

# Physique des particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Première partie: *Physique des Particules*

Laurent Favart

année 2022-23: BA Phys. Bloc 3

# Contenu du cours

- I. Introduction
- II. Moyens d'investigations
- III. Découverte des particules et des interactions forte et faible
- IV. Les accélérateurs
- V. Interactions particules-matière
- VI. Détection et identification des particules
- VII. Quarks et leptons : les constituants de la matière
- VIII. Modélisation des interactions fondamentales

# Plan du chapitre I

## I - Introduction

1. La physique des particules élémentaires
2. Structures élémentaires - de l'antiquité au *XXe* siècle
3. Ordres de grandeur et unités
4. Quadri-vecteurs et invariants
5. Les interactions fondamentales
6. Le Modèle Standard de la physique des particules
7. Notion de section efficace
8. Lien avec la cosmologie

# Bref historique - antiquité

- grecs anciens (VI-V bc) : Anaximène, Thalès, Empédocle - 4 éléments
- atomistes (IV bc) : Leucippe, Démocrite

3 propositions :

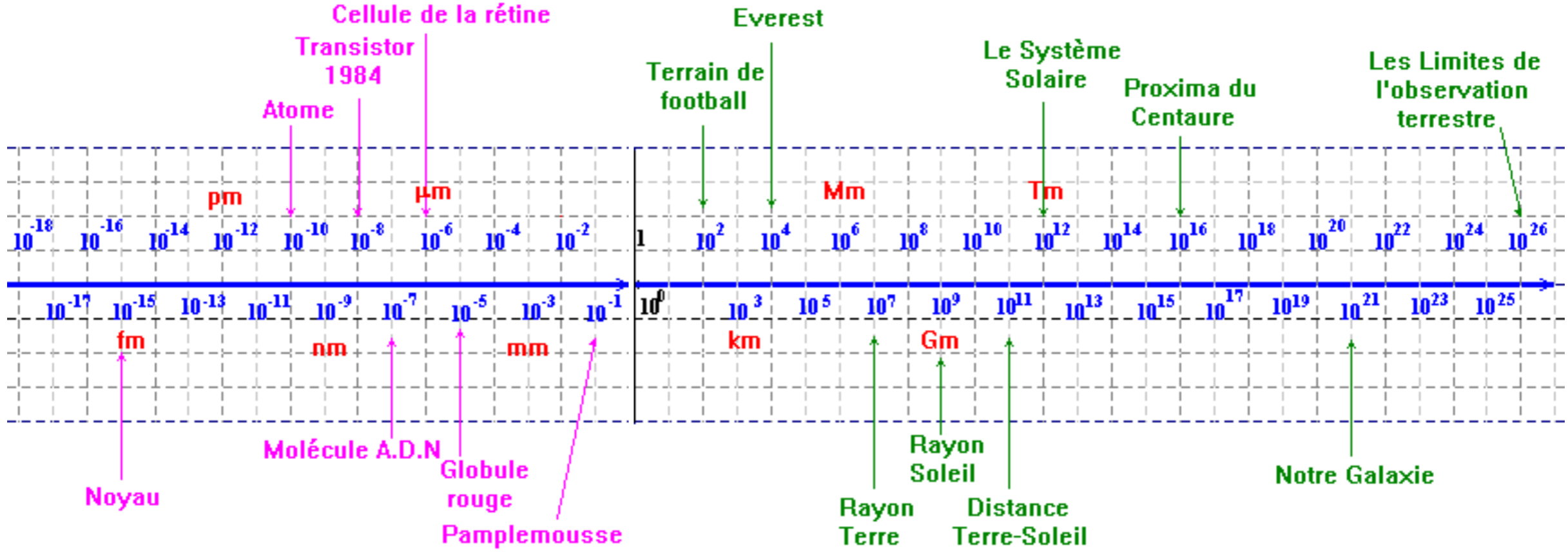
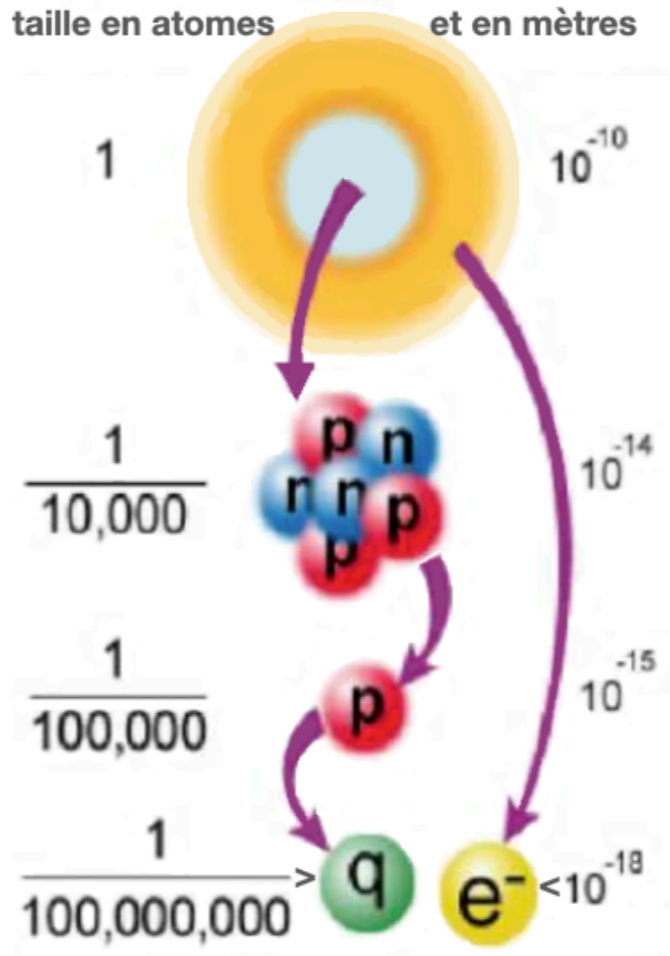
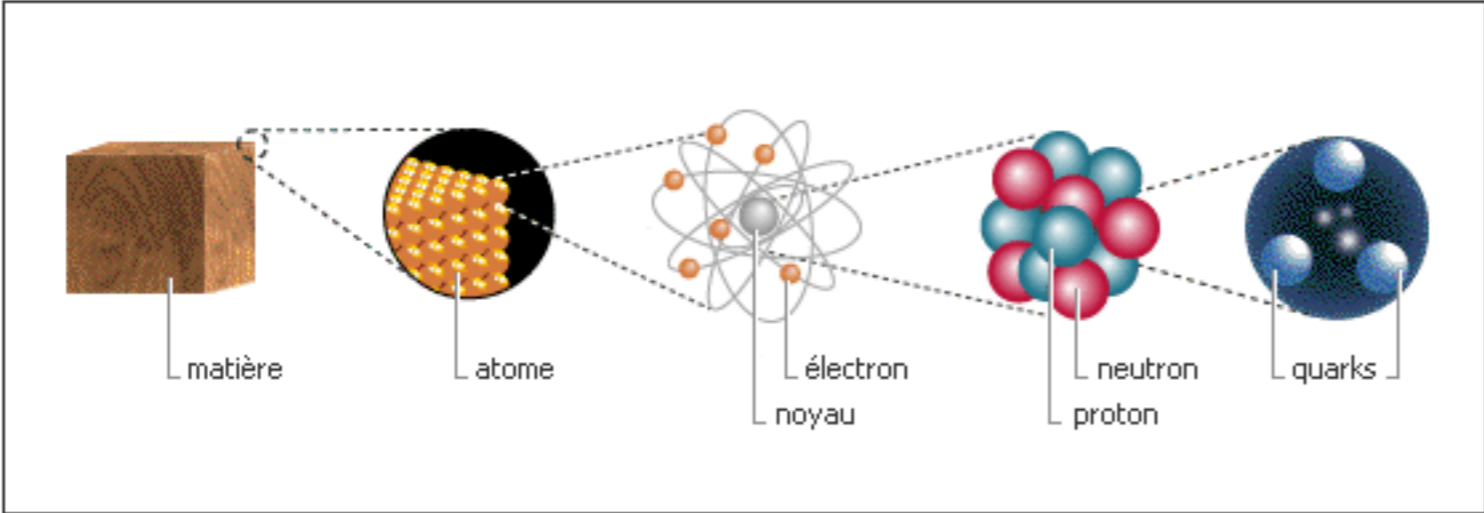
- la matière est constituée d'**atomes** (insécables et impérissables)
- les atomes se déplacent **dans le vide**
- principe de **causalité** : tout phénomène est le résultat d'une cause
- Epicure, Lucrèce (98-55 bc):
  - tout est agencement d'atomes
  - tout ce que vous voyons, sentons, entendons est circulation d'atomes
  - ⇒ projet visant à définir une réalité appréhendable par l'homme
  - ⇒ base de l'approche scientifique

# Bref historique - XVII- début XX<sup>e</sup>

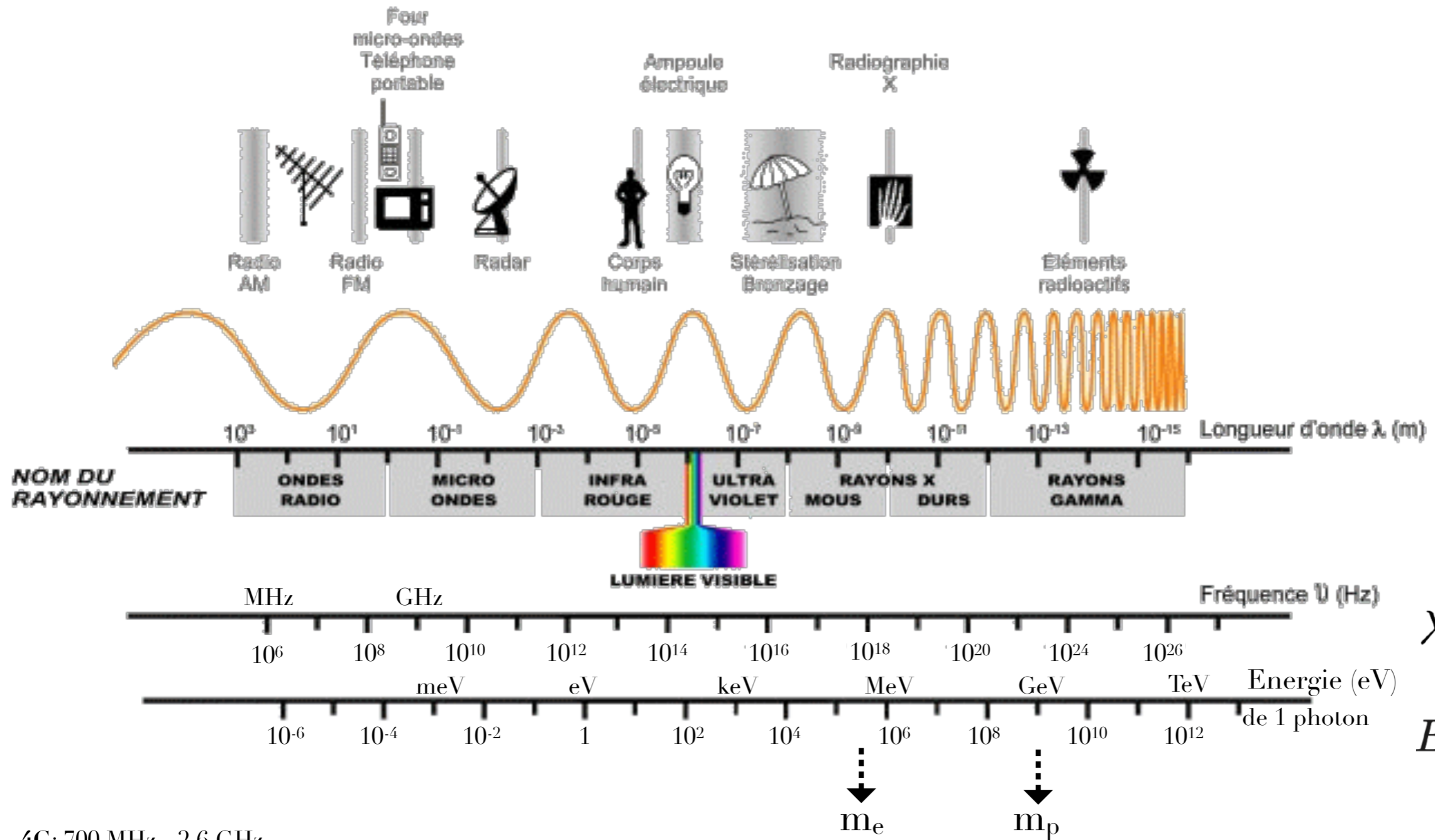
idées reprises par :

- 1661 Boyle
- 1789 Lavoisier : liste des 33 premiers éléments
- 1803 Dalton : 1<sup>ère</sup> théorie atomique de la matière
- 1868 Mendeleev : propriétés chimiques périodique
- XIX : tube à décharge
- 1897 Thomson : rayonnement cathodique  $\rightarrow$   $q/m$
- 1909 Millikan : charge électrique de l'électron
- 1912 Hess : rayonnement cosmique

# Structure de la matière



# Limite optique



$$\lambda = c/\nu$$

$$E = h\nu$$

4G: 700 MHz - 2.6 GHz

5G : 25 GHz

# Echelles spatiale et d'énergie

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Electronvolt

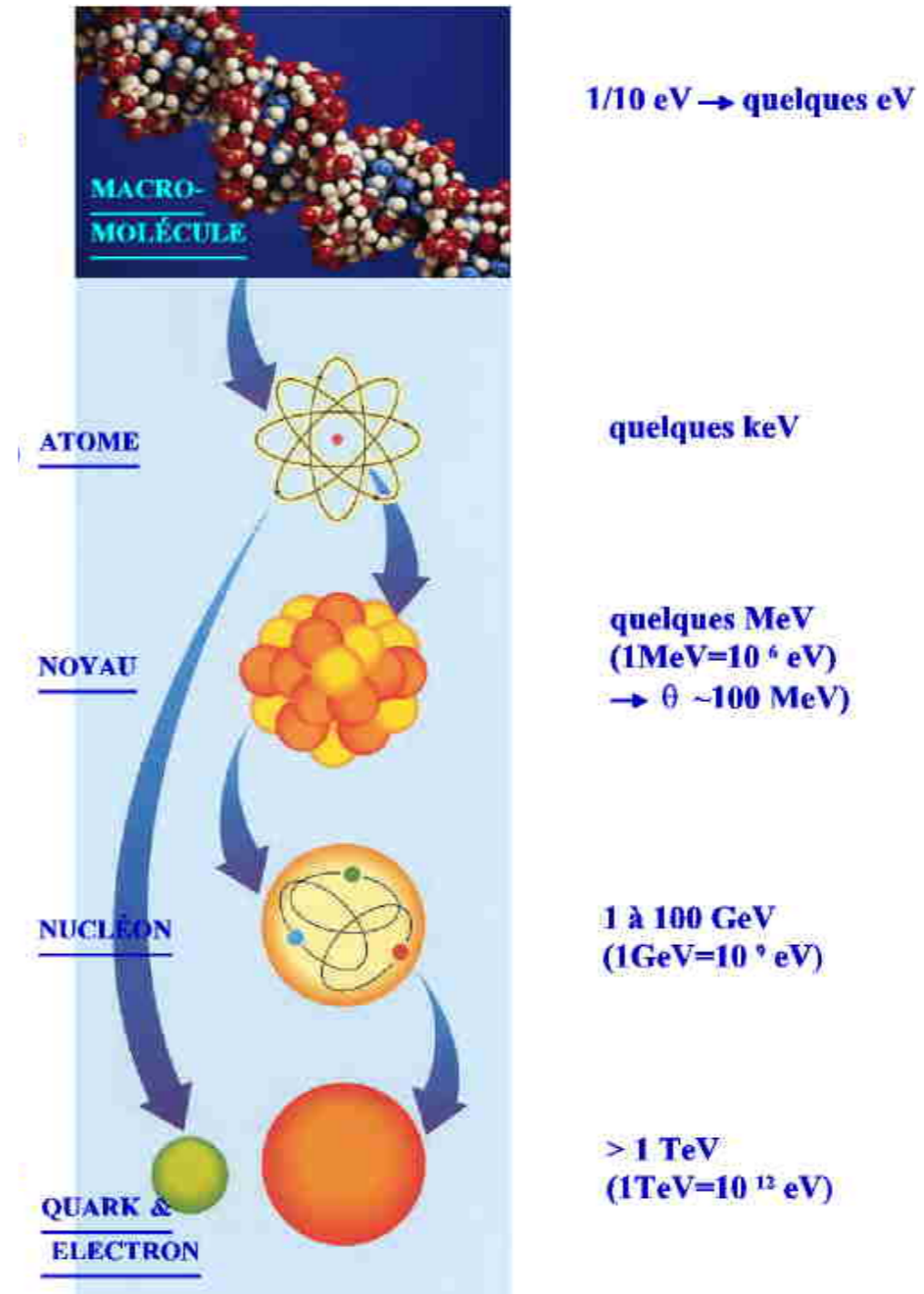
$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

kilo **keV**  $10^3$

Méga **MeV**  $10^6$

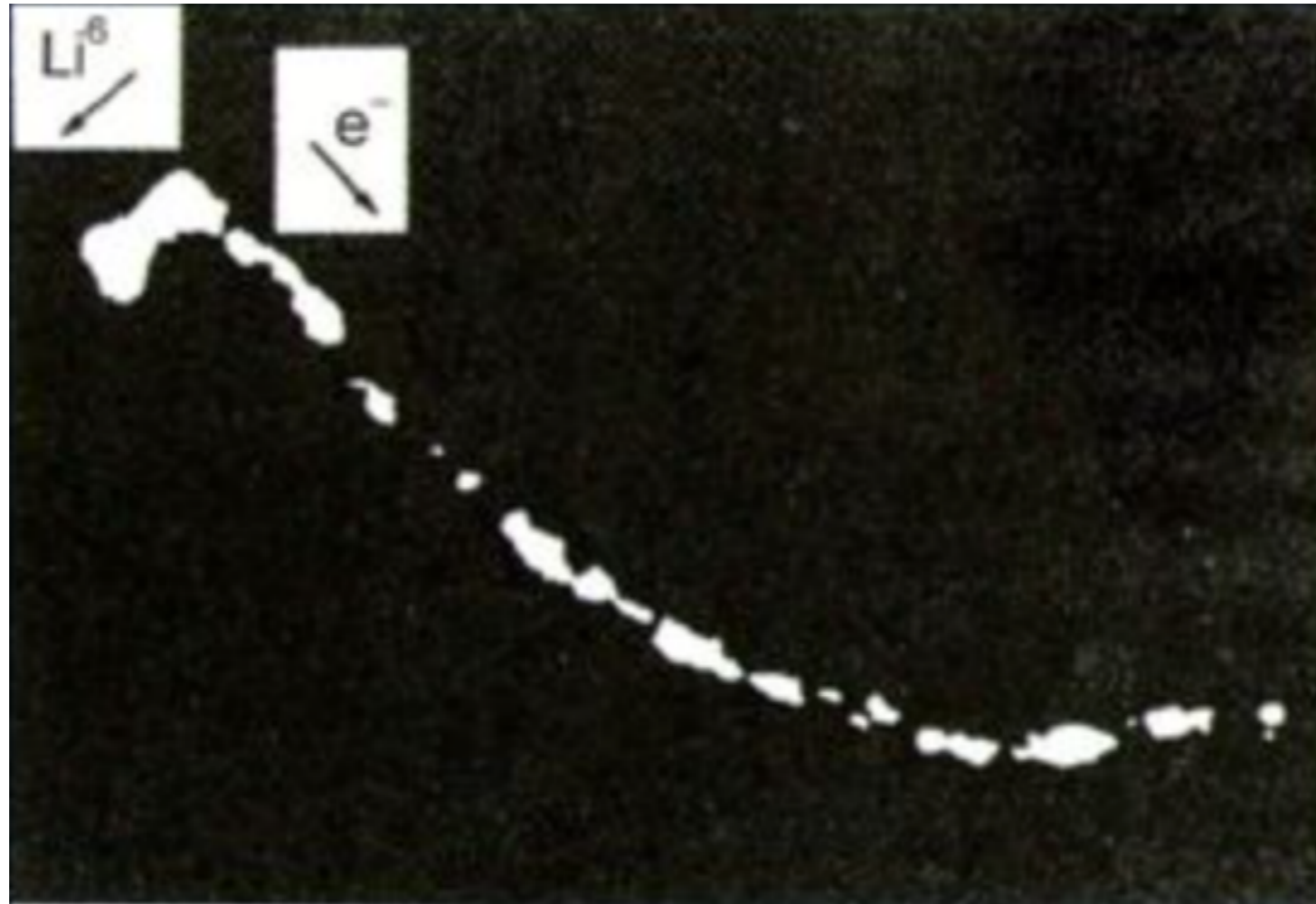
Giga **GeV**  $10^9$

Téra **TeV**  $10^{12}$





# Interactions faibles



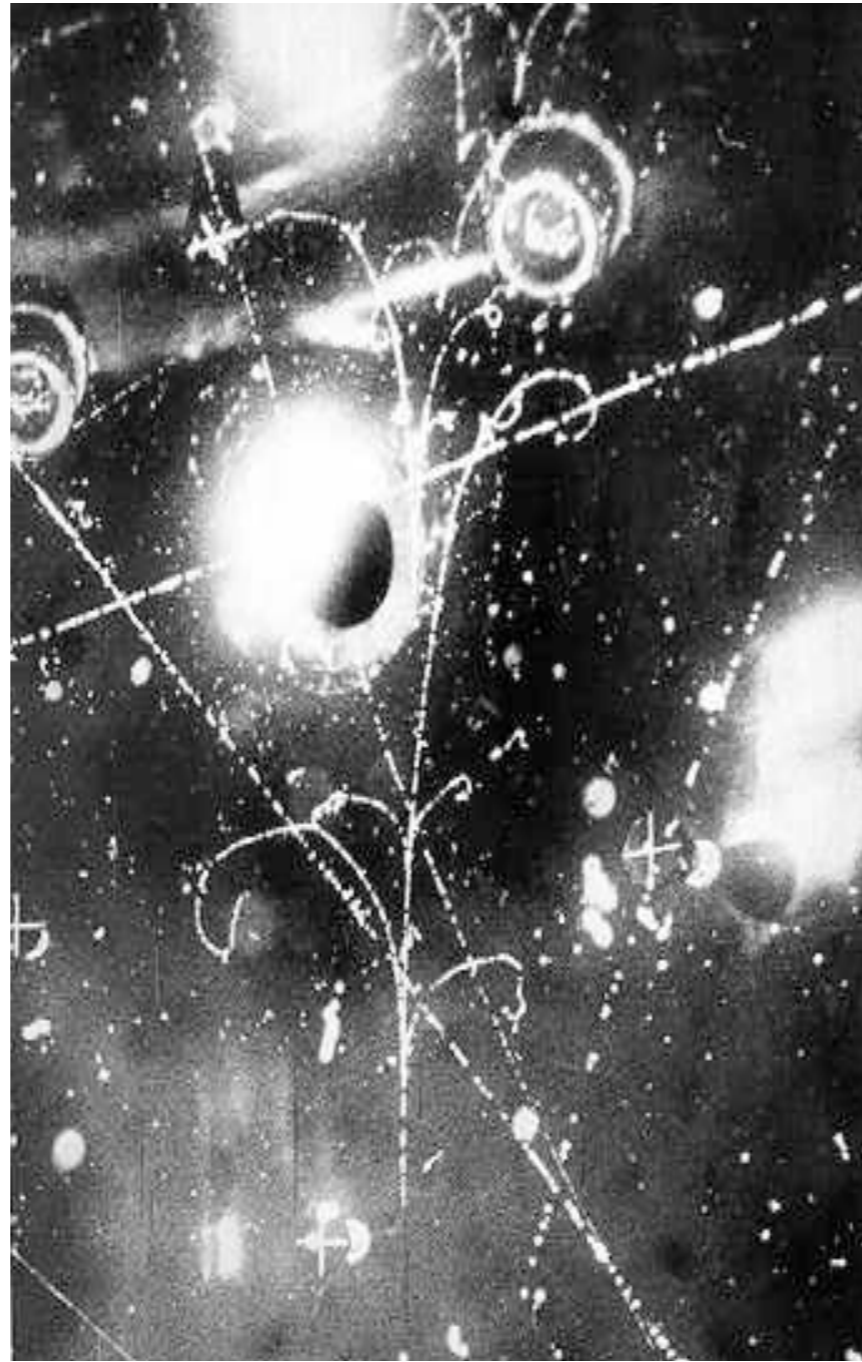
courant chargé

échange de  $W$  :  
désintégration beta

# Interactions faibles

échange de  $Z^0$

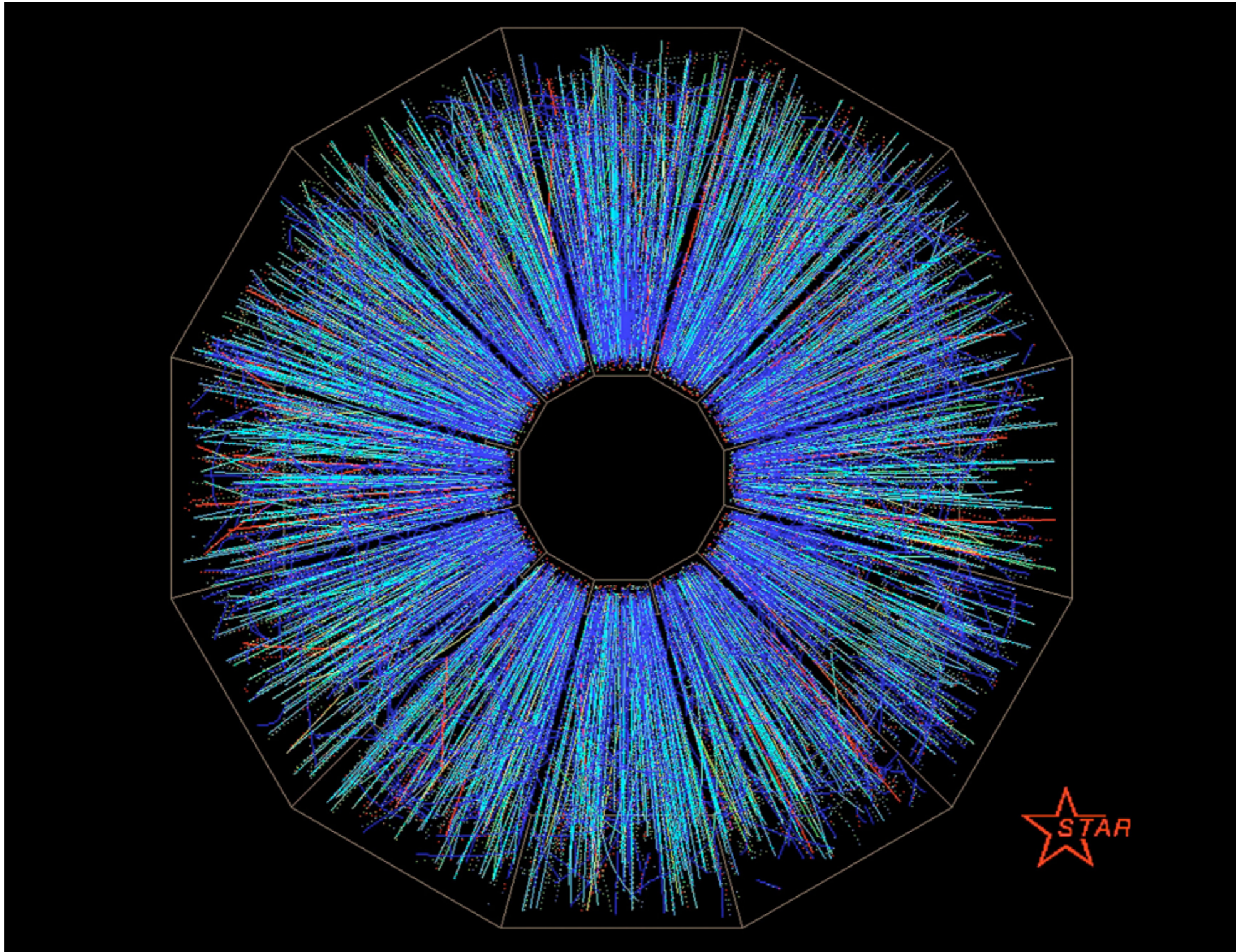
courant neutre



$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$$



# Interactions fortes



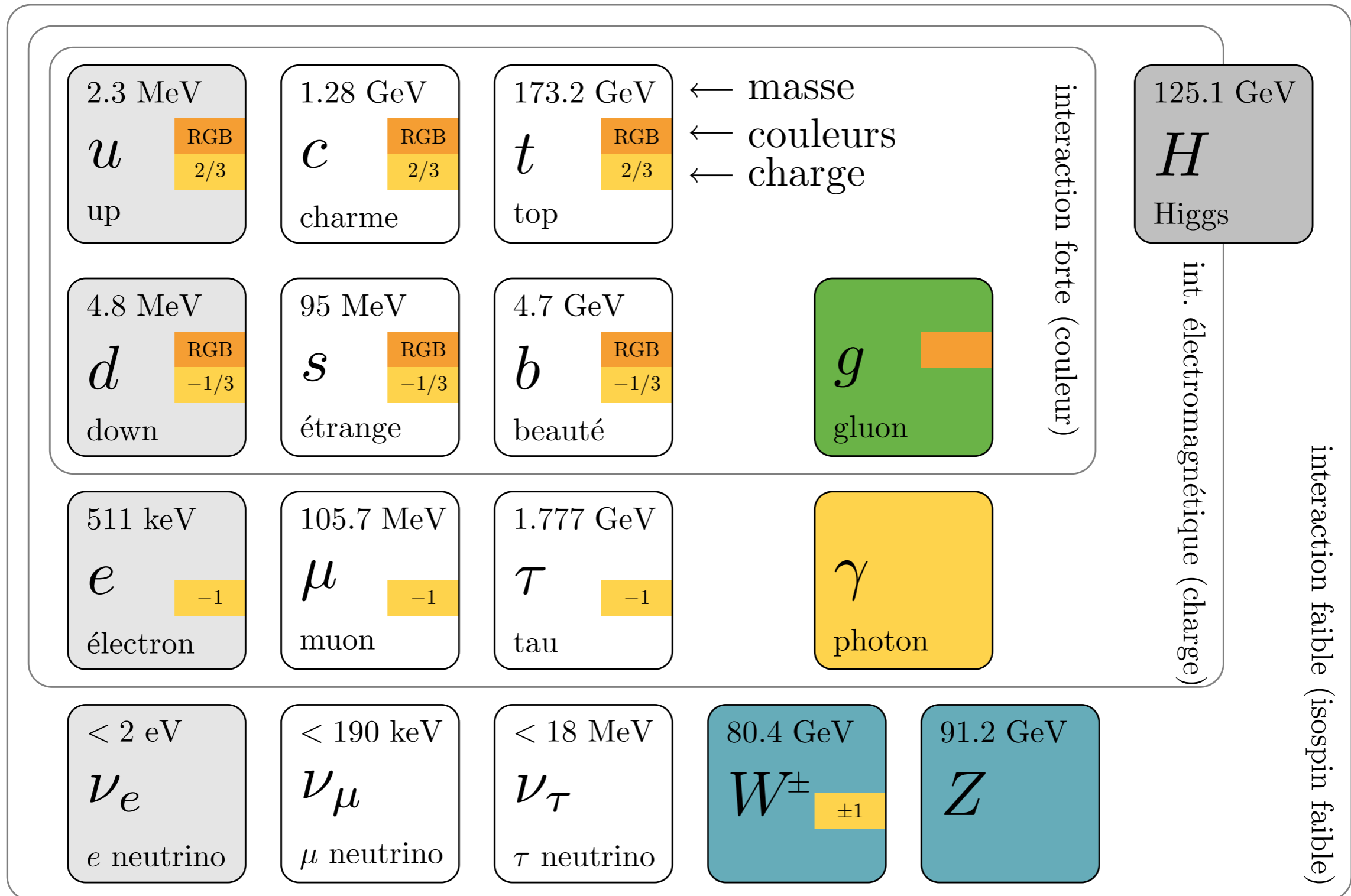
collision entre ions:  
échanges de gluons

# Les interactions

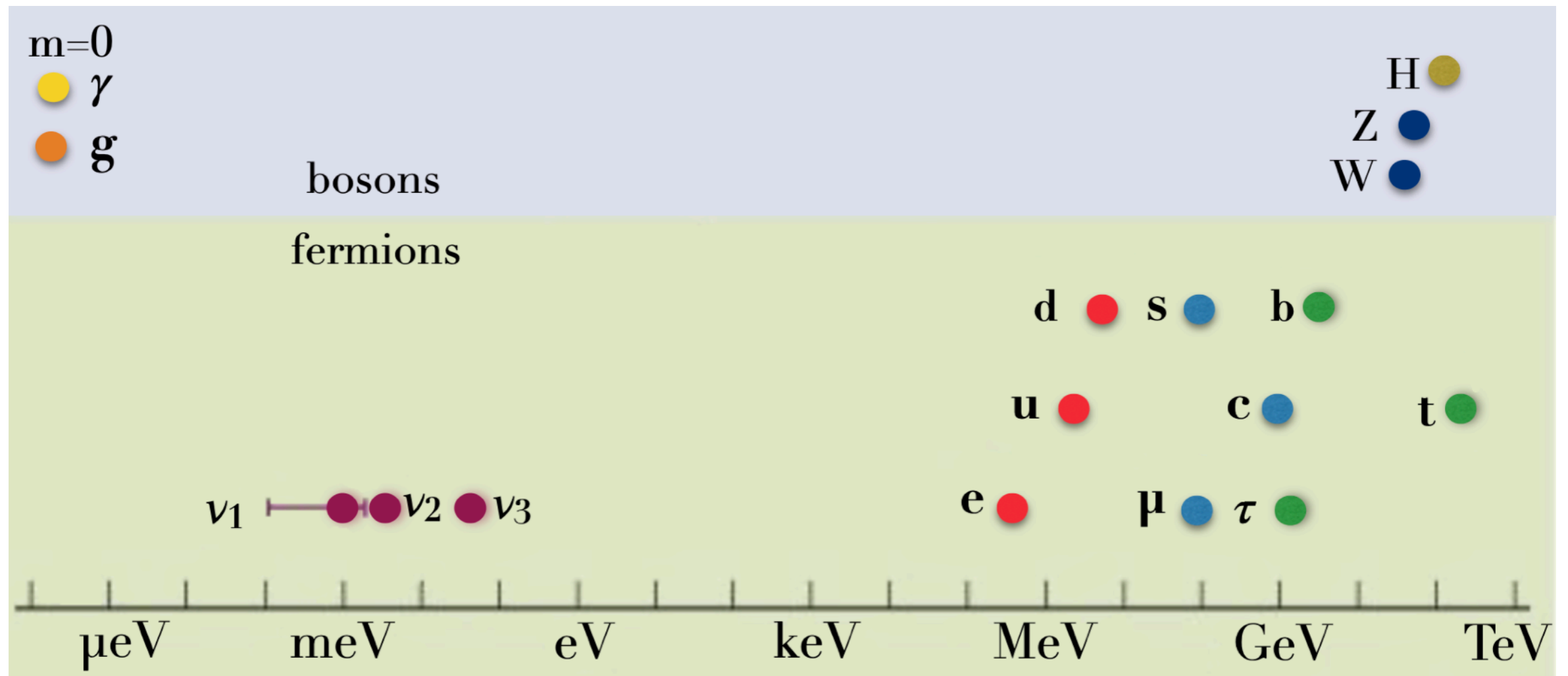
	forte	électromagnétique	faible	gravitationnelle
intensité	1	1/137	$10^{-8}$	$10^{-40}$
sensibilité	charge de couleur	charge électrique	charge faible	masse
portée (m)	$10^{-15}$	$\infty$	$10^{-18}$	$\infty$
particules affectées	hadrons	particules chargées	toutes sauf photon et gluons	particules massives
théorie	chromodynamique quantique (QCD)	électrofaible (EW)		relativité générale
particule médiatrice	gluon ( $g$ )	photon ( $\gamma$ )	$W^\pm$ et $Z$	graviton ?
exemple de réaction	$\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$	$\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	
section efficace	10 mb	20 $\mu\text{b}$	10 fb	
ex. de désintégration	$\rho \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	
temps de vie	$10^{-23}$ s	$10^{-16}$ s	$10^{-8}$ s	



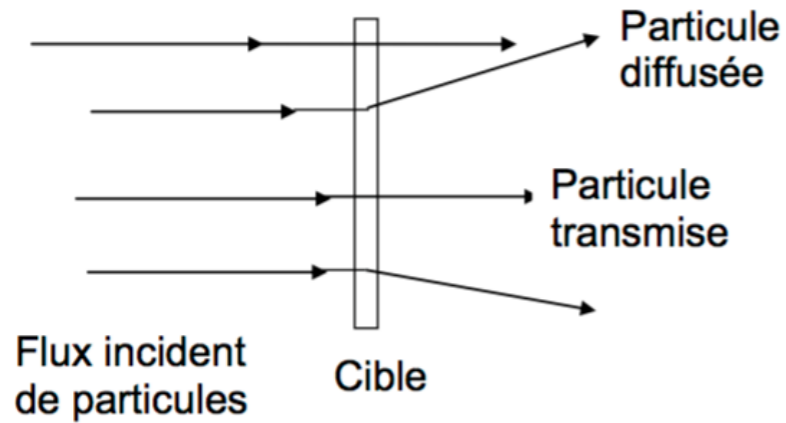
# Le modèle Standard



# Masses des particules élémentaires



# La section efficace



$$\sigma = \frac{\tau}{\Phi N_{cible}} \quad \frac{[s^{-1}]}{[s^{-1}][m^{-2}]} \sim [m^2]$$

$\tau$  : nombre de réactions produites par unité de temps

$\Phi$  : nombre de particules par unité de temps et par unité de surface

$N_{cible}$  : nombre de particules dans le volume de la cible (de surface couverte par le flux)

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

interaction avec les particules de la cible :

$$w = \sigma n_{cible} = \sigma \frac{N_A \rho}{A}$$

$n_{cible}$  désigne le nombre de particules cible par unité de volume

$\rho$  : densité volumique,  $N_A$  : nombre d'Avogadro,  $A$  : nombre atomique

probabilité que la particule interagisse dans l'épaisseur de la cible prise entre  $x$  et  $x+dx$  :

$$w dx = \sigma n_{cible} dx$$

Loi de variation du flux :

$$d\Phi = -\Phi w dx = -\Phi \sigma n_{cible} dx$$

$$\Phi(x) = \Phi(x_0) e^{-\sigma n_{cible} x} \quad \text{qui n'a pas interagi}$$

$$\Phi(x_0) (1 - e^{-\sigma n_{cible} x}) \quad \text{qui a interagi}$$



# La luminosité

luminosité : lien entre le nombre d'événements produits et la section efficace

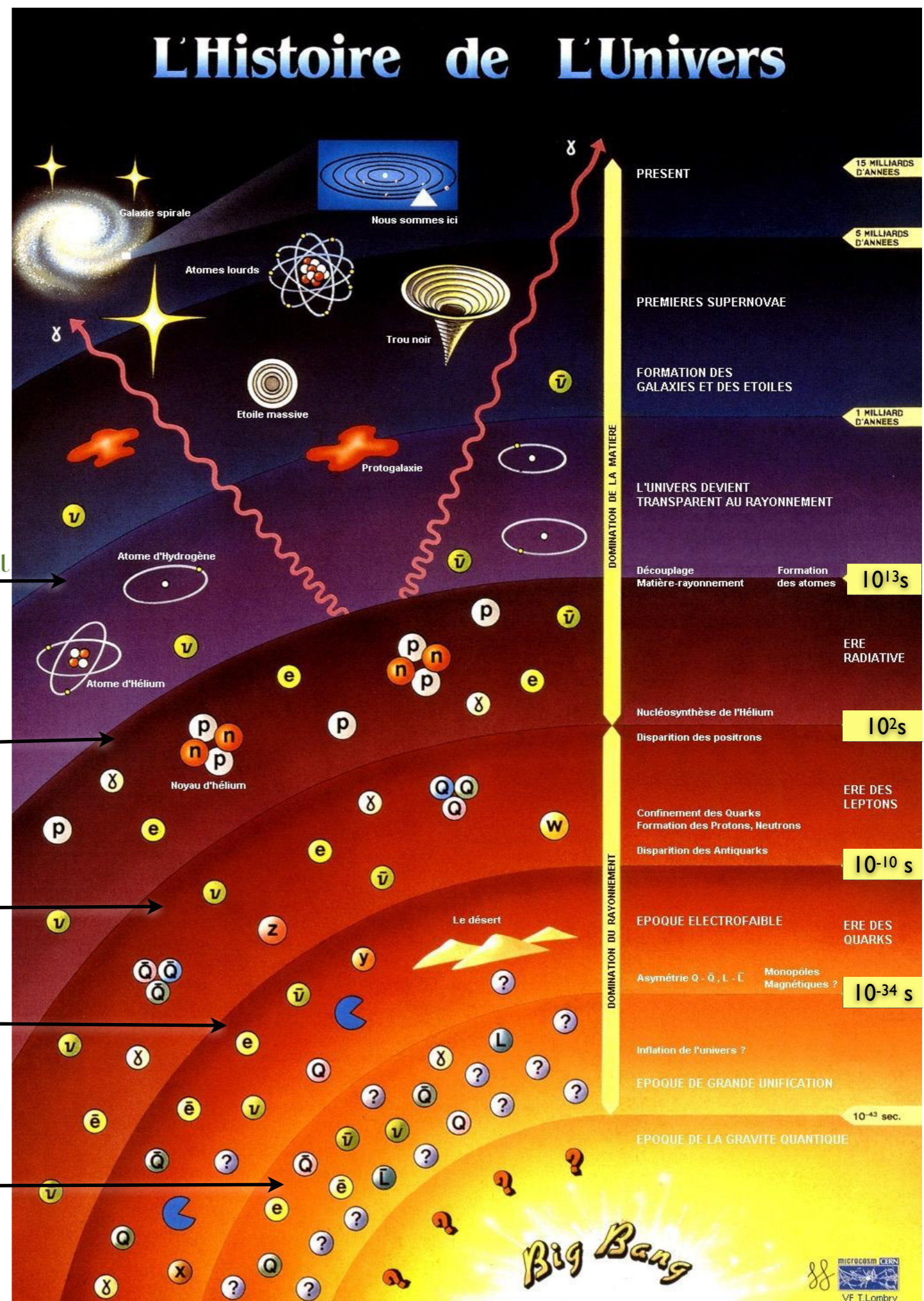
$$N = \int \sigma \mathcal{L} dt$$

$$[\mathcal{L}] = b^{-1} s^{-1}$$

luminosité totale (ou intégrée)

$$\mathcal{L}_{Tot} = \int \mathcal{L} dt$$

# Lien avec la cosmologie



Formation des atomes

photons échappent  
CMB 3K

Formation des noyaux  
D, He, Li

Formation des hadrons

disparition anti-quarks

Brisure électro-faible

Création de particles  
par paires

MeV

GeV

TeV