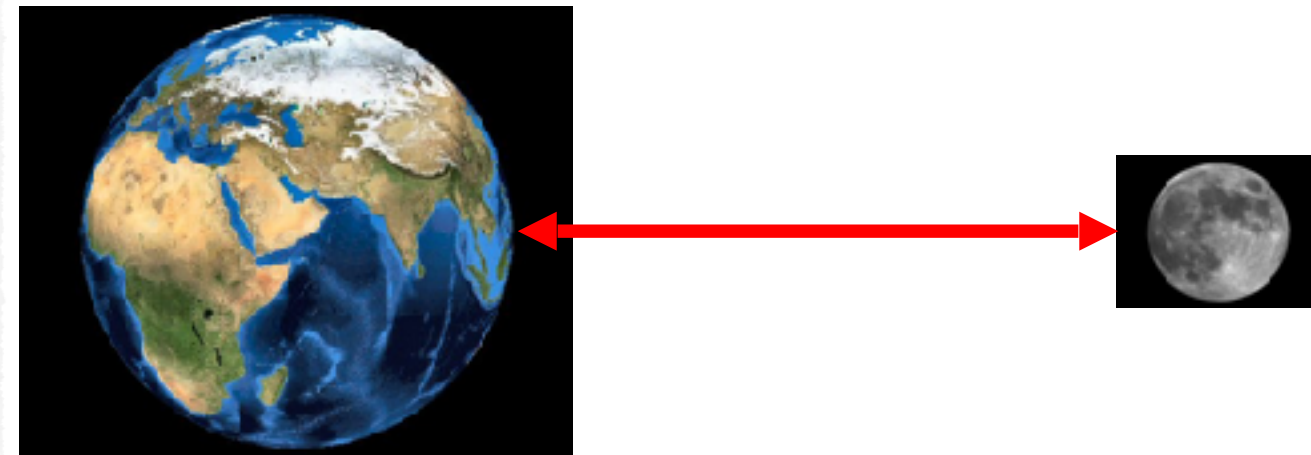


Boson de Higgs

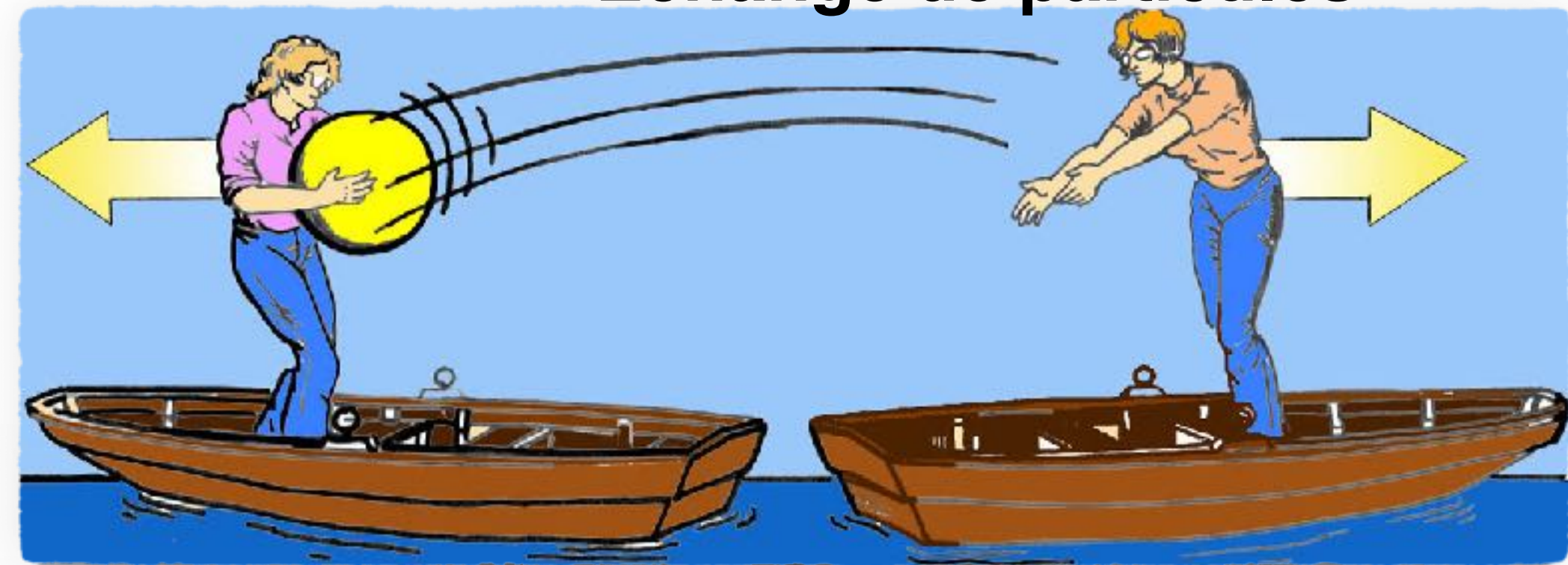


Les interactions

Vision « classique » :
Action instantanée à distance



Vision « moderne » :
Échange de particules

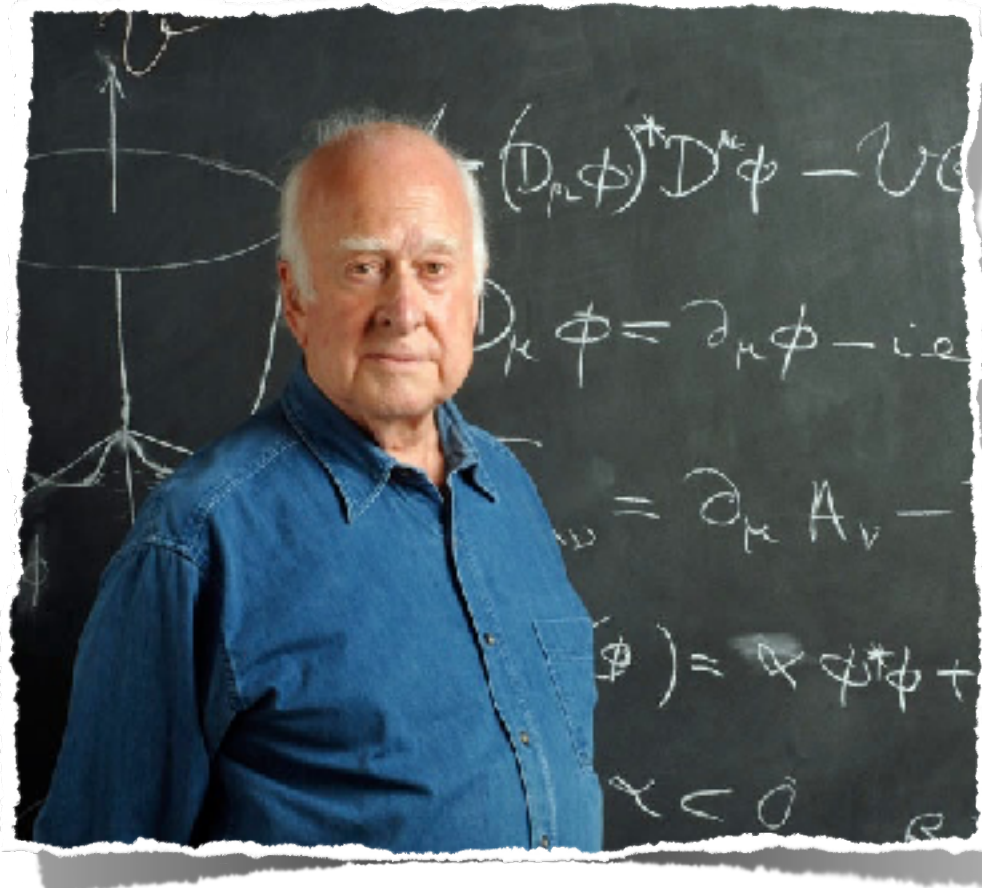


Les interactions :	Intensité	Médiateur	Portée	Domaine
Interaction forte	1	Gluons 	1 fm	Noyau, proton, neutron
Electromagnétisme	$\sim 10^{-2}$	Photon 	∞	électricité, chimie, lumière
Interaction faible	$\sim 10^{-6}$	Z^0  $W^\pm$ 	< 1 fm	Radioactivité β , fusion soleil et Iter
Gravitation	$\sim 10^{-38}$	Graviton ???	∞	Chute des corps, Trous Noirs

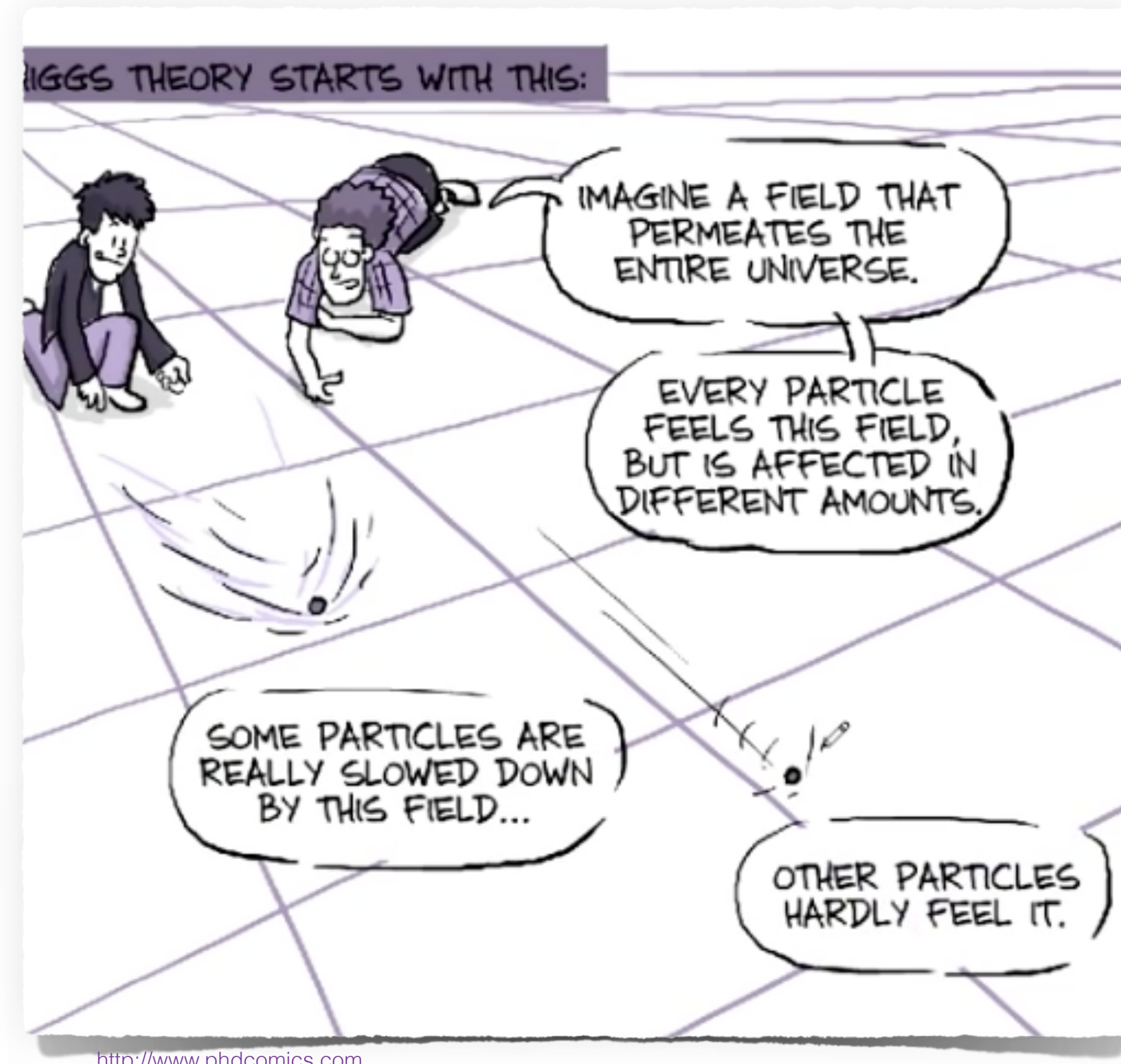
Le boson de Higgs



- Dans le modèle standard les particules ont une masse nulle, ... mais on sait que ce n'est pas vrai!
- Le **boson de Higgs** explique l'origine de la **masse** des particules.



Peter Higgs



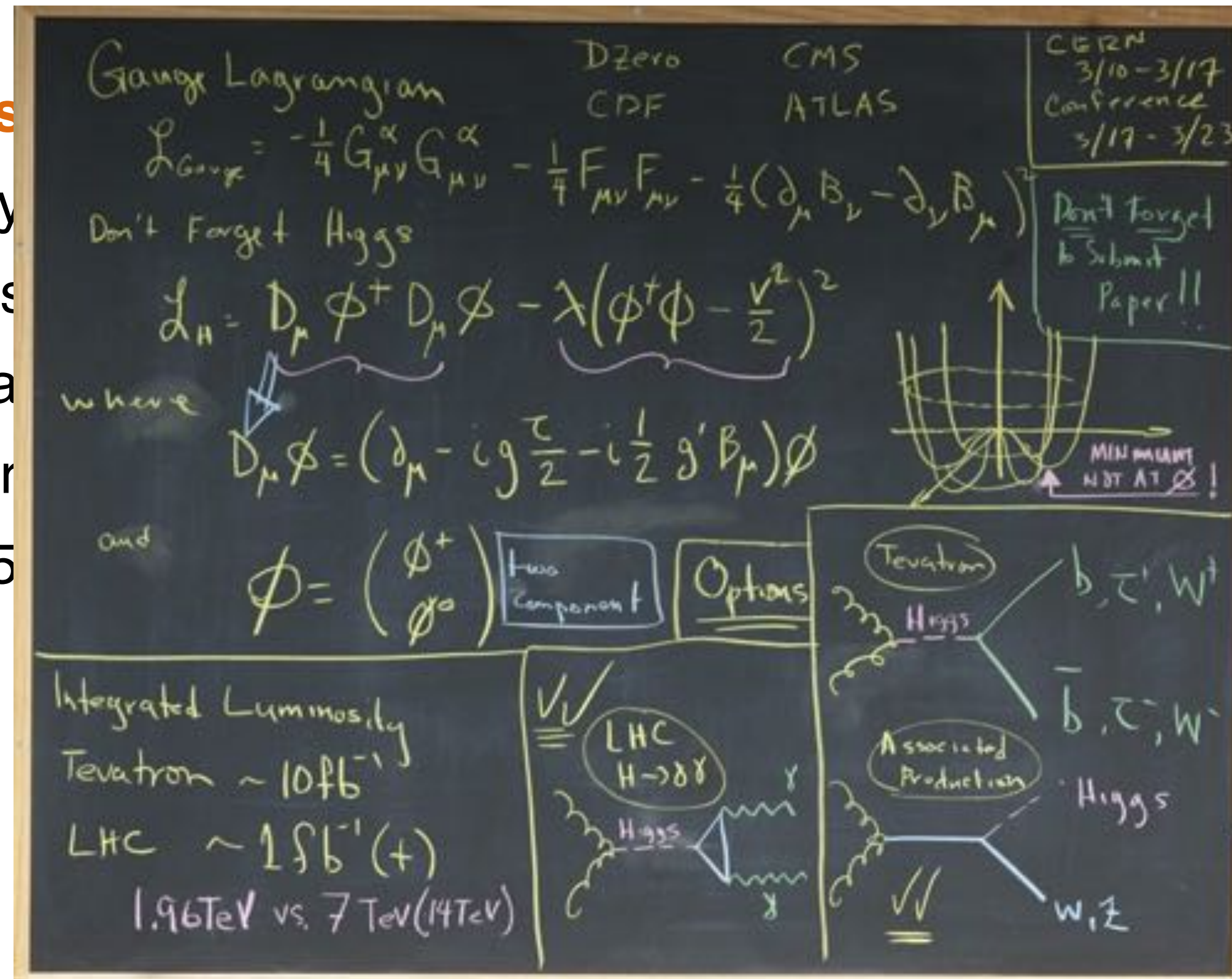
Insuffisances du modèle standard

- **Grand succès du modèle standard :**

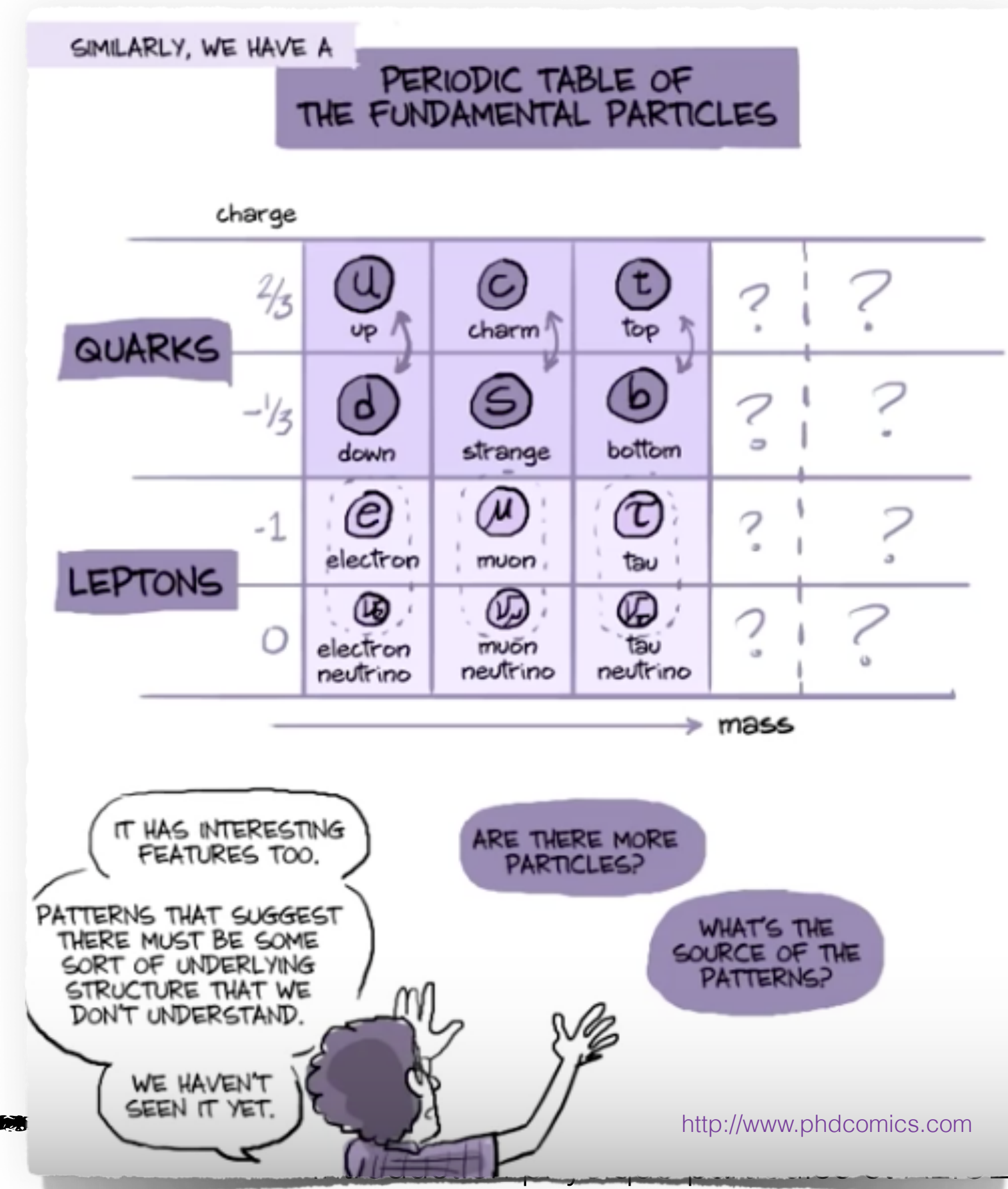
- Pouvoir prédictif (masses W et Z, nouvelles particules, etc.)
- Grande précision
- Pas encore mis en défaut

- **Mais**

- il y
- les
- pa
- Gr
- 25



es ?



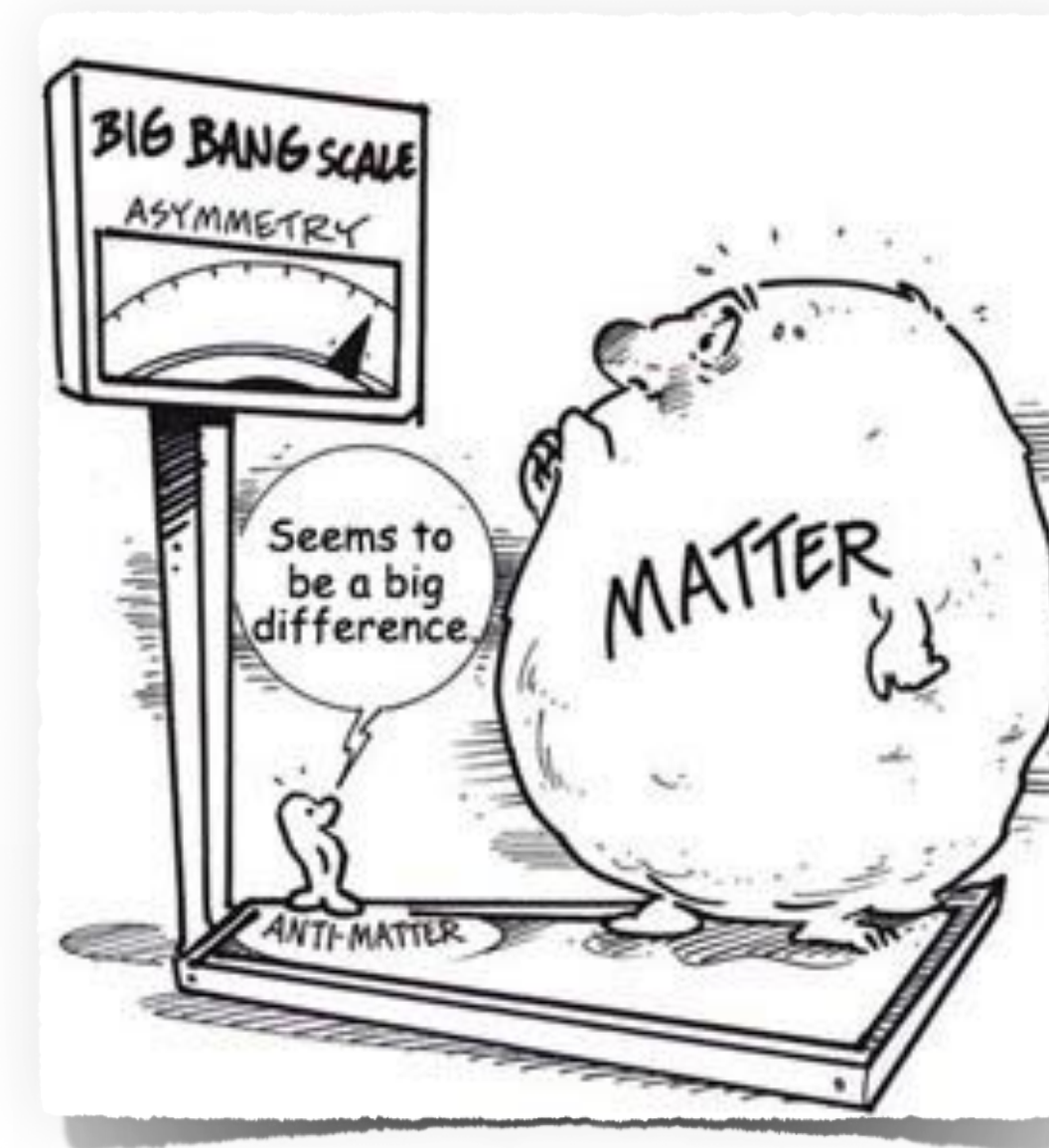
L'univers

- Le modèle standard ne décrit que 4% de l'univers connu (visible)



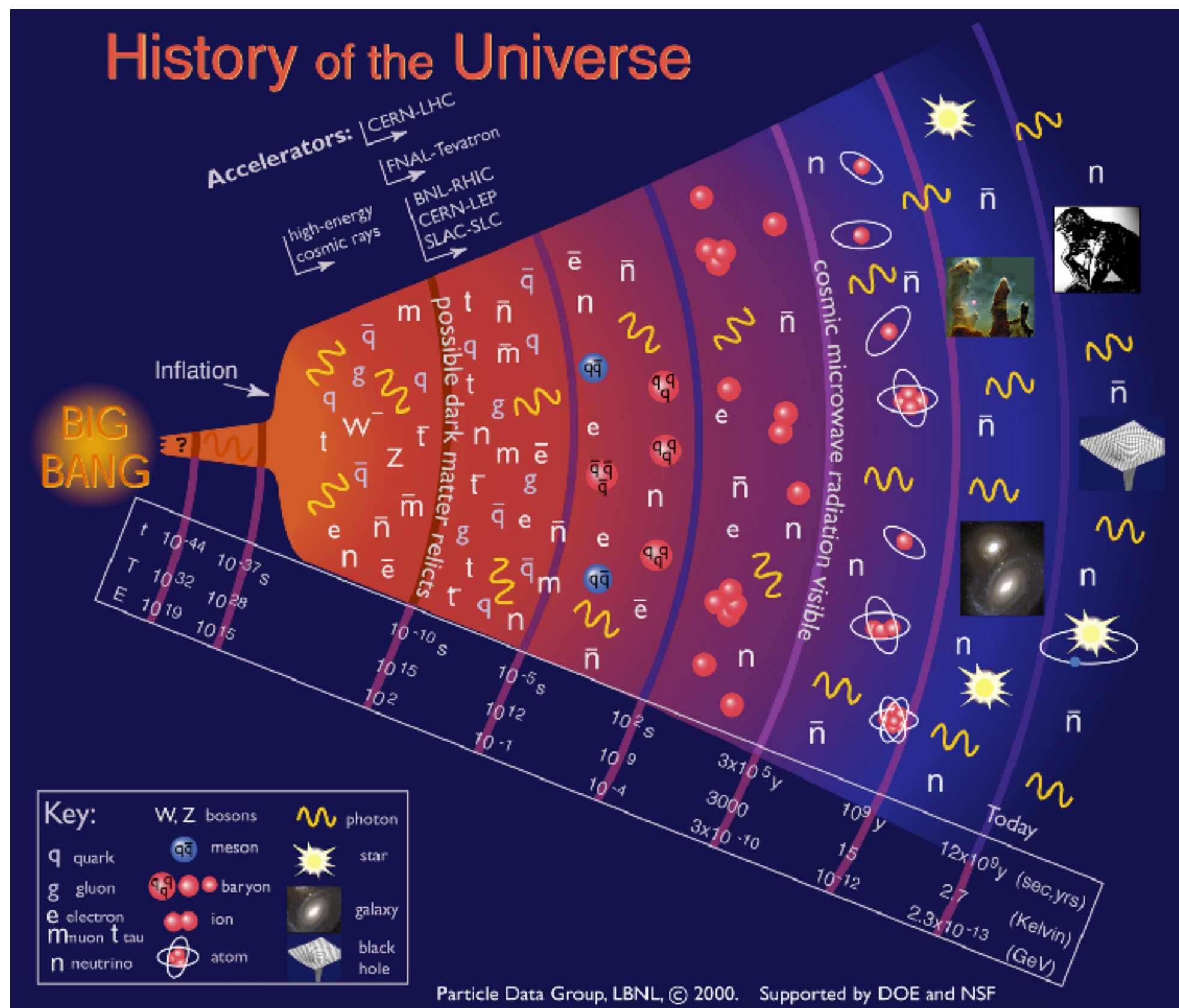
L'énigme de l'asymétrie matière-antimatière

- Le Big Bang devrait avoir créé la même quantité de matière et antimatière dans l'Univers Primordial. Pourtant, aujourd'hui, tout ce que nous percevons, est constitué presque intégralement de matière.
- **Pourquoi il y a t'il plus de matière que d'antimatière?**



La matière juste après le Big Bang

- Juste après le Big Bang, pour qq millésimes de seconde, l'univers fut composé d'une soupe extrêmement dense et chaude de particules voyageant presque à la vitesse de la lumière. Durant ces premiers instants évanescents, les quarks et les gluons étaient seulement liés faiblement, livres de bouger dans ce **Plasma de Quarks et de Gluons**

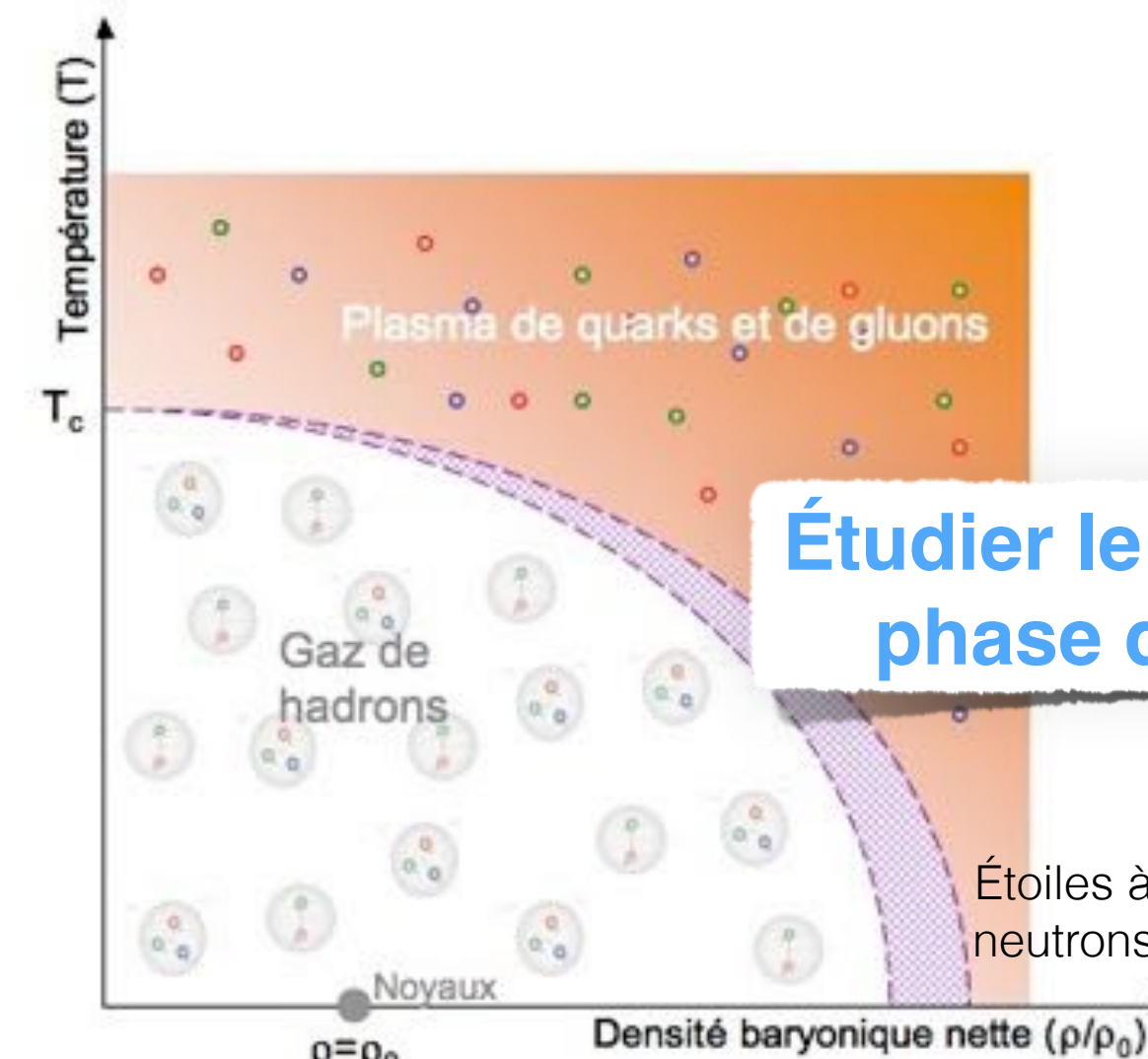


Comprendre les premiers instants
de l'évolution de l'Univers

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{\psi}_j (i \gamma^\mu D_\mu + m_j) \psi_j$$

where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$
and $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$

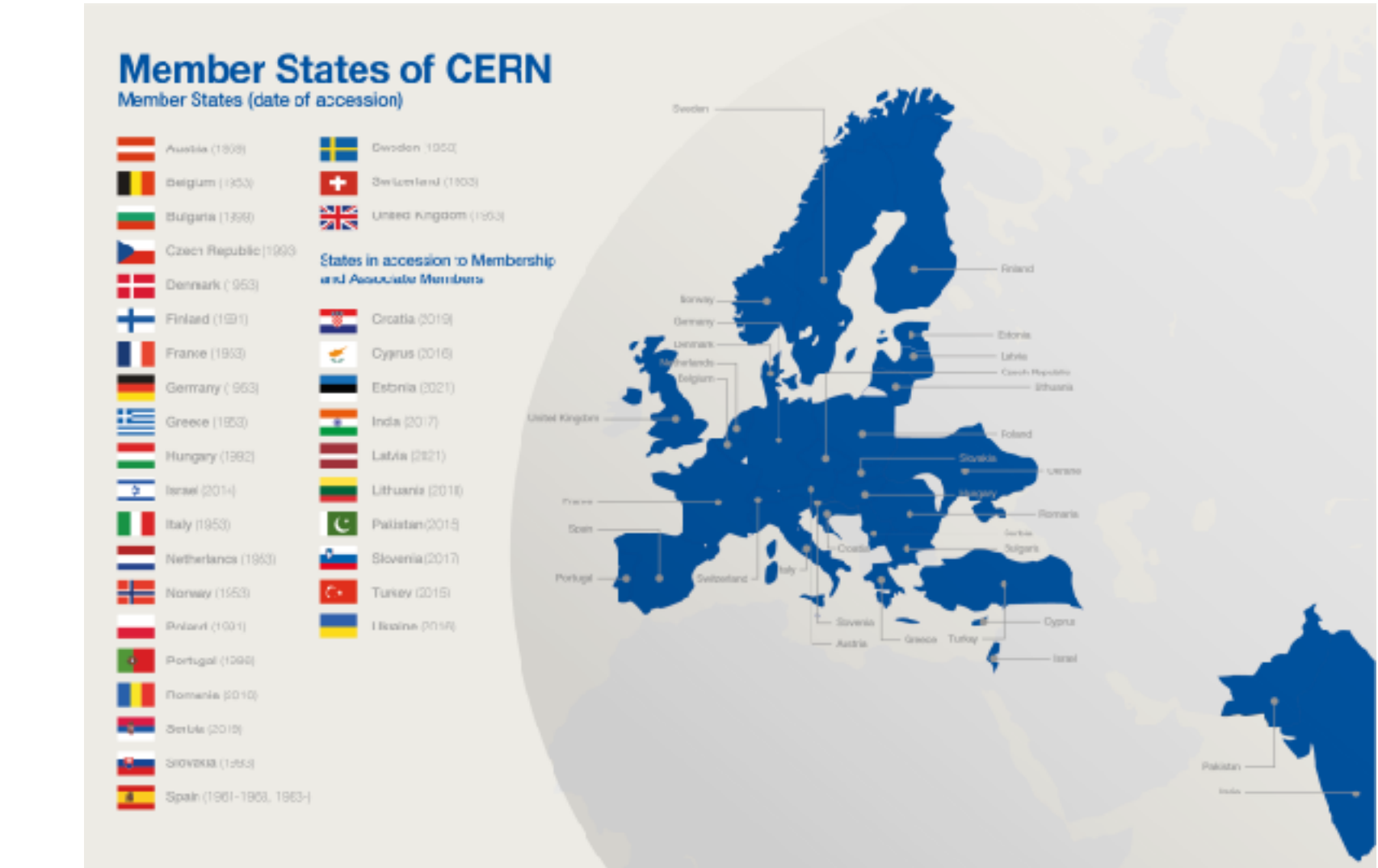
Étudier les propriétés de l'interaction forte:
le confinement



Étudier le diagramme de
phase de la matière

Le CERN

-

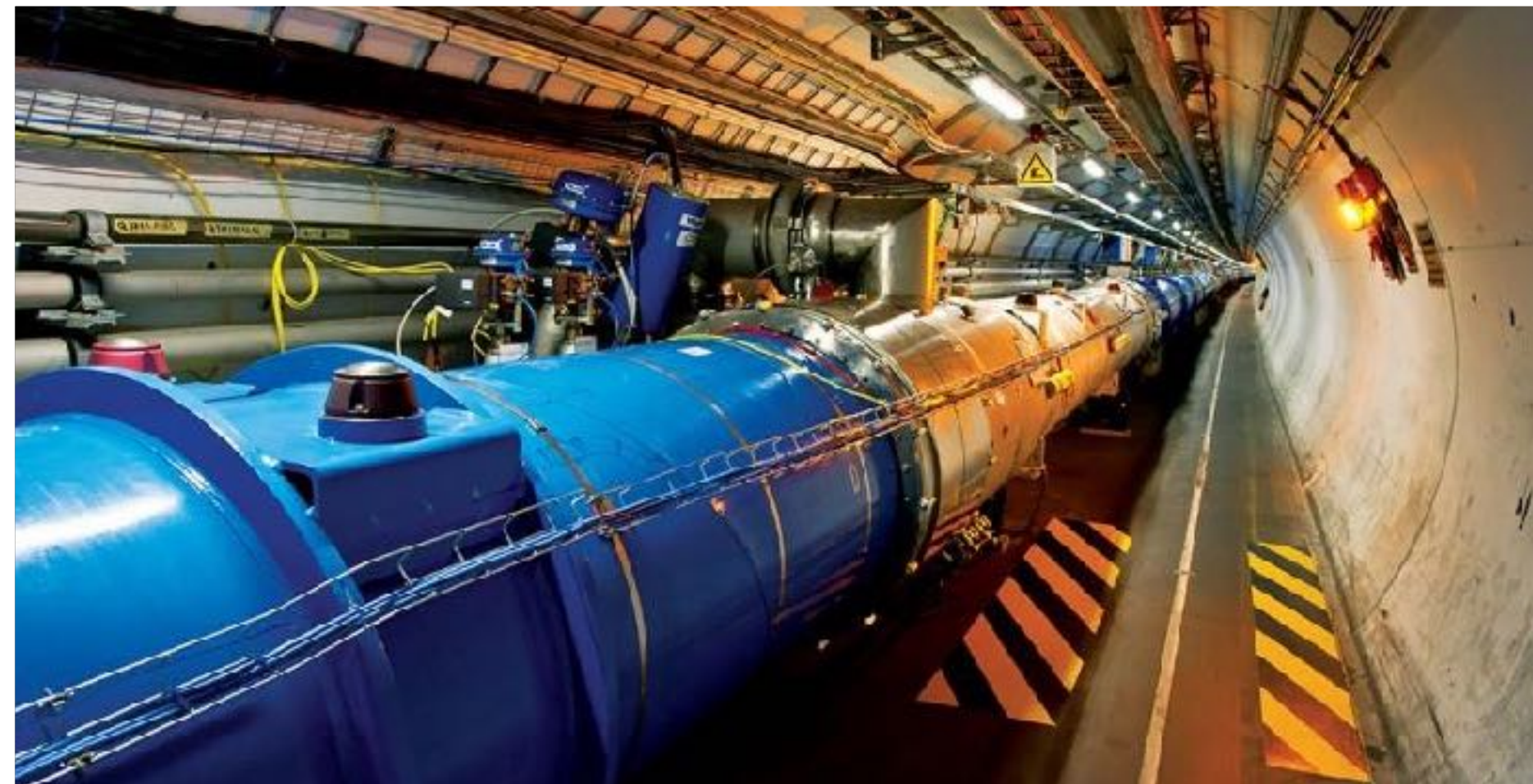


- QQ faits marquants:
 - 4 prix Nobel dont **Georges Charpak**
 - **Invention du web en 1990** par Sir Timothy Berners-Lee
- 
- A gold Nobel Prize medal is shown in the bottom right corner. It features a profile portrait of Alfred Nobel facing left. The text "ALFR. NOBEL" is inscribed on the left side of the medal, and "MDCCLXXXIII" and "MDCCCXCIV" are on the right side.



Le Large Hadron Collider (LHC)

- **Large Hadron Collider:**
 - 27km de circonférence à ~100m sous terre
 - **Collisions de pp jusqu'à PbPb** à des énergies du **TeV** (7 TeV par nucléon)
 - Les particules circulent à 99.9999991% la vitesse de la lumière, ~11245 tours/seconde.
 - **Technologie de pointe:** cavités accélératrices supraconductrices refroidies à 1,9K (-271°C)

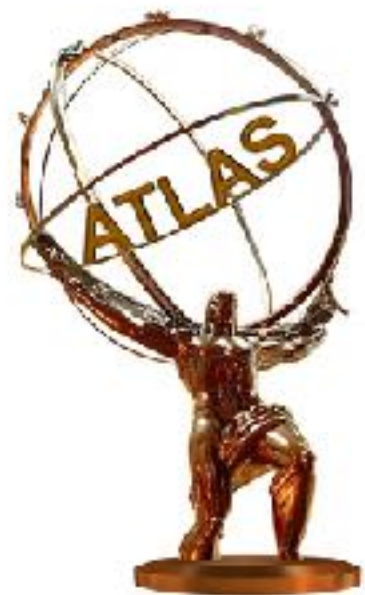


Les expériences du LHC

**Les expériences du LHC: des appareils photo de grande qualité.
Phénomène fugace (10^{-24} s), localisé (10^{-15} m) et fréquent (1-100 ns $\sim 10^{-9}$ s).**



- Physique des ions lourds
 - Collisions PbPb
 - Plasma de quarks et des gluons



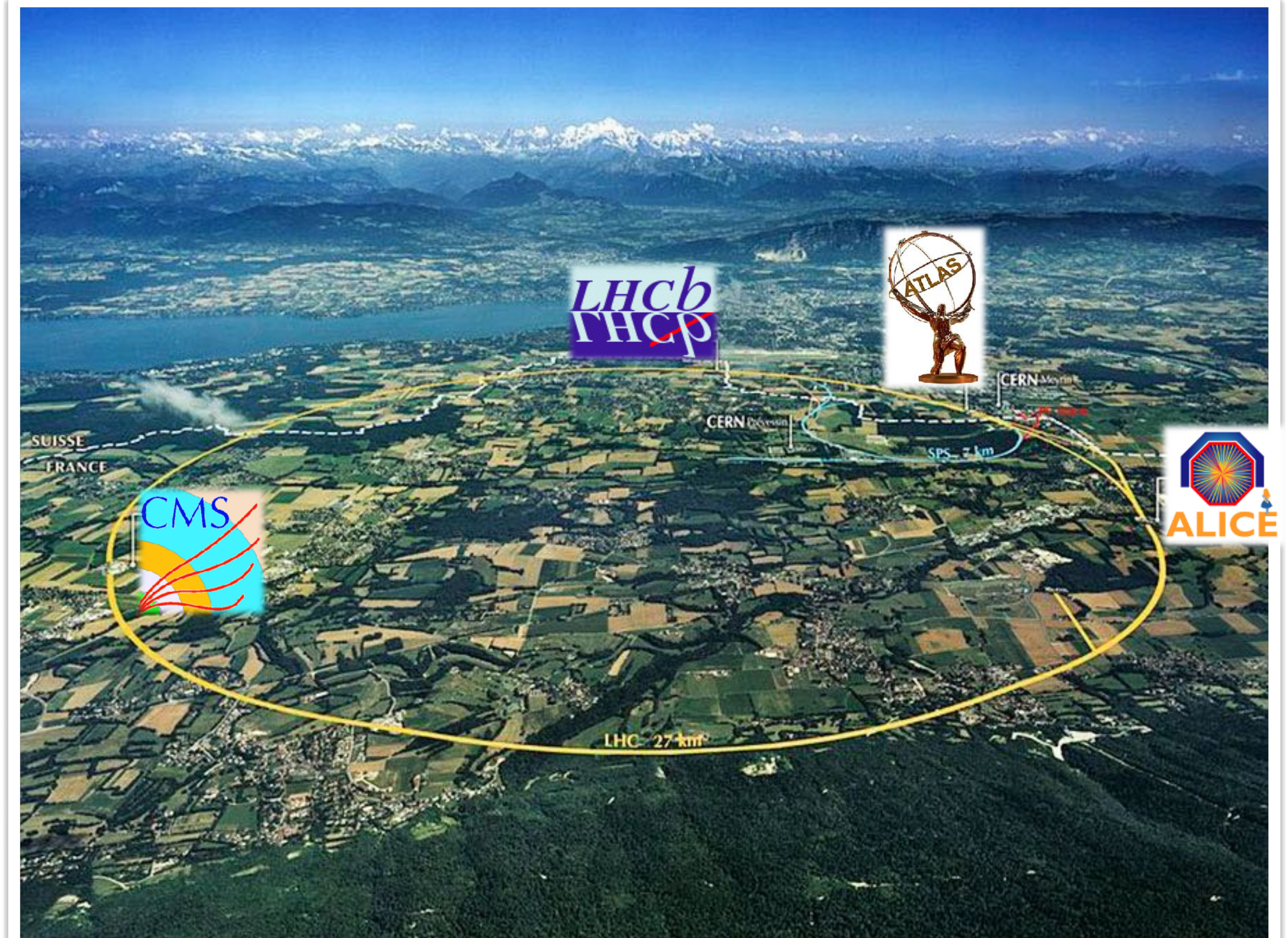
- Physique du modèle standard et au delà
 - Collisions pp
 - Boson de Higgs
 - supersymétrie



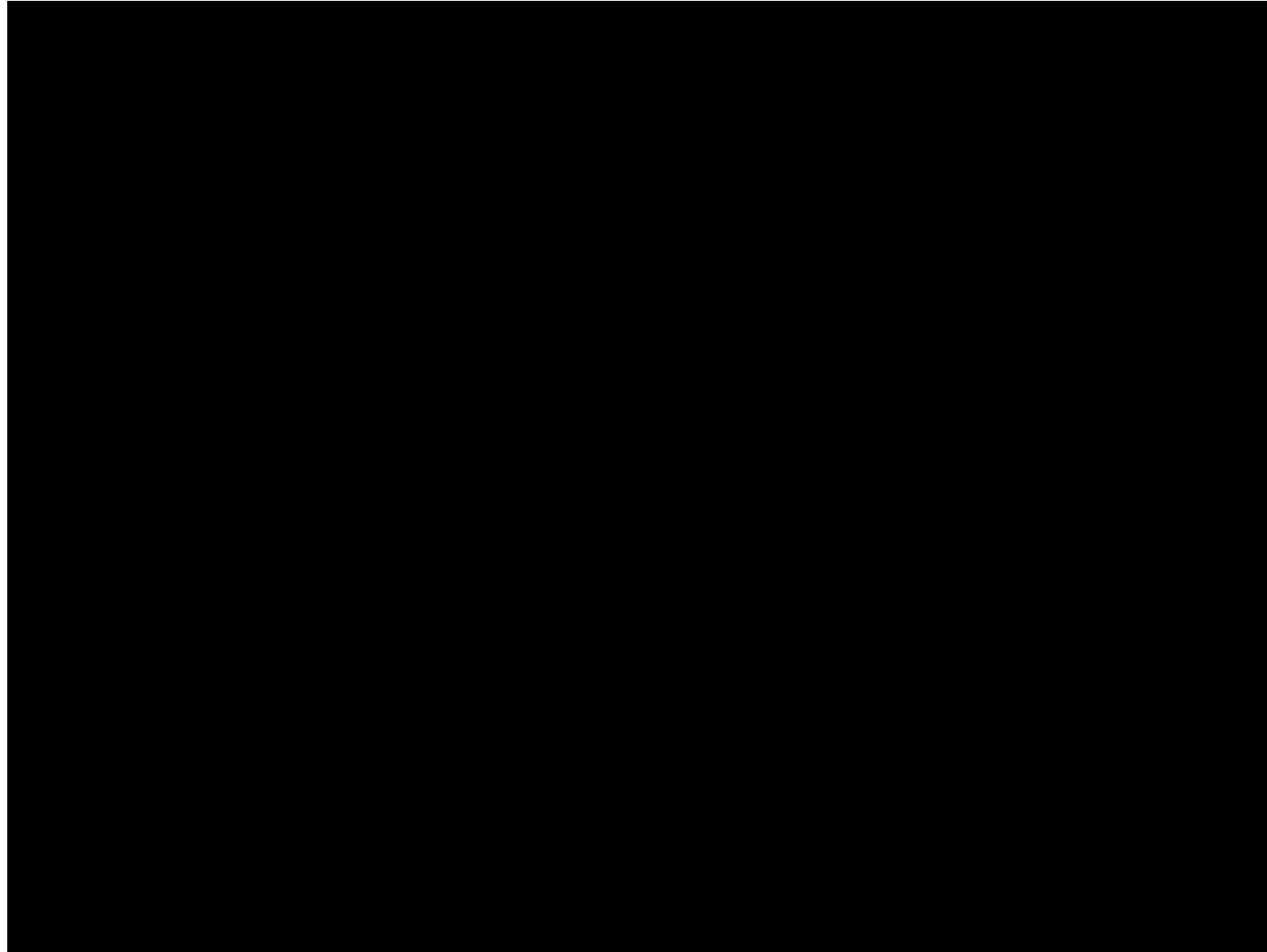
- Comme ATLAS
- Étude de l'asymétrie matière-antimatière



- Collisions pp
- Violation CP



Petit résumé et passage au CERN



Conclusions I

- La physique des particules: comprendre la structure intime de la matière.
(modèle standard des particules)



- Comment?

- **Théoricien** :
modèle pour décrire la nature
- **Expérimentateur** : valider le modèle
 - détecteur: conception et construction des l'expériences
 - analyse: exploitation des données
 - Informaticiens (récent)



Conclusions II



- **Le modèle standard:**
la matière est composée par des “briques” élémentaires ou **fermions** (soit des **quarks** ou des **leptons**, et leurs antiparticules) qui interagissent à travers des particules **médiateurs des interactions** ou **bosons**.
- Le modèle standard ne décrit que 4% de l'univers.

Merci de votre attention !

Questions?

