

# Physique des particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Première partie: *Physique des Particules*

Laurent Favart

année 2024-25: BA Phys. Bloc 3

# Laurent Favart

personal webpage

Home

Enseignement

Publications

Expérience H1

Expérience CMS

LHeC

Hautes Energies

## Enseignement

### Stages et mémoires à l'IIHE

- poster des activités et stages de l'IIHE [pdf]
- liste des sujets de [stages et mémoires IIHE](#)

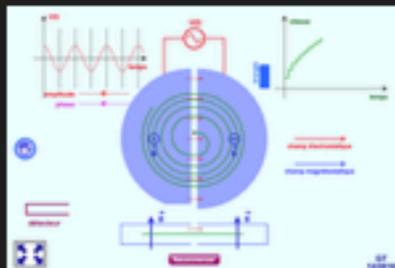
### Cours dispensés à l'ULB

#### [ **PHYS-F305** ] Physique des particules et Physique Nucléaire

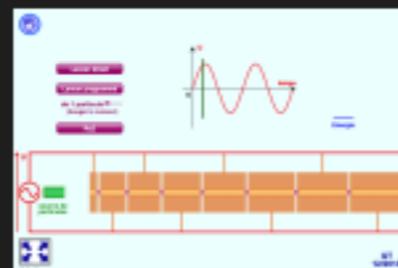
Introduction à la physique subatomique, c'est-à-dire à la physique du noyau atomique (physique nucléaire) et celle des particules élémentaires (électrons, neutrinos, quarks, gluons,...). Le cours permet d'acquérir les connaissances fondamentales de la structure de la matière aux échelles subatomiques et des interactions fondamentales. Il donne les bases nécessaires aux cours approfondis proposés au niveau du Master en Physique.

partie I : Physique des particules :

- Notes de cours : [[Notes-PHYS-F305-202324.pdf](#)] (58 MB - version novembre 2023)
- Slides montrées durant l'année 2022-23 : [Chap1.pdf](#), [Chap2.pdf](#), [Chap3.pdf](#), [Chap4.pdf](#), [Chap5.pdf](#), [Chap6.pdf](#), [Chap7.pdf](#), [Chap8.pdf](#)
- Illustrations animées interactives :



Le Cyclotron



Le Linac

**PHYS-F305- partie 1 - Physique des particules  
2024-25**

	<b>Lundi</b>	<b>Mercredi</b>
16/09/2023	<b>cours</b>	<b>cours</b>
23/09/2023	<b>cours</b>	<b>cours</b>
30/09/2023	<b>cours</b>	<b>cours</b>
07/10/2023	<b>cours</b>	<b>TP-1</b>
14/10/2023	<b>X</b>	<b>X</b>
21/10/2023	<b>cours</b>	<b>TP-1</b>
28/10/2023	<b>tampon</b>	<b>tampon</b>
04/11/2023	<b>cours</b>	<b>cours</b>
11/11/2023	<b>congé</b>	<b>TP-2</b>
18/11/2023	<b>TP-2</b>	<b>St-V</b>
25/11/2023	<b>TP-3</b>	<b>cours</b>
02/12/2023	<b>cours</b>	<b>TP-3</b>
09/12/2023	<b>réserve</b>	<b>réserve</b>

TP donnés par Max Vanden Bemden <[Max.Vanden.Bemden@ulb.be](mailto:Max.Vanden.Bemden@ulb.be)>

# 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 :

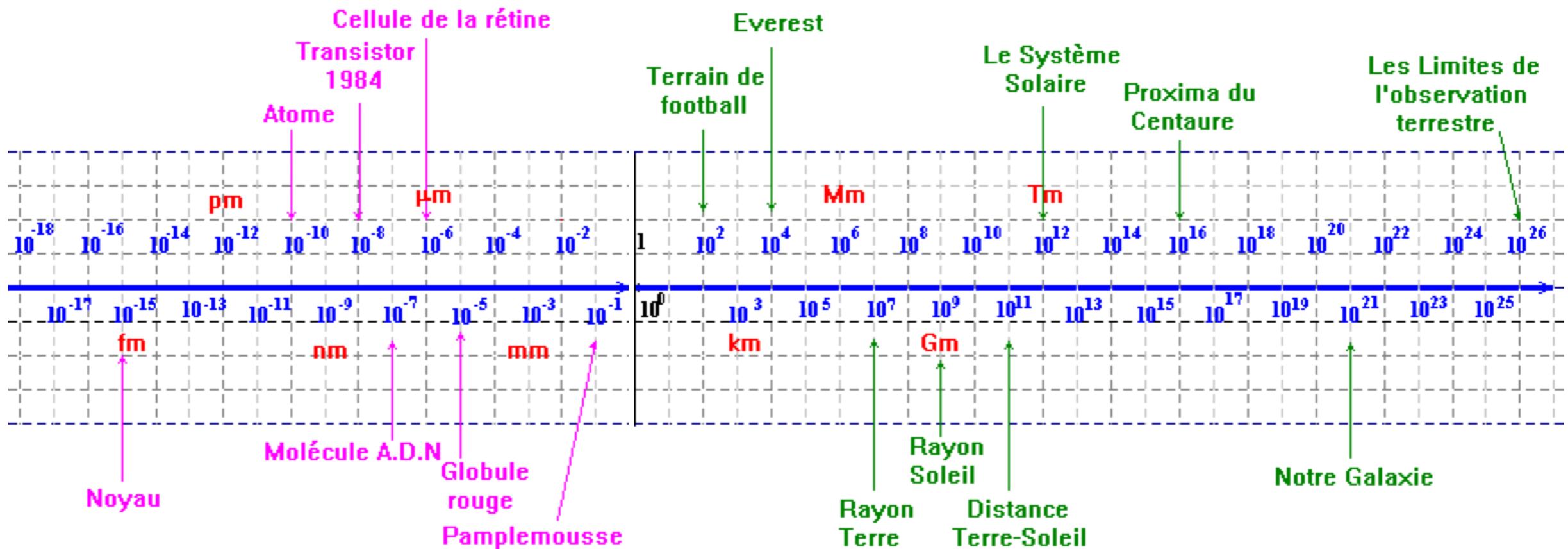
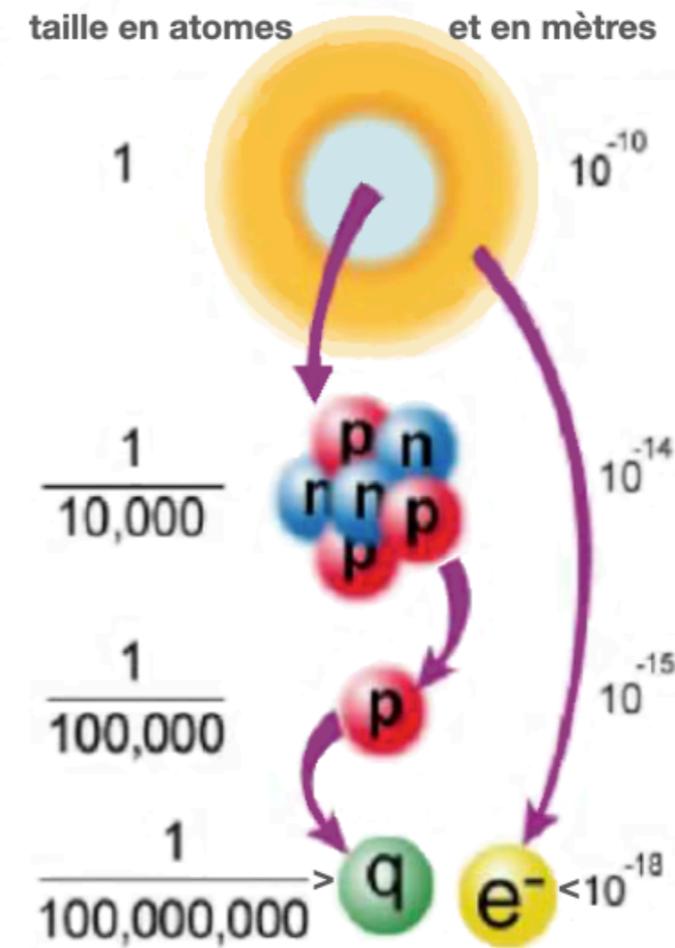
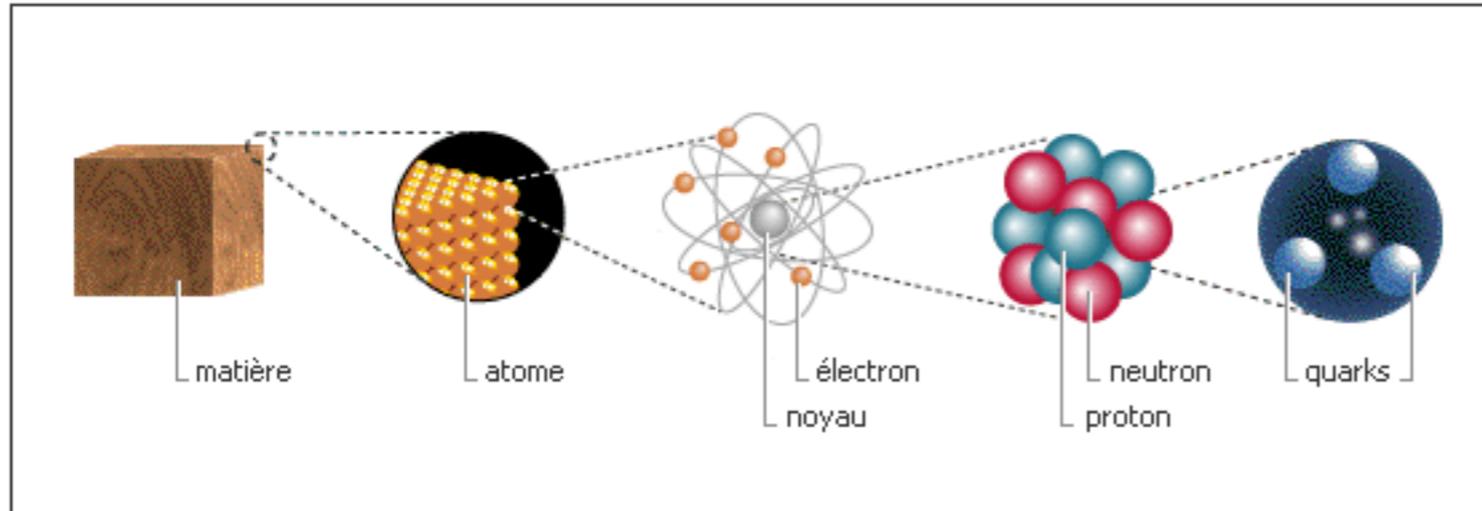
- la matière est constituée d'**atomes** (insécables et impérissables)
- les atomes se déplacent **dans le vide**
- principe de **causalité** : tout phénomène est le résultat d'une cause
- Epicure, Lucrèce (98-55 bc):
  - tout est agencement d'atomes
  - tout ce que vous voyons, sentons, entendons est 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>

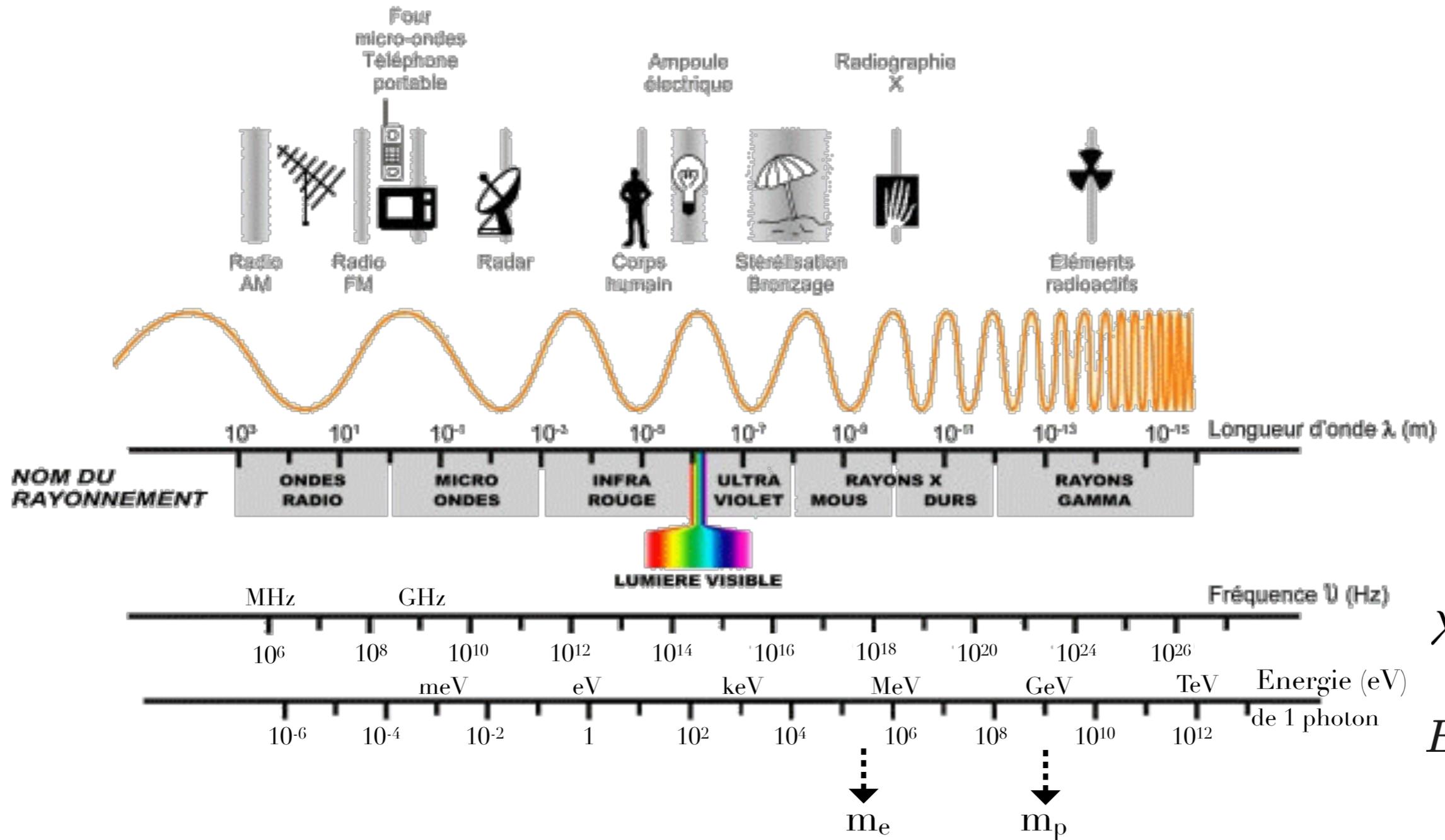
idées reprises par :

- 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
- Fin XIX : radioactivité:  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$
- 1909 Millikan : charge électrique de l'électron
- 1912 Hess : rayonnement cosmique

# Structure de la matière



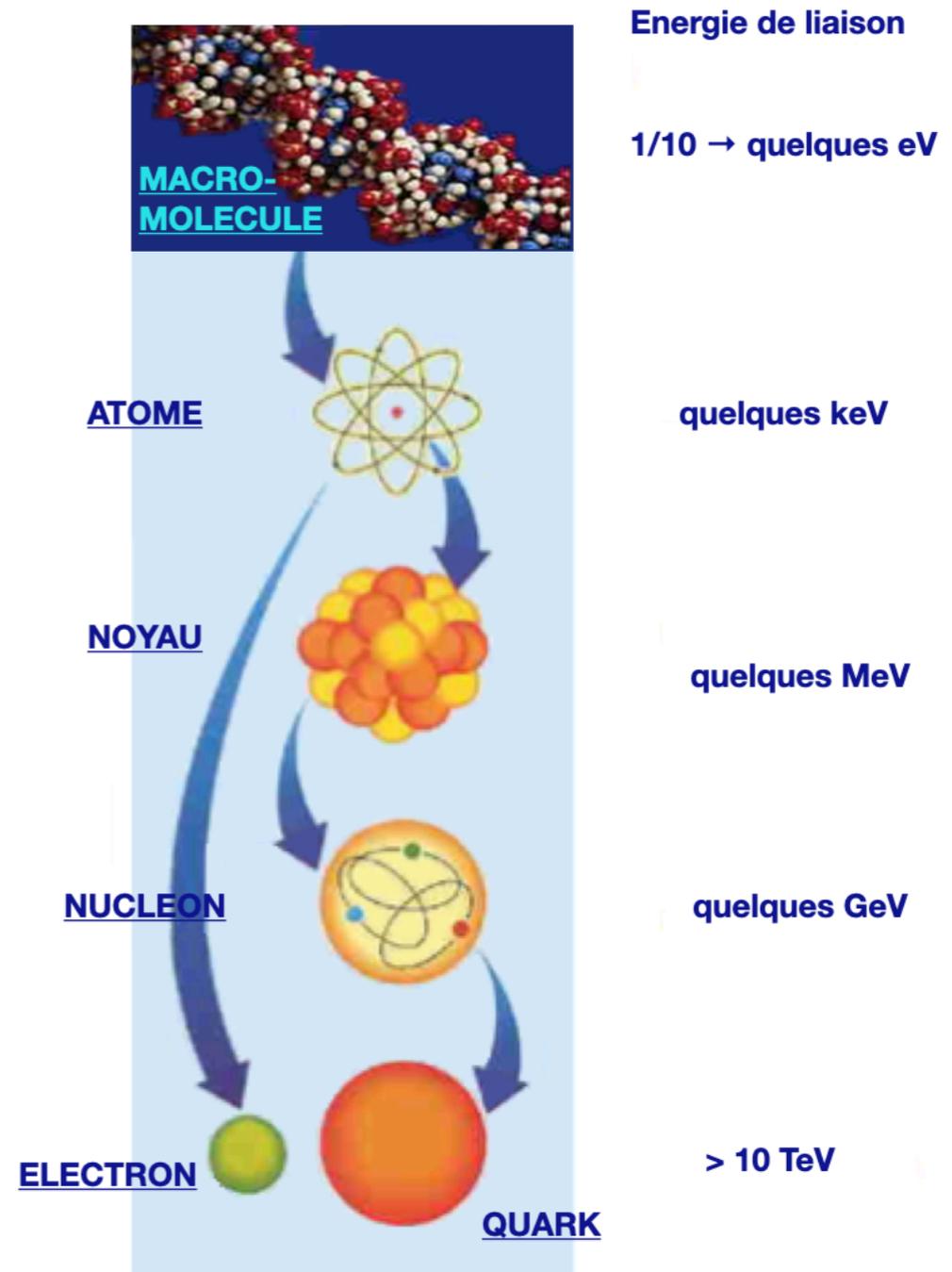
# Limite optique



# Echelles spatiale et d'énergie

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

Electronvolt		
1 eV	=	1,6 10 <sup>-19</sup> J
kilo keV		10 <sup>3</sup>
Méga MeV		10 <sup>6</sup>
Giga GeV		10 <sup>9</sup>
Téra TeV		10 <sup>12</sup>

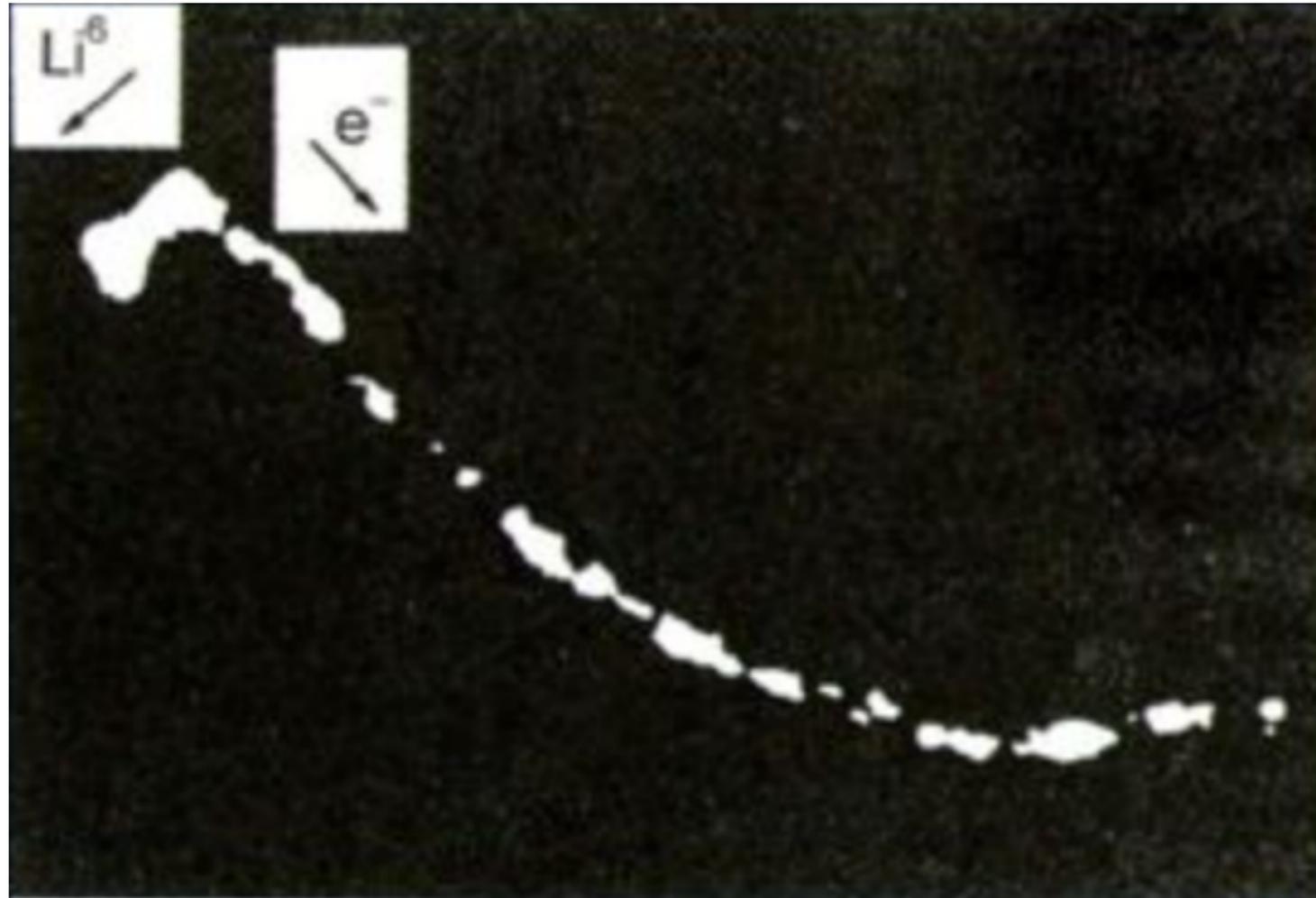


Comment atteindre de telles énergies en laboratoire ?

# 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	

# Interactions faibles



courant chargé

échange de  $W$  :  
désintégration beta

# Interactions faibles

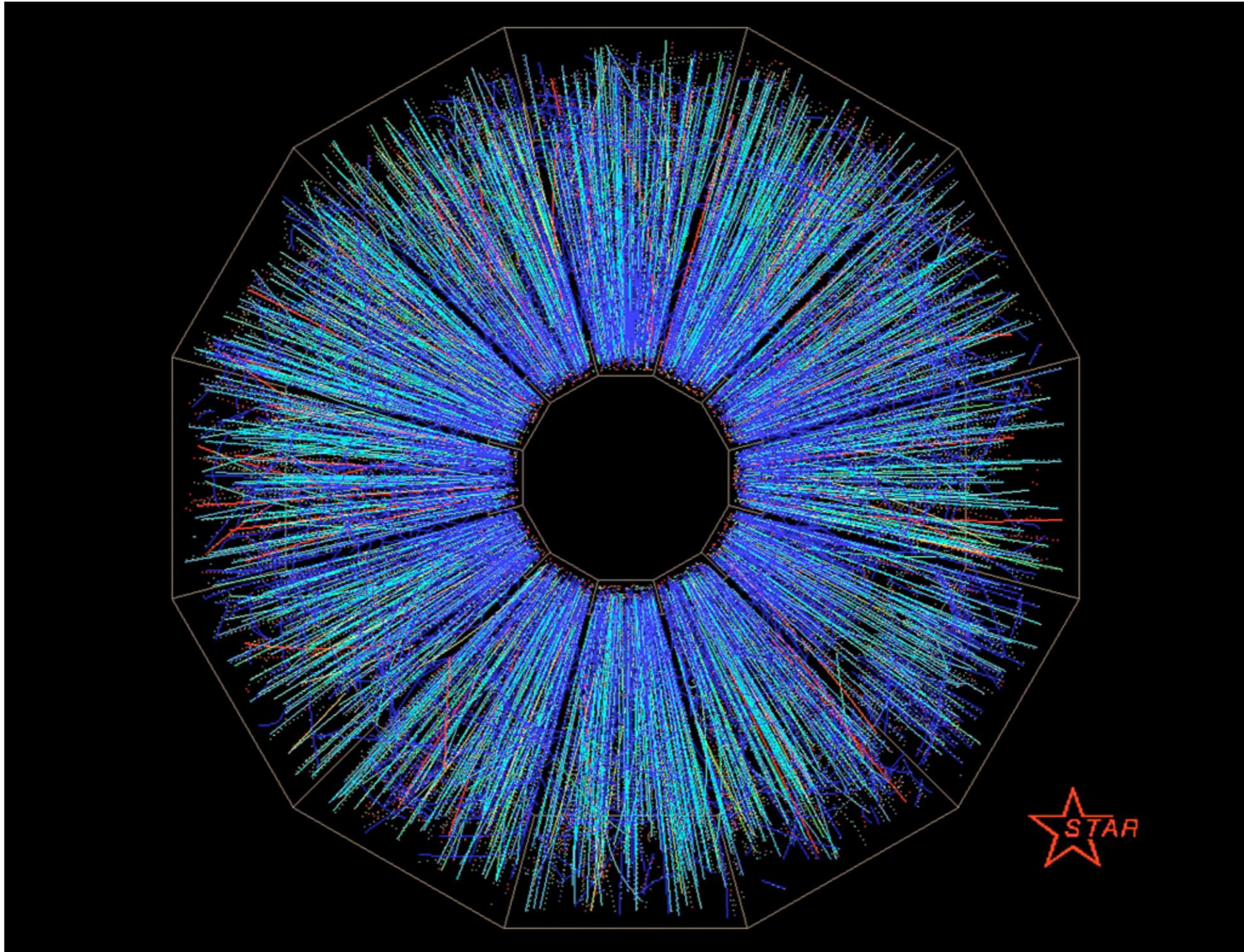
échange de  $Z^0$

courant neutre



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

# Interactions fortes

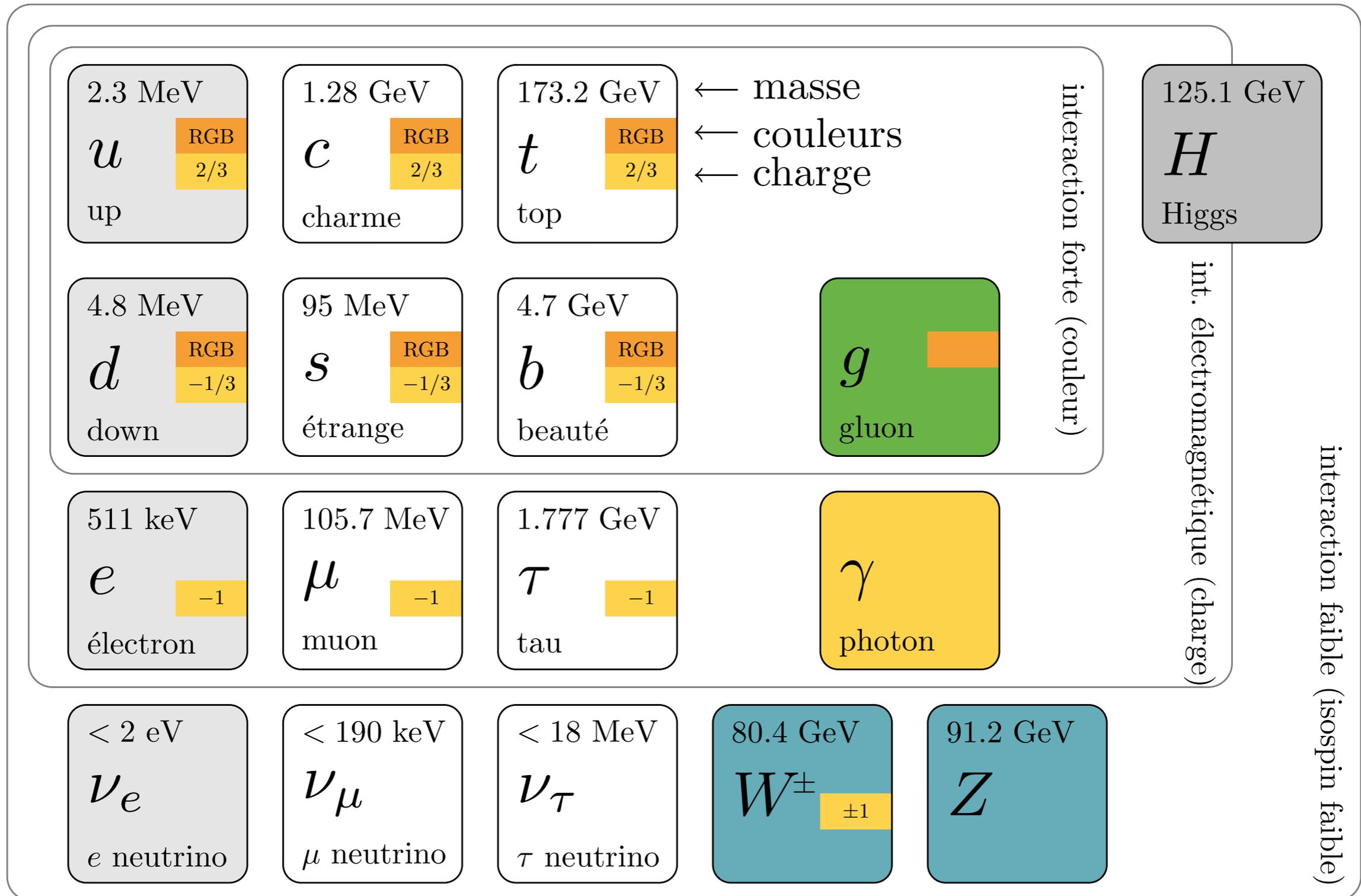


collision entre ions:  
échanges de gluons

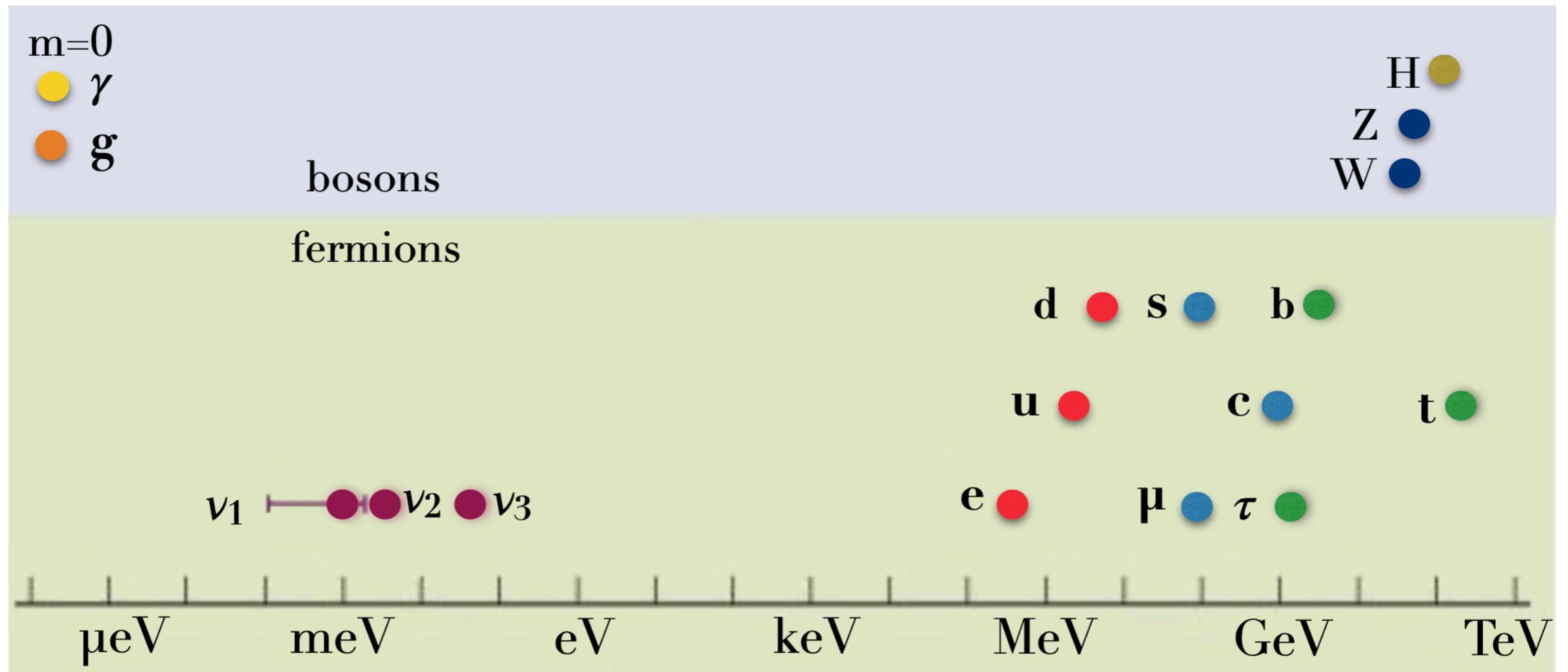
# Les interactions

	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	

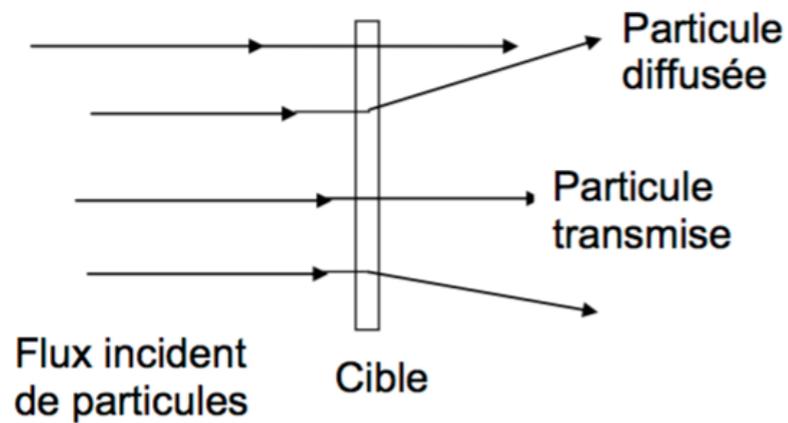
# Le modèle Standard



# 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 :

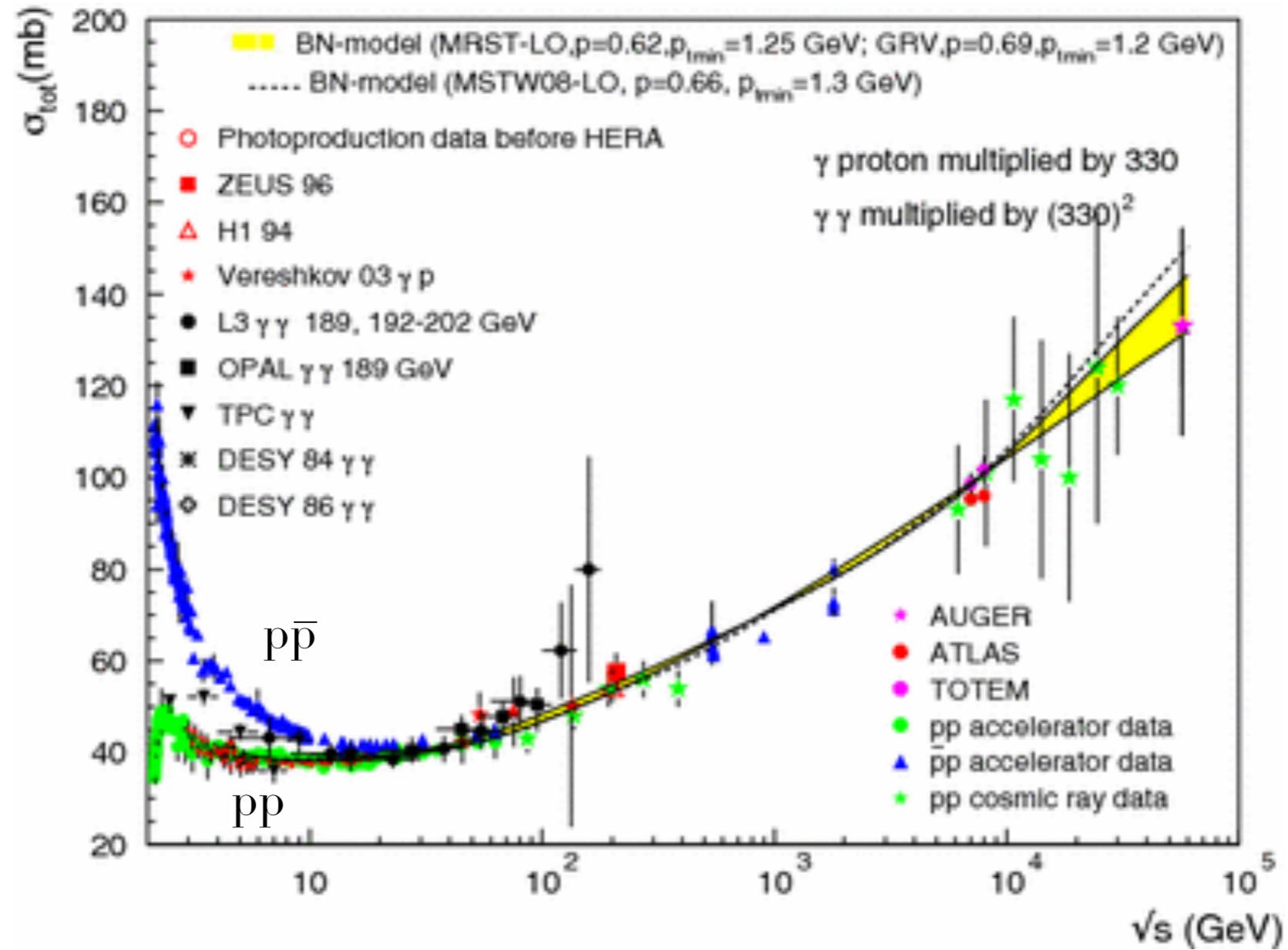
$$d\Phi = -\Phi w dx = -\Phi \sigma n_{cible} dx$$

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

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

# Exemple de mesure de section efficace

Section efficace  
totale



Énergie dans le système du centre de masse

# La luminosité

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

$$N = \int \sigma \mathcal{L} dt \quad [\mathcal{L}] = b^{-1} s^{-1}$$

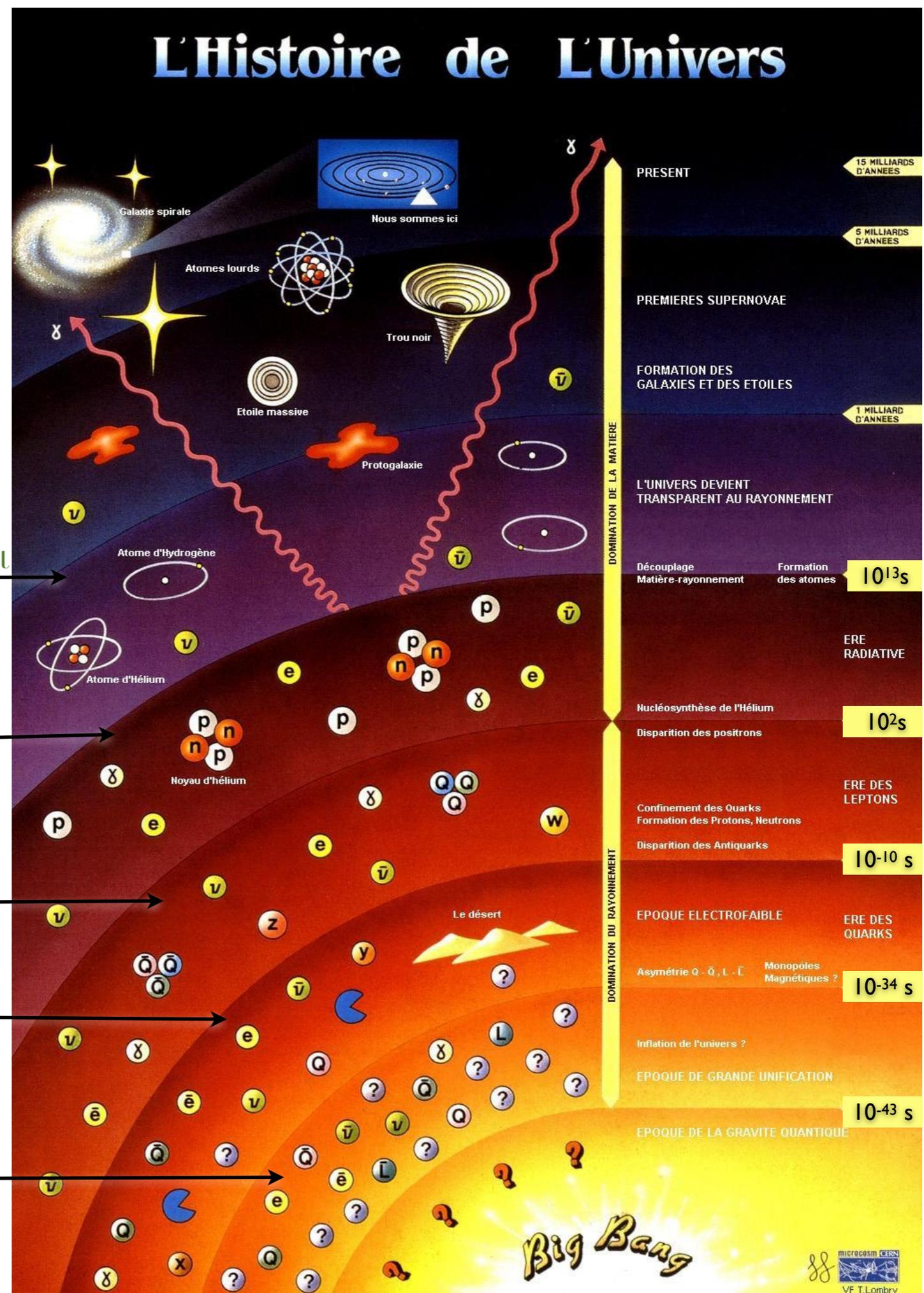
luminosité totale (ou intégrée)

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

---

	réaction type	section efficace		
IF	réactions nucléaires	1 b		
	$p + n \rightarrow X$	40 mb	$m$	$10^{-3}$
EM	$\gamma + p \rightarrow X$	20 $\mu$ b	$\mu$	$10^{-6}$
	$\gamma + \gamma \rightarrow X$	0.5 $\mu$ b	$n$	$10^{-9}$
	$e^+ + e^- \rightarrow X$	100 nb	$p$	$10^{-12}$
Higgs	$p + p \rightarrow H + X$	10 pb	$f$	$10^{-15}$
If	$\nu + p \rightarrow X$	10 fb		

# 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