

Introduction

à la physique des particules et aux expériences du LHC

Zaida Conesa del Valle
IJCLab (CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay)
Masterclass ALICE, 25 mars 2024



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

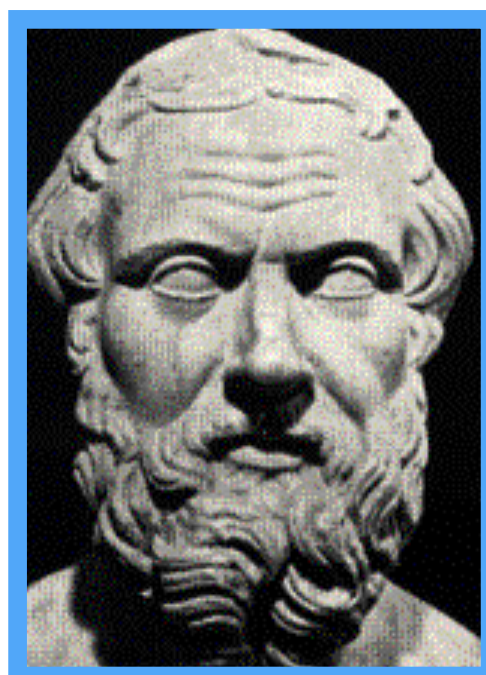
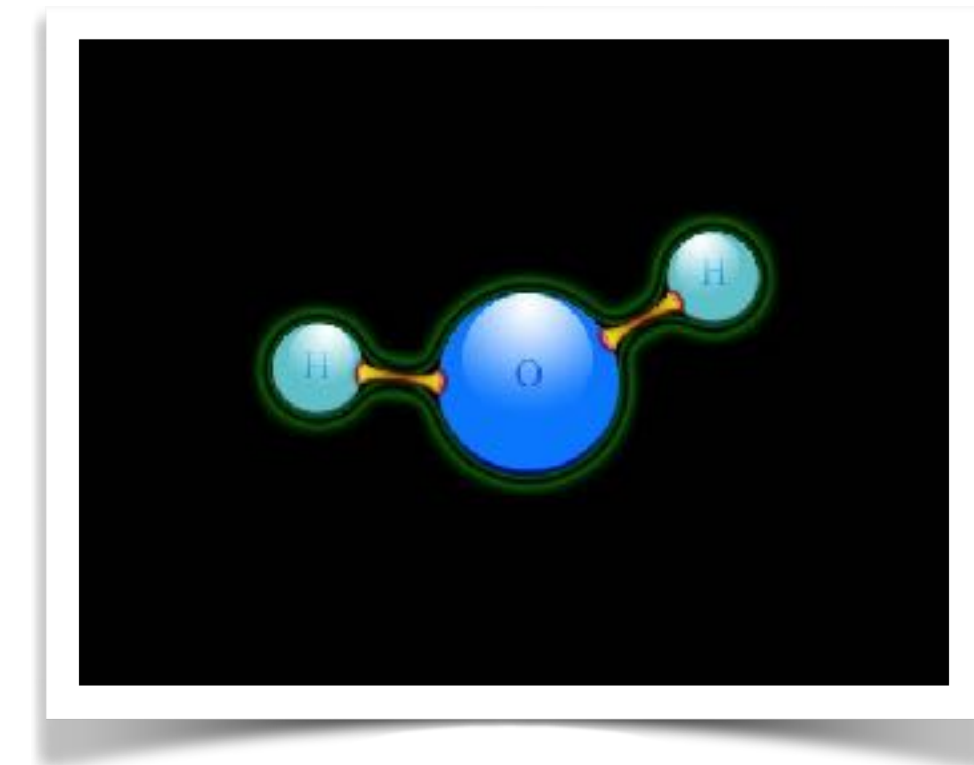


Commençons par un peu de chimie



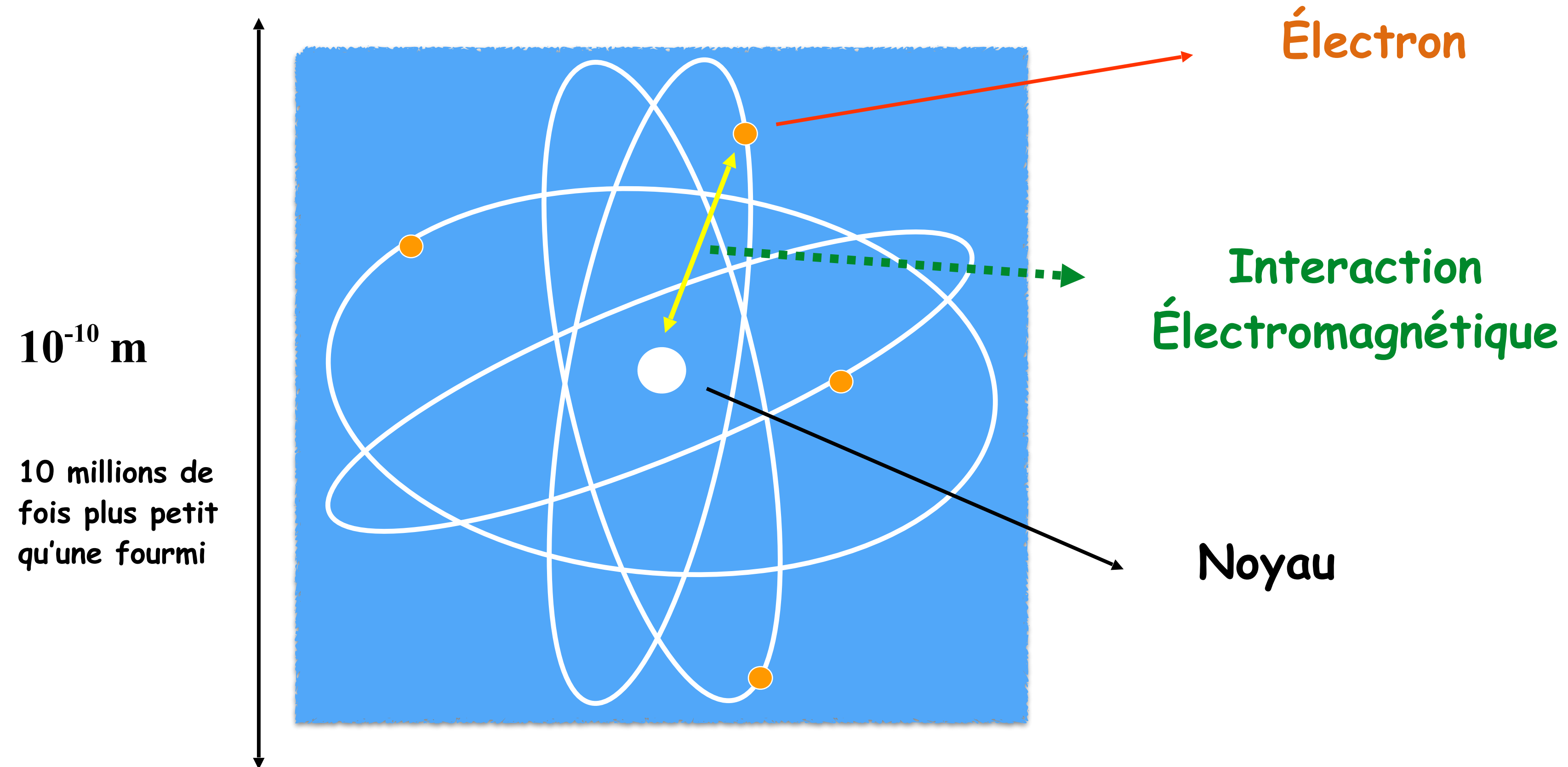
- Prenons une goutte d'eau, la plus petite partie sera une **molécule** d'eau (H_2O)

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



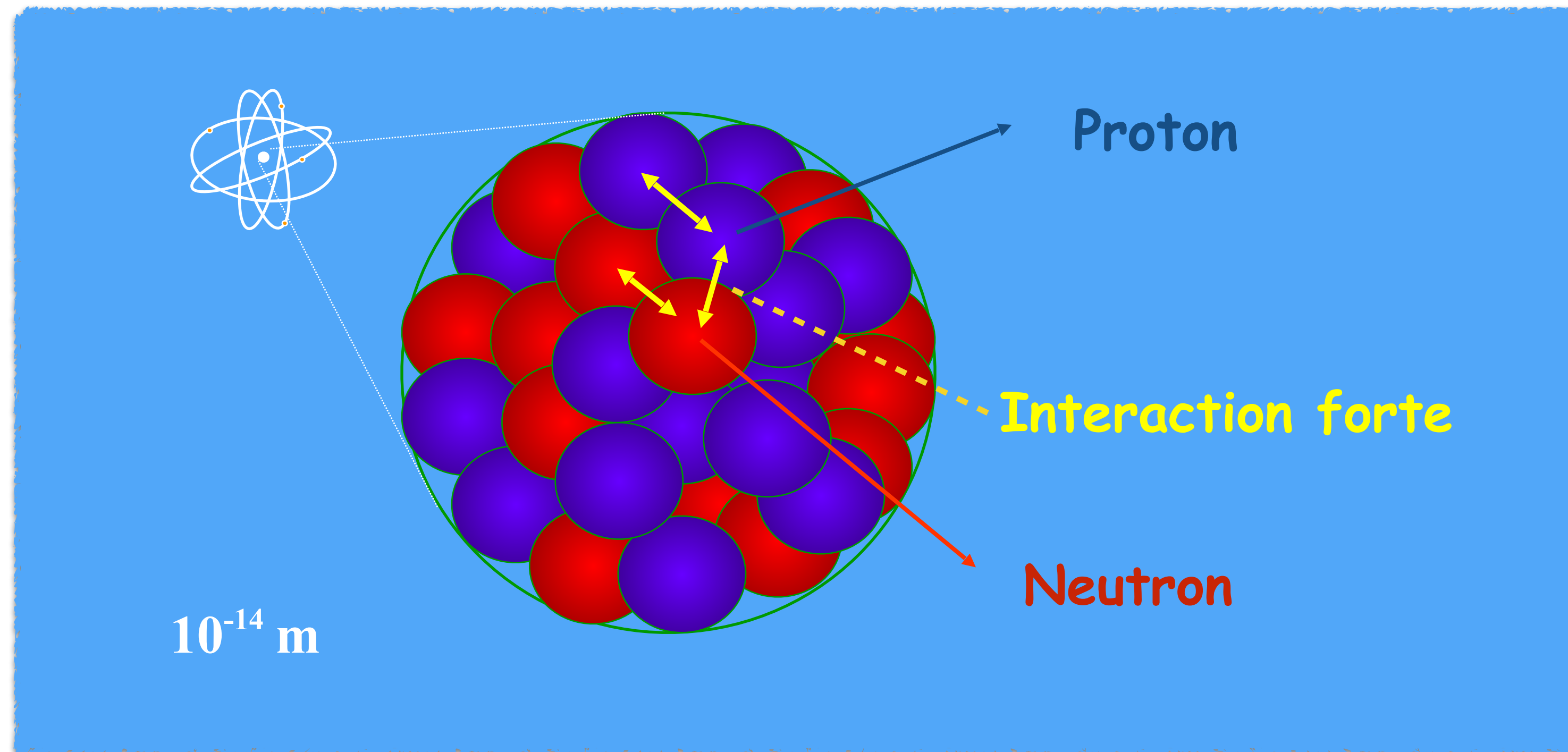
- Démocrite (-500 av. JC):
Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide : **atomos**

L'atome



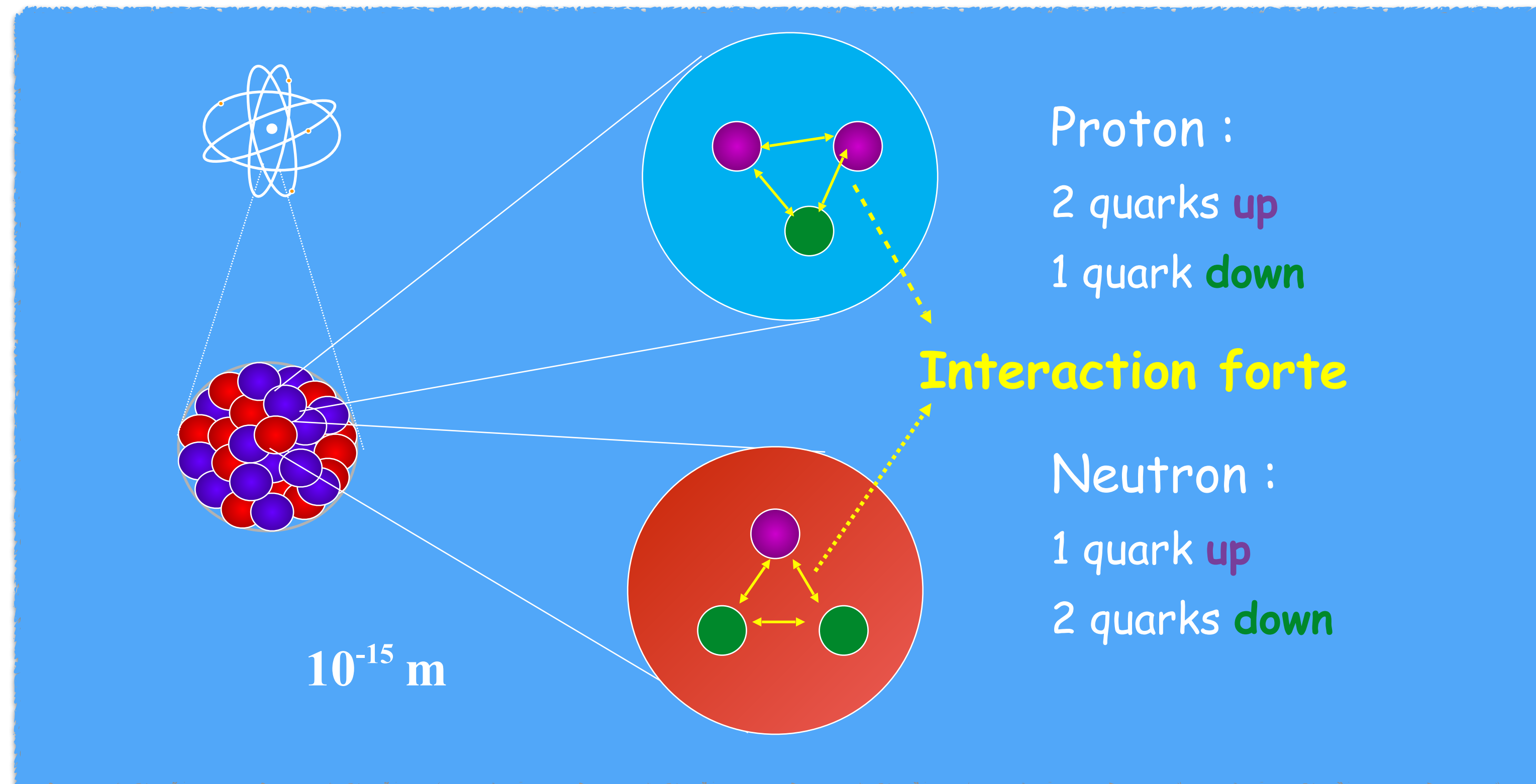
- L'atome est composé d'un noyau chargé positivement et d'**électrons** chargés négativement et qui gravitent autour du **noyau**.

Le noyau de l'atome



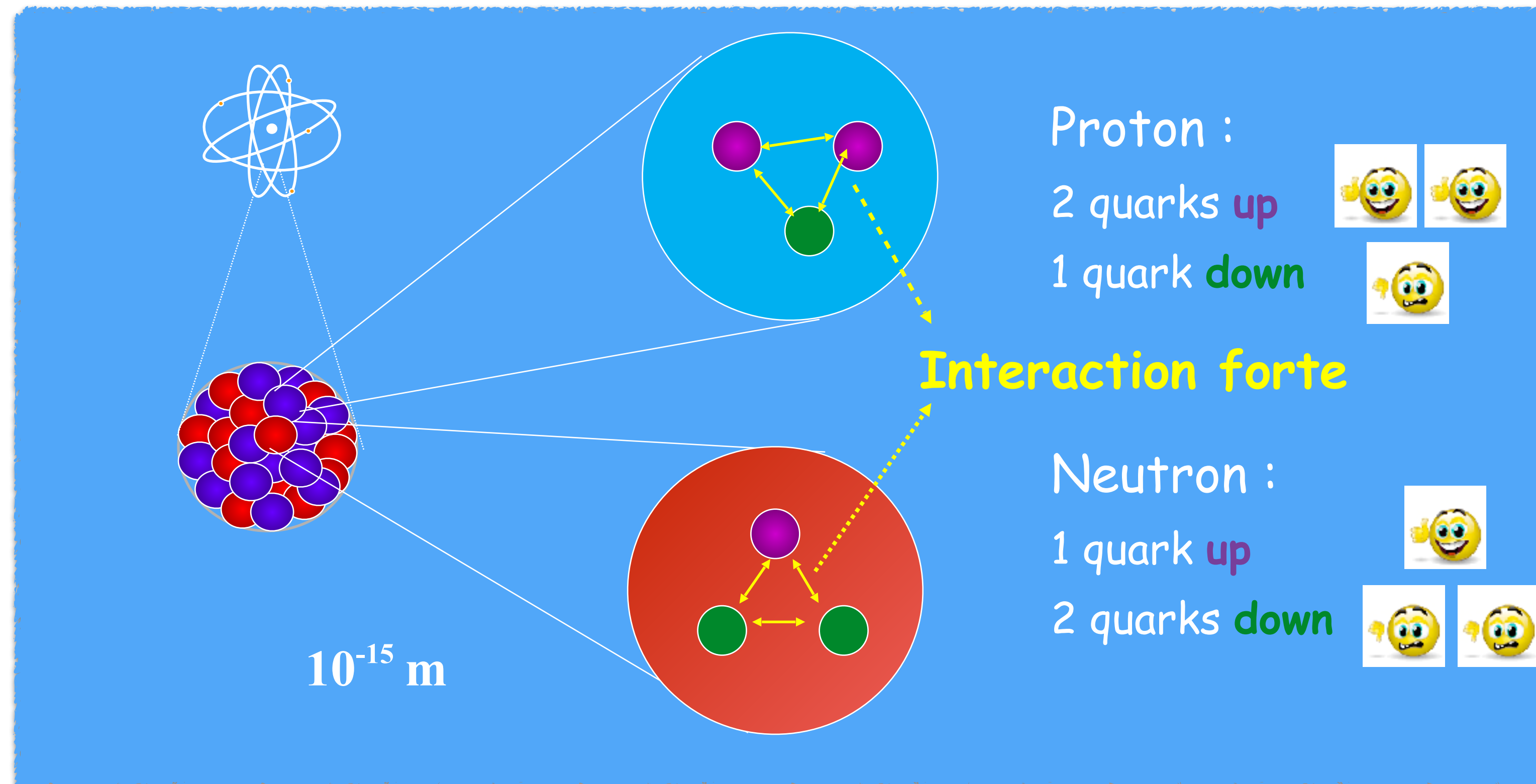
- Le noyau de l'atome est composé par des **hadrons**, des **protons** (chargés positivement) et des **neutrons** (de charge neutre).

Les protons et neutrons



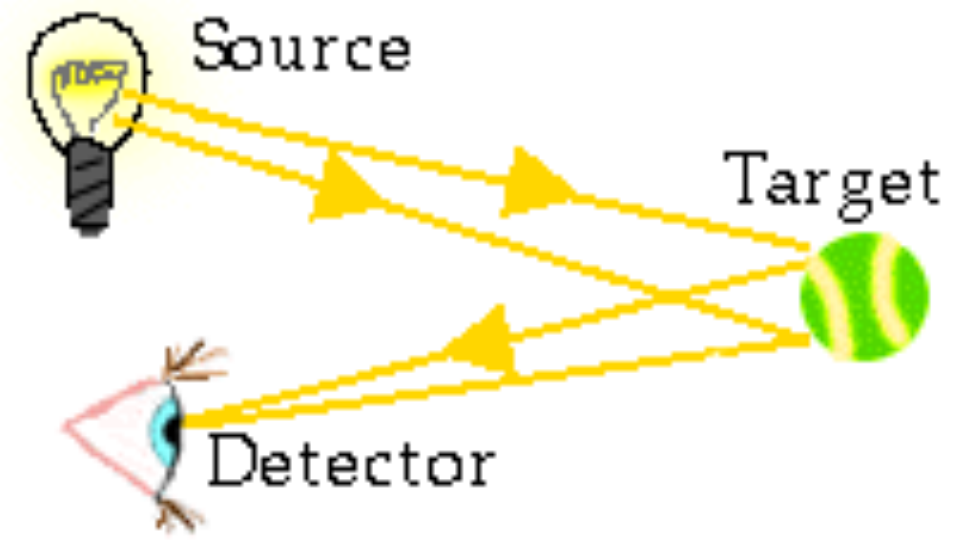
- Les hadrons sont particules composés par de **quarks**.

Les protons et neutrons



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

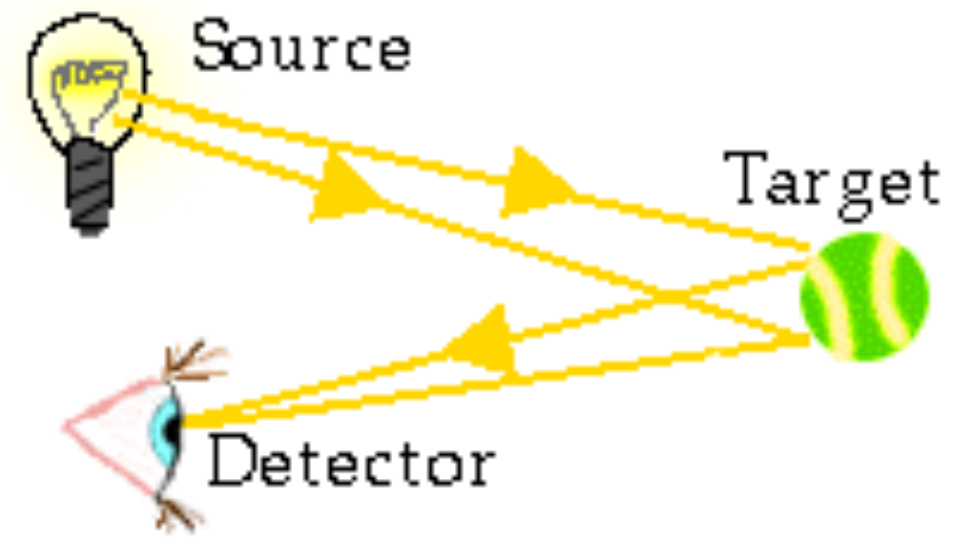
Comment les étudier s'ils sont si petits?



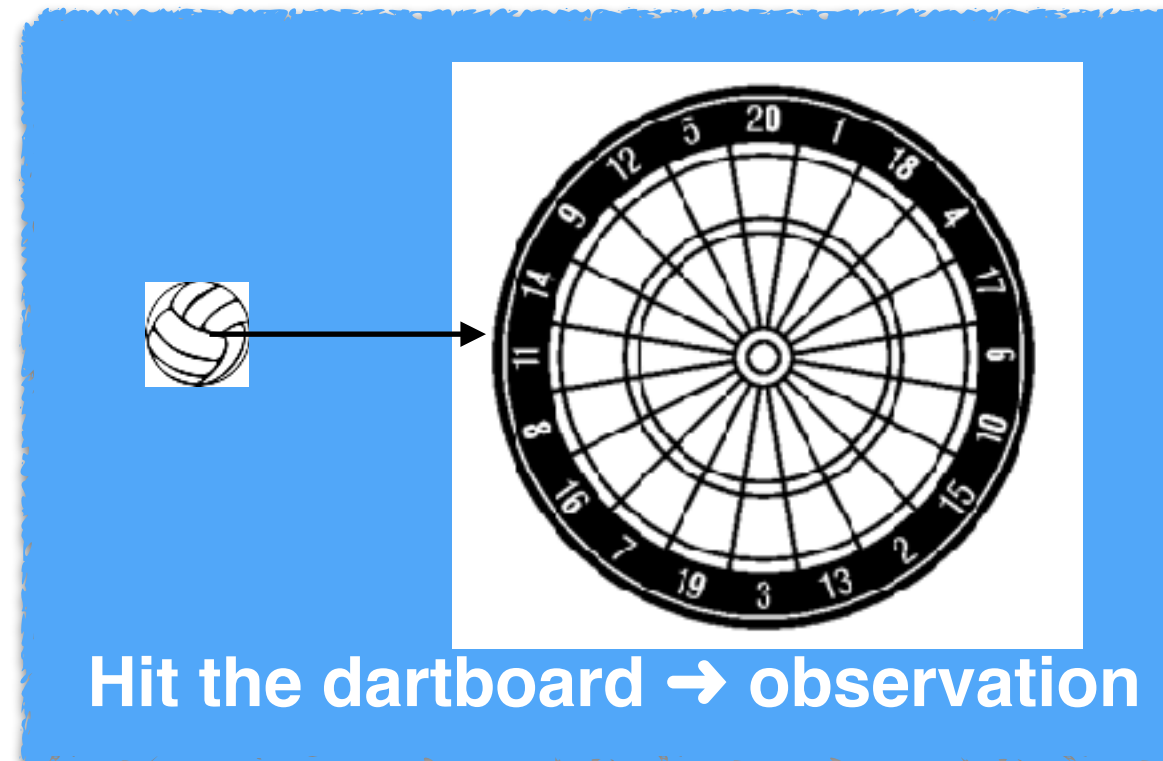
- Comment: une **source** (e.g. lumière) pour visualiser la **cible** (objet) qu'on observe avec un **détecteur** (e.g. l'oeil).



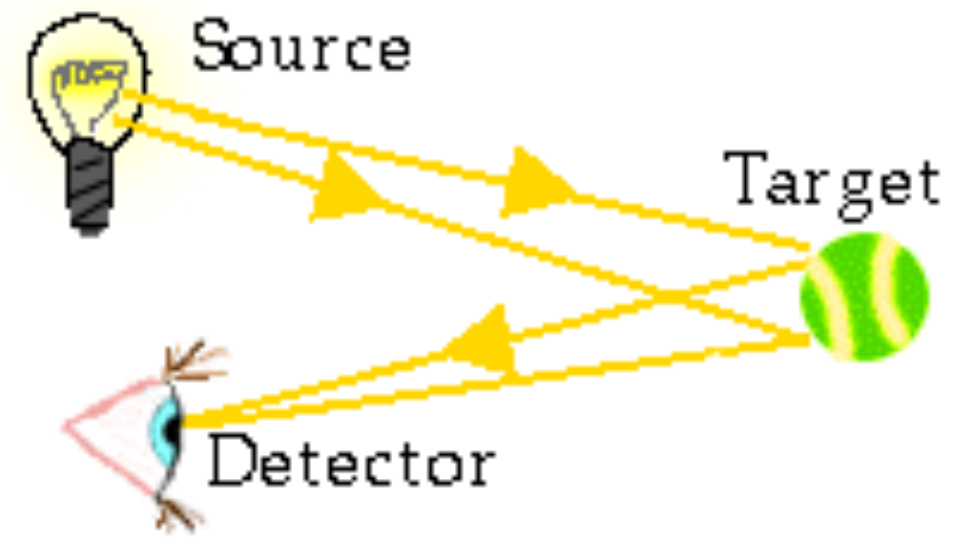
Comment les étudier s'ils sont si petits?



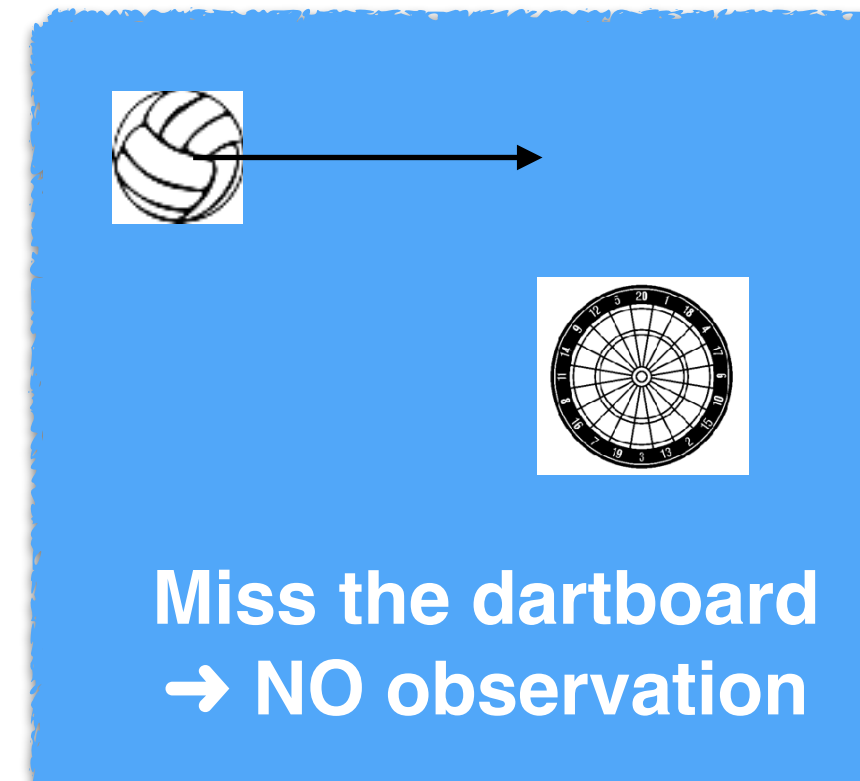
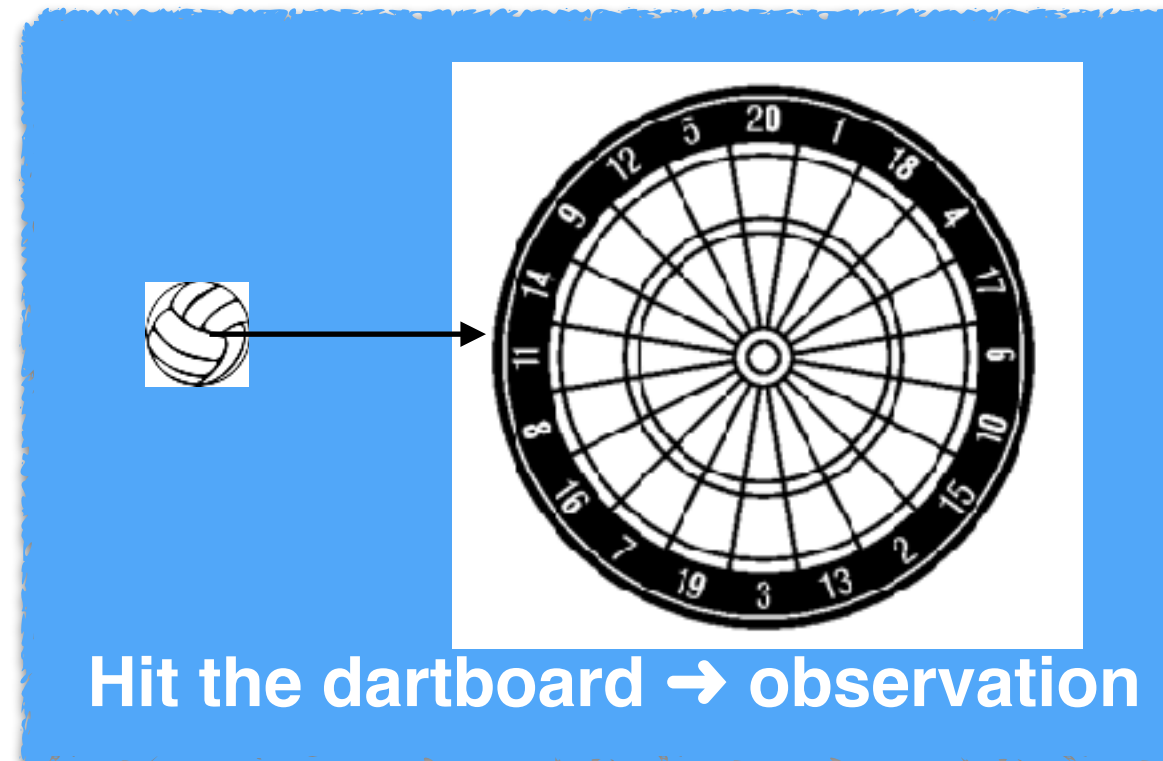
- Comment: une **source** (e.g. lumière) pour visualiser la **cible** (objet) qu'on observe avec un **détecteur** (e.g. l'oeil).



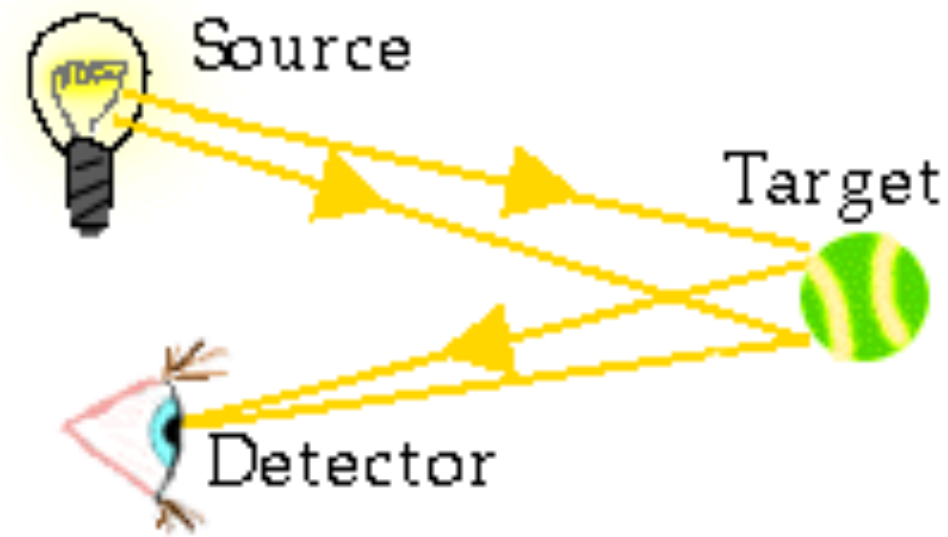
Comment les étudier s'ils sont si petits?



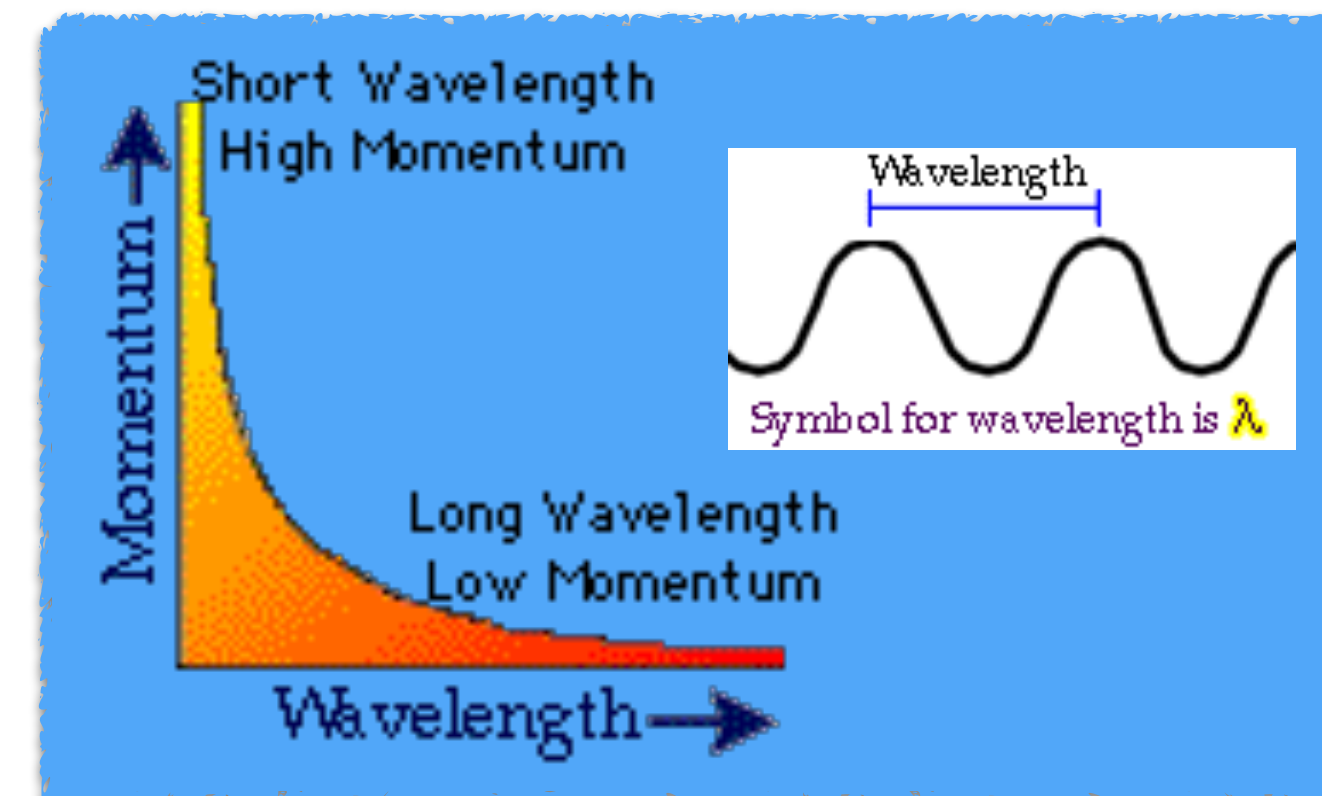
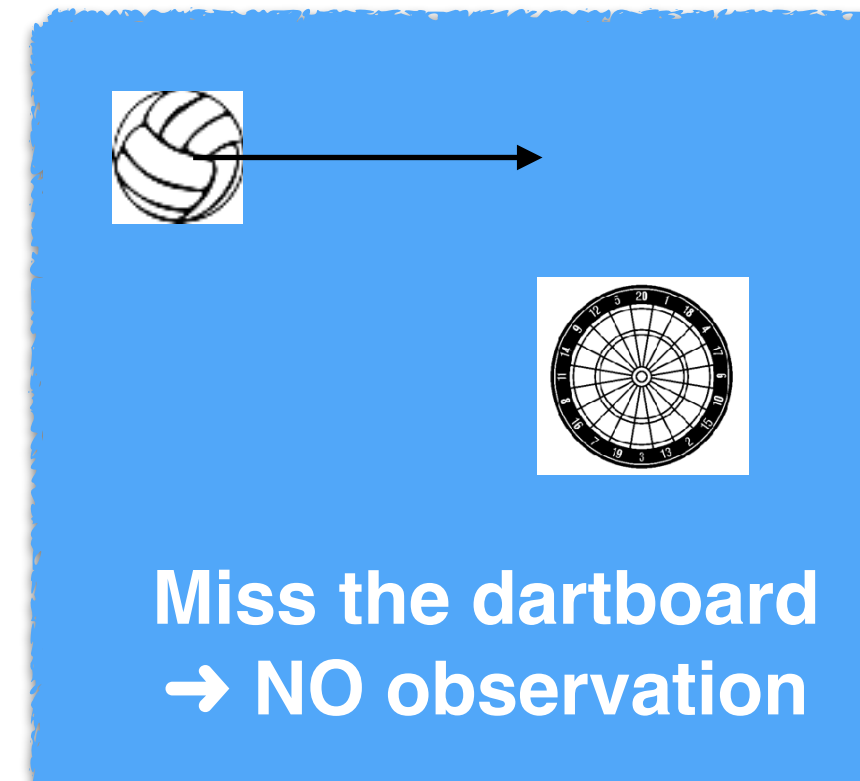
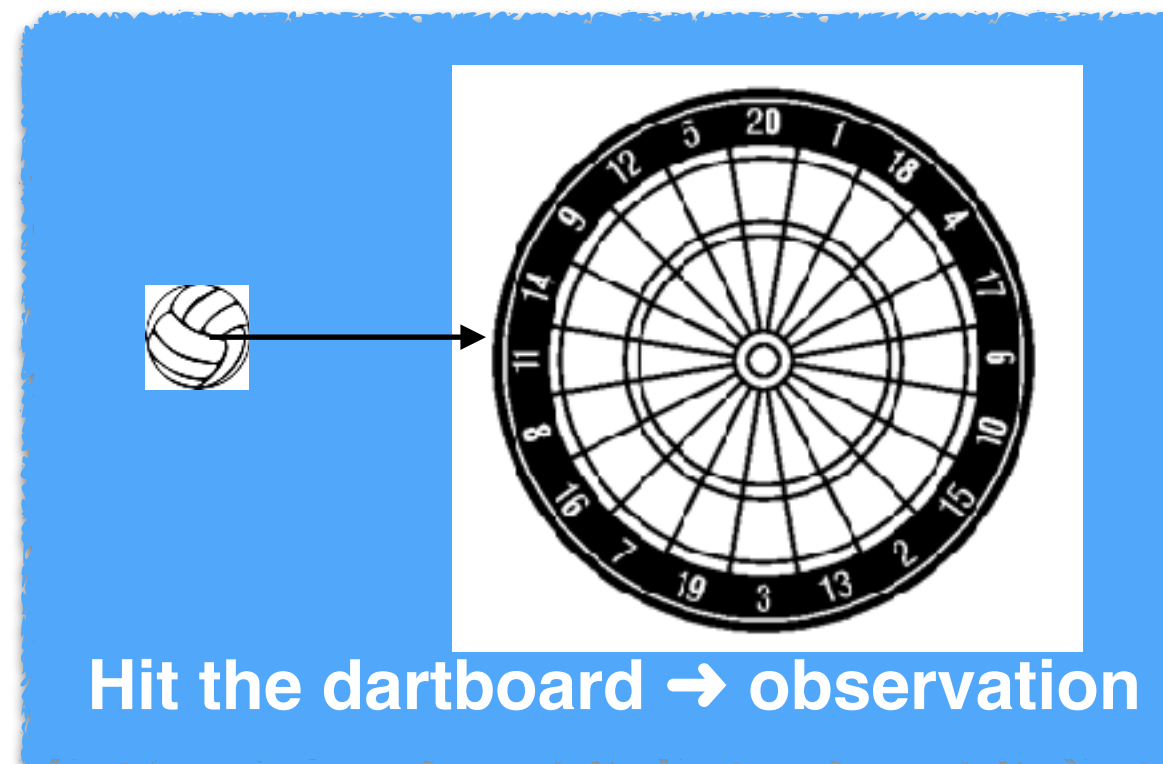
- Comment: une **source** (e.g. lumière) pour visualiser la **cible** (objet) qu'on observe avec un **détecteur** (e.g. l'oeil).



Comment les étudier s'ils sont si petits?



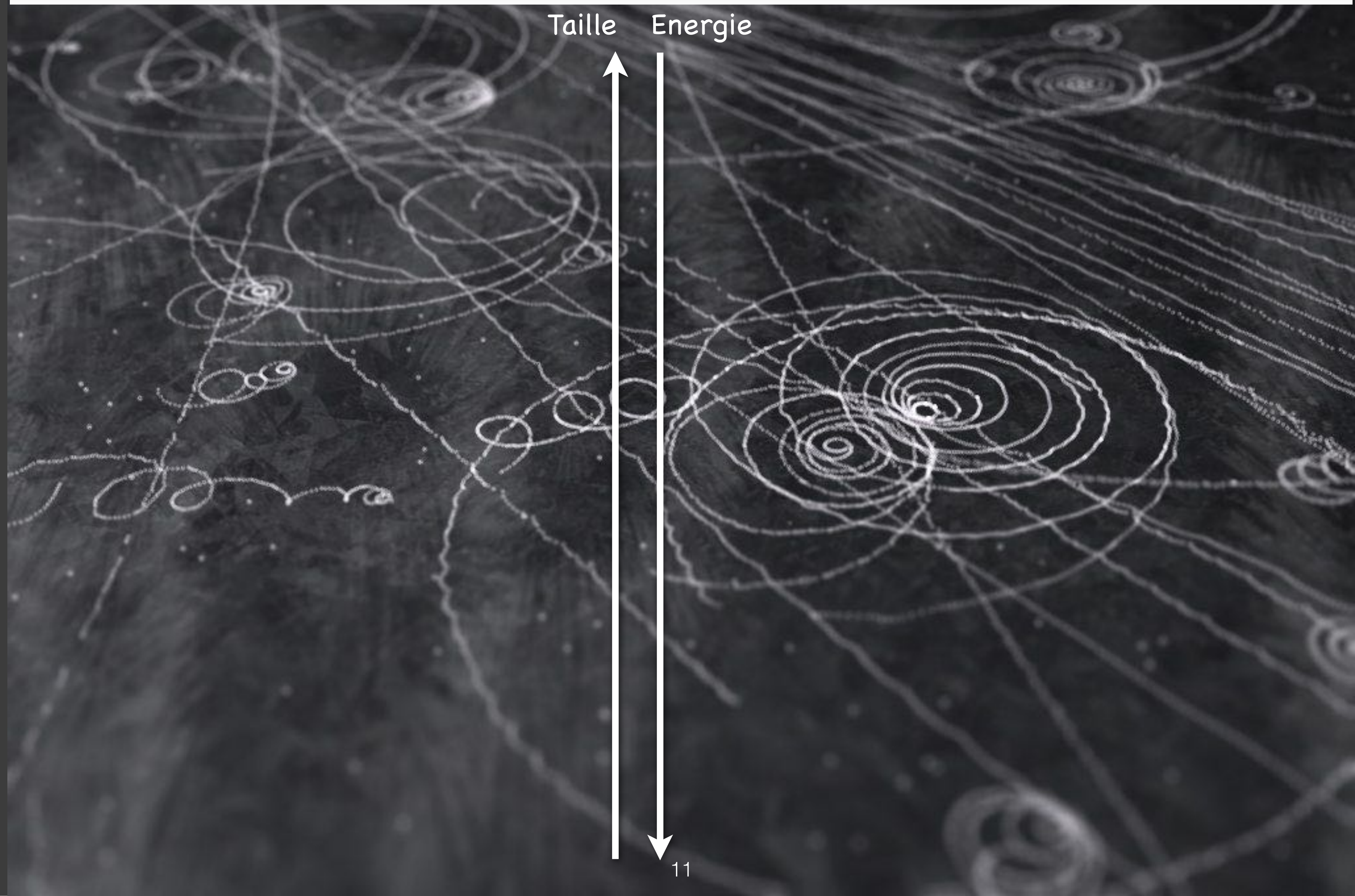
- Comment: une **source** (e.g. lumière) pour visualiser la **cible** (objet) qu'on observe avec un **détecteur** (e.g. l'oeil).



- 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.

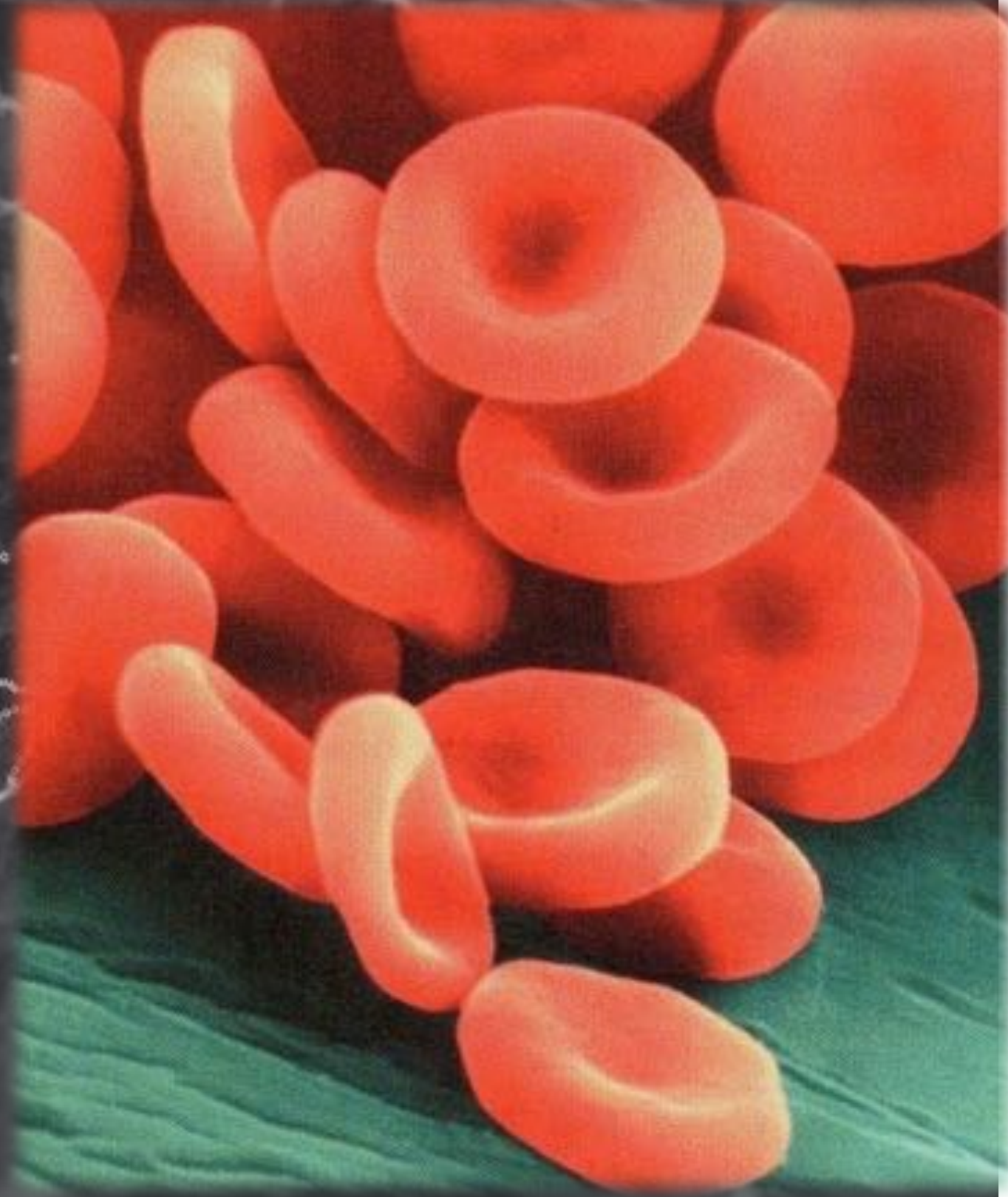


Échelles de taille et d'énergie



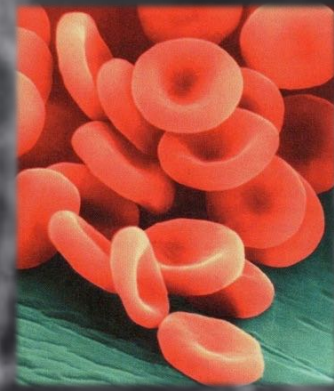
Échelles de taille et d'énergie

Taille Energie



Échelles de taille et d'énergie

Cellule



$10\mu\text{m} = 10^{-5}\text{m}$

Taille

Energie

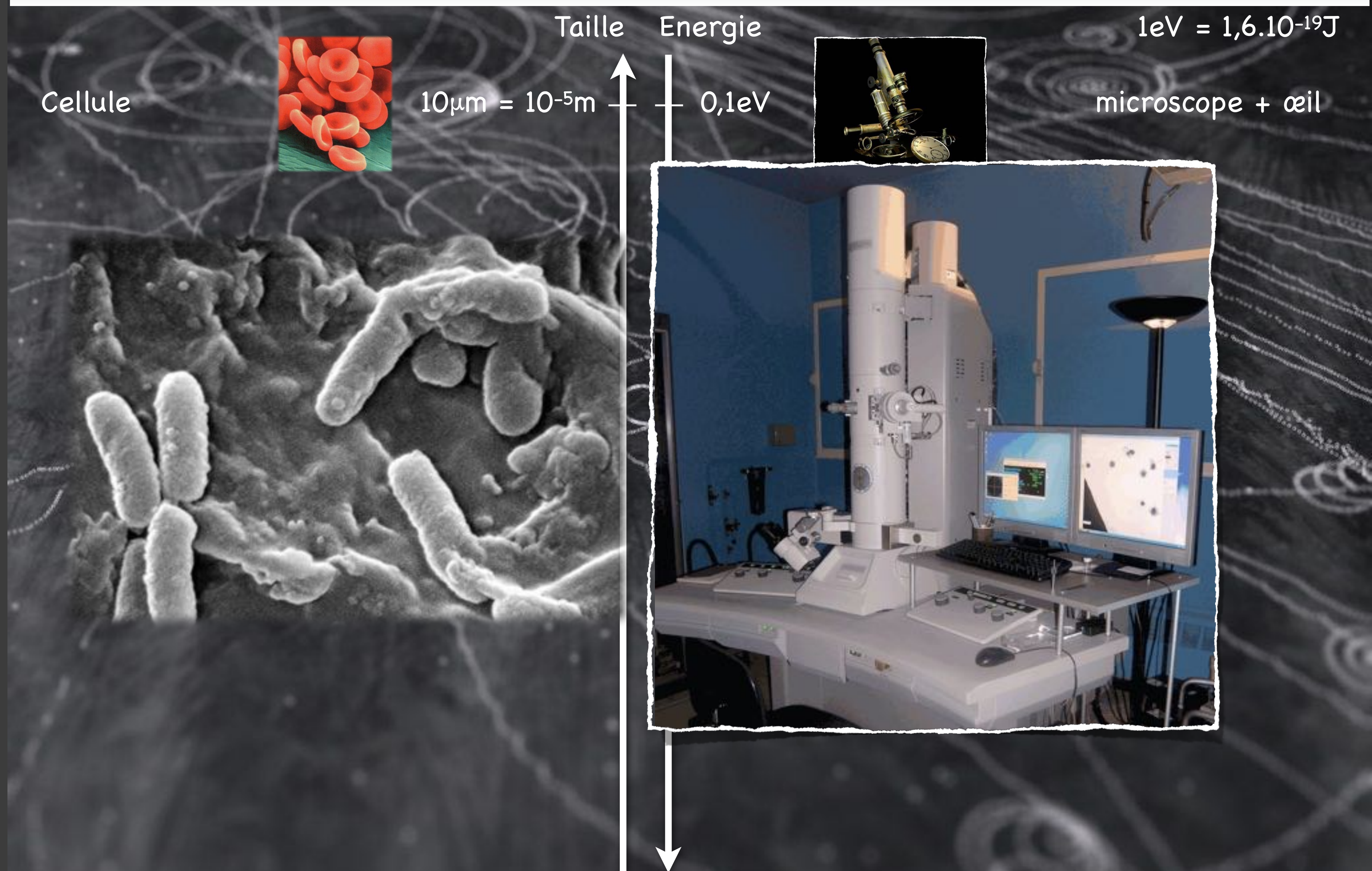
0,1eV



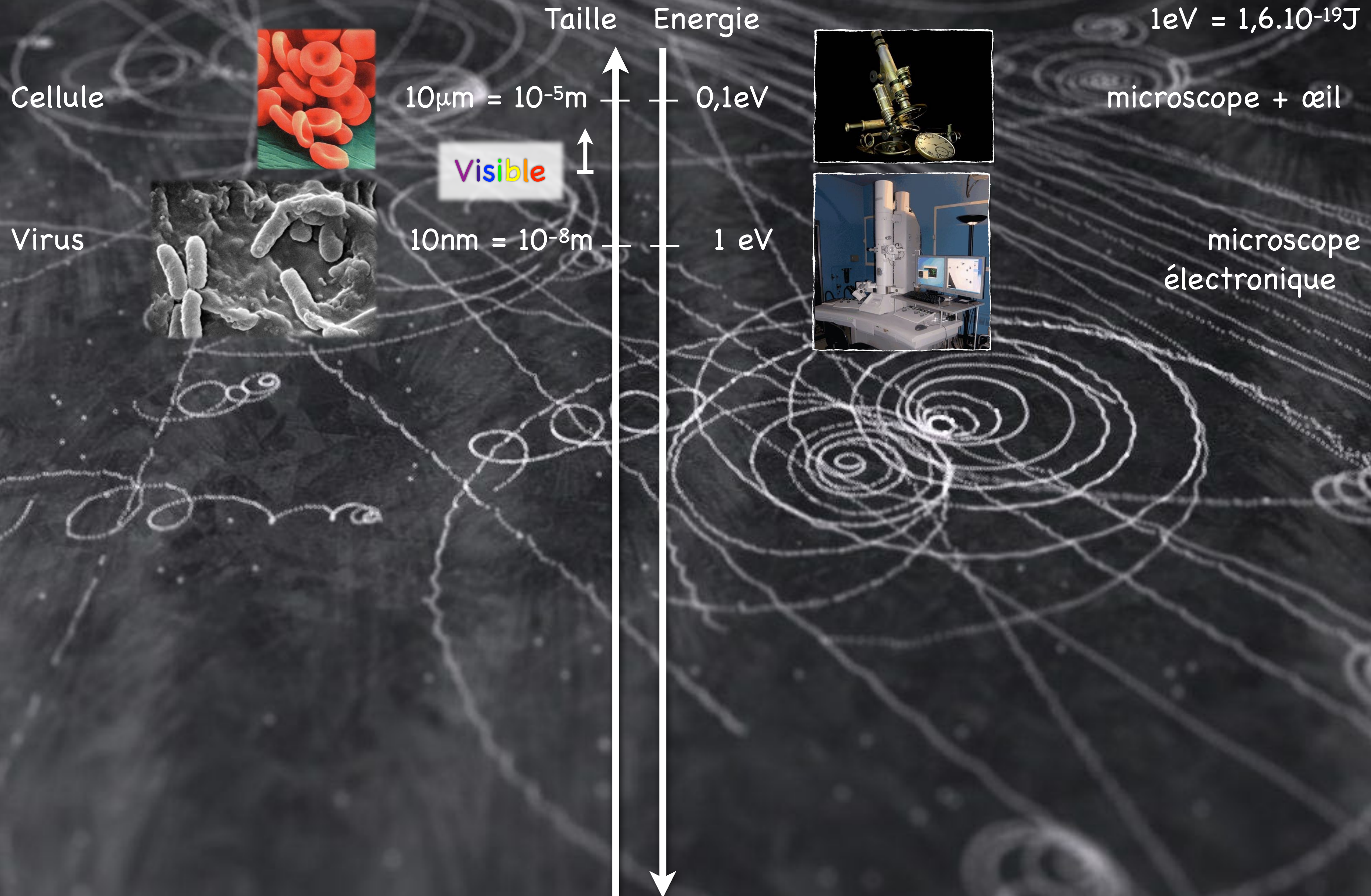
$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$

microscope + œil

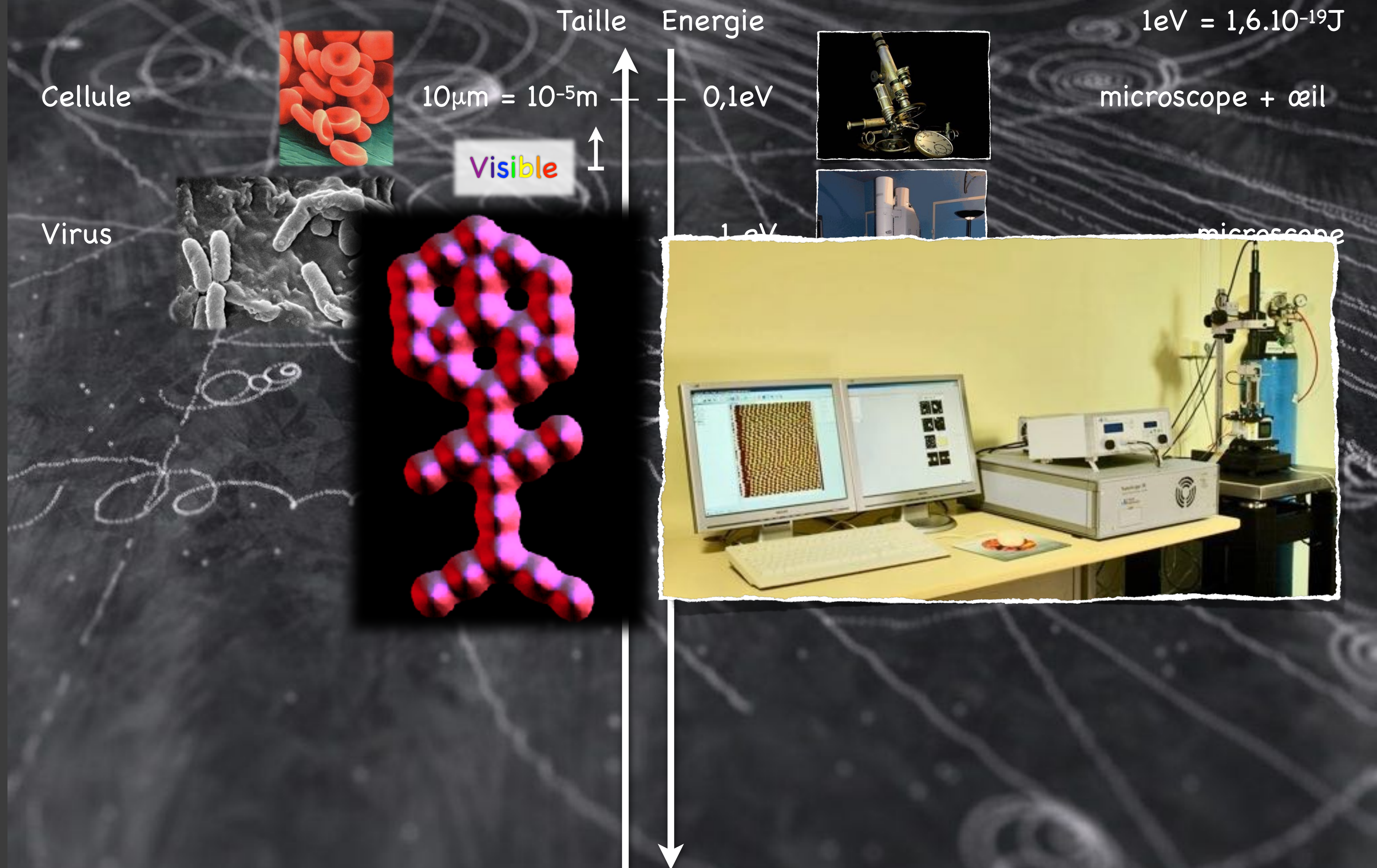
Échelles de taille et d'énergie



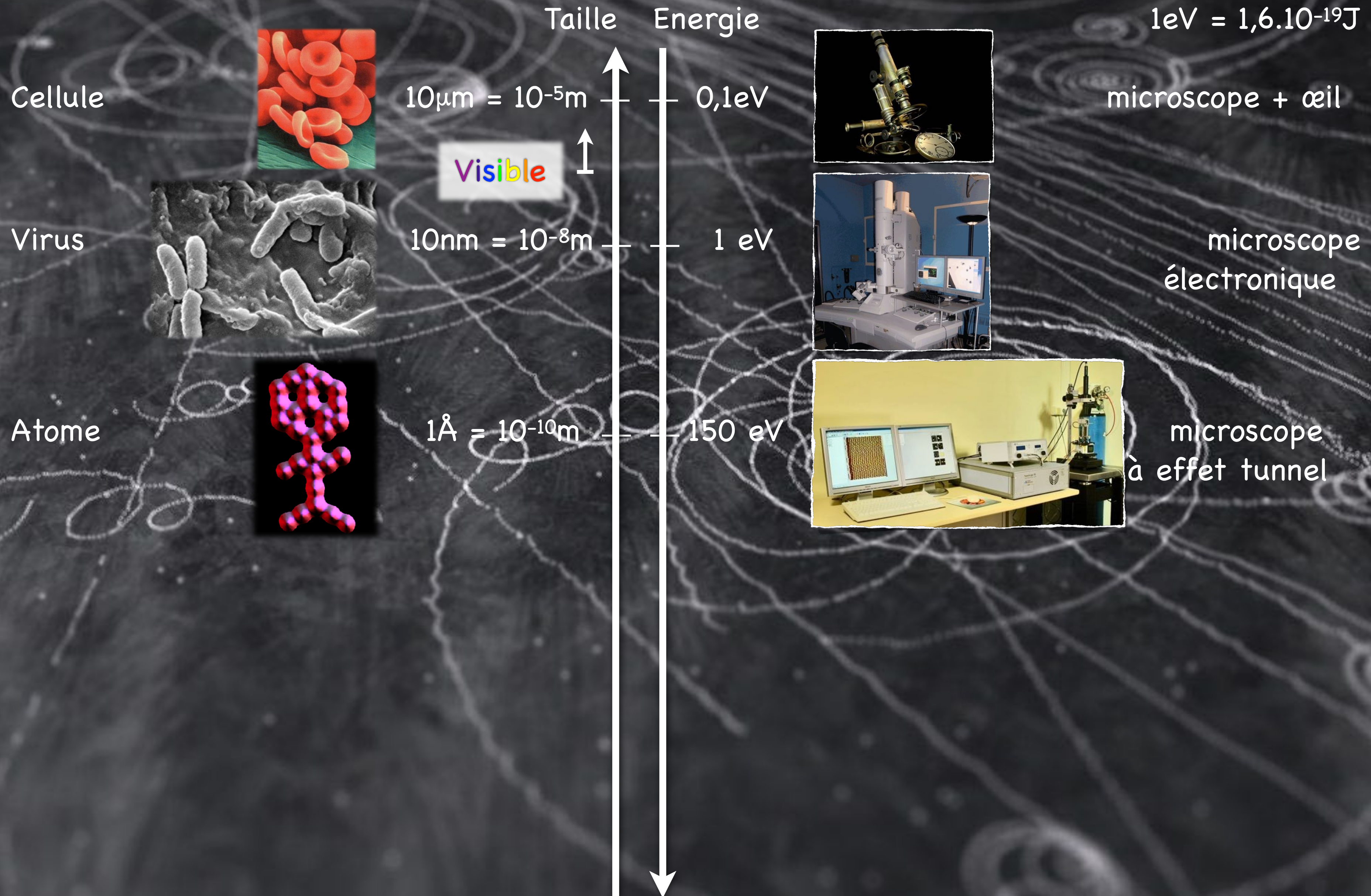
Échelles de taille et d'énergie



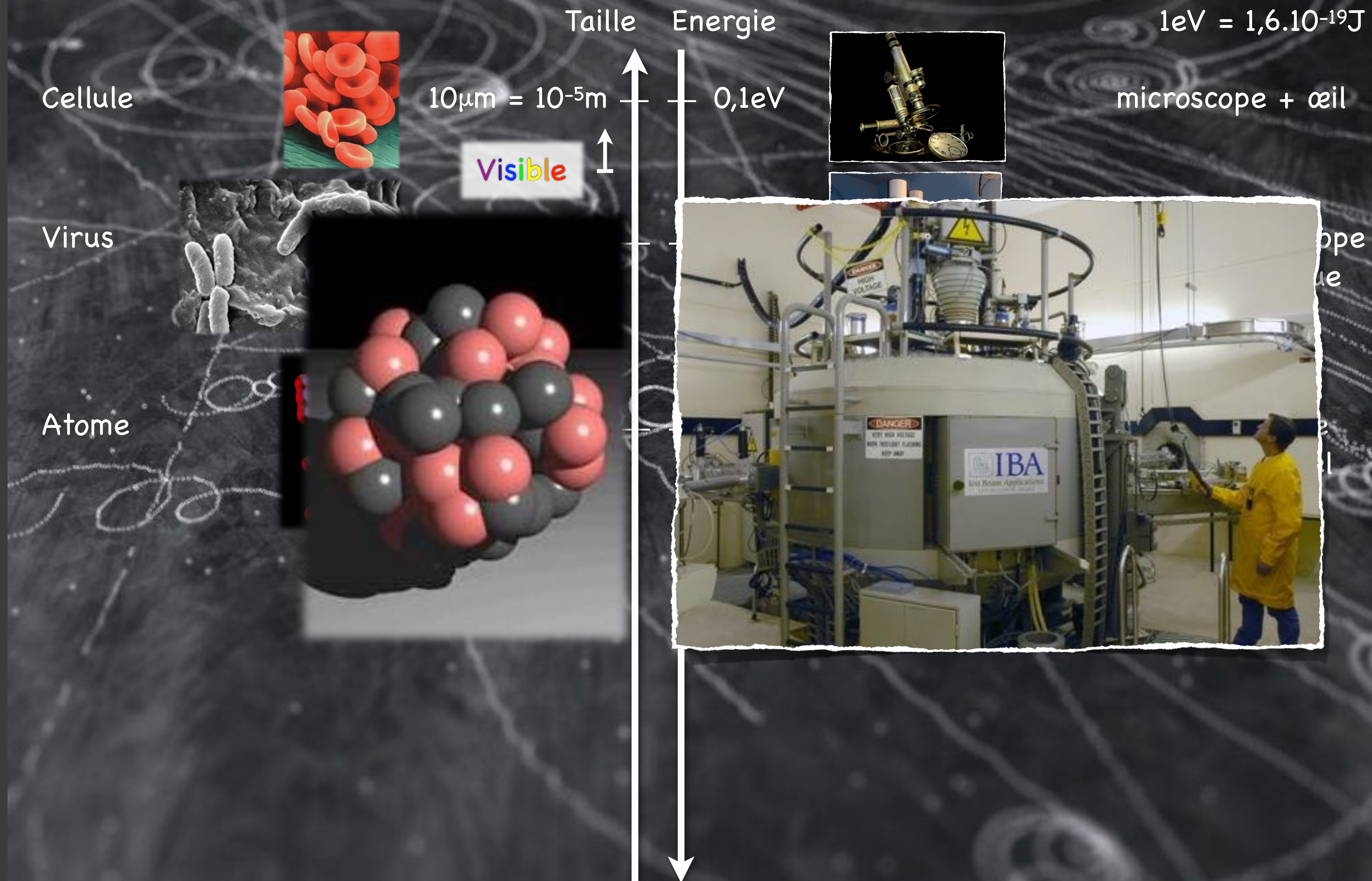
Échelles de taille et d'énergie



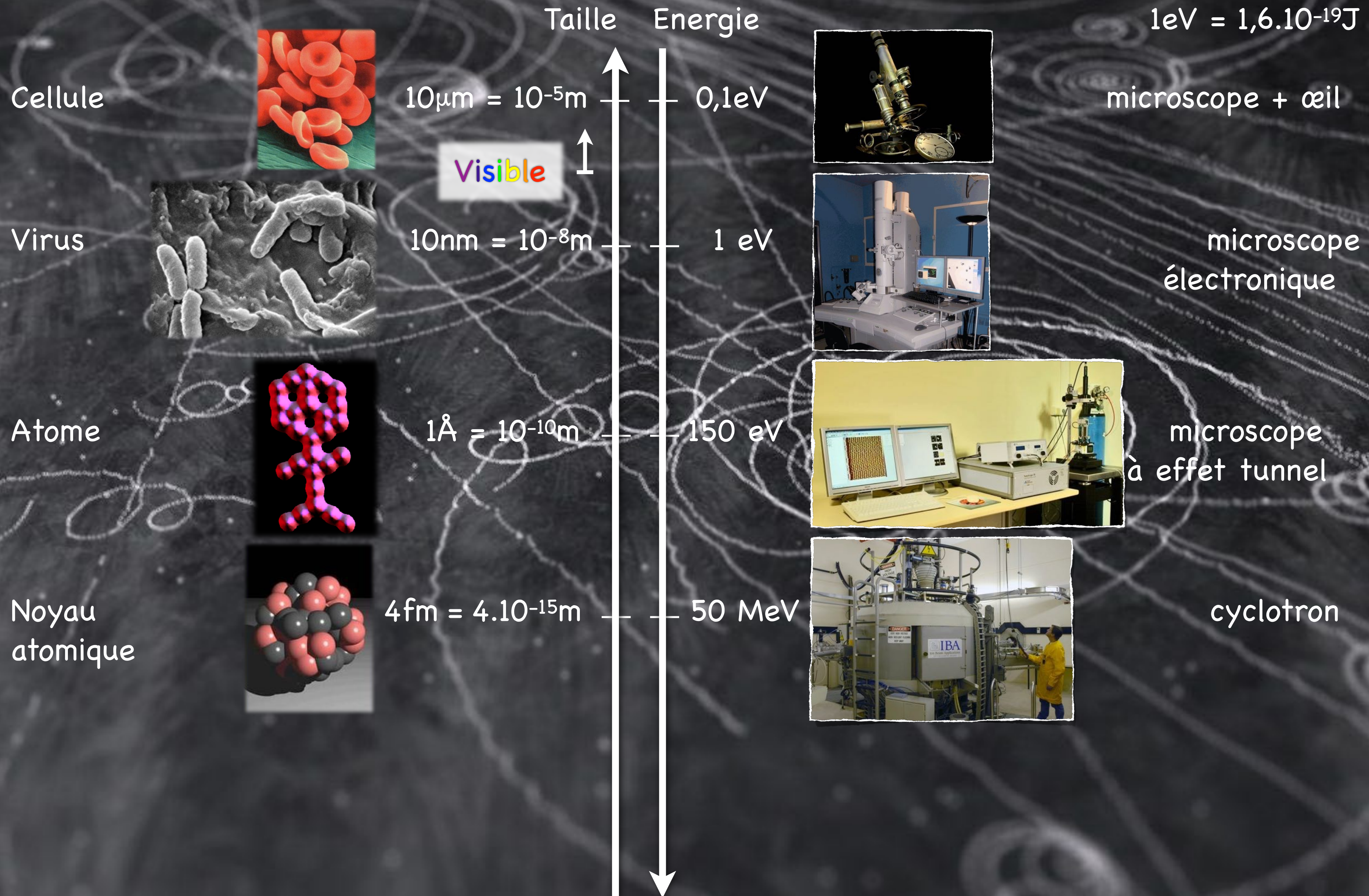
Échelles de taille et d'énergie



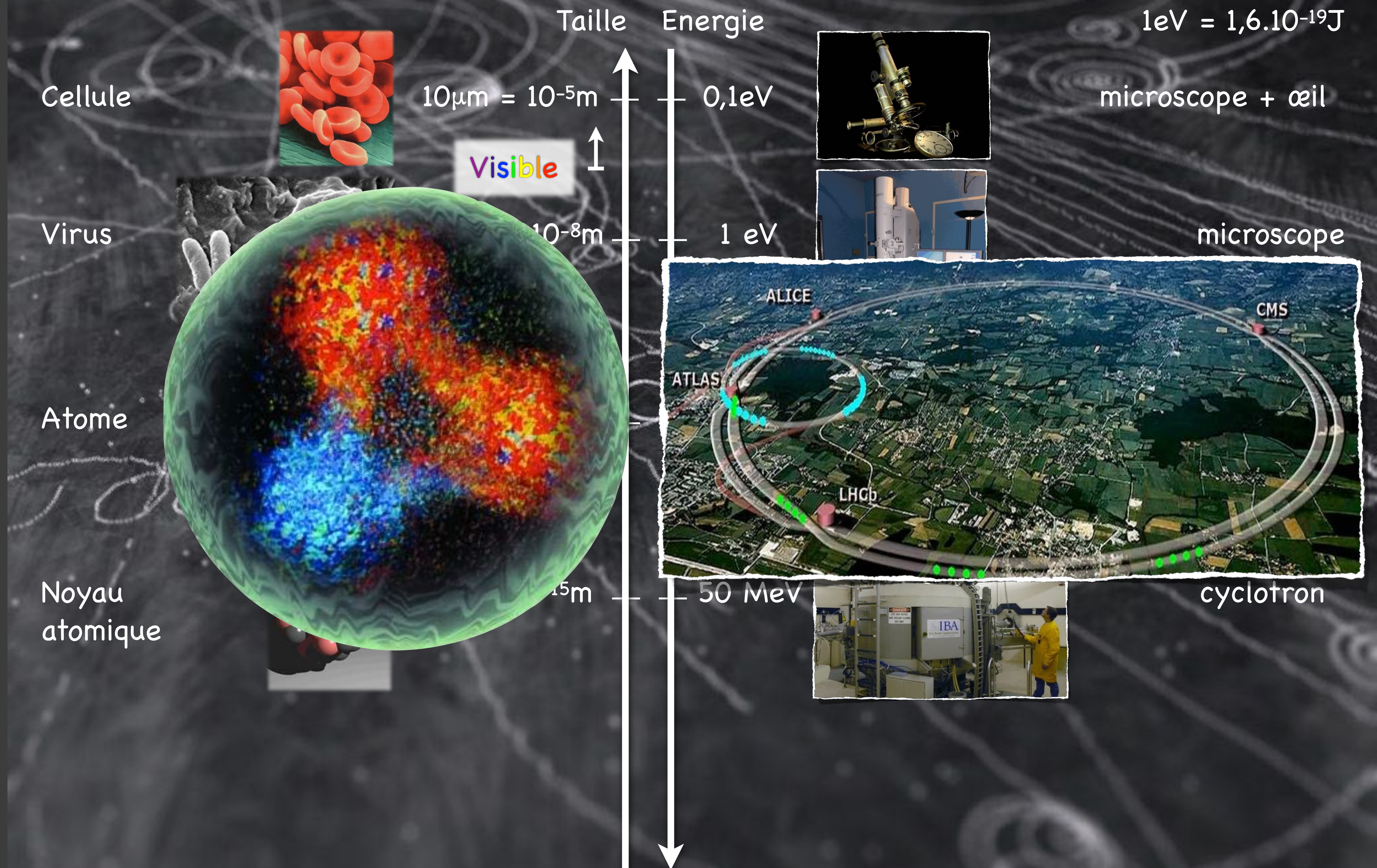
Échelles de taille et d'énergie



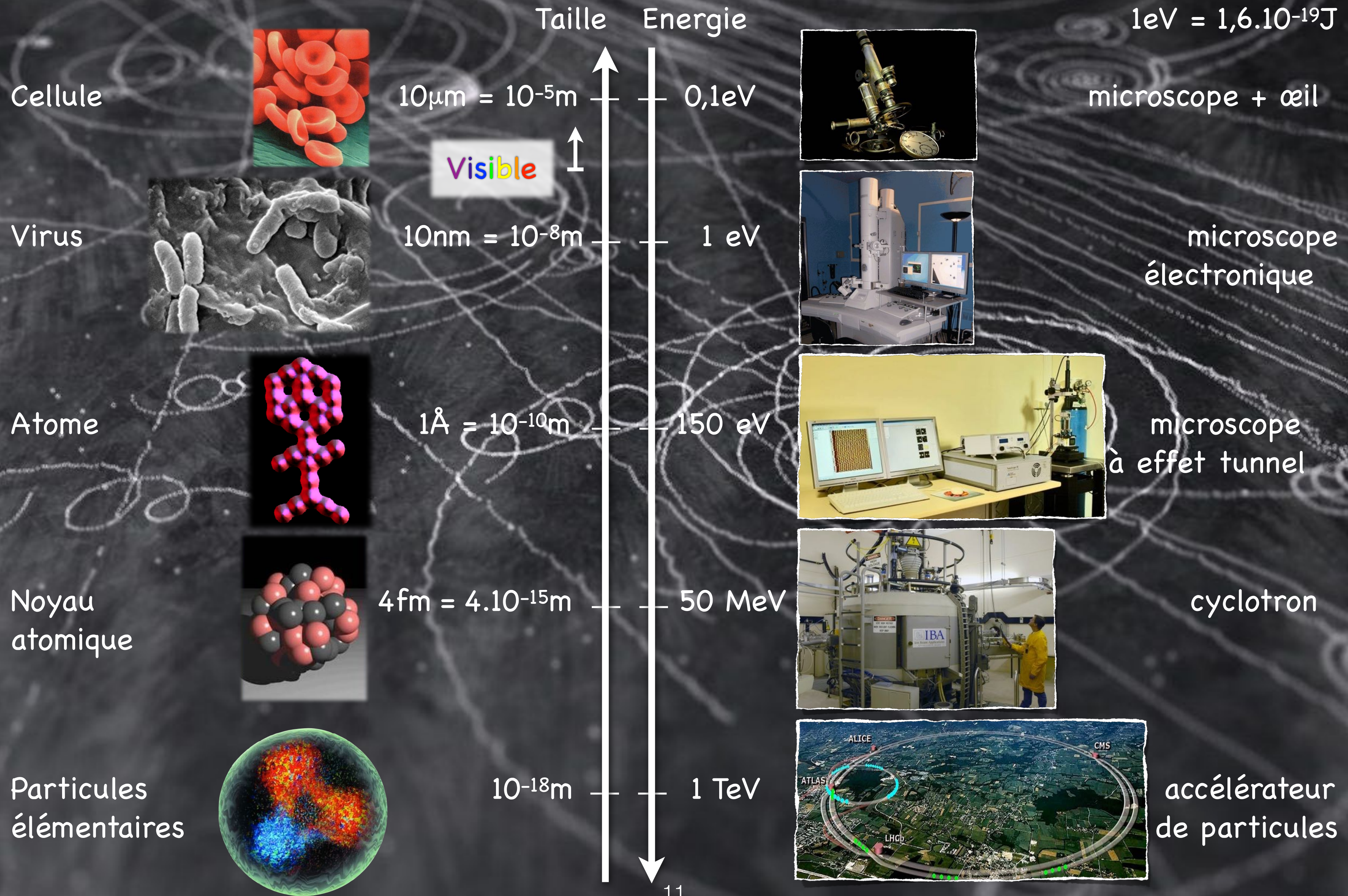
Échelles de taille et d'énergie



Échelles de taille et d'énergie

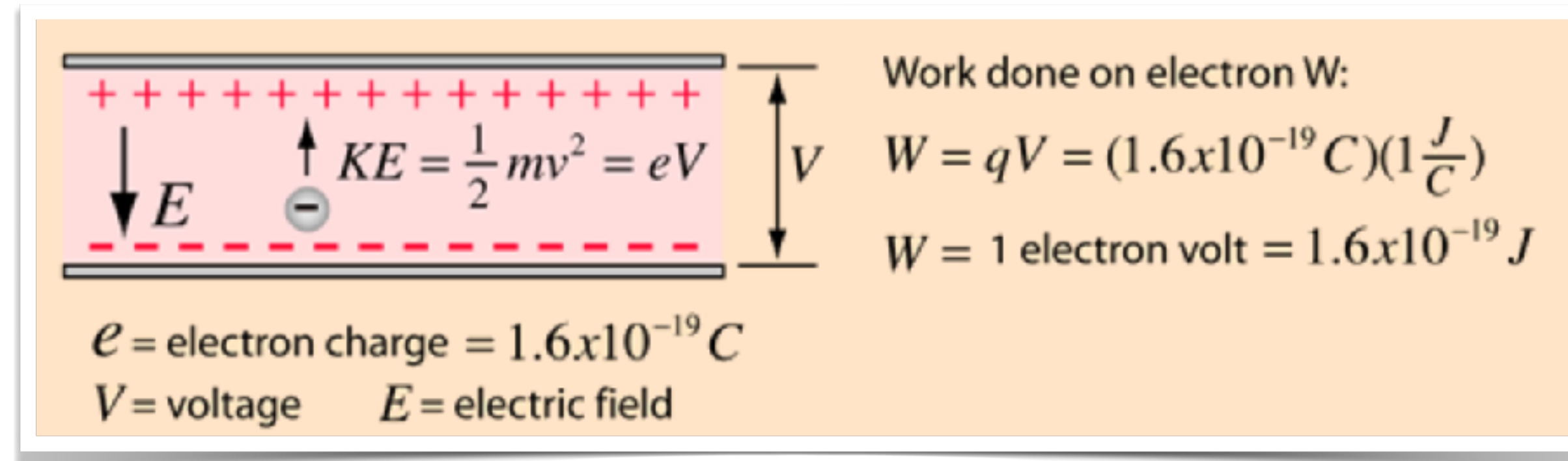


Échelles de taille et d'énergie



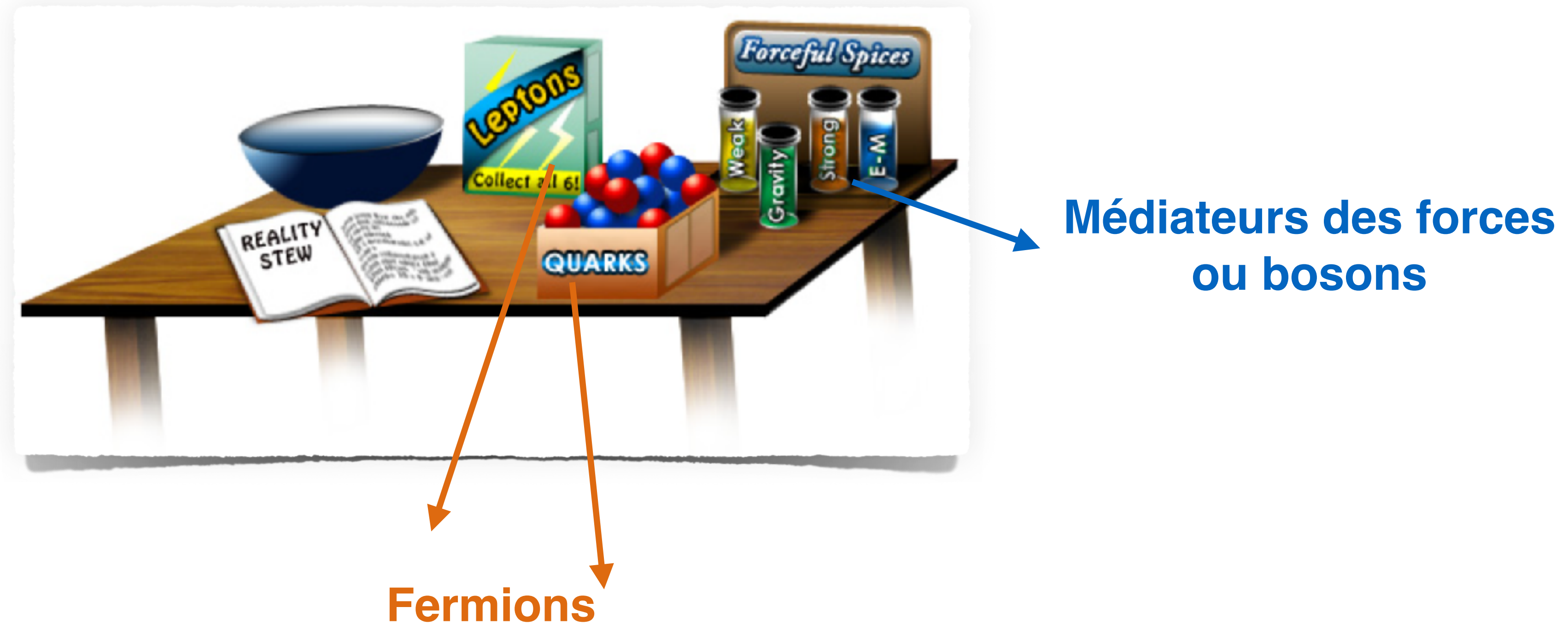
Quelques concepts en physique de particules

- **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:
 - $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ 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 !**
 $\frac{1}{2} m v^2 = 1.6 \times 10^{-7} \text{ Joules}$ ($m = 2 \times 10^{-6} \text{ kg}$, $v = 0.4 \text{ m/s}$)
 - 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 30 000 milliards de fois plus petit que celui d'un atome d'hydrogène ($r=25 \text{ pm} = 25 \cdot 10^{-12} \text{ m}$) → **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) :

Les leptons :







	Electron	Muon	Tau
$Q = -e$			
$Q = 0$			
	ν_e	ν_μ	ν_τ

→ masse

Les "briques" élémentaires (zoologie)

Les fermions («briques» élémentaires) :

Les leptons :







	Electron	Muon	Tau
$Q = -e$			
$Q = 0$			
	ν_e	ν_μ	ν_τ

→ masse

Les "briques" élémentaires (zoologie)







Les fermions («briques» élémentaires) :

Les leptons :

	Electron	Muon	Tau
$Q = -e$			
$Q = 0$			
	ν_e	ν_μ	ν_τ

masse

Les quarks :

	Up	Charm	Top
$+\frac{2}{3} e$			
$-\frac{1}{3} e$			
	Down	Strange	Beauty

masse

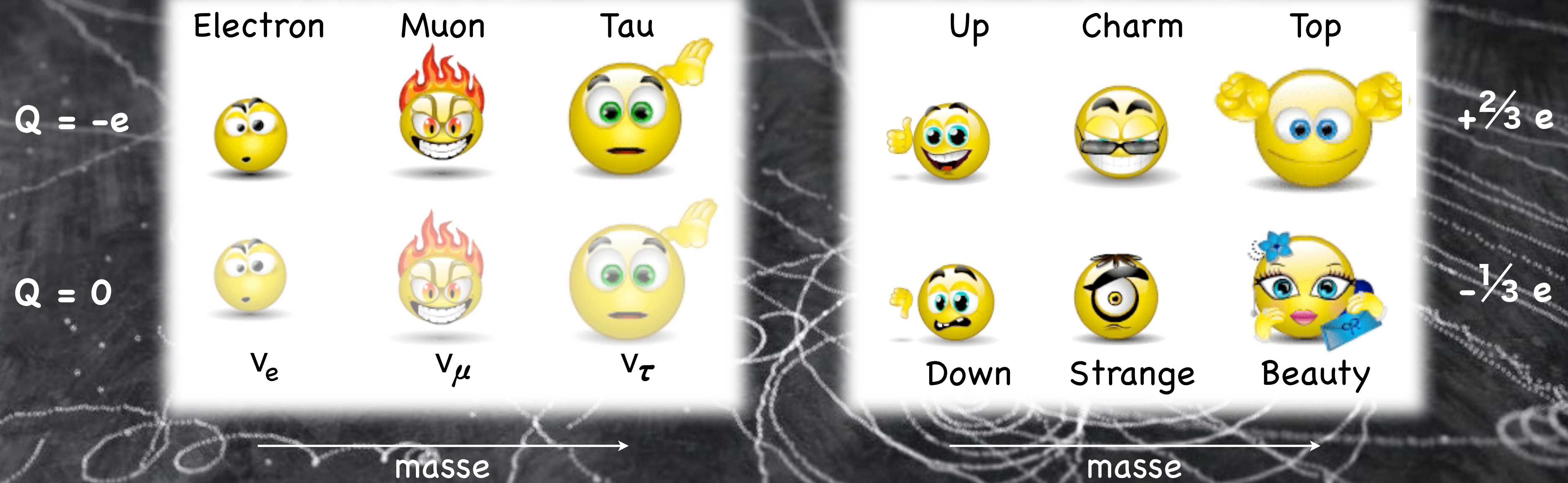
Les "briques" élémentaires (zoologie)

Les fermions («briques» élémentaires) :

et leurs anti-particules

Les leptons :

Les quarks :



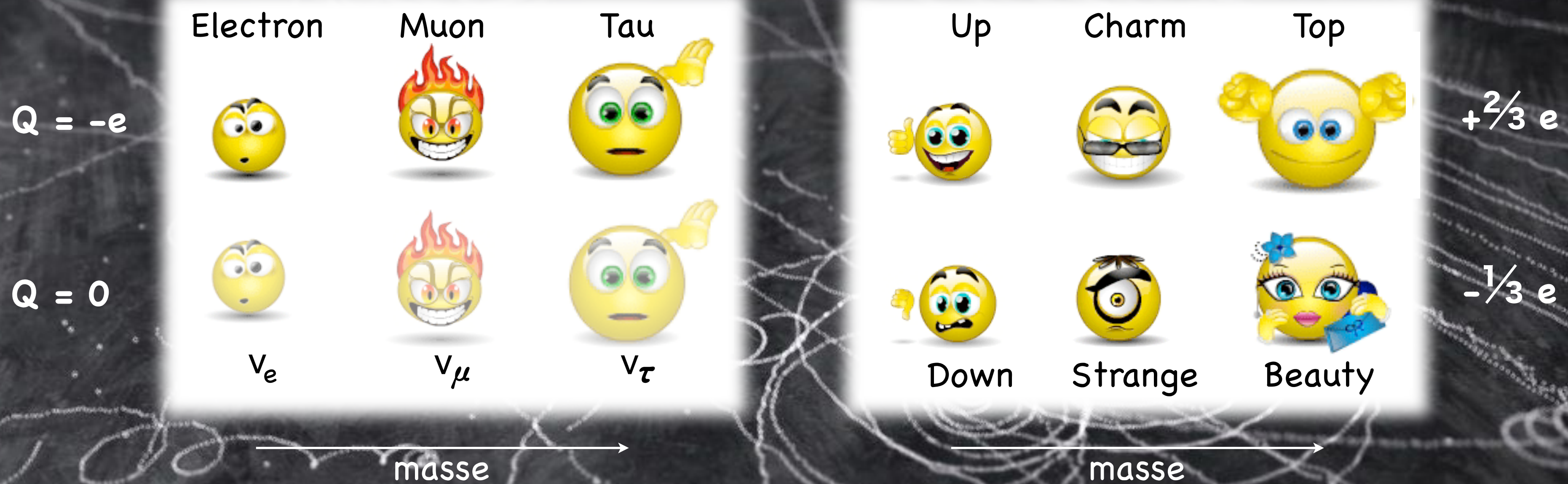
Les "briques" élémentaires (zoologie)

Les fermions («briques» élémentaires) :

et leurs anti-particules

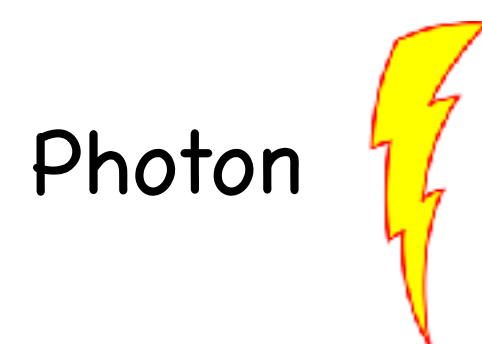
Les leptons :

Les quarks :

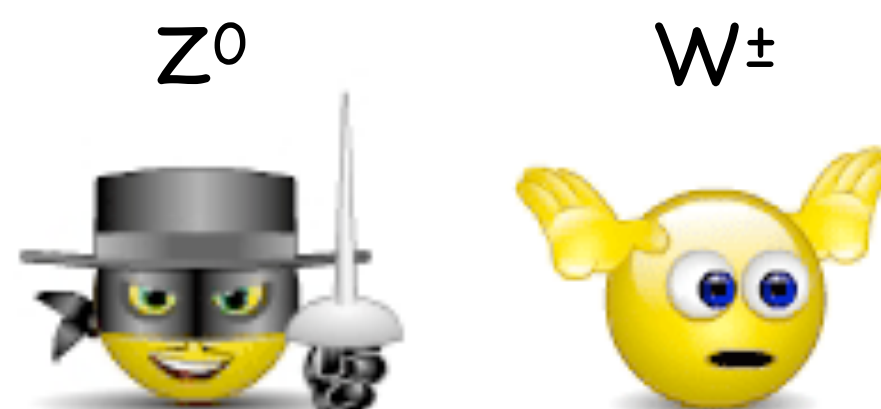


Les bosons (médiateurs des interactions = «ciment») :

Electro-Magnétisme :



Interaction Faible :



Interaction Forte :

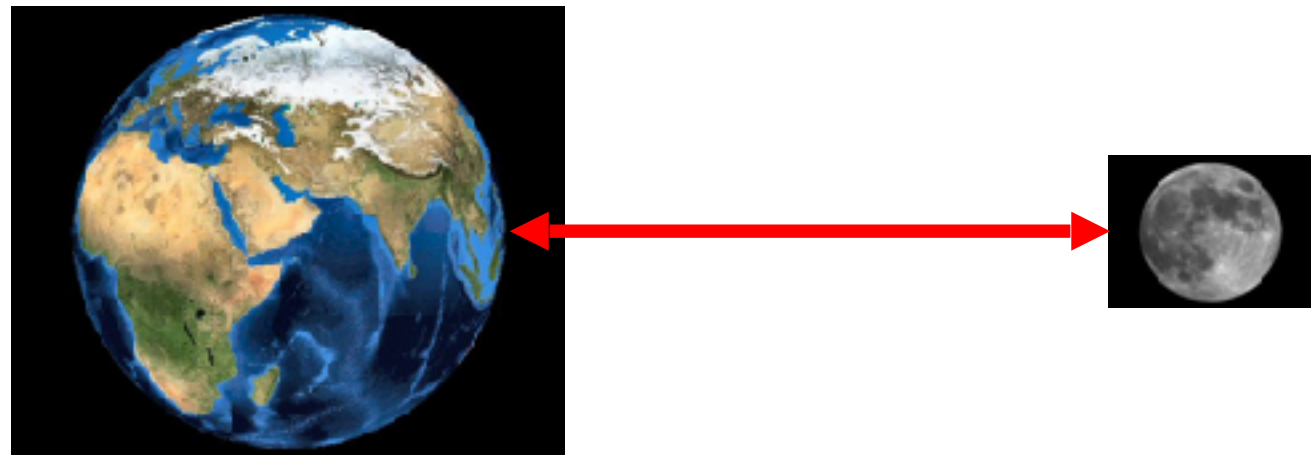


Boson de Higgs



Les interactions

Vision « classique »:
Action instantanée à distance

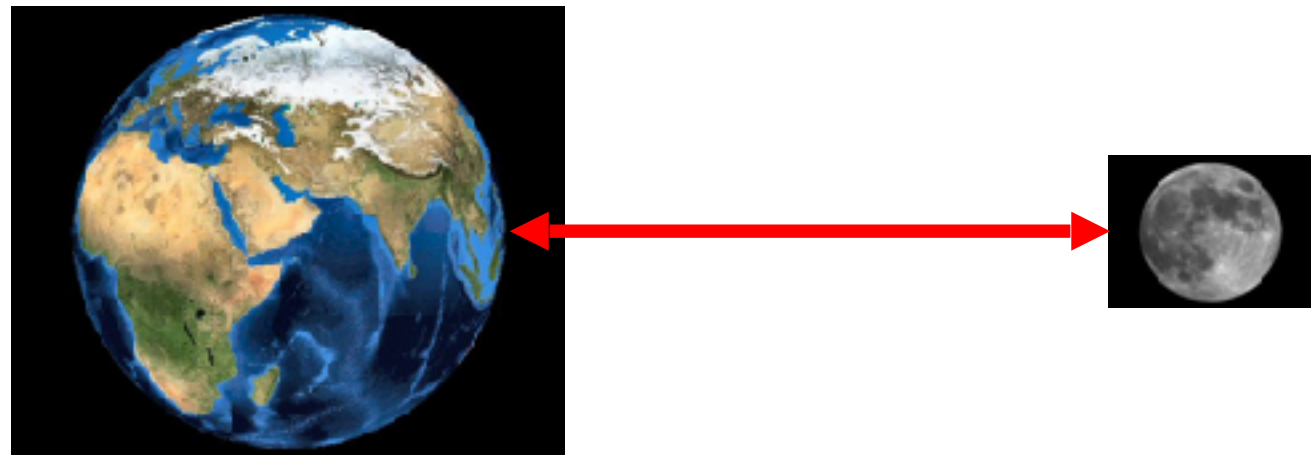


Vision « moderne »:
Échange de particules



Les interactions

Vision « classique » :
Action instantanée à distance



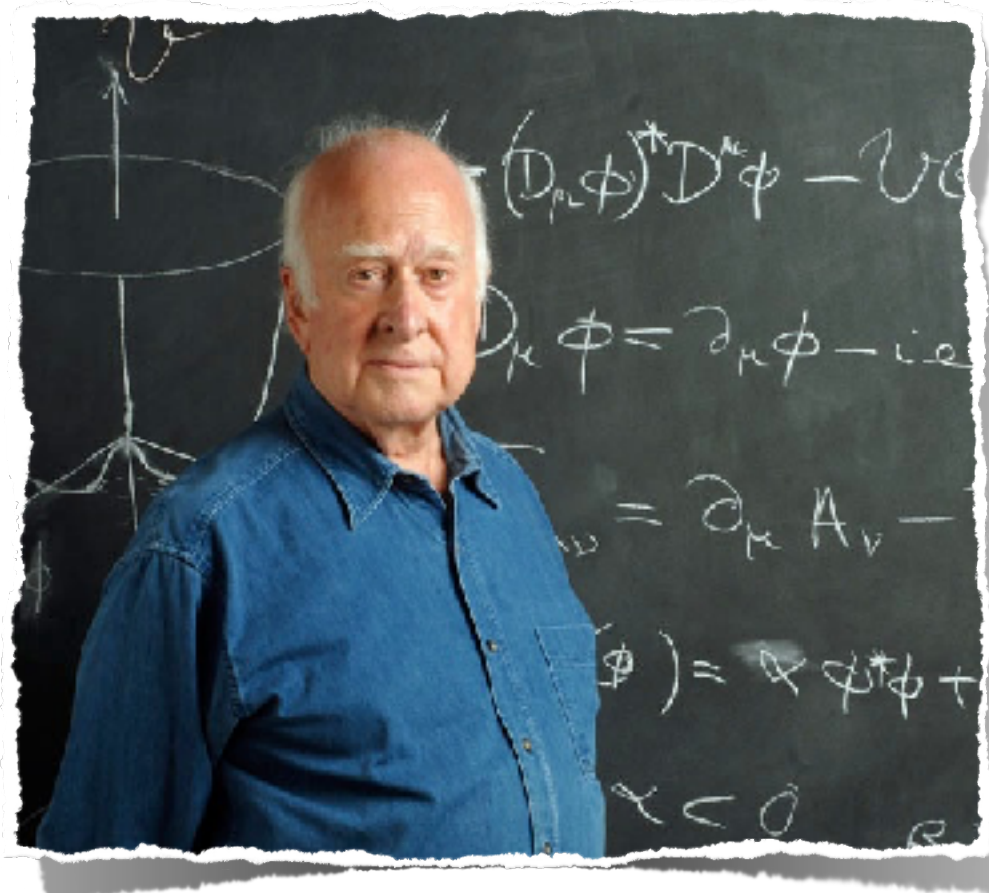
Vision « moderne » :
Échange de particules



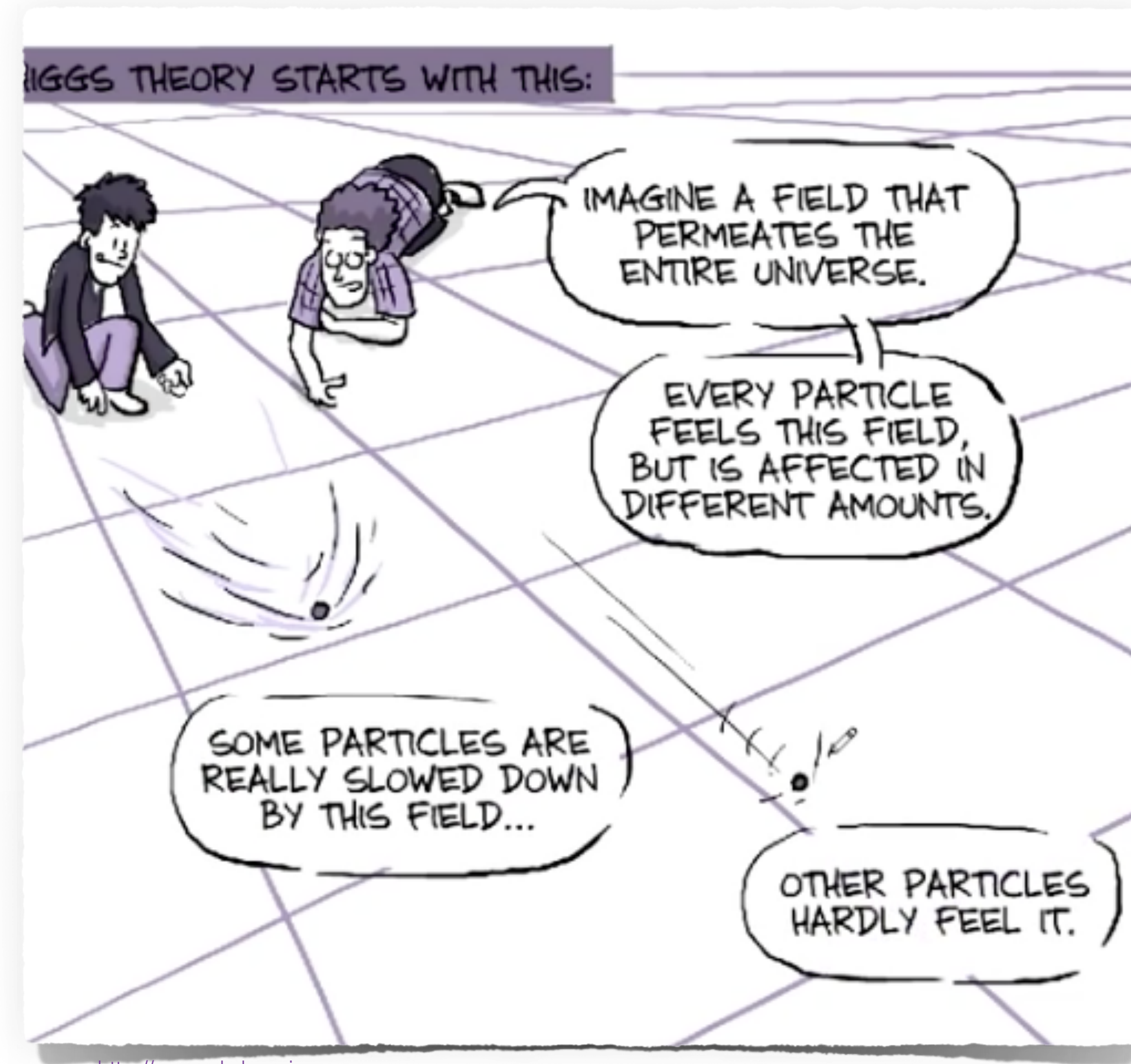
Les interactions :	Intensité	Médiateur	Portée	Domaine
Interaction forte	1	Gluons 	1 fm	Noyau, proton, neutron
Electromagnétisme	$\sim 10^{-2}$	Photon 	∞	électricité, chimie, lumière
Interaction faible	$\sim 10^{-6}$	Z^0  W^\pm 	< 1 fm	Radioactivité β , fusion soleil et Iter
Gravitation	$\sim 10^{-38}$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

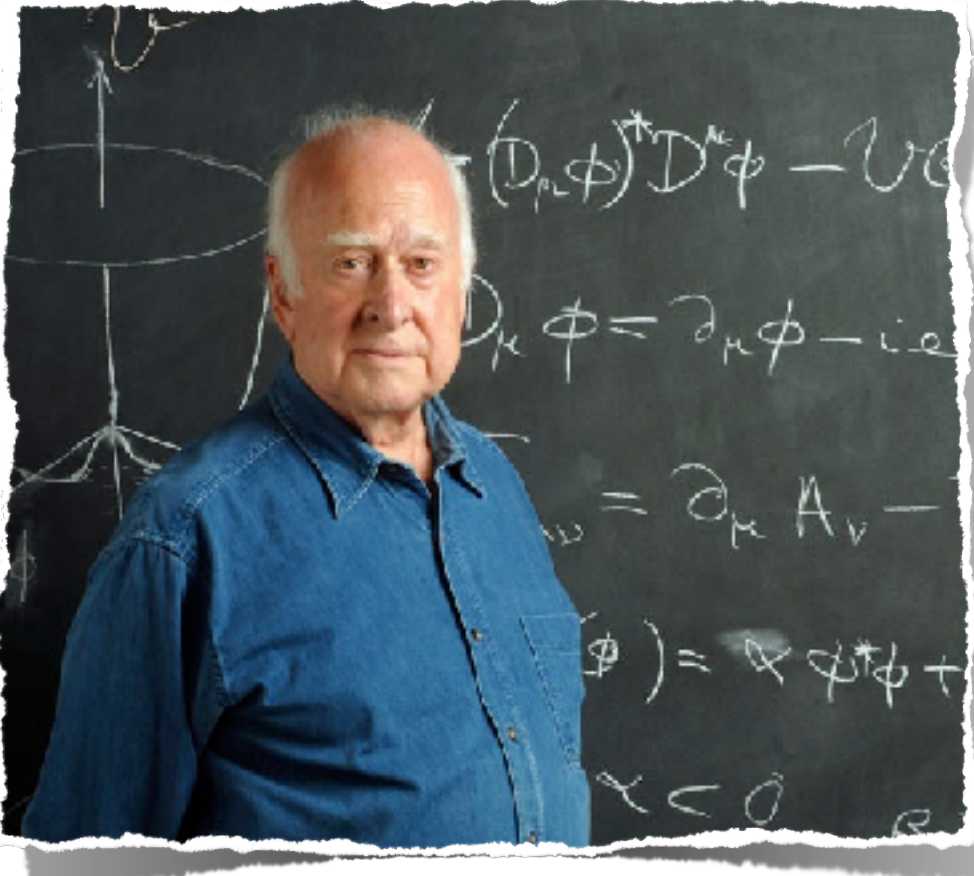


<http://www.phdcomics.com>

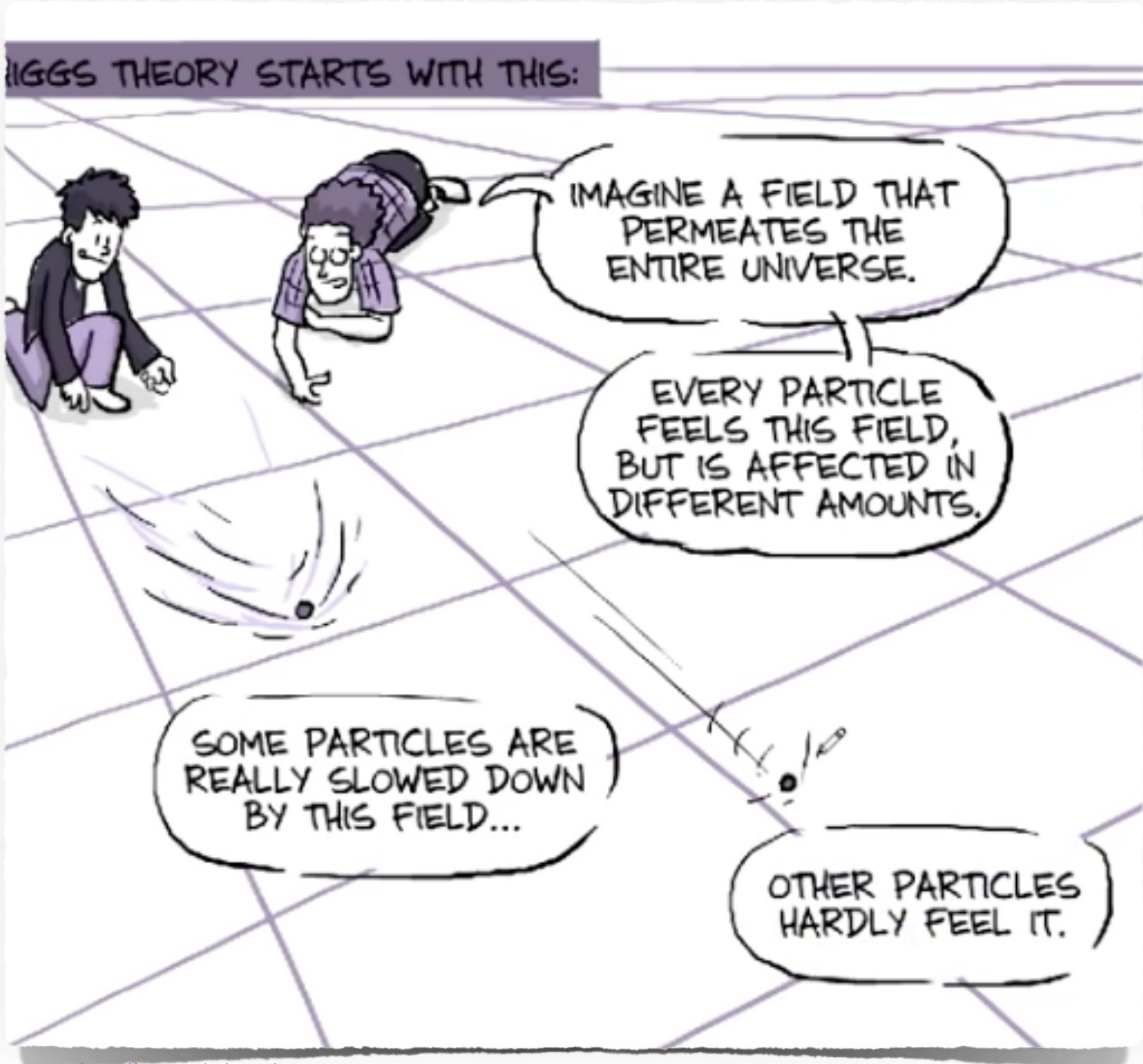
Le boson de Higgs



- 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

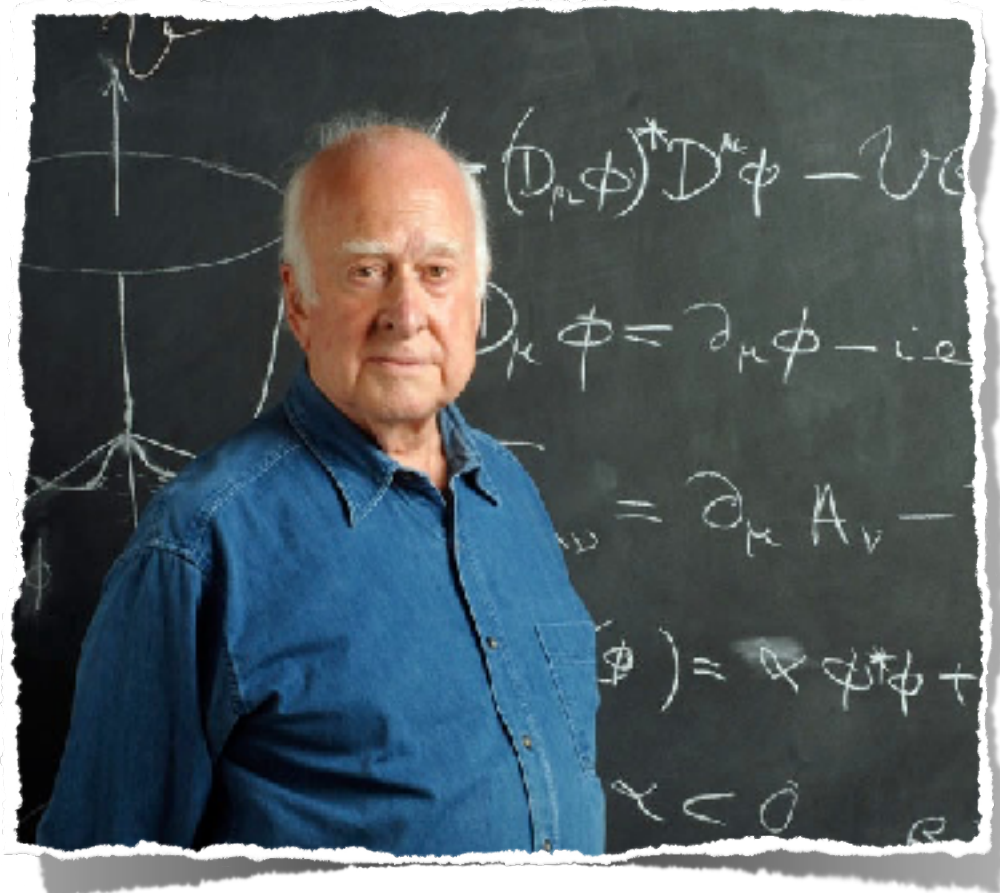


<http://www.phdcomics.com>

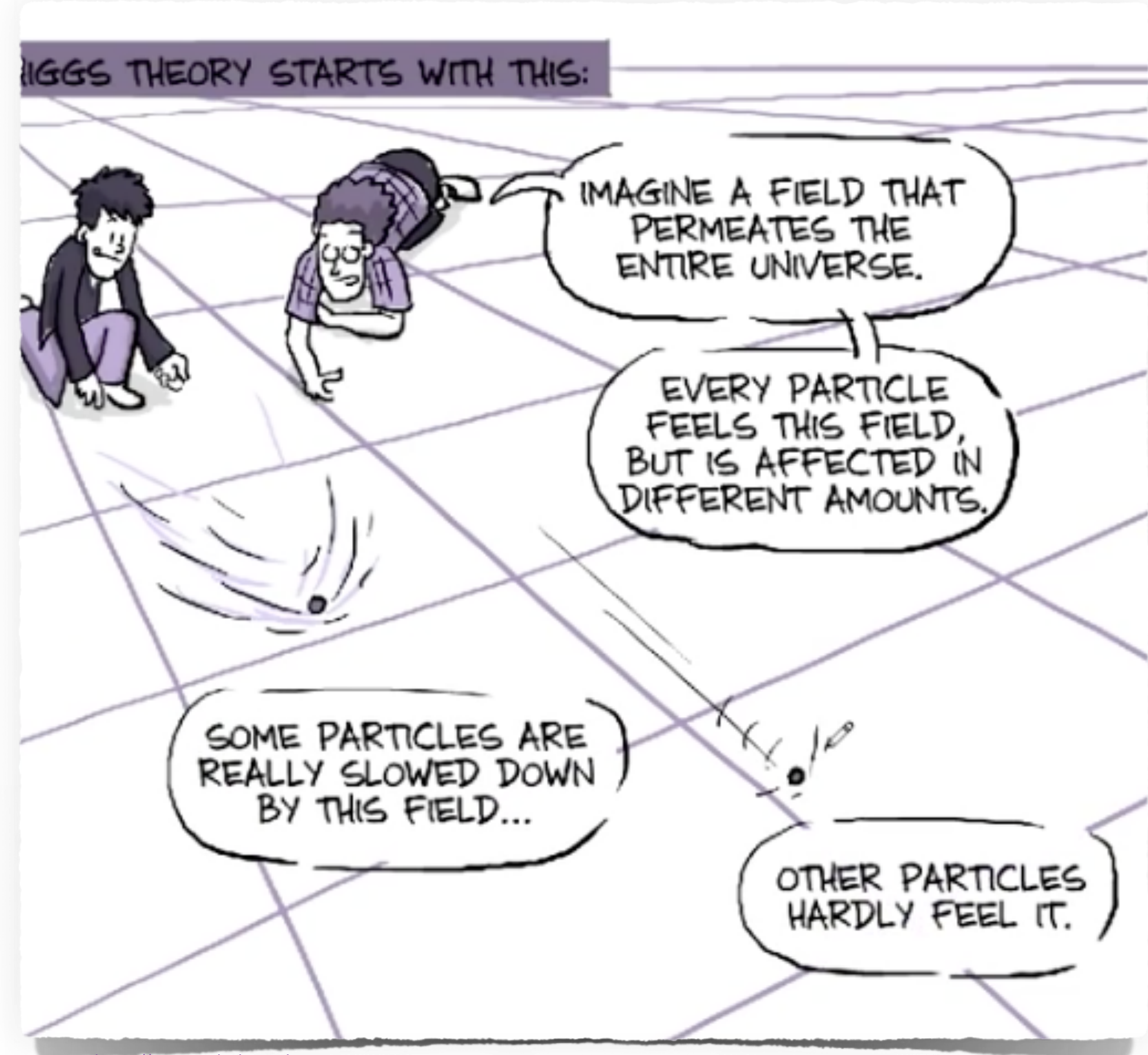
Le boson de Higgs



- 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



<http://www.phdcomics.com>

Insuffisances du modèle standard

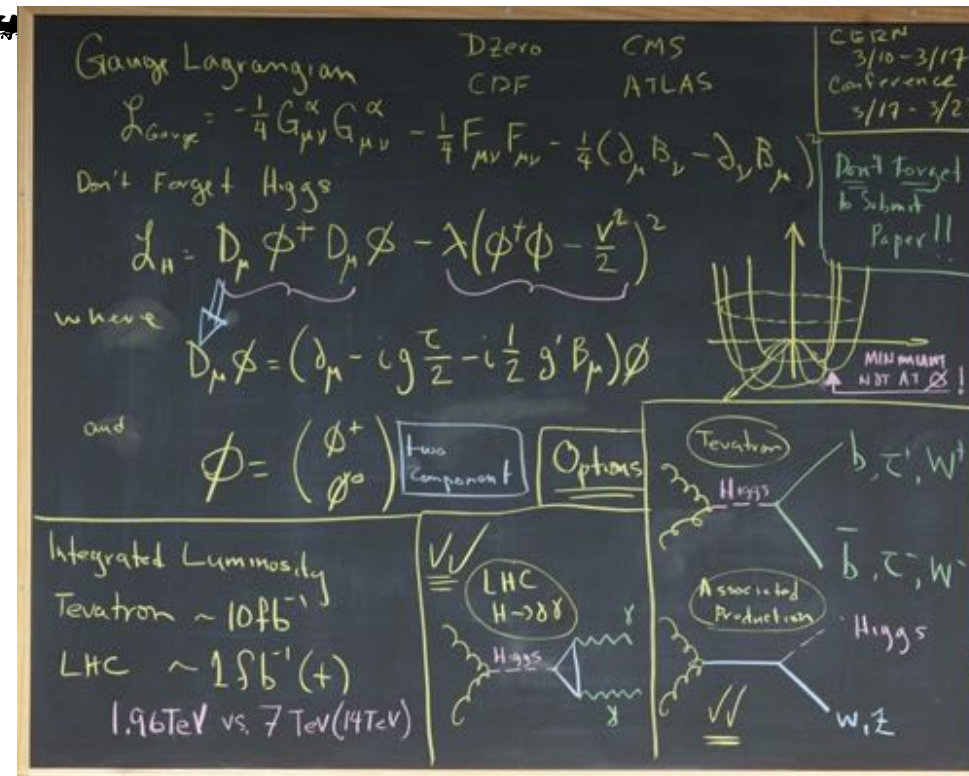
Insuffisances du modèle standard

- **Grand succès du modèle standard :**
 - Pouvoir prédictif (masses W et Z, nouvelles particules, etc.)
 - Grande précision
 - Pas encore mis en défaut

Gauge Lagrangian
 $\mathcal{L}_{\text{Gauge}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^{\alpha} G_{\mu\nu}^{\alpha} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \frac{1}{4} (\partial_{\mu} B_{\nu} - \partial_{\nu} B_{\mu})^2$
 Don't Forget Higgs
 $\mathcal{L}_H = D_{\mu} \phi^{\dagger} D_{\mu} \phi - \lambda (\phi^{\dagger} \phi - \frac{v^2}{2})^2$
 where
 $D_{\mu} \phi = (\partial_{\mu} - i g \frac{\tau}{2} - i \frac{1}{2} g' B_{\mu}) \phi$
 and
 $\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$ Two Component Options

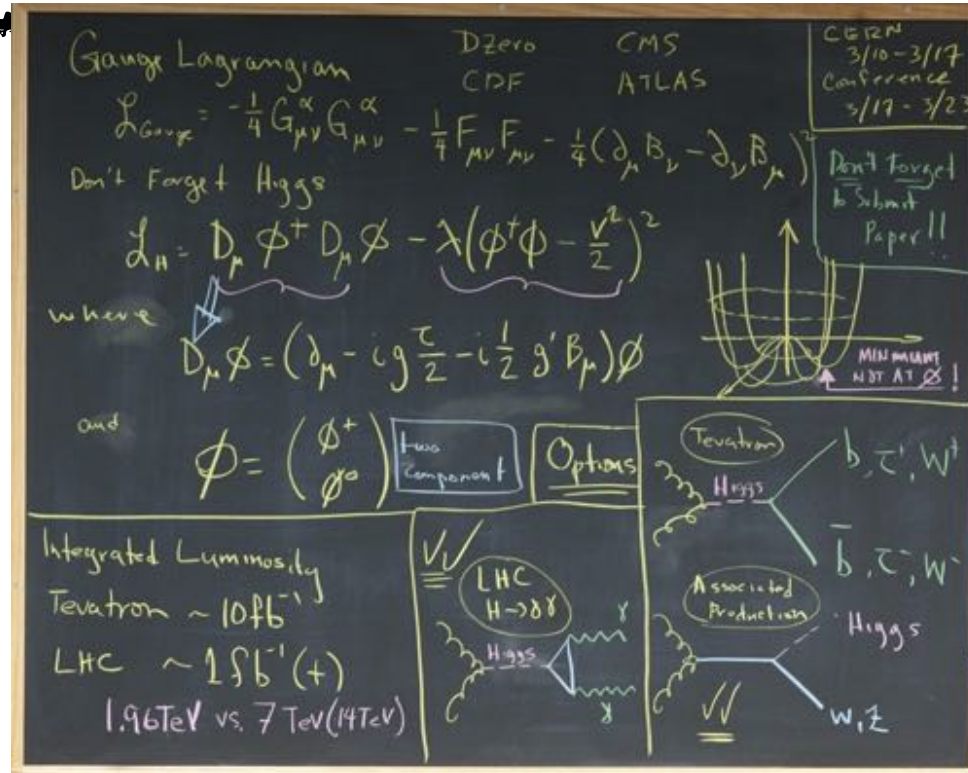
DZero CMS
 CDF ATLAS
 CERN 3/10-3/17 Conference
 3/17-3/23
 Don't Forget to Submit Paper!!
 MINIMUM NOT AT 8!
 Tevatron Higgs b, τ, W^{\pm}
 Associated Production b, τ, W^{\pm} Higgs W, Z
 LHC $H \rightarrow \gamma\gamma$
 Higgs γ
 Integrated Luminosity
 Tevatron $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$
 LHC $\sim 150 \text{ fb}^{-1} (+)$
 1.96 TeV vs. 7 TeV (14 TeV)

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

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 pourquoi ... ?

- il y a t'il trois familles de leptons/quarks?
- les charges électriques des particules sont les mêmes ?
- pas d'unification interaction forte/électro-faible?
- Gravitation exclue?
- 25 paramètres du modèles :
 - 12 masses des fermions (quarks & leptons)
 - 4+4 angles de mélange (CKM, NMS)
 - 3 masses des bosons (W, Z, Higgs)
 - 2 intensités d'interaction (électro-faible, forte)

SIMILARLY, WE HAVE A

PERIODIC TABLE OF THE FUNDAMENTAL PARTICLES

	charge				
QUARKS	2/3	u up	c charm	t top	? ?
	-1/3	d down	s strange	b bottom	? ?
LEPTONS	-1	e electron	μ muon	τ tau	? ?
	0	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	? ?

mass

IT HAS INTERESTING FEATURES TOO.

PATTERNS THAT SUGGEST THERE MUST BE SOME SORT OF UNDERLYING STRUCTURE THAT WE DON'T UNDERSTAND.

WE HAVEN'T SEEN IT YET.

ARE THERE MORE PARTICLES?

WHAT'S THE SOURCE OF THE PATTERNS?

<http://www.phdcomics.com>

L'univers

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



L'univers

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



L'univers

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



L'univers

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



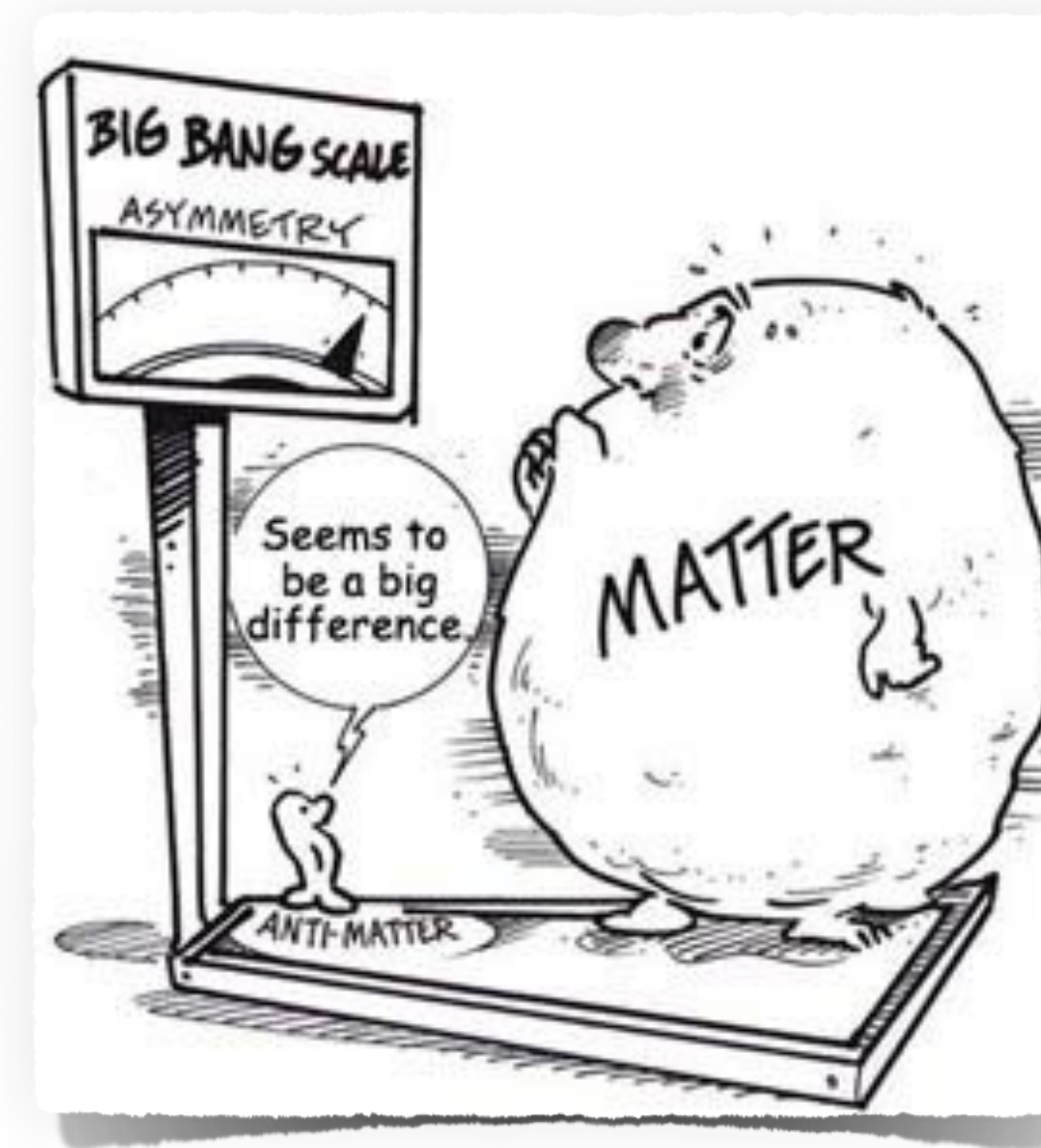
L'univers

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



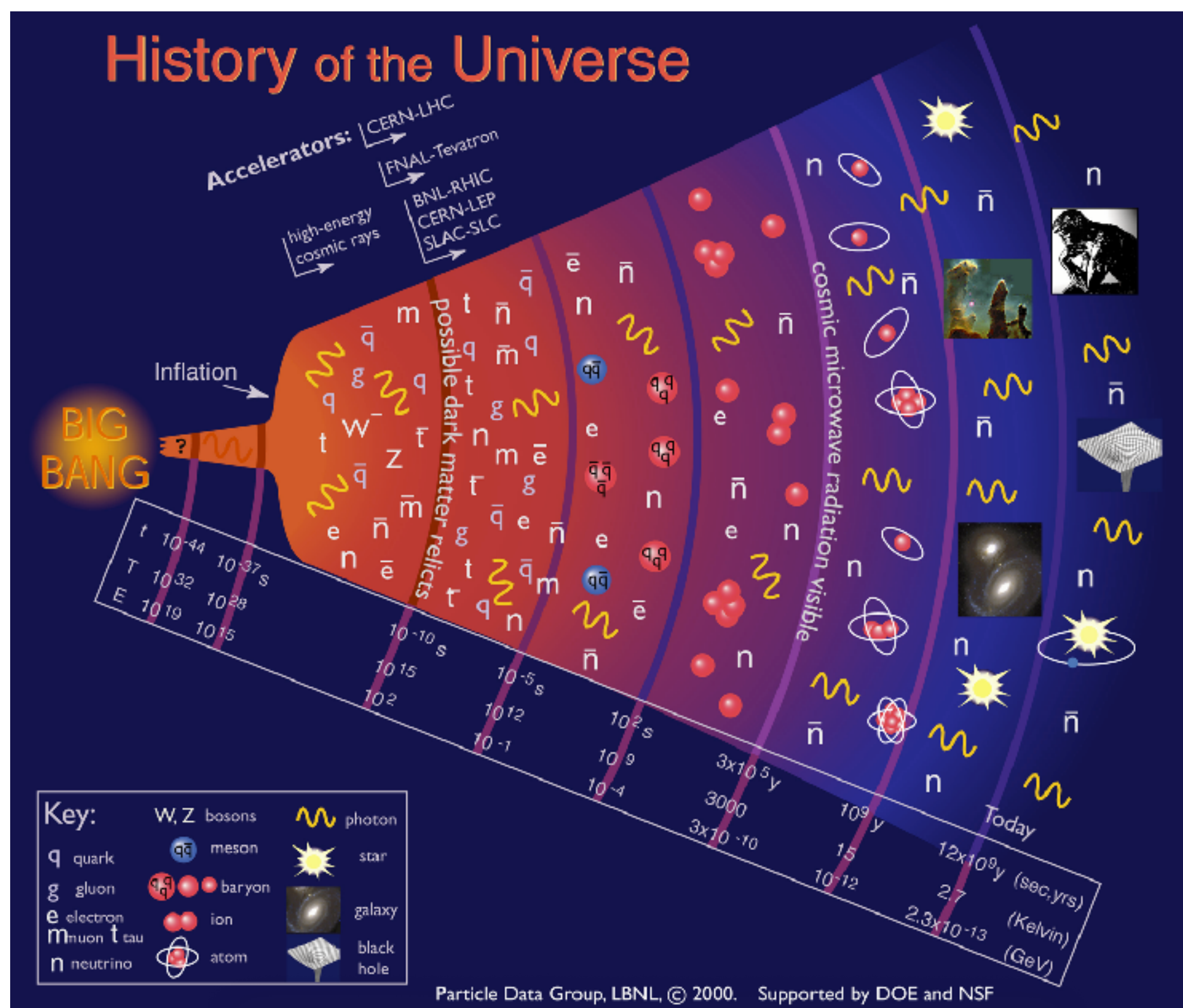
L'énigme de l'asymétrie matière-antimatière

- 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

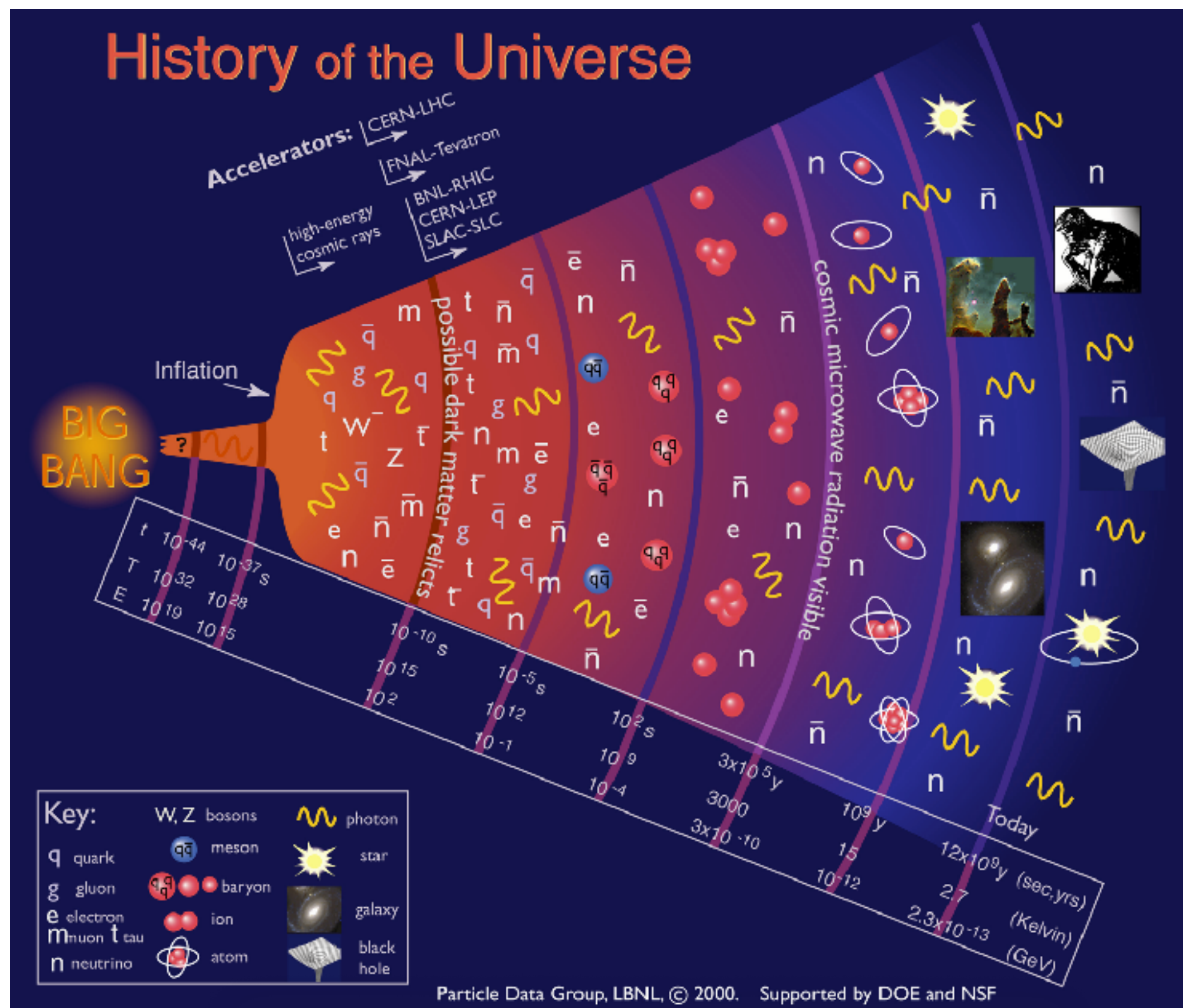
- Juste après le Big Bang, pour qq millésimes de seconde, l'univers fut composé d'une soupe extrêmement dense et chaude de particules voyageant presque à la vitesse de la lumière. Durant ces premiers instants évanescents, les quarks et les gluons étaient seulement liés faiblement, livres de bouger dans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



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

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**



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

where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + f_{bc}^a A_\mu^b A_\nu^c$

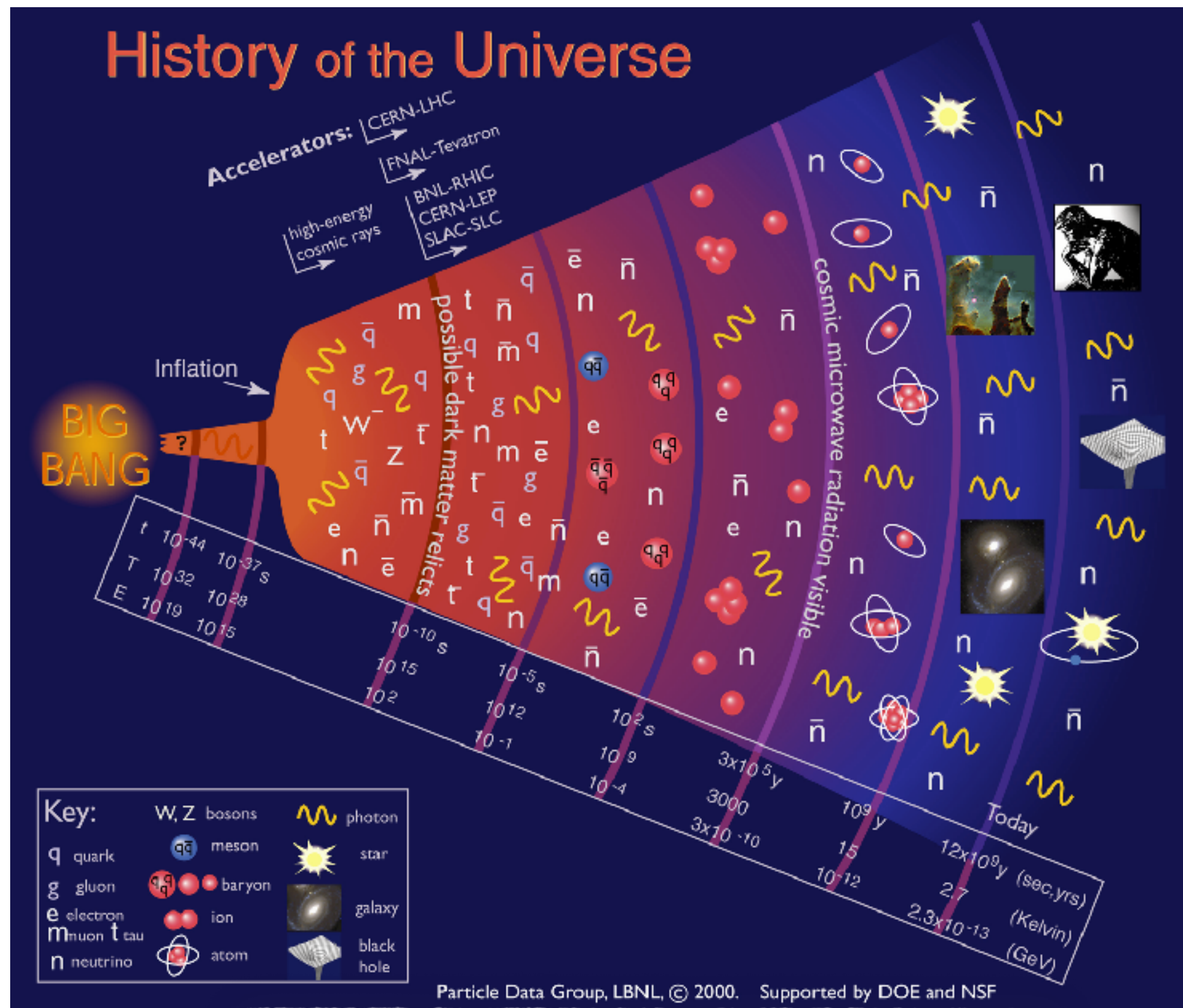
and $D_\mu \equiv \partial_\mu + i\tau^a A_\mu^a$

Étudier les propriétés de l'interaction forte: le confinement

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

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**

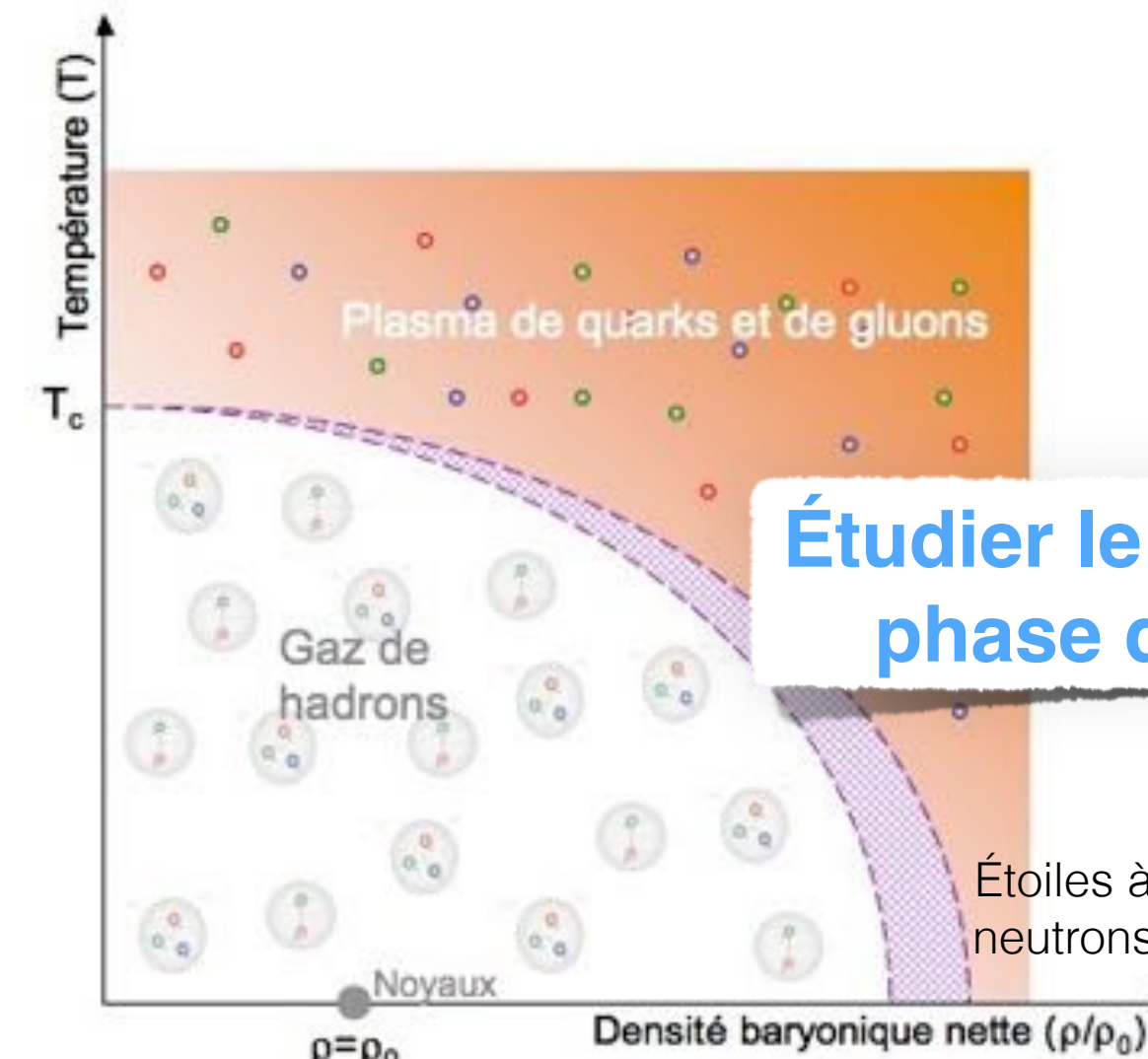


Comprendre les premiers instants de l'évolution de l'Univers

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

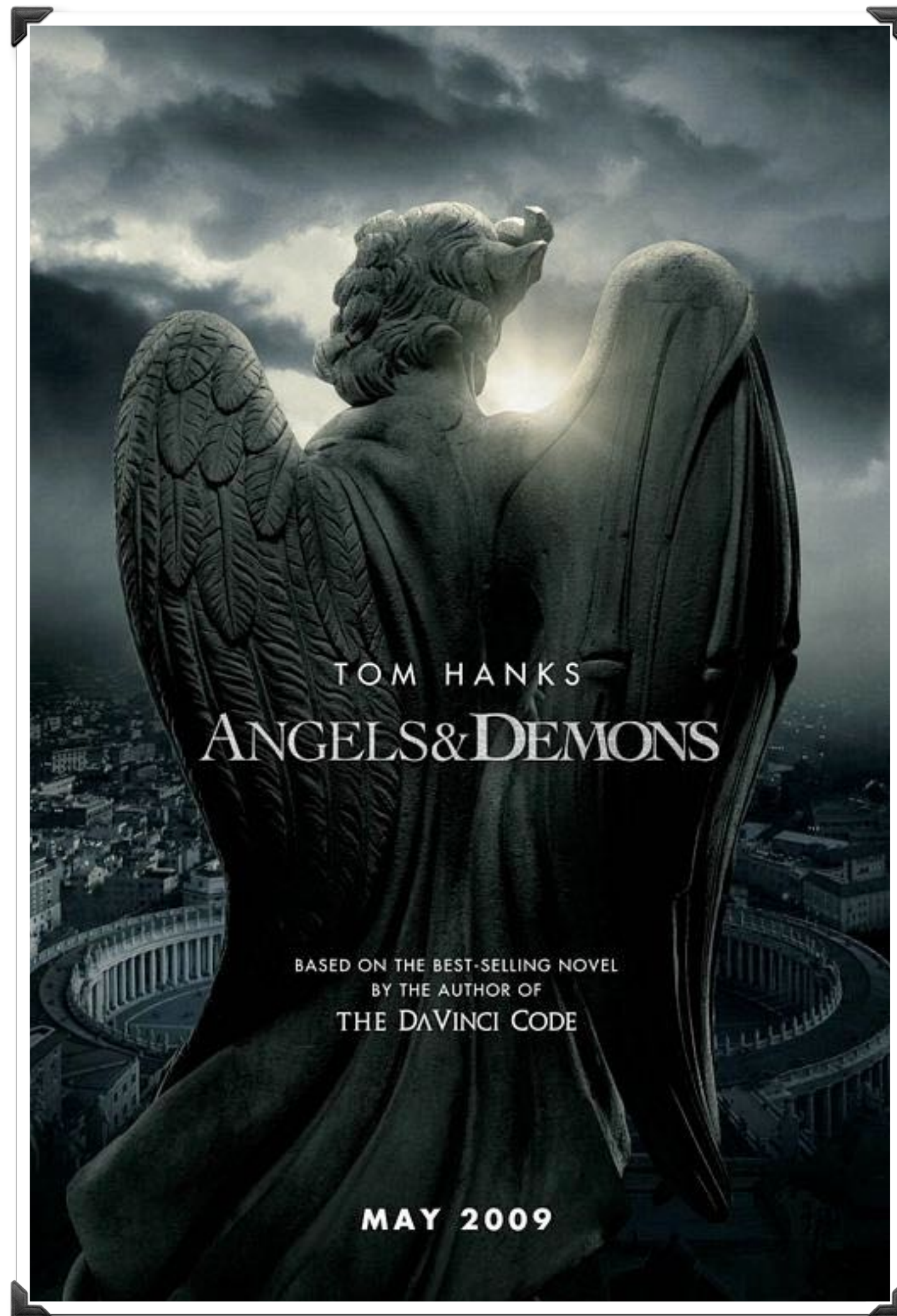
where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{bc}^a A_\mu^b A_\nu^c$
and $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$

Étudier les propriétés de l'interaction forte: le confinement



Étudier le diagramme de phase de la matière

Anges et démons



Film de Ron Howard inspiré du livre de Dan Brown
sorti le 13 mai 2009

Une société secrète, appelée les Illuminati, s'est jurée d'anéantir l'église catholique. Pour mener à bien son projet, elle a dérobé au CERN suffisamment d'anti-matière pour annihiler le Vatican. Robert Langdon, spécialiste des symboles, est appelé à la rescousse...

Passage éclair au CERN

GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS



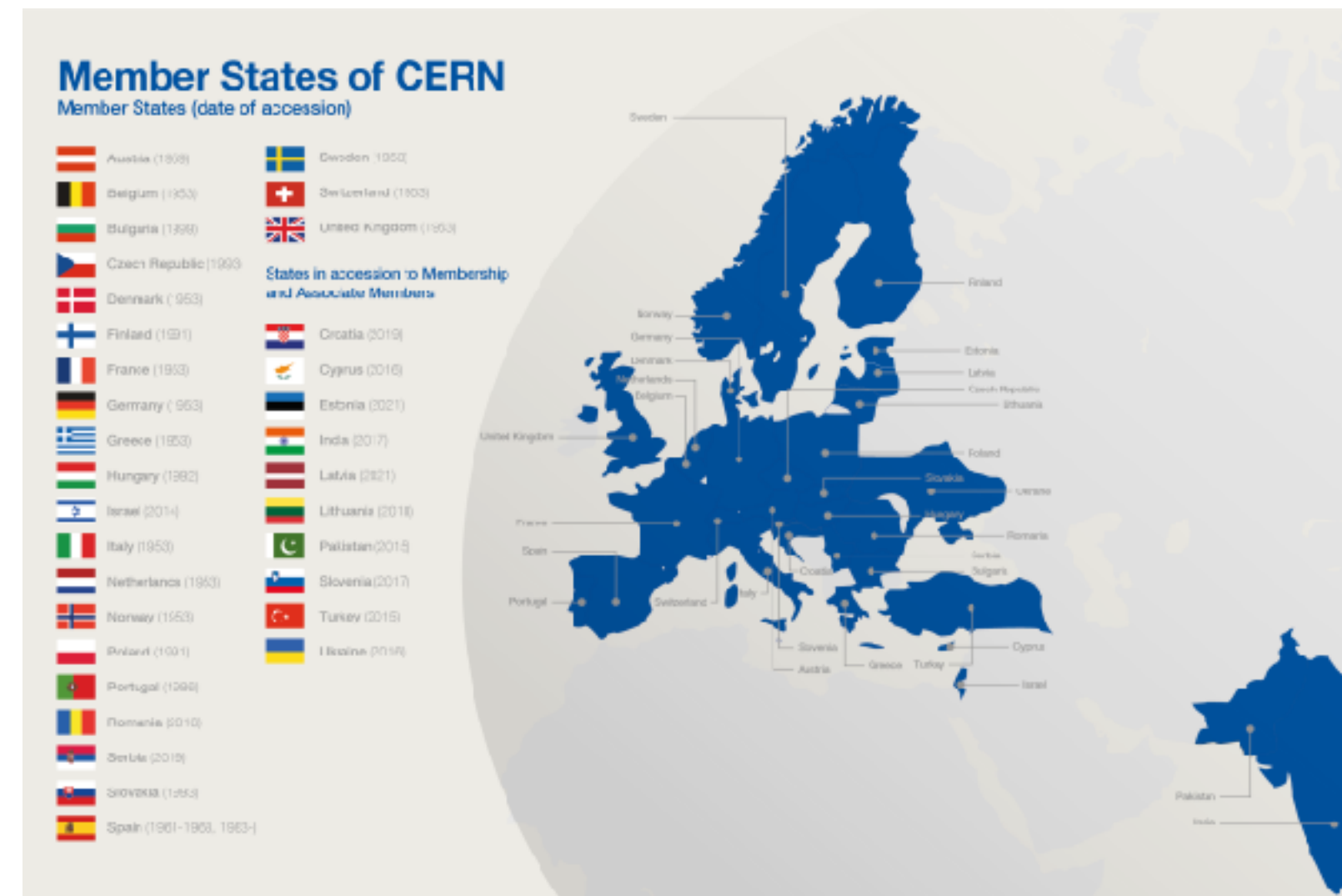
LARGE HADRON COLLIDER
CERN LABORATORIES
GENEVA, SWITZERLAND

GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS

LARGE HADRON COLLIDER
CERN LABORATORIES
GENEVA, SWITZERLAND

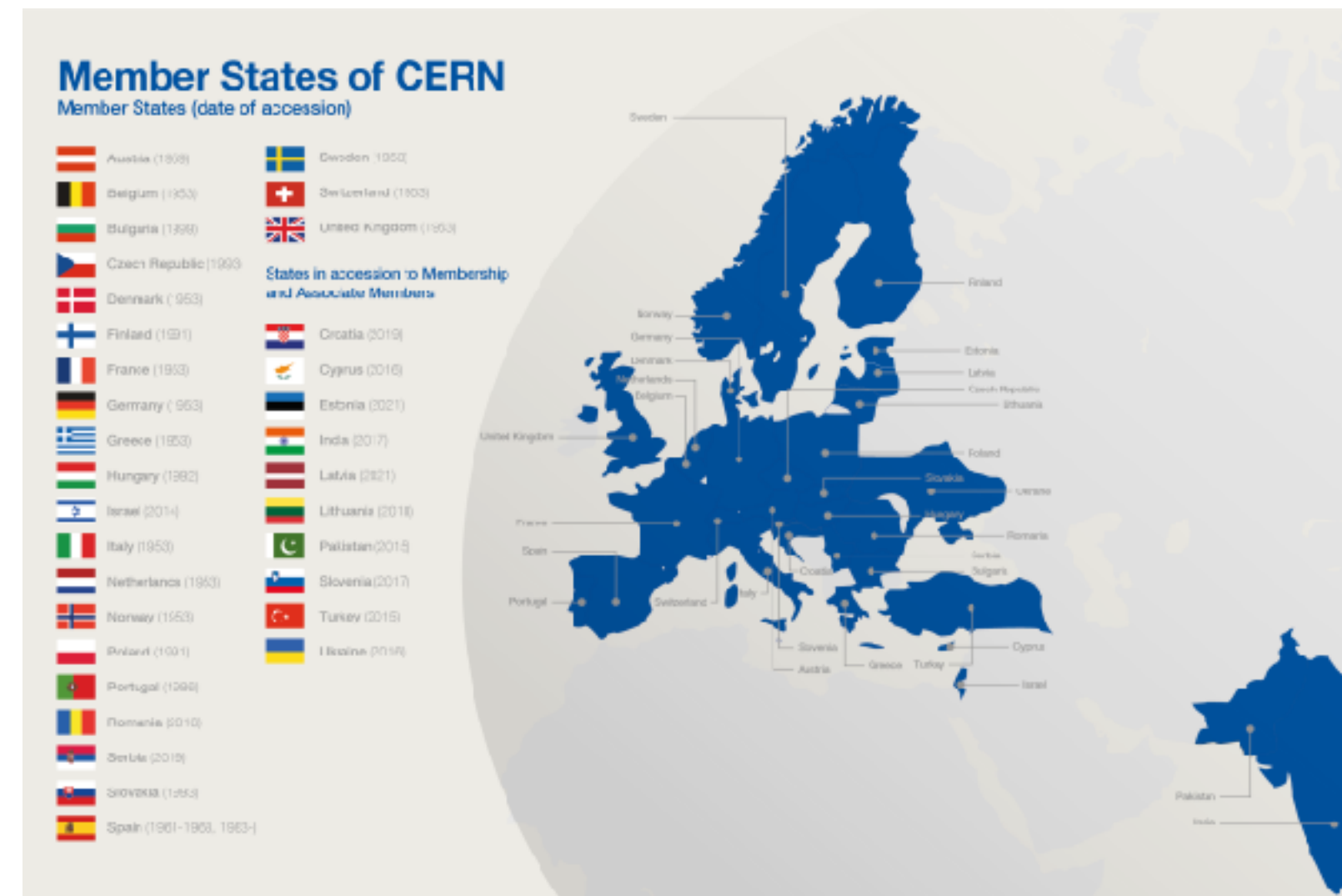
Le CERN

- **Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire**
(Accelerating Science)
 - Frontière Franco-Suisse, Genève ($46^{\circ}14'2.60''N$, $6^{\circ}3'10.86''E$)
 - Création en 1954
 - Environ 12000 physiciens
 - 23 pays membres
 - 120 nationalités



Le CERN

- **Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire**
(Accelerating Science)
 - Frontière Franco-Suisse, Genève (46°14'2.60"N, 6°3'10.86"E)
 - Création en 1954
 - Environ 12000 physiciens
 - 23 pays membres
 - 120 nationalités



- QQ faits marquants:
 - 4 prix Nobel dont Georges Charpak
 - Invention du web en 1990 par Sir Timothy Berners-Lee



CERN: mythes et réalités



CERN: mythes et réalités



CERN: mythes et réalités

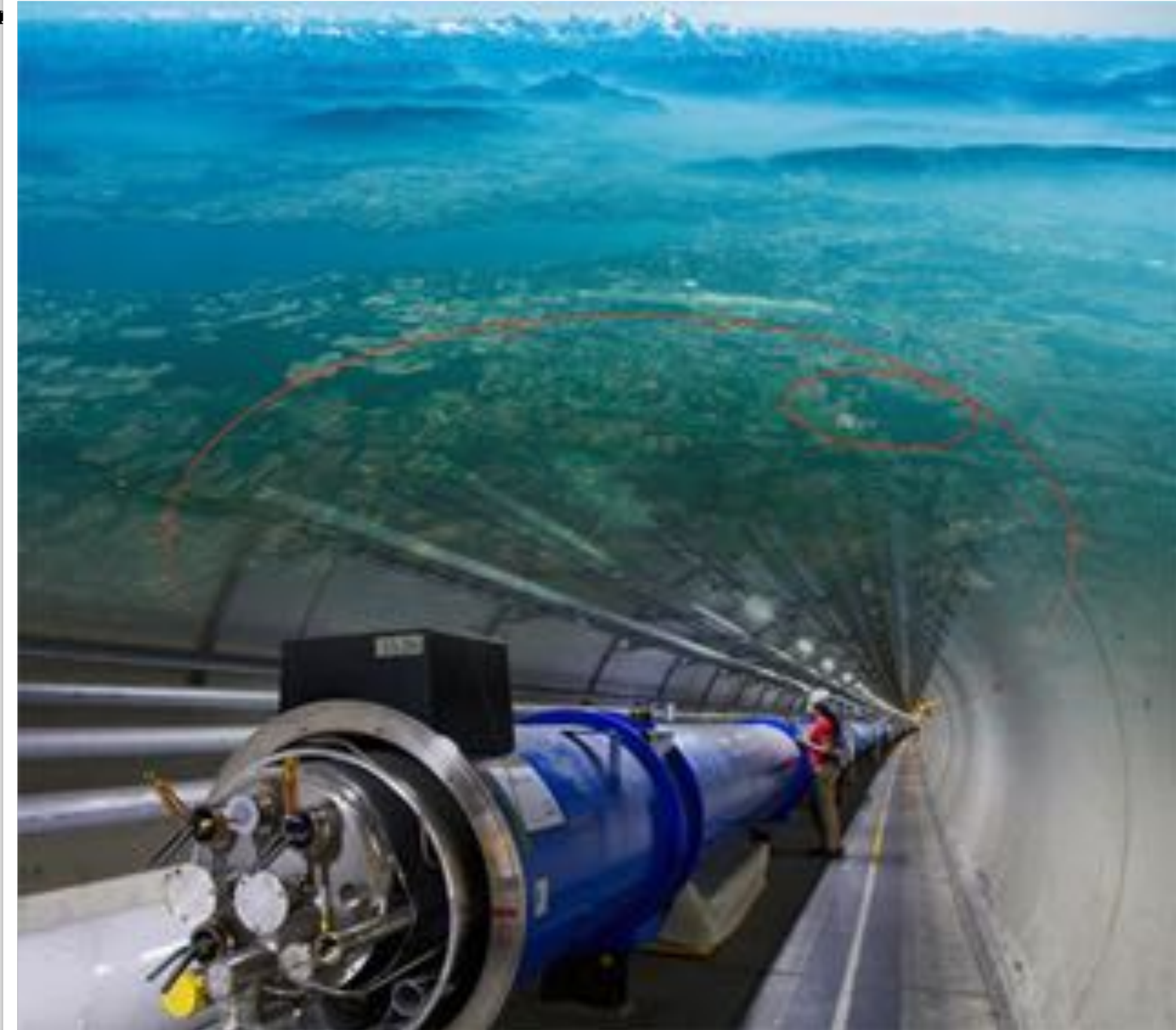
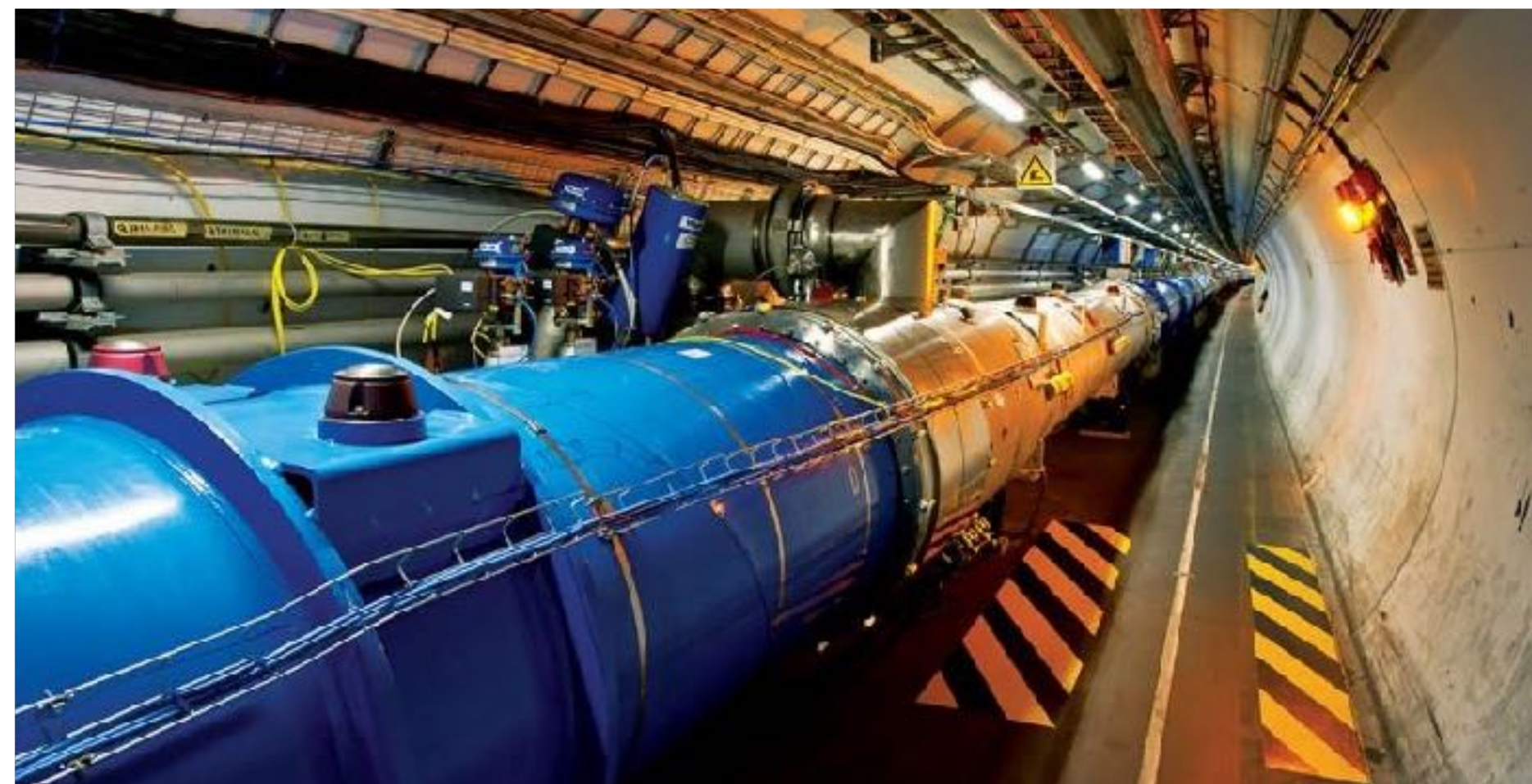


CERN: mythes et réalités



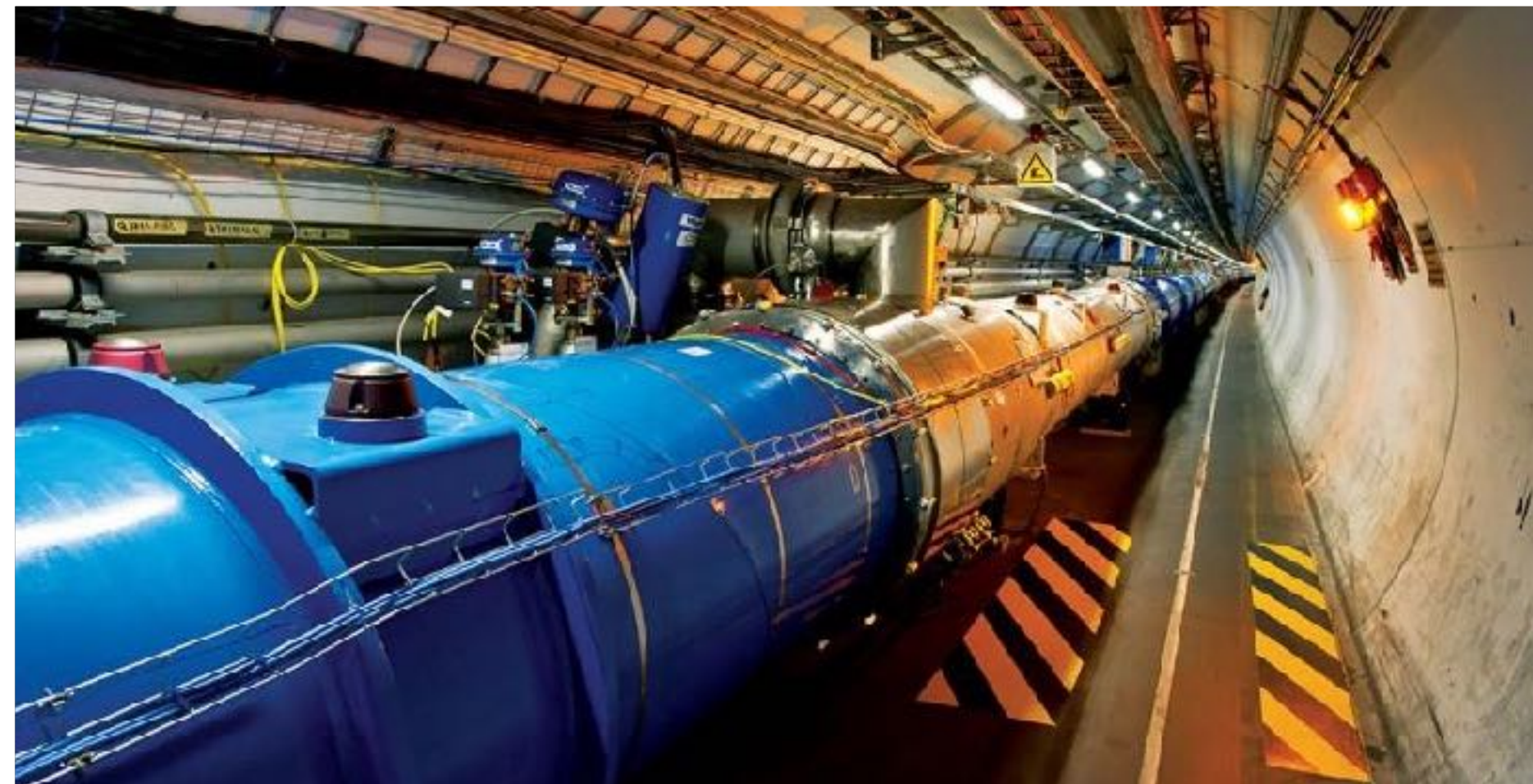
Le Large Hadron Collider (LHC)

- **Large Hadron Collider:**
 - **27km de circonférence**
à ~100m sous terre
 - **Collisions pp et PbPb**
a 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)



Le Large Hadron Collider (LHC)

- **Large Hadron Collider:**
 - **27km de circonférence**
à **~100m sous terre**
 - **Collisions pp et PbPb**
a 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)



Le LHC: mythes et réalités



Le LHC: mythes et réalités



Le LHC: mythes et réalités



Le LHC: mythes et réalités

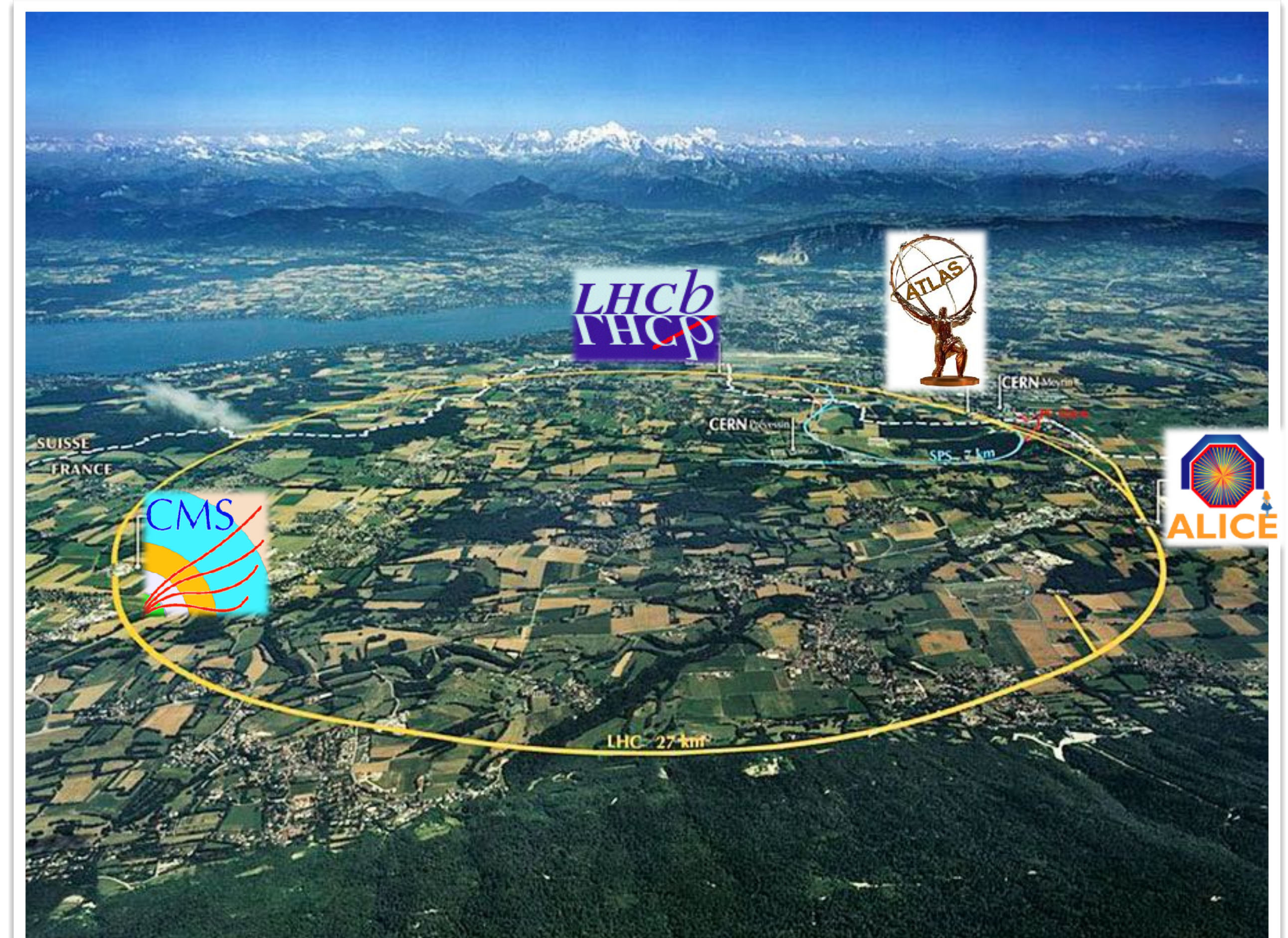


Le LHC: mythes et réalités



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).**

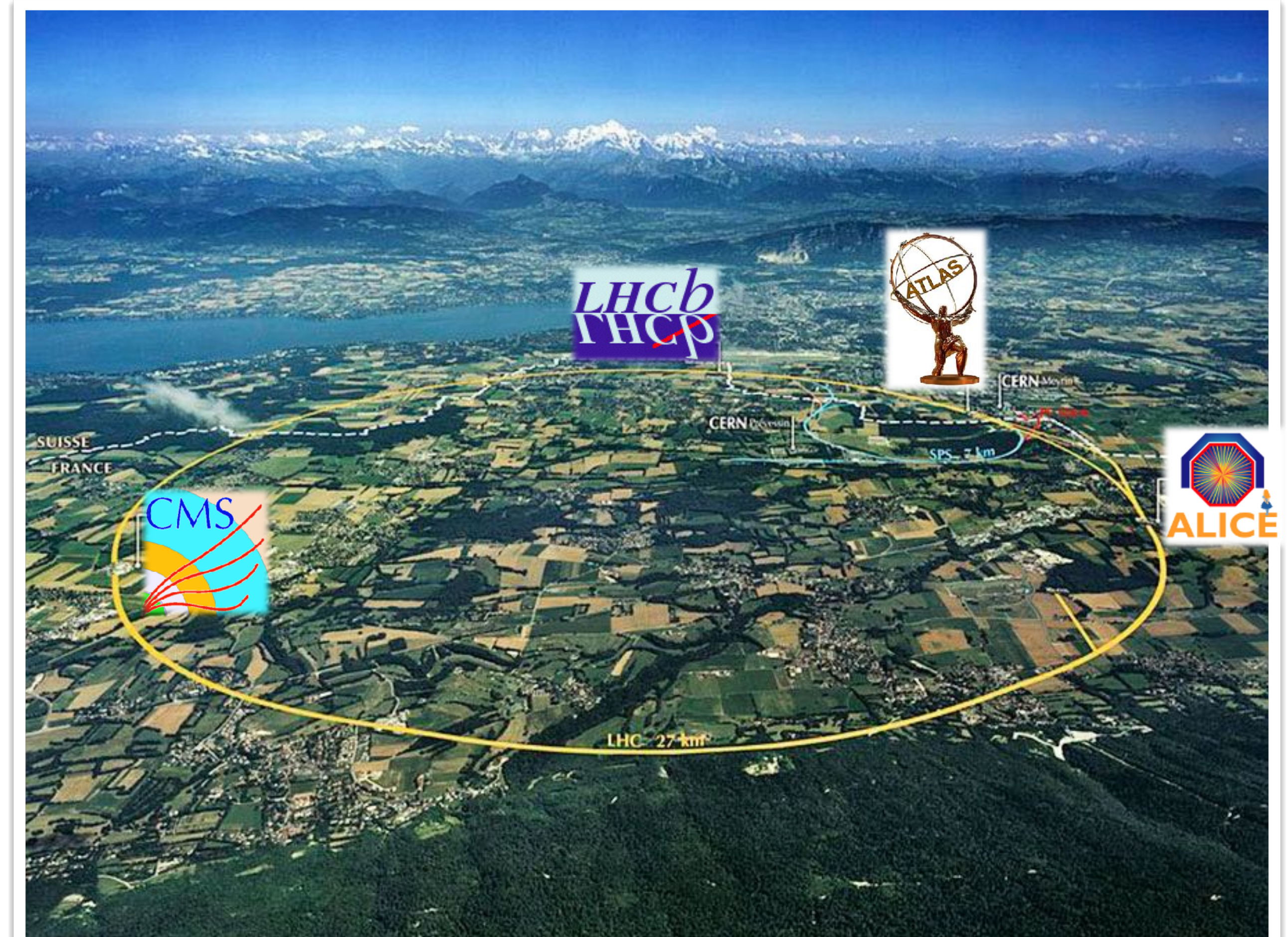


Les expériences du LHC

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



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



Les expériences du LHC

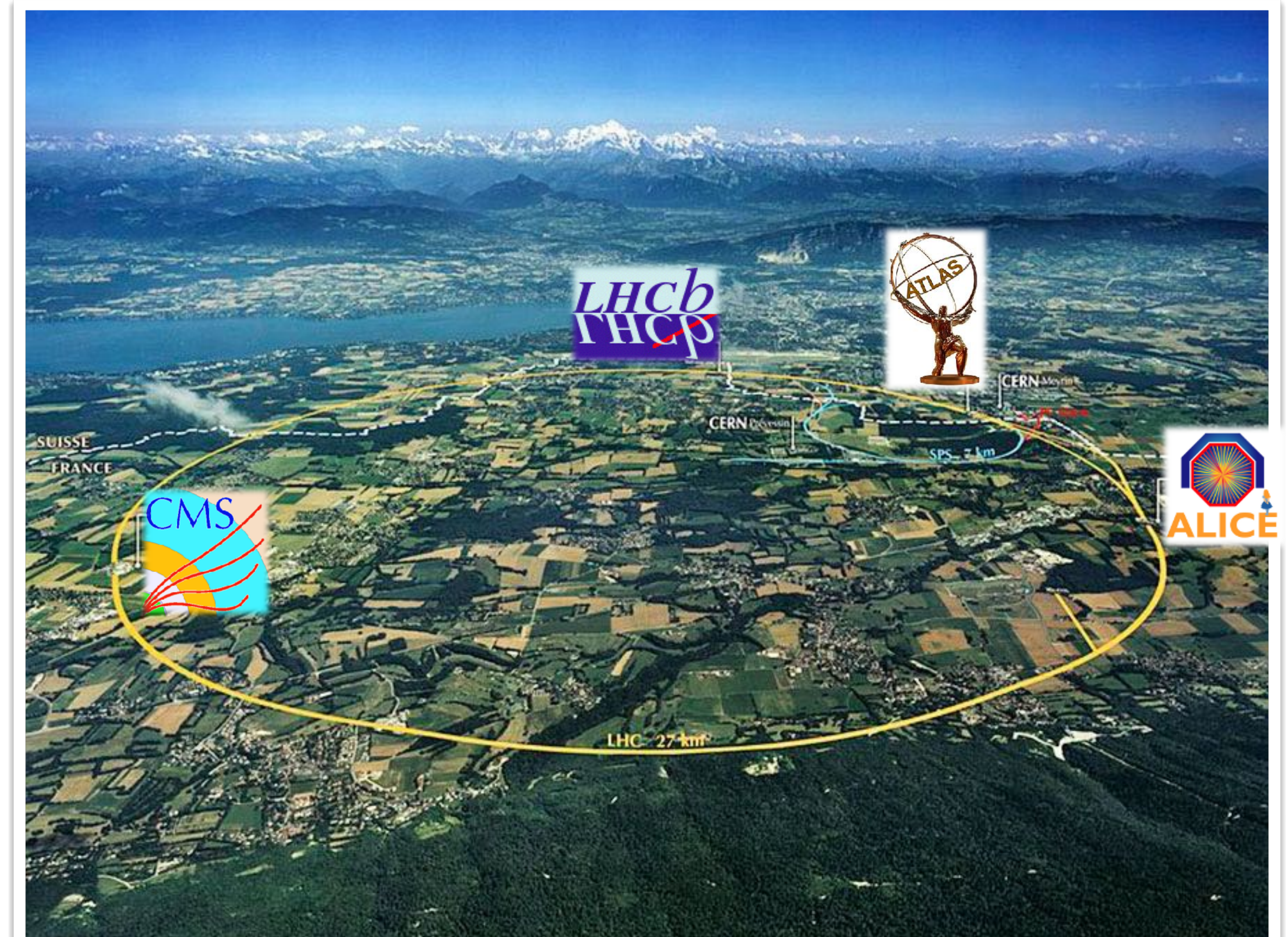
**Les expériences du LHC: des appareils photo de grande qualité.
Phénomène fugace (10^{-24} s), localisé (10^{-15} m) et fréquent (1-100 ns).**



- 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



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).**



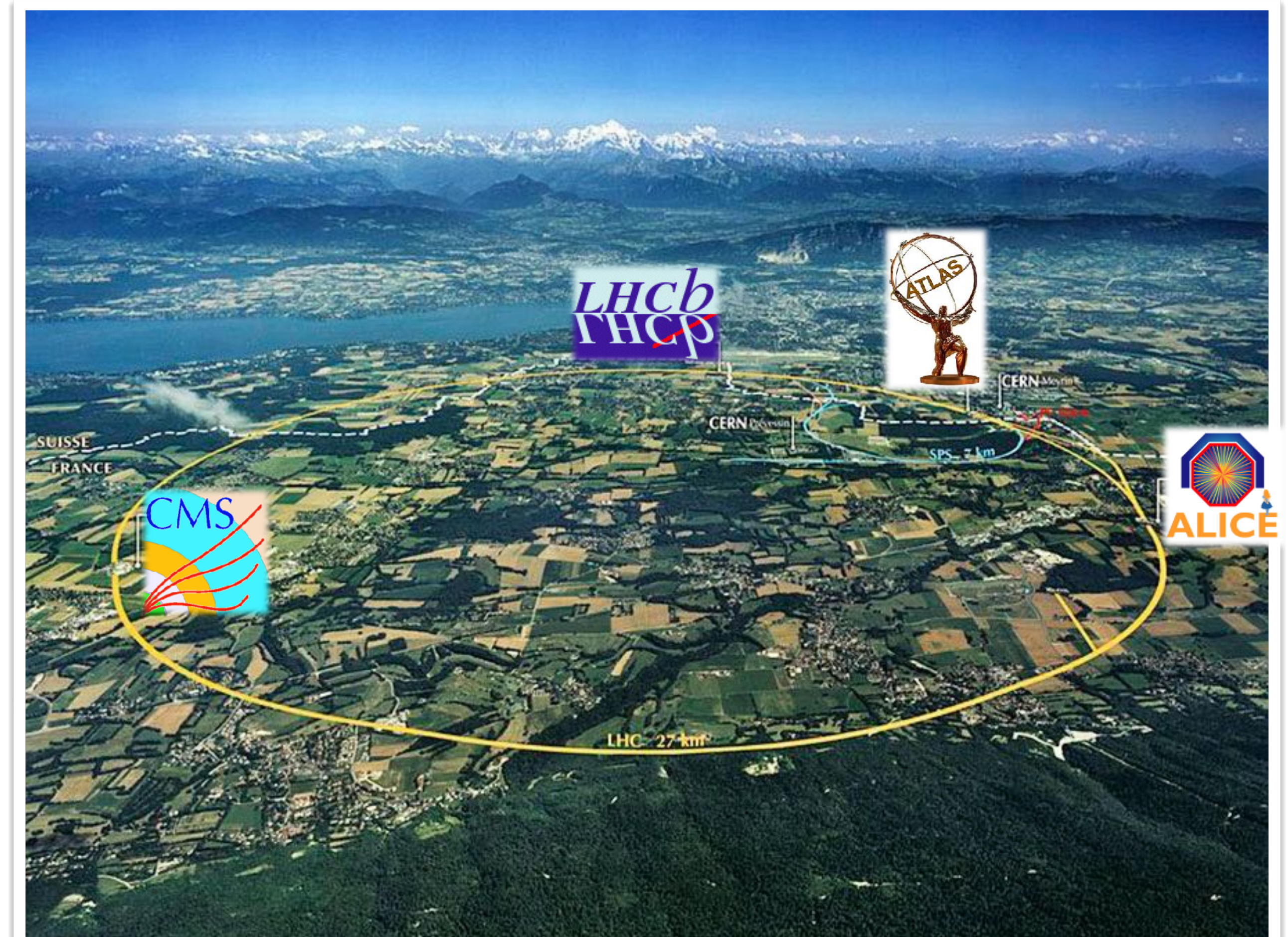
- Physique des ions lourds
 - Collisions PbPb
 - Plasma de quarks et des gluons



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



- Comme ATLAS



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).**



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



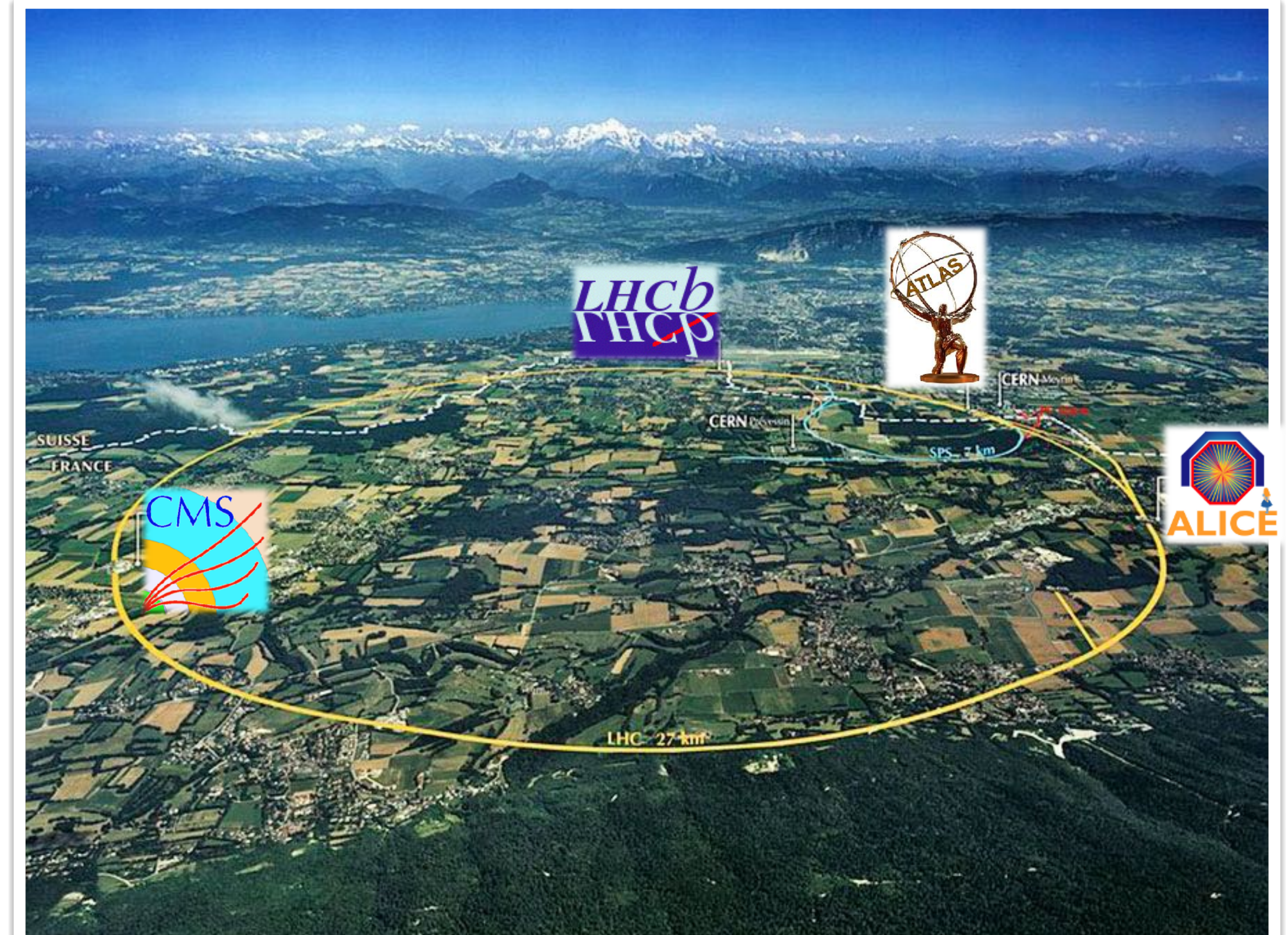
- Physique du modèle standard et au delà
 - Collisions pp
 - Boson de Higgs
 - supersymétrie



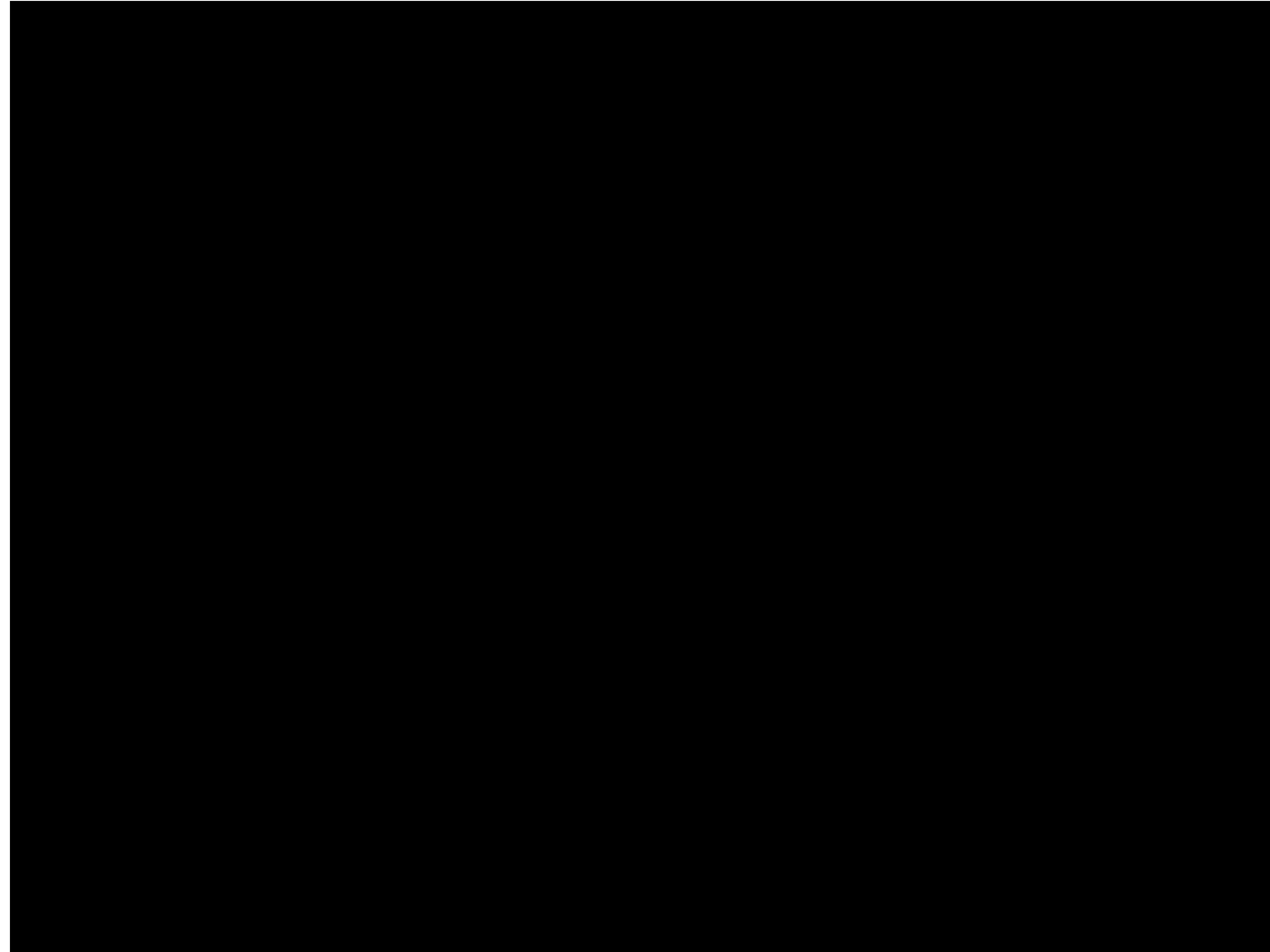
- Comme ATLAS
- Étude de l'asymétrie matière-antimatière



- Collisions pp
- Violation CP



Petit résumé et passage au CERN



1

2

3

Conclusions I

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



Conclusions I

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



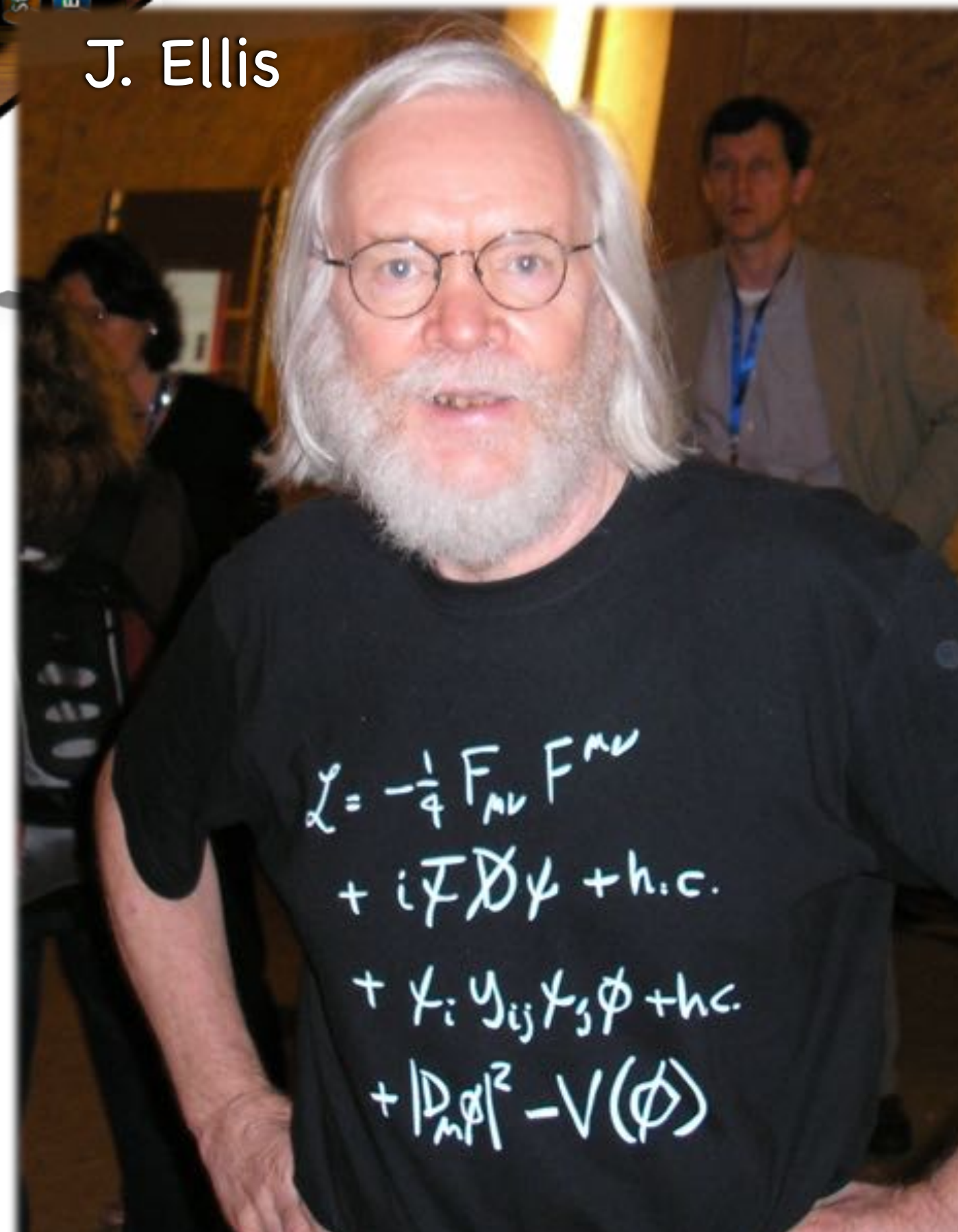
- Comment?
 - **Théoricien** :
modèle pour décrire la nature
 - **Expérimentateur** : valider le modèle
 - détecteur: conception et construction des l'expériences
 - analyse: exploitation des données
 - Informaticiens (récent)

Conclusions I

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



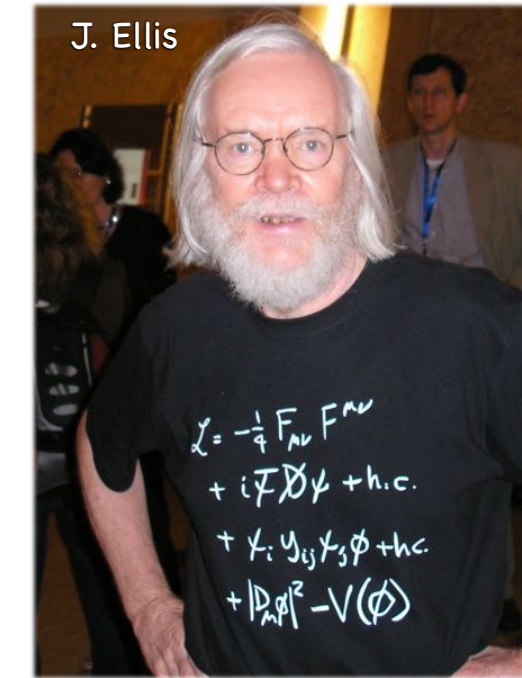
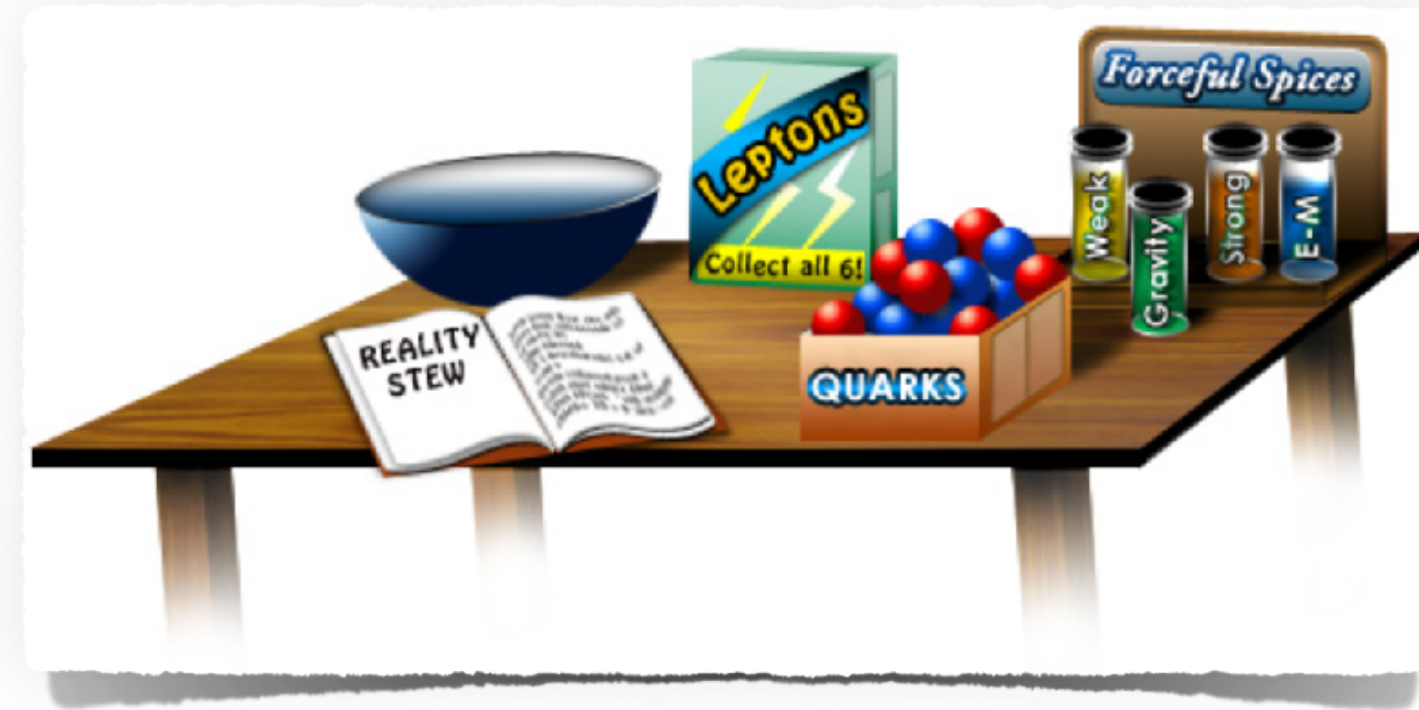
J. Ellis



- 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 I

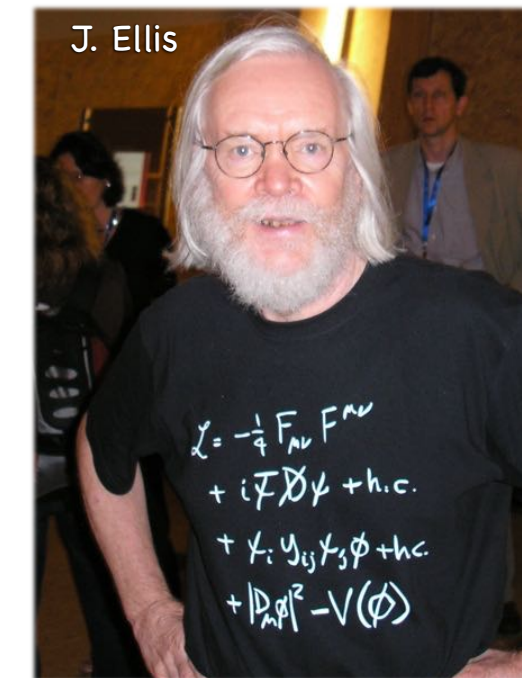
- La physique des particules: comprendre la structure intime de la matière.
(modèle standard des particules)



- 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 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 expériences
 - analyse: exploitation des données
 - Informaticiens (récent)

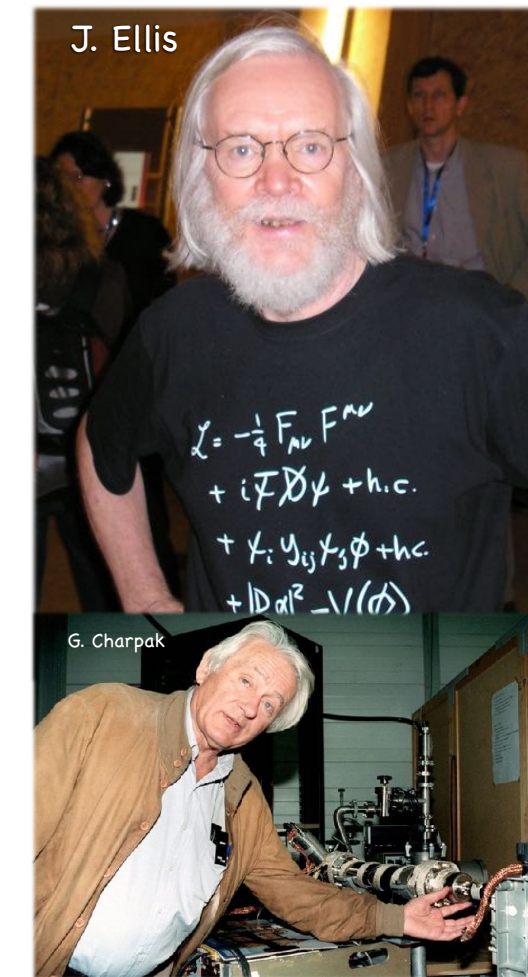


Conclusions I

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

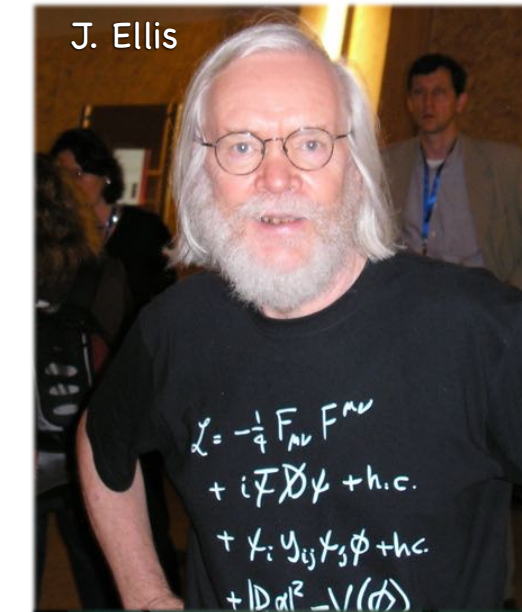


- Comment?
 - **Théoricien** :
modèle pour décrire la nature
 - **Expérimentateur** : valider le modèle
 - détecteur: conception et construction des l'expériences
 - analyse: exploitation des données
 - Informaticiens (récent)



Conclusions 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
 - détecteur: conception et des l'expériences
 - analyse: exploitation des
 - Informaticiens (récent)

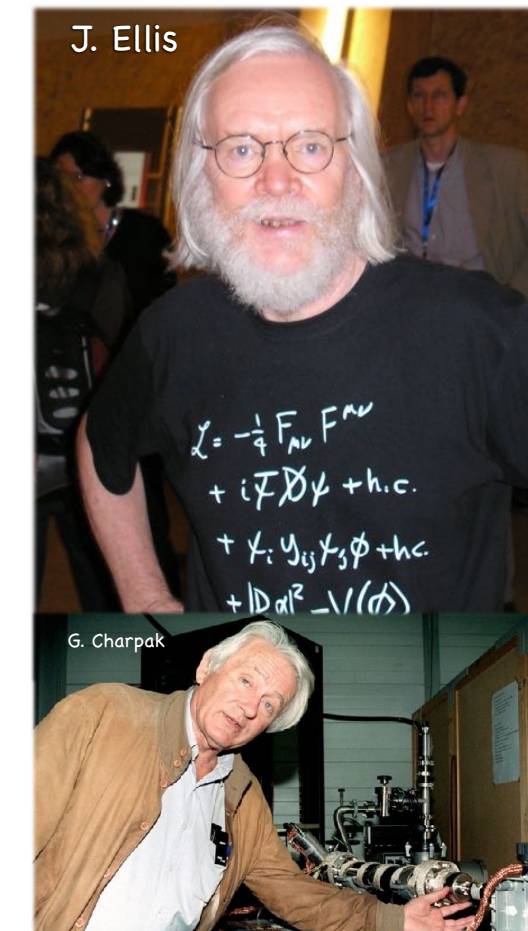


Conclusions I

- 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)

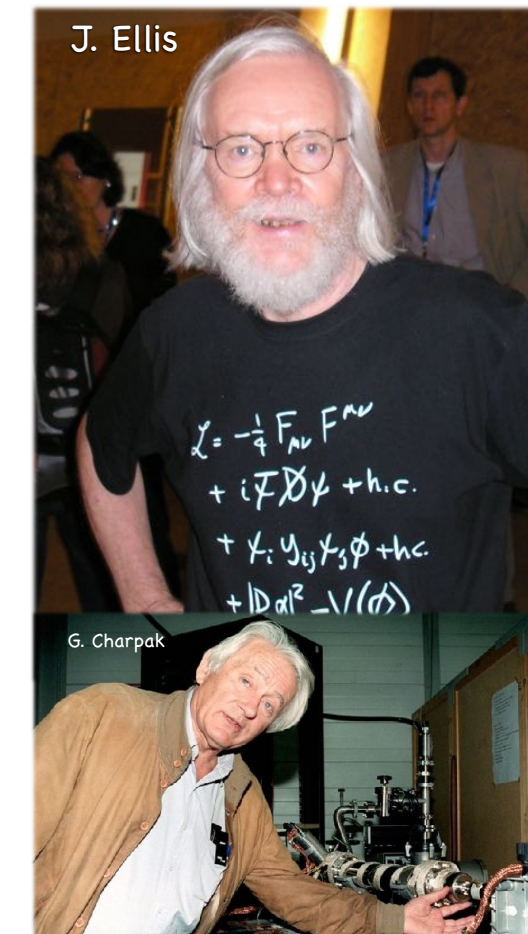


Conclusions I

- 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)

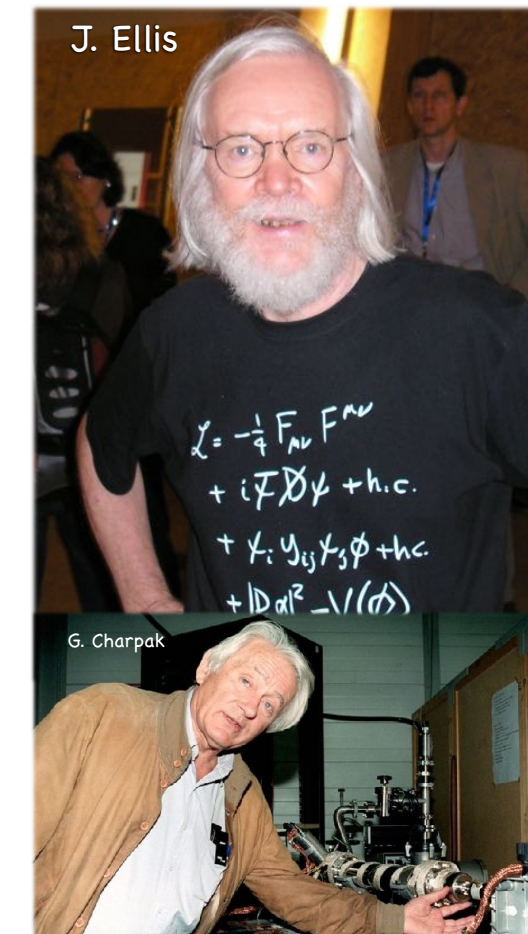


Conclusions I

- 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?

