

La physique des deux infinis

Elisabeth Petit
CPPM



Ecole IN2P3 d'instrumentation
"Techniques de base des détecteurs"
Fréjus, 10-15 mars 2024



NUCLÉAIRE
& PARTICULES

- ◆ Trois grands domaines scientifiques :
 - la **physique des particules** et **hadronique**, qui s'intéresse aux composants les plus élémentaires de la matière (les quarks, les leptons et les bosons) et à leurs interactions
 - la **physique** et **astrophysique nucléaire**, qui étudie la structure et la dynamique des noyaux atomiques et apporte ainsi des éléments essentiels au modèle astrophysique de formation des étoiles ainsi qu'à un grand éventail d'applications
 - la physique des **astroparticules** et la **cosmologie**, qui observent l'Univers à partir des différents messagers cosmiques (photons, rayons cosmiques, neutrinos, ondes gravitationnelles) et qui tentent d'en comprendre la dynamique et l'évolution depuis ses origines jusqu'à aujourd'hui

- ◆ Sciences qui ont ~ un siècle



Voyage au pays de l'infiniment petit...

◆ Vidéo CERN



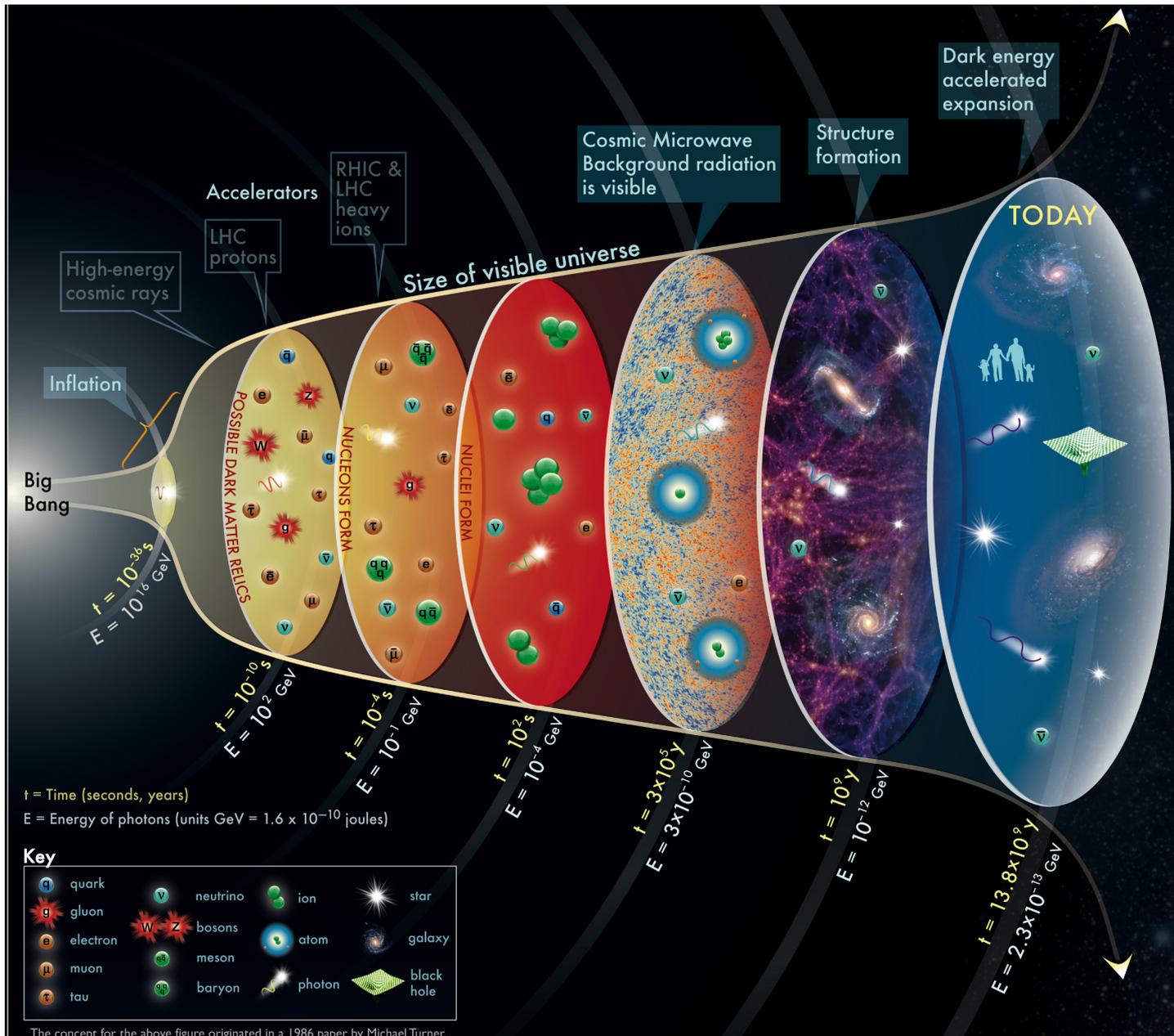
version pdf : [lien vers la vidéo](#)





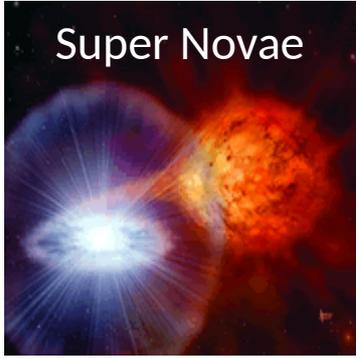
... en lien avec l'infiniment grand...

◆ Histoire de l'univers :



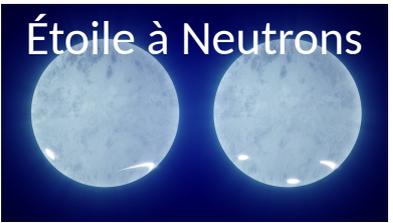


... avec la physique nucléaire/hadronique au cœur



Super Novae

Évolution des couches

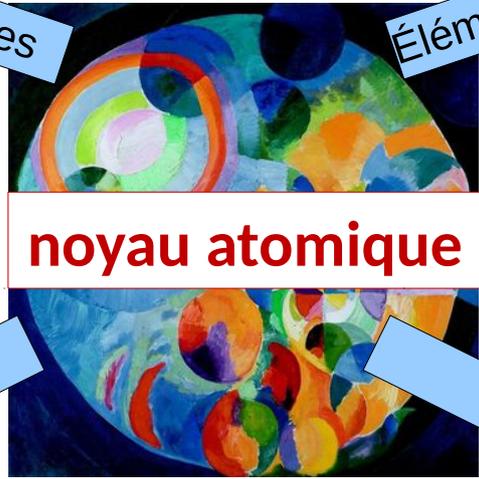


Étoile à Neutrons

Au seuil



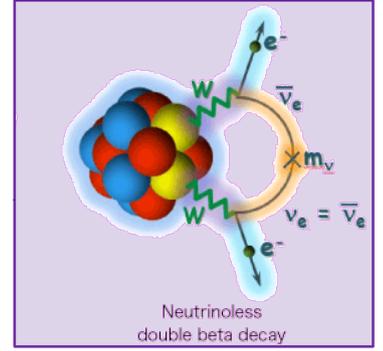
Fusion d'étoiles à neutrons



noyau atomique

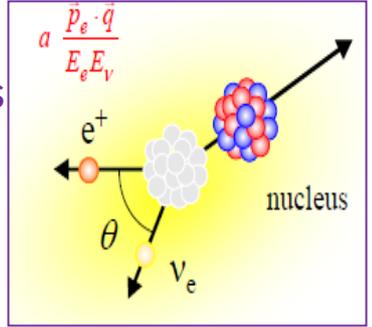
Éléments super-lourds

Décroissance β sans neutrinos



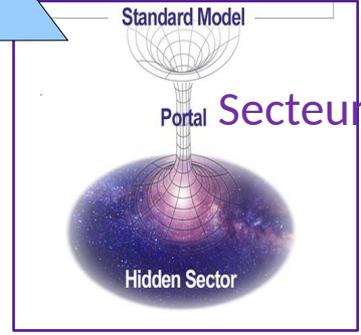
Neutrinoless double beta decay

Interactions fondamentales



nucleus

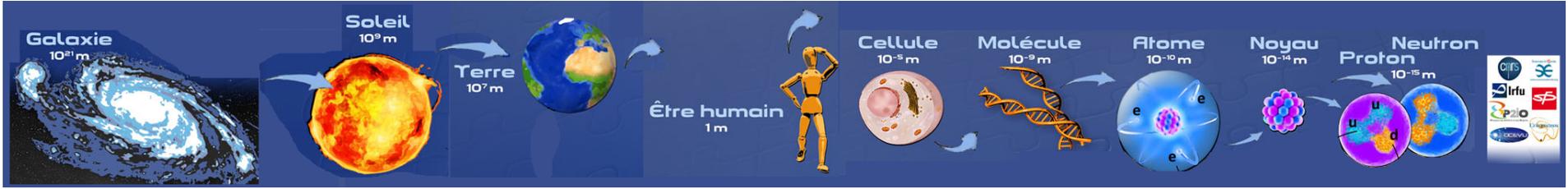
Fission



Secteur sombre



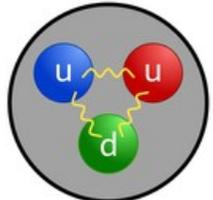
Les "objets" de la physique des particules



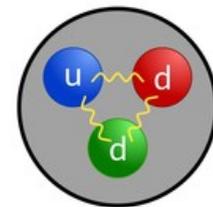
three generations of matter (fermions)

| Matière ordinaire | I | II | III | | |
|-------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| mass | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | $\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge | 2/3 | 2/3 | 2/3 | 0 | 0 |
| spin | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 0 |
| QUARKS | u up | c charm | t top | g gluon | H Higgs |
| | $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | |
| | -1/3 | -1/3 | -1/3 | 0 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | d down | s strange | b bottom | γ photon | |
| | $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ | |
| | -1 | -1 | -1 | 0 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | e electron | μ muon | τ tau | Z Z boson | |
| LEPTONS | $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ | $< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ | $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ | |
| | 0 | 0 | 0 | ±1 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | W W boson | |
| | | | | | SCALAR BOSONS |
| | | | | | GAUGE BOSONS |

Proton



Neutron



Baryon =
particule
composée
de 3 quarks
(essentielle-
ment proton
et neutron)



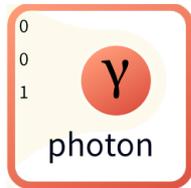
Modèle Standard de la physique des particules (1)

◆ Théorie quantique relativiste qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions

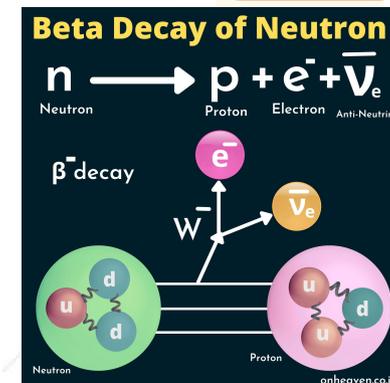
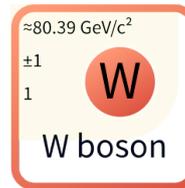
- les **interactions** entre particules se font par l'intermédiaire d'**échanges** de bosons de jauge



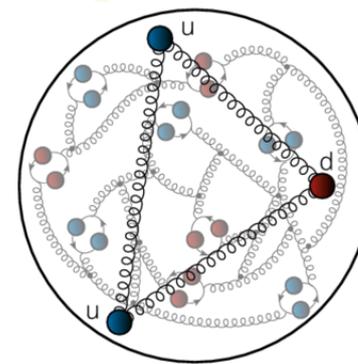
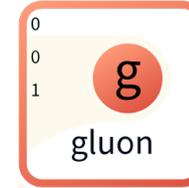
◆ Interactions fondamentales liées à des “champs”:



électromagnétisme



interaction faible



interaction forte



gravité



Modèle Standard de la physique des particules (2)

◆ Théorie diablement **précise**

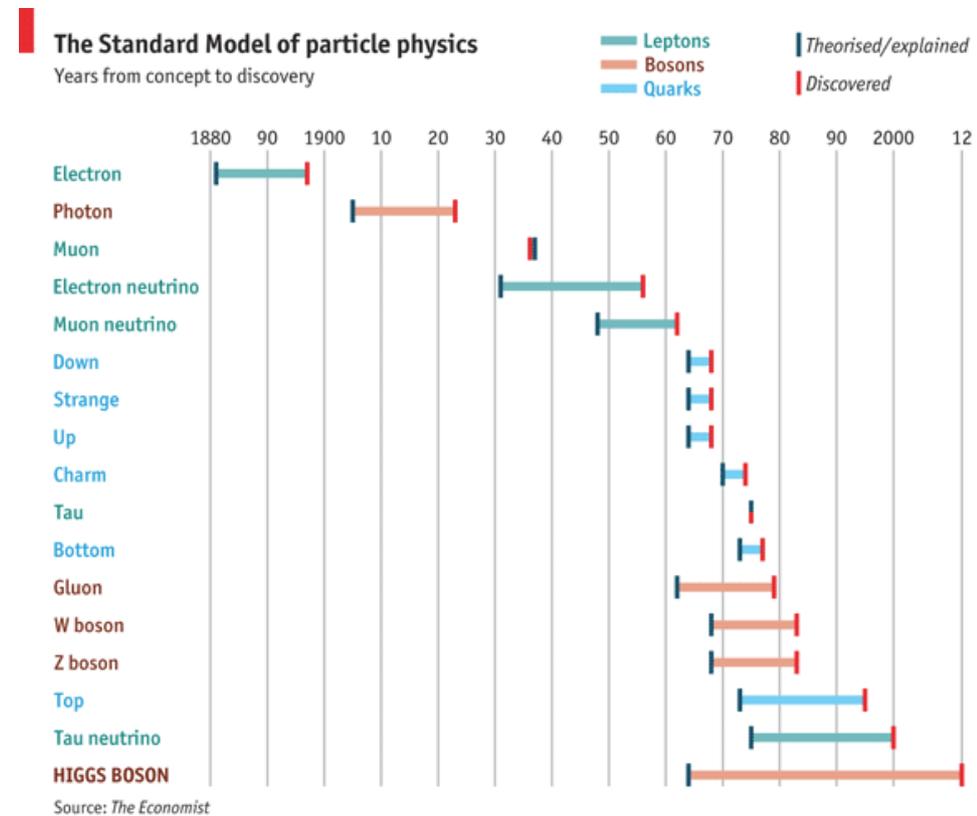
- qui a prédit l'existence de particules découvertes ensuite
- qui décrit parfaitement les mesures

◆ Mais plusieurs limites connues :

- n'explique pas la gravitation
- n'explique pas pourquoi il y a trois familles de particules
- n'explique pas la différence entre matière et antimatière
- n'explique pas la masse des neutrinos
- n'explique pas la matière noire

◆ On sait que cette théorie n'est **pas complète** et qu'il doit exister une théorie "au-delà du Modèle Standard"

- des centaines de recherches en ce sens mais pas vraiment de piste claire

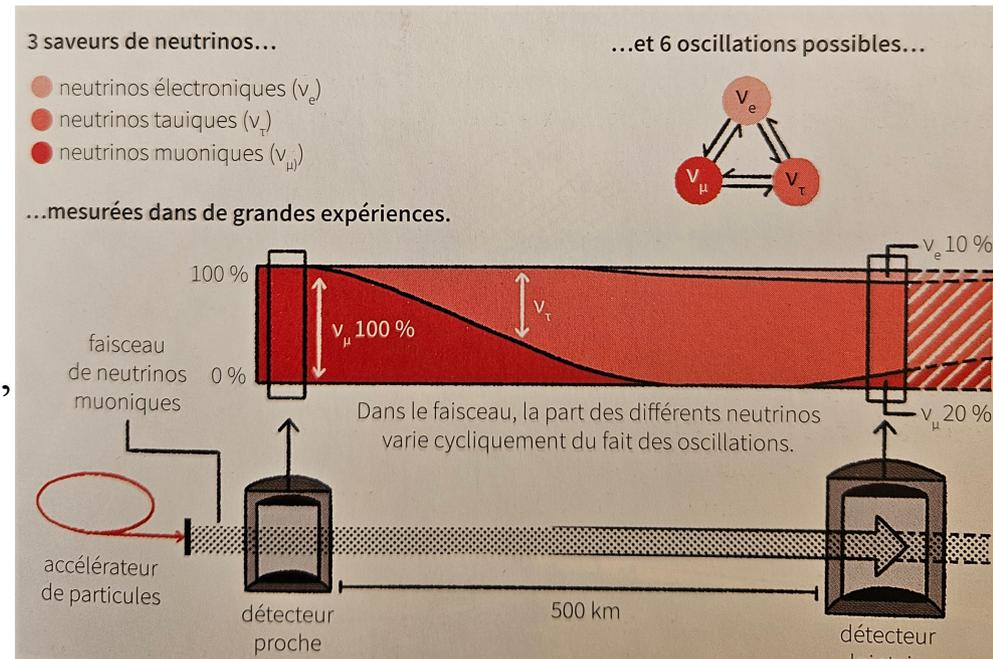
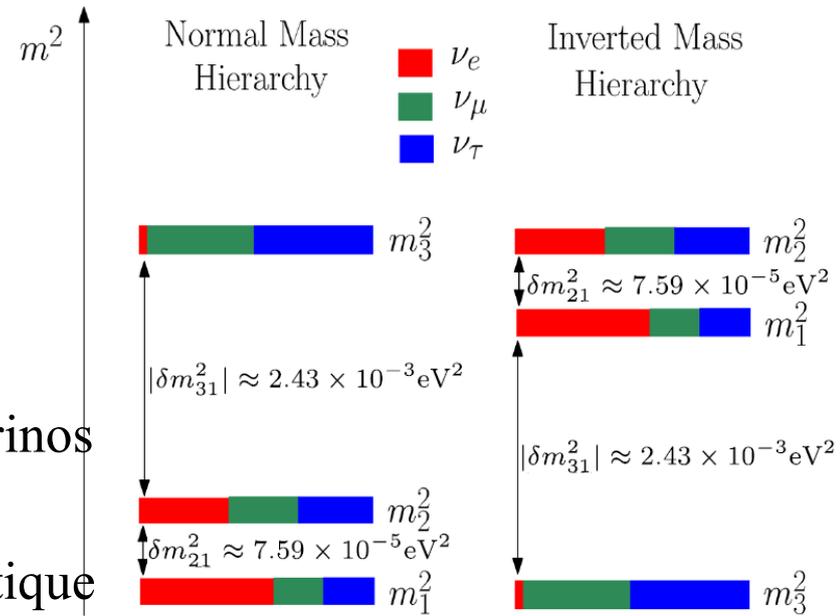




Les neutrinos

Physique particules,
astroparticules et cosmologie

- ◆ Particule n'interagissant avec la matière que par **interaction faible**
- ◆ **Oscillations** des neutrinos :
 - ν_e provenant du soleil moins nombreux que prévu
 - problème depuis les années 1960 jusqu'en 2001
 - phénomène observé maintenant pour tous les neutrinos ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ en 2010, $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ en 2011)
 - les neutrinos seraient en fait la **superposition** quantique de **trois états**
 - “angles de mélange” maintenant bien mesurés
 - on ne connaît toujours pas la hiérarchie des masses des neutrinos
 - probabilité d'oscillation dépend de la **distance**
 - mélange de détecteurs “proches” et “lointains”
- ◆ Masse nulle d'après le Modèle Standard
 - mais on sait qu'elle est non nulle à cause des oscillations
 - mesures : $< 0.3 \text{ eV}$





Les "objets" de la physique nucléaire

- ◆ 288 noyaux stables
- ◆ >3300 noyaux vus en laboratoire
- ◆ ~7000 au total estimés

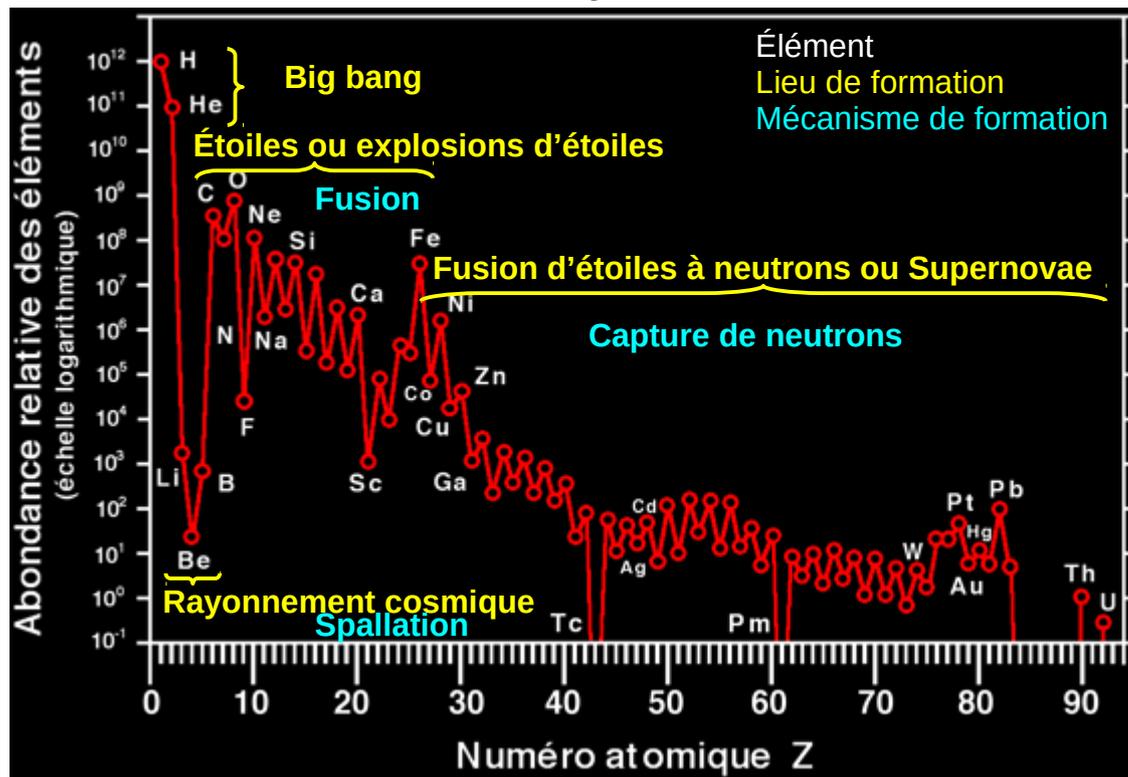
Tableau périodique des éléments chimiques

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| I A | | | | | | | | | | | | | | | | | | VII A | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | | He | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li Be B C N O F Ne | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 39 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 41 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 43 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 46 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 47 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 48 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 49 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 51 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 52 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 53 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 54 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 55 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 56 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 57 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 58 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 59 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 51 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 61 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 53 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 62 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 54 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 63 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 64 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 56 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 65 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 57 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 66 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 67 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 59 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 68 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 69 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 61 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 62 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 71 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 63 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 72 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 73 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 74 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 66 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 75 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 67 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 76 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 68 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 77 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 69 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 78 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 79 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 72 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 81 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 73 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 82 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 83 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 84 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 76 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 85 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 77 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 86 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 78 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 87 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 79 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 88 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 89 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 81 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 90 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 82 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 91 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 92 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 84 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 93 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 94 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 86 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 95 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 87 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 96 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 88 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 97 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 89 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 98 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 99 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 92 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 101 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 102 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 94 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 103 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 95 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 104 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 105 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 106 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 107 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 108 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 109 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 101 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 110 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 102 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 111 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 103 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 112 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 104 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 113 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 105 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 114 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 106 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 115 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 107 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 116 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 108 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 117 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 109 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 110 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 119 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 111 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 112 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 121 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 113 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 122 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 114 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 123 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 115 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 124 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 116 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 125 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 117 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 126 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 127 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 119 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 128 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 129 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 121 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 130 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 122 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 131 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 123 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 132 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 124 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 133 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 125 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 134 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 126 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 135 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 127 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 136 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 128 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 137 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 129 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 138 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 130 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 139 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 131 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 140 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 132 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 141 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 133 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 142 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 134 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 143 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 135 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 144 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 136 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 145 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 137 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 146 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 138 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 147 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 139 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 148 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 140 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 149 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 141 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 150 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 142 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 151 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 143 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 152 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 144 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 153 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 145 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 154 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 146 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 155 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 147 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 156 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 148 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 157 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 149 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 158 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 150 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 159 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 151 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 160 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 152 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 161 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 153 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 162 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 154 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 163 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 155 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 164 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 156 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 165 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 157 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 166 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 158 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 167 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 159 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 168 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 160 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 169 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 161 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 170 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 162 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 171 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 163 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 172 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 164 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 173 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 165 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 174 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 166 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 175 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 167 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 176 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 168 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 177 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 169 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 178 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 170 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 179 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 171 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 180 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 172 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 181 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 173 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 182 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 174 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 183 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 175 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 184 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 176 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 185 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 177 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 186 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 178 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 187 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 179 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 188 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 180 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 189 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 181 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 190 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 182 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 191 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 183 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 192 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 184 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 193 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 185 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 194 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 186 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 195 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 187 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 196 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 188 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 197 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 189 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 198 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 190 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 199 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 191 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 200 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 192 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 201 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 193 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 202 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 194 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 203 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 195 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 204 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 196 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 205 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 197 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 206 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 198 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 207 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 199 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 208 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 200 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 209 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 201 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 210 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 202 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 211 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 203 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 212 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 204 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 213 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 205 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 214 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 206 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 215 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 207 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 216 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 208 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 217 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 209 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 218 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 210 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 219 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 211 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 220 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 212 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 221 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 213 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 222 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 214 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 223 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 215 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 224 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 216 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 225 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 217 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 226 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 218 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 227 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 219 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 228 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 220 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 229 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 221 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 230 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 222 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 231 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 223 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 232 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 224 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 233 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 225 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 234 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 226 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 235 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 227 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 236 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 228 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 237 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 229 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 238 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 230 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 239 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 231 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 240 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 232 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 241 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 233 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 242 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 234 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 243 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 235 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 244 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 236 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 245 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 237 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 246 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 238 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 247 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 239 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 248 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 240 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 249 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 241 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 242 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 251 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 243 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 252 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 244 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 253 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 245 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 254 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 246 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 255 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 247 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 256 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 248 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 257 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 249 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 258 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 250 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 259 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 251 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 260 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 252 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 261 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 253 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 262 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 254 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 263 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 255 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 264 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 256 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 265 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 257 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 266 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 258 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 267 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 259 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 268 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 260 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 269 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 261 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 270 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 262 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 271 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 263 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 272 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 264 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 273 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 265 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 274 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 266 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 275 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 267 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 276 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 268 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 277 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 269 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 278 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 270 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 279 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 271 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 280 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 272 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 281 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 273 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 282 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 274 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 283 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 275 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 284 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 276 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 285 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 277 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 286 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 278 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 287 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 279 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 288 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 280 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 289 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 281 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 290 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 282 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 291 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 283 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 292 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 284 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 293 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 285 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 294 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 286 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 295 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 287 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 296 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 288 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 297 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 289 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 298 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 290 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 299 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 291 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 292 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 301 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 293 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 302 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 294 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 303 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 295 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 304 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 296 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 305 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 297 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 306 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 298 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 307 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 299 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 308 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 309 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 301 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 310 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 302 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 311 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 303 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 312 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 304 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 313 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 305 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 314 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 306 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 315 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 307 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 316 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 308 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 317 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 309 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 318 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 310 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 319 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 311 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 320 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 312 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 321 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 313 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 322 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 314 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 323 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 315 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 324 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 316 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 325 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 317 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 326 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 318 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 327 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 319 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 328 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 320 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 329 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 321 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 330 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 322 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 331 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 323 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 332 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 324 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 333 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 325 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 334 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 326 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 335 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 327 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 336 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 328 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 337 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 329 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 338 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 330 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 339 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 331 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 340 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 332 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 341 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 333 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 342 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 334 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 343 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 335 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 344 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 336 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 345 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 337 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 346 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 338 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 347 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 339 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 348 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 340 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 349 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 341 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 350 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 342 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 351 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 343 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 352 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 344 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 353 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 345 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 354 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 346 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 355 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 347 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 356 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 348 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 357 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 349 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 358 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 350 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 359 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 351 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 360 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 352 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 361 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 353 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 362 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 354 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 363 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 355 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 364 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 356 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 365 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 357 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 366 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 358 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 367 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 359 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 368 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 360 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 369 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 361 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 370 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 362 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 371 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 363 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 372 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 364 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 373 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 365 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 374 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 366 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 375 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 367 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 376 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 368 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 377 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 369 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 378 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 370 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 379 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 371 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



Astrophysique nucléaire

- ◆ Après le Big Bang, l'Univers contient seulement deux éléments chimiques: l'hydrogène et l'hélium
- ◆ **Nucléosynthèse** : ce sont les étoiles qui sont à l'origine de la grande diversité des éléments constituant l'Univers aujourd'hui



- ◆ Les astrophysiciens reproduisent et observent les réactions qui ont lieu dans les étoiles pour mieux comprendre le processus de création des éléments chimiques et la vie des étoiles

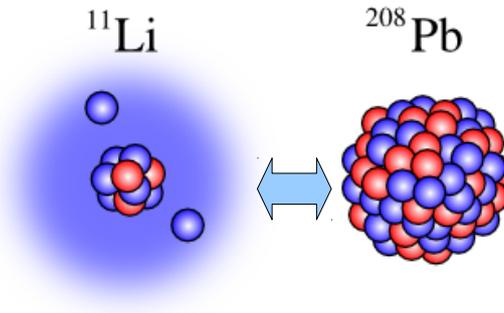


Noyaux exotiques

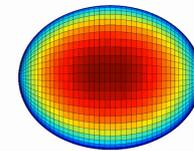
- ◆ Pas encore de **modèle unique** et universellement accepté pour prédire les propriétés d'un noyau atomique **à partir** des **interactions fondamentales**
 - les propriétés des noyaux exotiques permettent de tester les modèles du noyau atomique et de la matière nucléaire dans des conditions extrêmes

- ◆ Exemple :

- halos de neutrons



- noyaux super-déformés

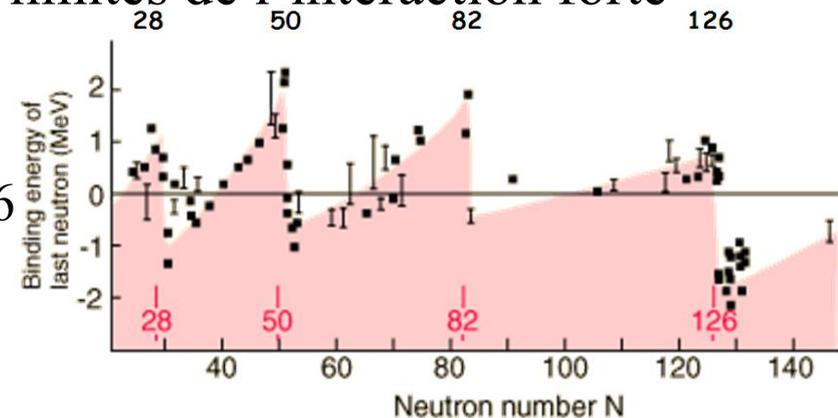


Radium 224

- ◆ Noyaux super lourds (> 118 protons): test des limites de l'interaction forte

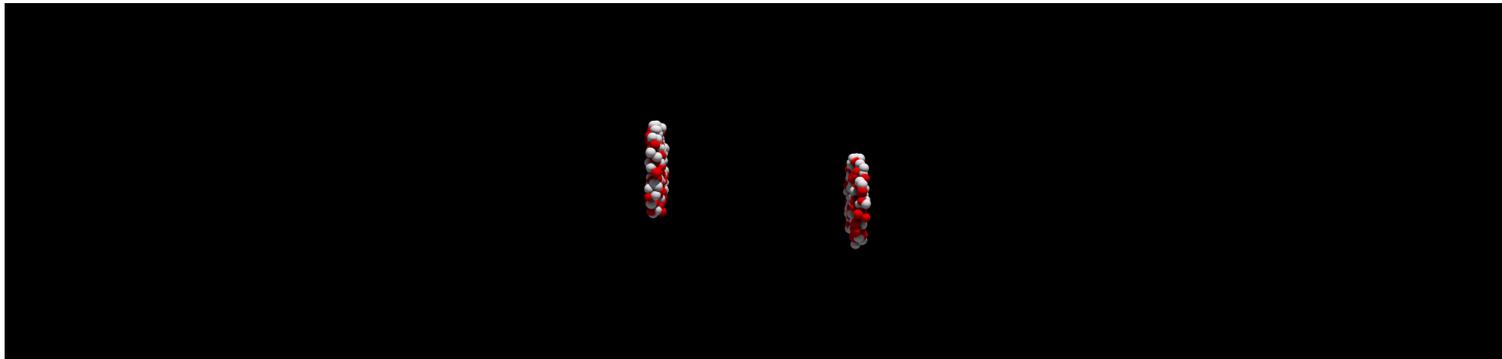
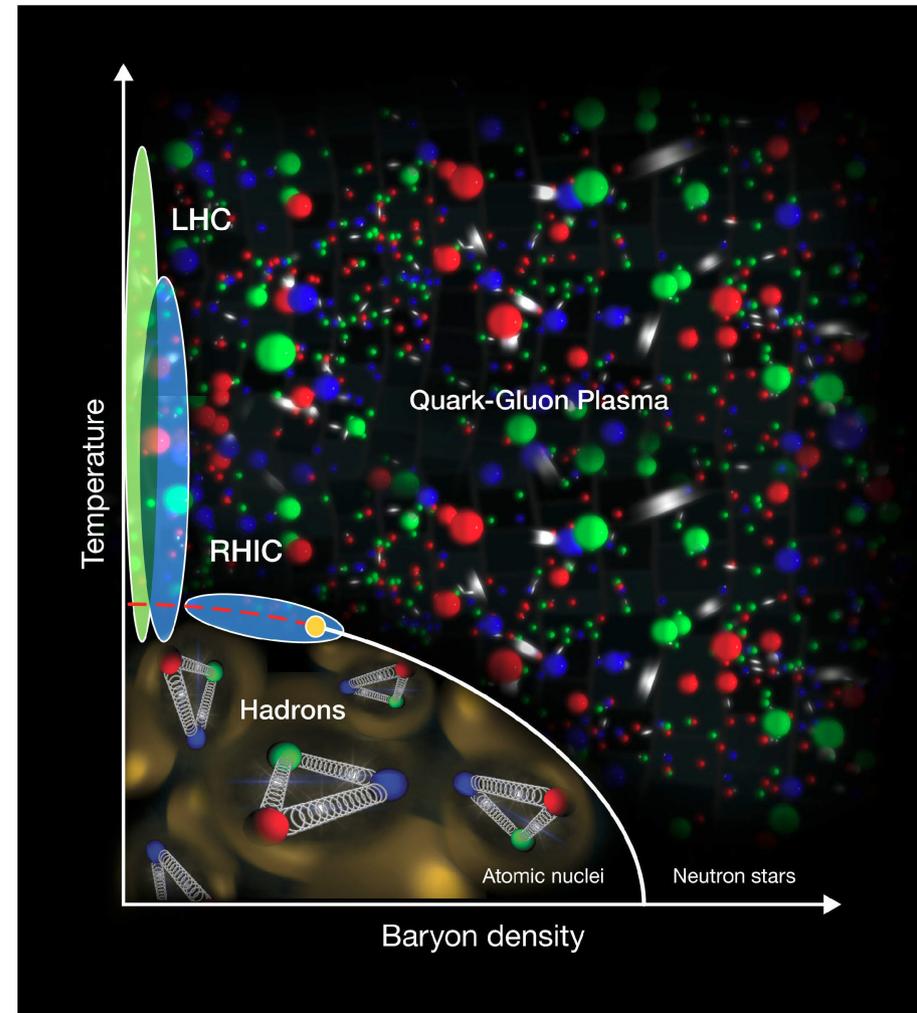
- ◆ Noyaux dits “magiques”

- semblent particulièrement stables et robustes lorsqu'ils possèdent 2, 8, 20, 28, 50, 82 ou 126 protons et/ou neutrons
- il semblerait que les noyaux dits “exotiques” ne répondent pas tous à cette loi



Plasma de quarks et gluons

- ◆ Les quarks sont confinés dans les noyaux grâce aux gluons de l'interaction forte
- ◆ Aux premières **micro-secondes de l'Univers** la température était très élevée et les densités très fortes : les quarks et gluons n'étaient pas confinés mais se propageaient librement dans un état de la matière que l'on appelle un "**plasma de quarks et gluons**"
- ◆ Ces conditions peuvent exister actuellement :
 - dans les étoiles à neutrons
 - dans des collisionneurs d'ions lourds

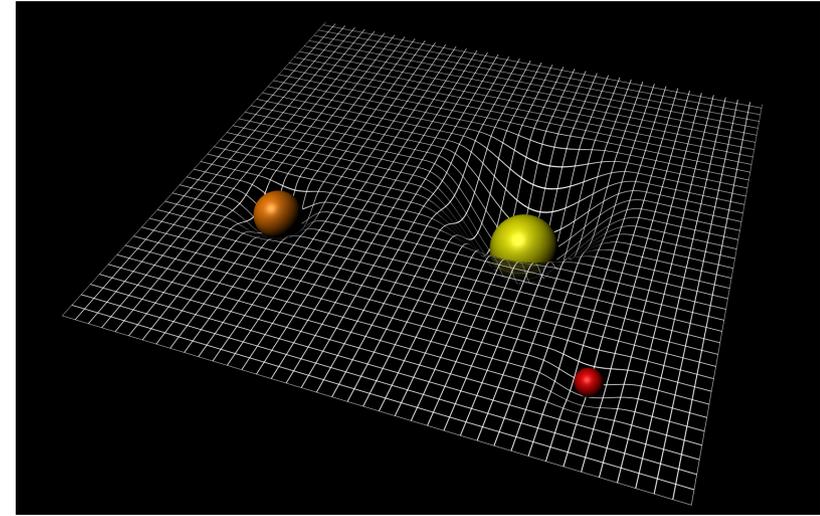




Le Modèle Standard de la cosmologie (1)

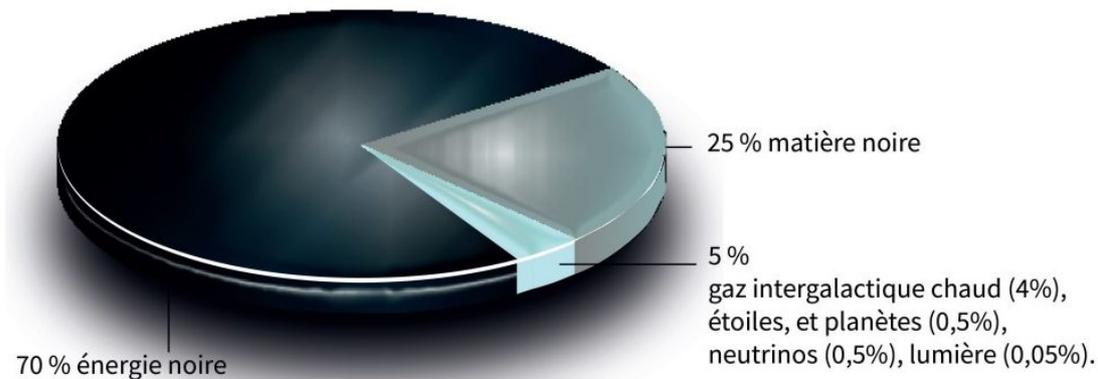
◆ Relativité générale (1917)

- la gravitation n'est pas une force mais une propriété de l'espace-temps en présence d'objets massifs. Ces objets déforment et étirent l'espace-temps autour d'eux : on dit souvent qu'ils le "courbent"
- la force de gravitation est la conséquence de la courbure de l'espace-temps



- ◆ 1927 : l'univers est en expansion
- ◆ ~1970 : l'univers contient de la matière noire
- ◆ 1998 : l'univers est en expansion accélérée (→ énergie noire)

CONTENU DE L'UNIVERS AUJOURD'HUI

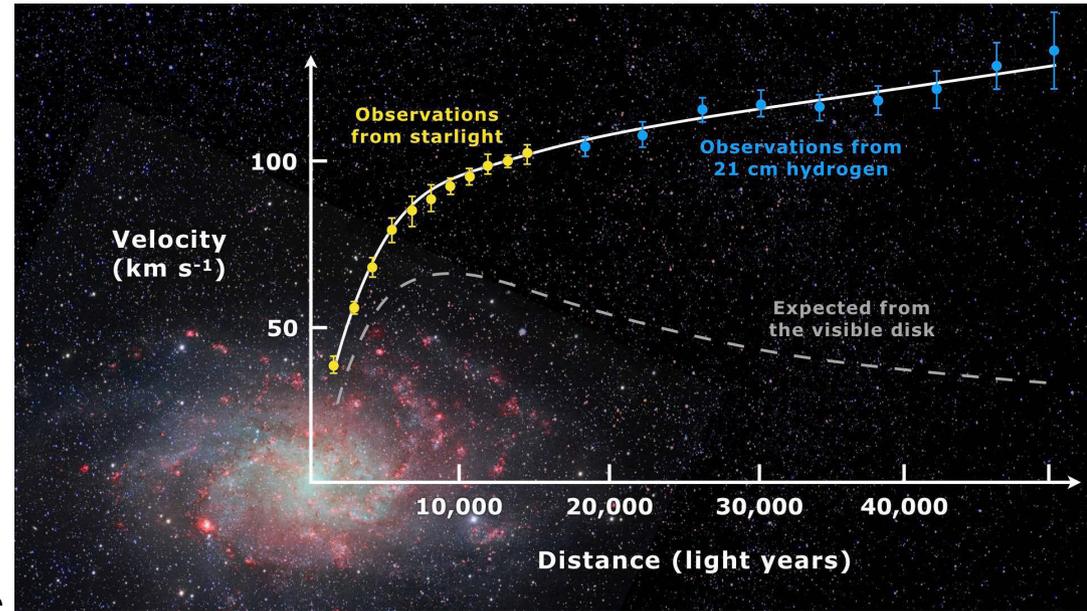


◆ Initialement postulée pour expliquer les vitesses de rotation des galaxies

- mais beaucoup d'autres preuves

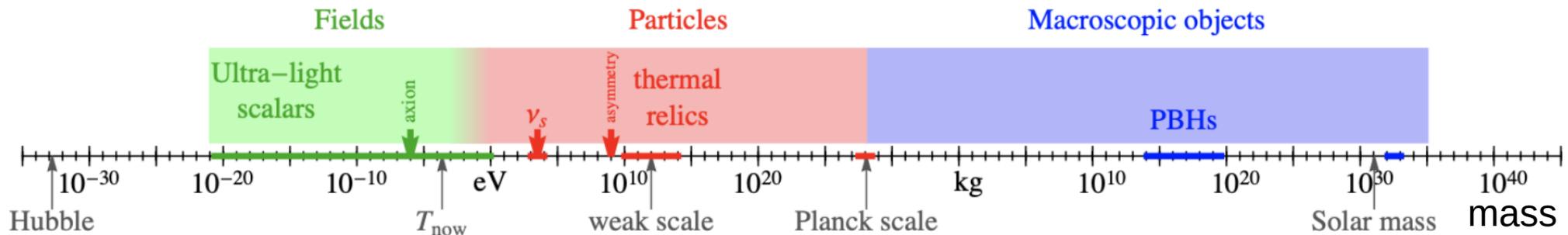
◆ Nouvelle particule inconnue

- neutre (ne brille pas)
- ni trop chaude, ni trop froide
- interagit très très faiblement (ni avec elle-même ni avec la matière ordinaire)
- stable ou à très longue durée de vie
- peut-être une relique de l'univers primordial



◆ Candidats

- principaux : WIMP, ALP, axions, trous noirs primordiaux

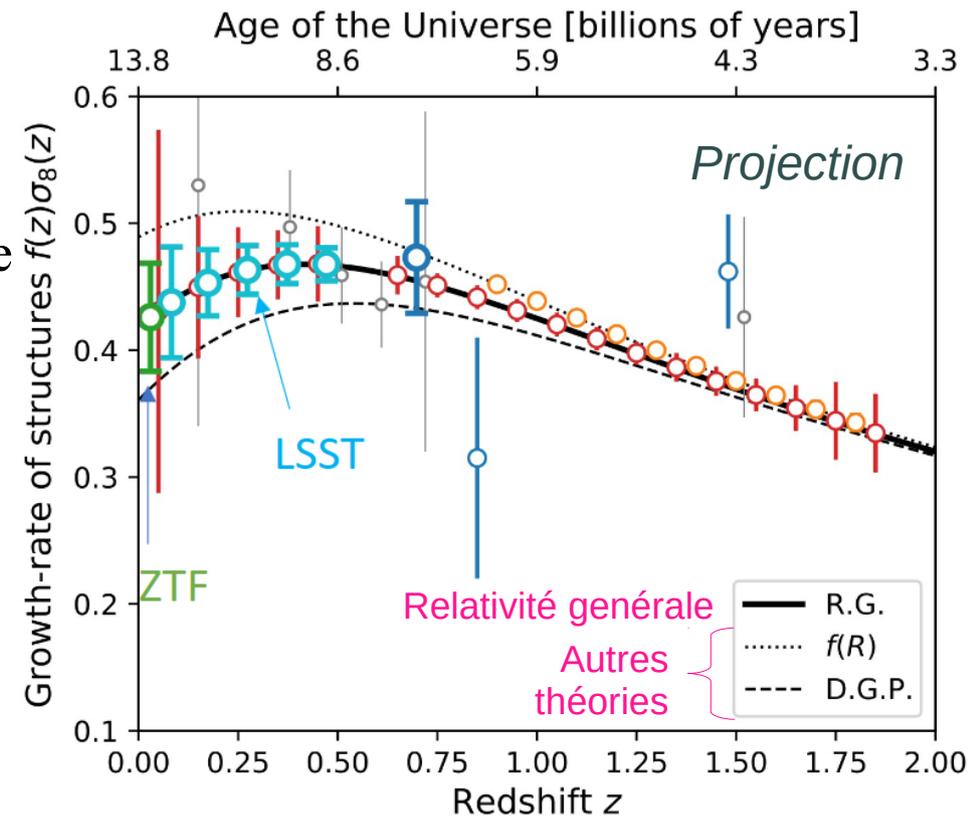


◆ Autre solution : changer les équations



L'énergie noire

- ◆ 1998 : découverte que l'expansion de l'univers s'accélère
 - pression négative → **énergie noire**
- ◆ Une **constante cosmologique**, comme proposé tout d'abord par Einstein ?
 - lié à l'énergie du vide : désaccord de 120 ordres de grandeur avec la physique des particules !
- ◆ **Nouveau type de champ**, à l'instar des champs connus comme par exemple le champ magnétique ou le champ de gravitation, qui évolue dynamiquement avec l'expansion de l'univers ?
- ◆ Manifestation d'une **rupture avec la relativité générale** et une déviation de la loi de la gravité ?





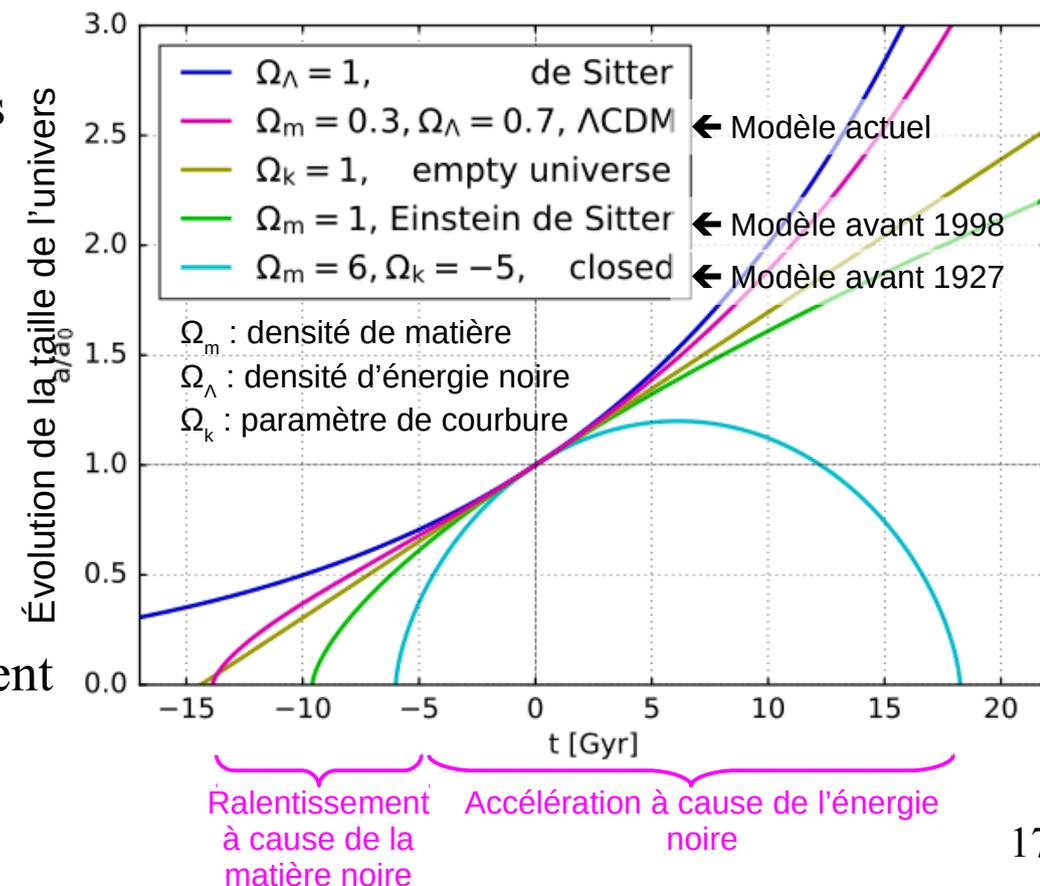
Le Modèle Standard de la cosmologie (2)

◆ **Modèle Λ CDM** (Lambda Cold Dark Matter) : modèle le plus simple qui rend compte des propriétés de l'Univers observable :

- l'existence et la structure du fond diffus cosmologique
- la structure à grande échelle de la distribution des galaxies
- l'abondance des nucléons et celle des éléments légers
- l'expansion de l'Univers et l'accélération de son expansion

◆ Se fonde sur trois hypothèses :

- le principe cosmologique : l'Univers est **homogène et isotrope** à grande échelle
- le principe d'universalité : la gravitation est décrite par la **relativité générale** à toutes les échelles
- le **contenu en matière** de l'Univers, donné par la matière noire froide (CDM), les baryons et le rayonnement





Les “objets” de l’astroparticule et la cosmologie (1)

◆ Supernova

- implosion d’une étoile en fin de vie
- SN1a : “chandelles” cosmiques (luminosité totale connue)

◆ Pulsar

- des étoiles à neutrons très fortement magnétisées et tournant très rapidement sur elles-mêmes

◆ Microquasar

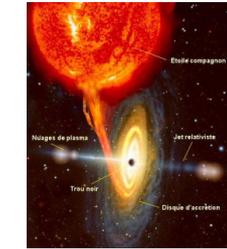
- système binaire comprenant un objet compact (étoile à neutrons, trou noir) et une étoile compagne

◆ Noyaux actifs de galaxie (quasar)

- région centrale d’une galaxie abritant un trou noir de masse pouvant atteindre plusieurs milliards de masses solaires...

◆ Sursauts gamma (GRB)

- émissions de rayons gamma de très grande intensité qui durent de quelques dixièmes à quelques dizaines de secondes situés à de très grandes distances de la Terre (plus d’une dizaine de milliards d’années lumière)

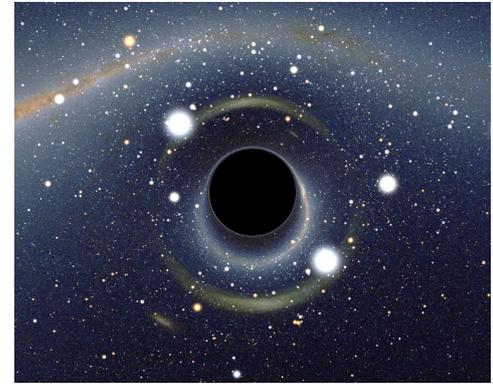




Les “objets” de l’astroparticule et la cosmologie (2)

◆ Trous noirs

- objet céleste si compact que l'intensité de son champ gravitationnel empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper

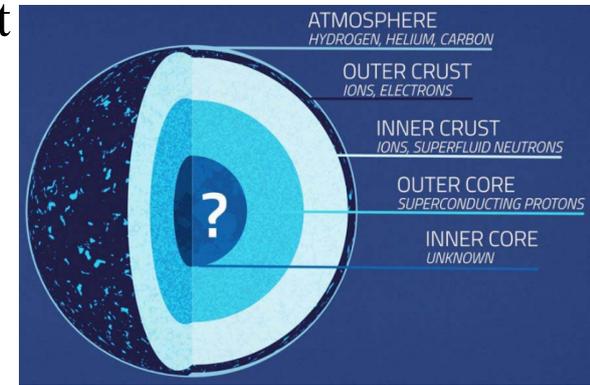


◆ Étoiles à neutrons

- des étoiles à neutrons très fortement magnétisées et tournant très rapidement sur elles-mêmes

◆ Effets de **lentille gravitationnelle** (weak lensing)

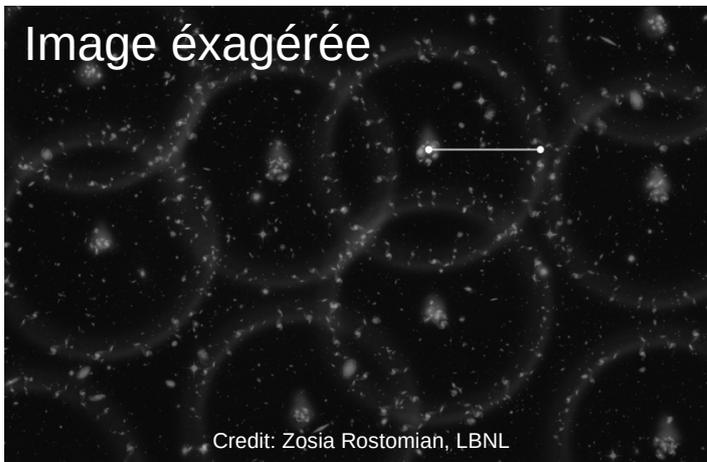
- déviation des rayons lumineux par un corps massif
- objet visible ou invisible



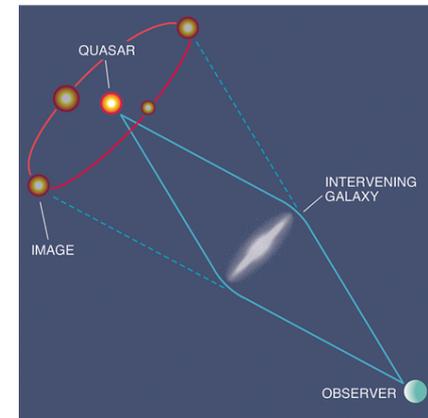
◆ Oscillations acoustiques baryoniques (BAO)

- zones de surdensité créées par des ondes acoustiques dans le plasma de baryons (protons et neutrons) et photons primordial

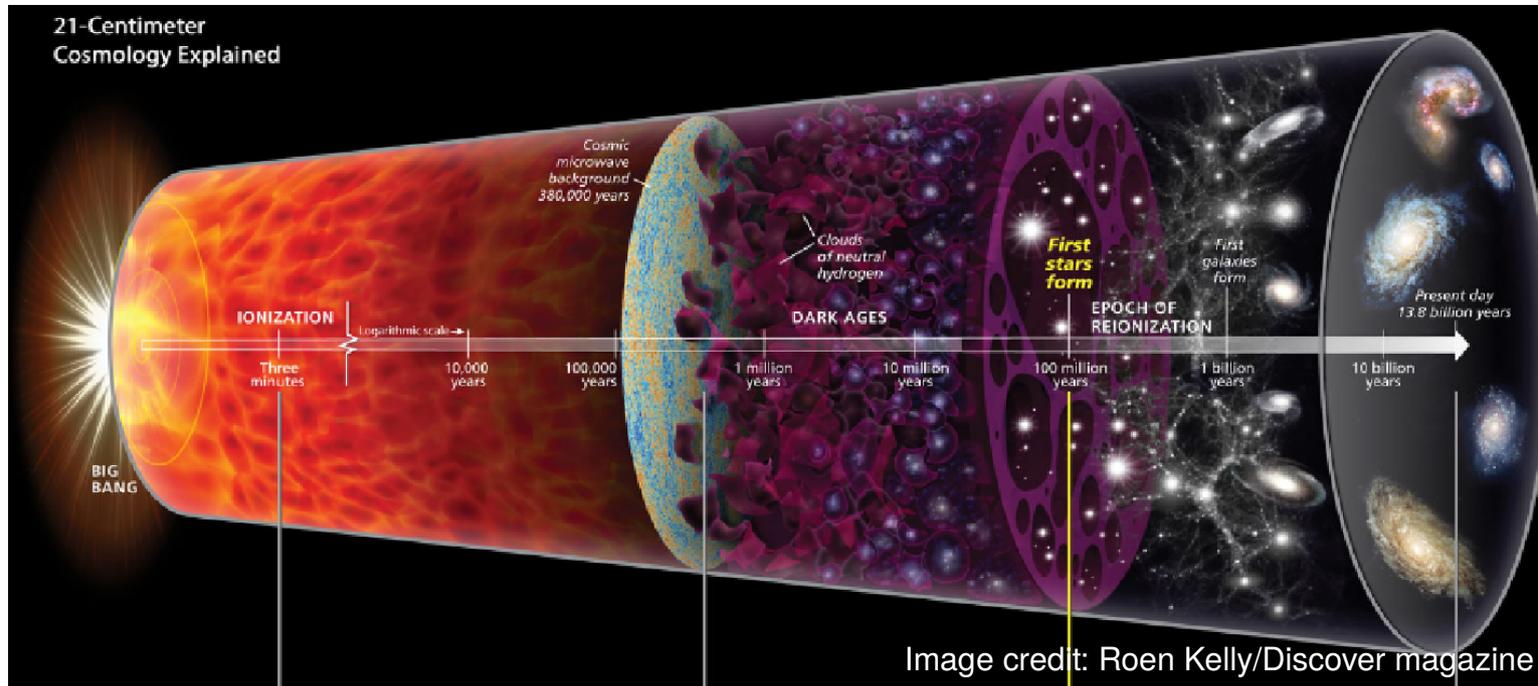
Image exagérée



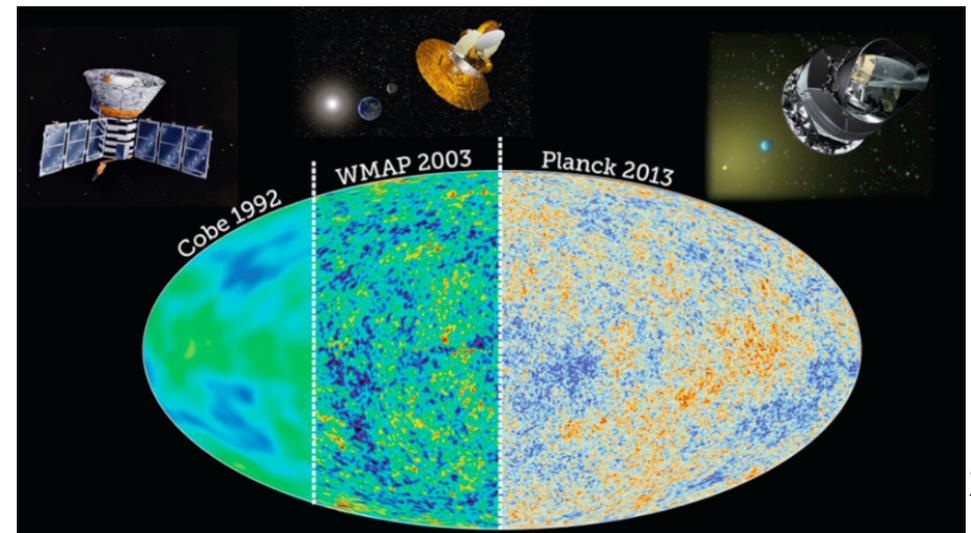
Credit: Zosia Rostomian, LBNL



Fond diffus cosmologique



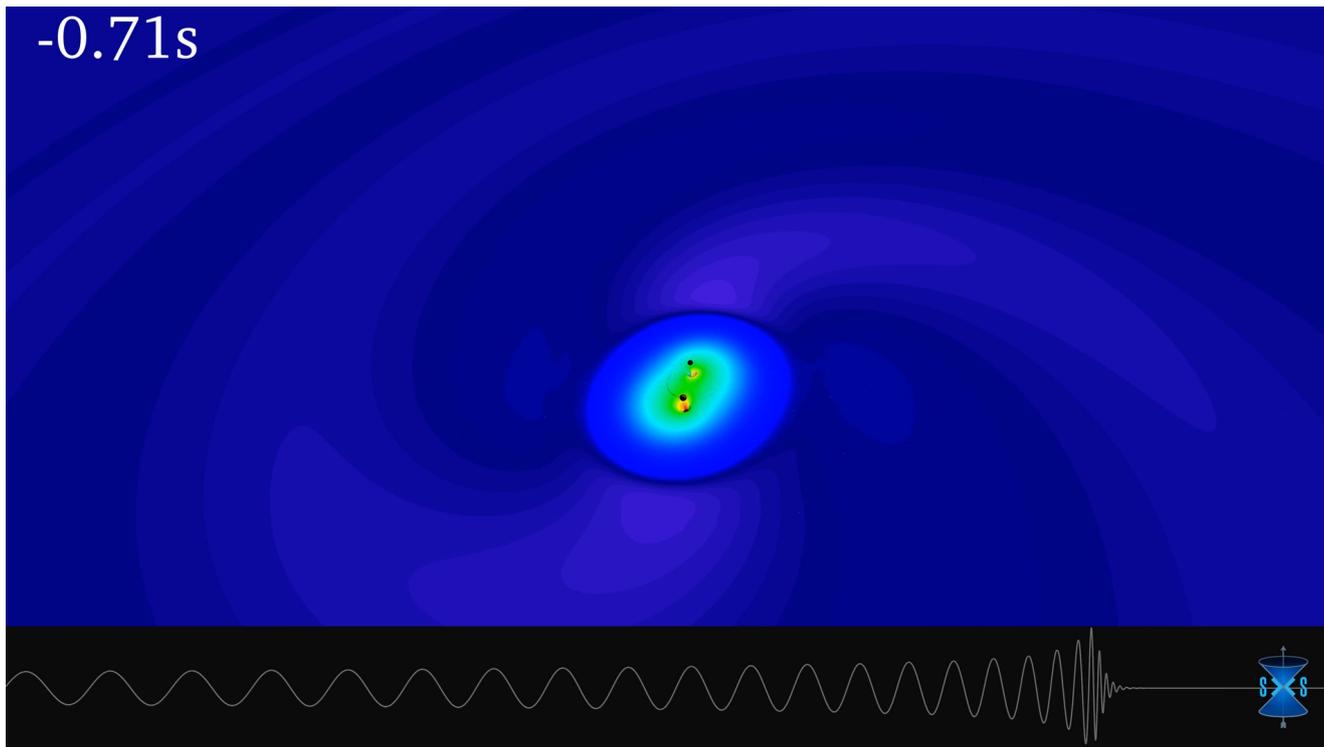
- ◆ Formé lorsque l'univers est devenu transparent : quand il a été assez froid pour que les protons et les électrons puissent former de l'hydrogène
 - première lumière visible
- ◆ Radiation du corps noir très isotropique à **1.73K**
 - fluctuations minuscules (10^{-5} K)
 - polarisé linéairement



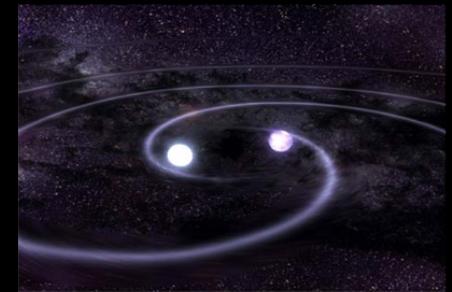


Ondes gravitationnelles

- ◆ La théorie de la relativité générale d'Einstein prédit que deux astres orbitant l'un autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles. Ces ondes leur font perdre de l'énergie, ce qui fait qu'ils vont lentement spiraler l'un vers l'autre avant de fusionner



- ◆ On pensait qu'elles existaient depuis 1974
 - accélération de la rotation des pulsars binaires (pulsar + étoile à neutron ou naine blanche)
- ◆ Détectées directement en 2016



Étoiles à neutrons binaires

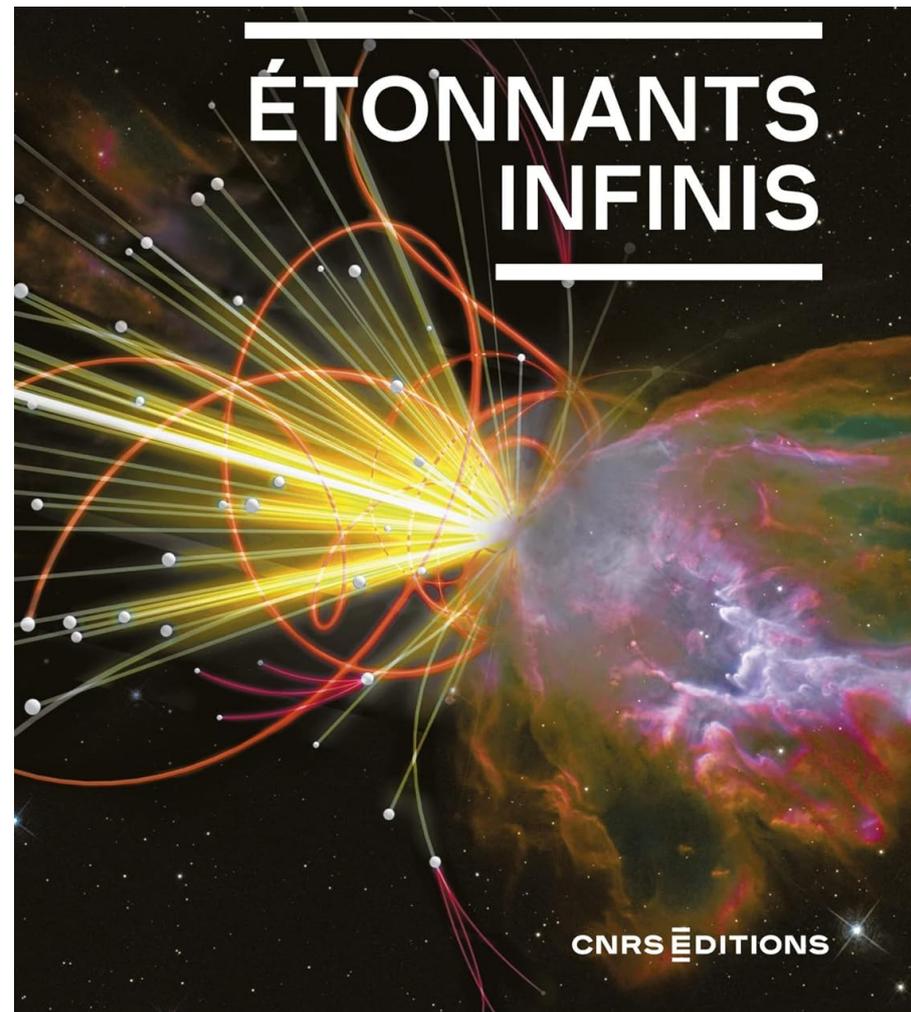


Trous noirs binaires



Binôme trou noir - étoiles à neutrons

- ◆ On va voir aux cours suivant comment observer/mesurer tout ça !
- ◆ Référence recommandée :



Back-up

Near the black holes, the colors depict the rate at which time flows. In the green regions outside the holes, time flows at its normal rate. In the yellow regions, it is slowed by 20 or 30 percent. In the red regions, time is hugely slowed. Far from the holes, the blue and purple bands depict outgoing gravitational waves, produced by the black holes' orbital movement and collision.

◆ Unités usuelles inadaptées à cette échelle

◆ **Energie** : electron-volt (eV)

- $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V

◆ **Impulsion** : eV/c

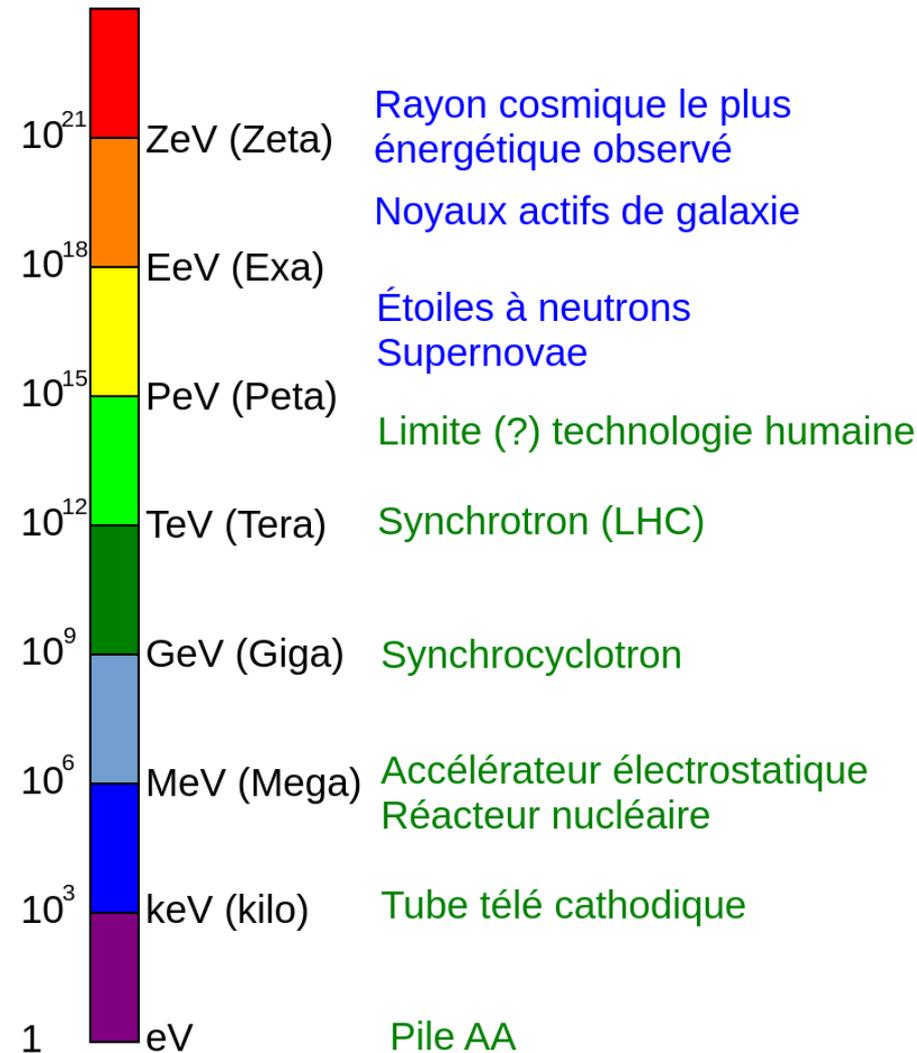
◆ **Masse** : eV/c²

- $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

◆ Habituellement on écrit que la vitesse de la lumière $c = 1$

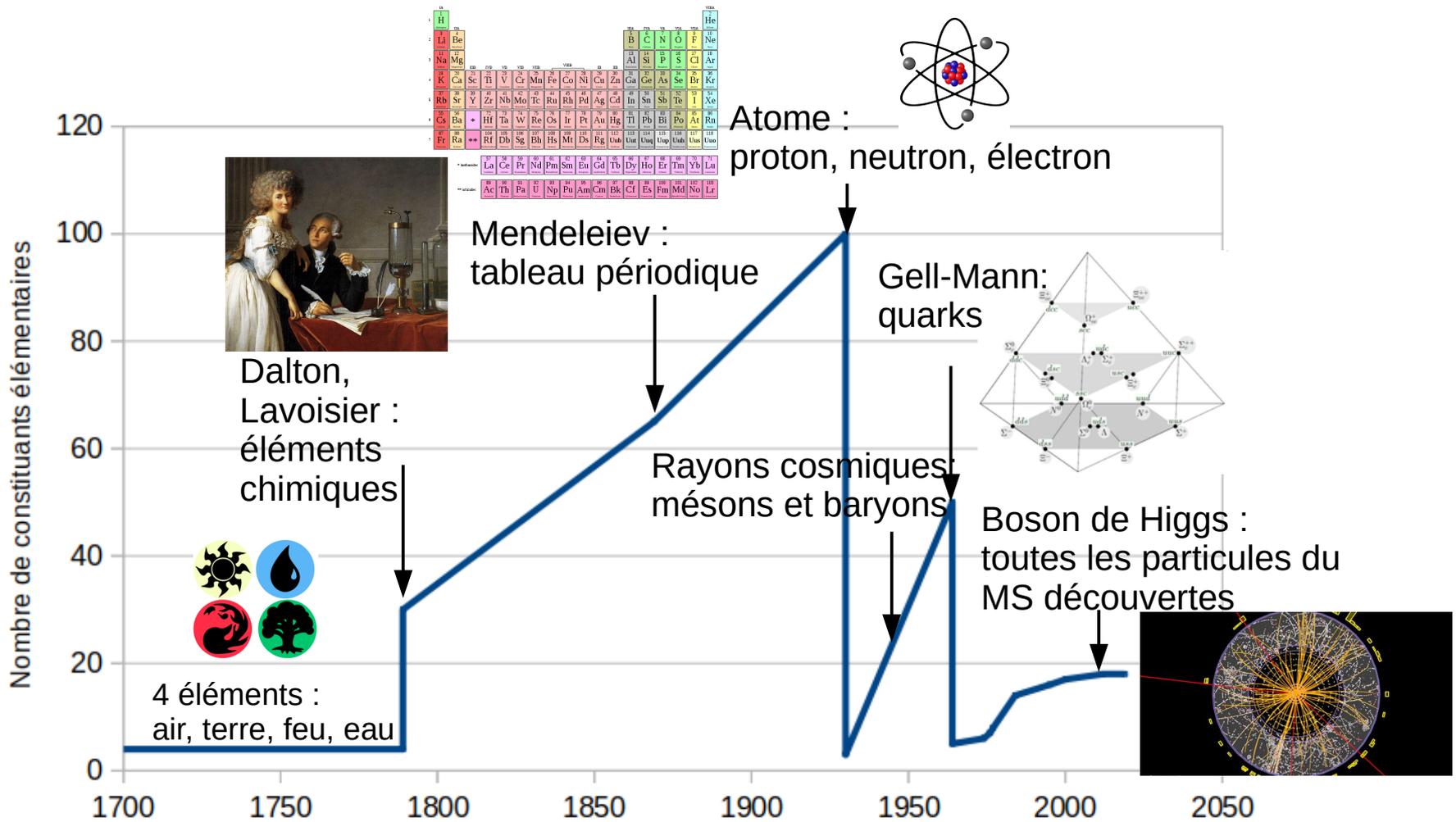
⇒ impulsions et masses en eV

◆ En physique des hautes énergies, on a souvent $pc \gg mc^2$, on confond alors **pc** et **E**. Ainsi, quand on parle “d’électrons de 50 GeV” ou de “protons de 3.5 TeV”, on ne précise pas s’il s’agit de leur énergie ou de leur quantité de mouvement



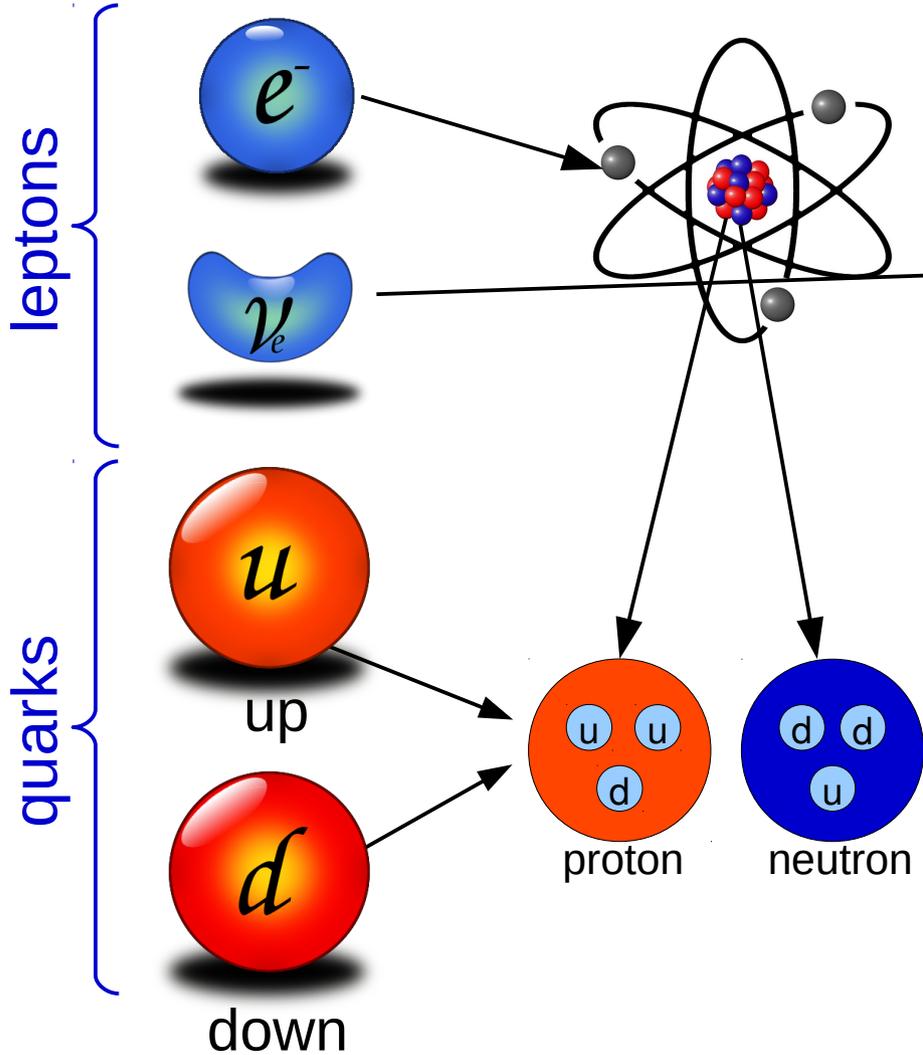
De quoi est fait l'univers ?

- ◆ À travers l'histoire, recherche d'un nombre minimal de constituants élémentaires de la matière

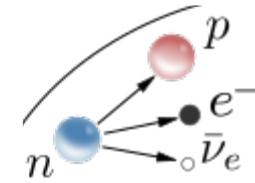


Les particules de matière (2)

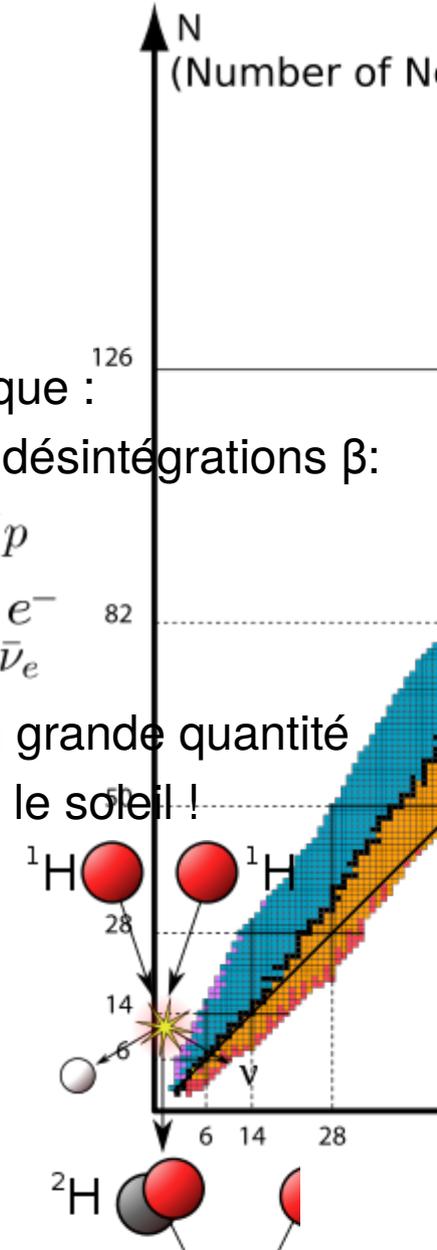
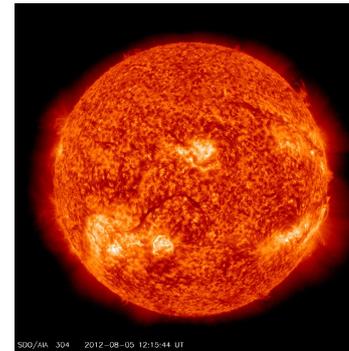
◆ La matière ordinaire :



neutrino électronique :
- produit dans les désintégrations β :



- aussi produit en grande quantité par la fusion dans le soleil !



Les particules de matière (3)

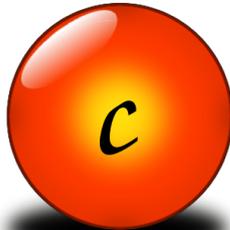


◆ Deuxième famille

leptons



quarks



charm



strange

Le **muon** a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 207 fois plus grande et il se désintègre en $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Il a aussi **son neutrino** associé

quark **charm** (550x masse up)

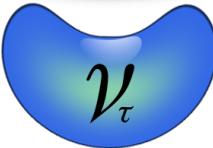
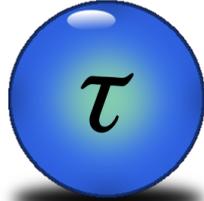
quark **strange** (20x masse down)



Les particules de matière (4)

◆ Troisième famille

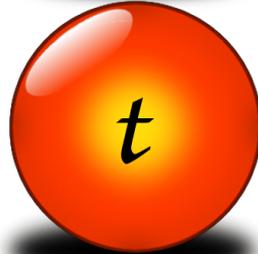
leptons



Le **tau** a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 3500 fois plus grande et il se désintègre en $\tau = 3 \cdot 10^{-13}$ s.

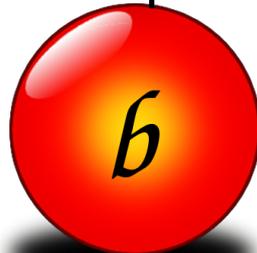
Il a aussi son neutrino associé.

quarks



top

quark **top** (76000x masse up)
particule la plus lourde du MS ~ atome d'or



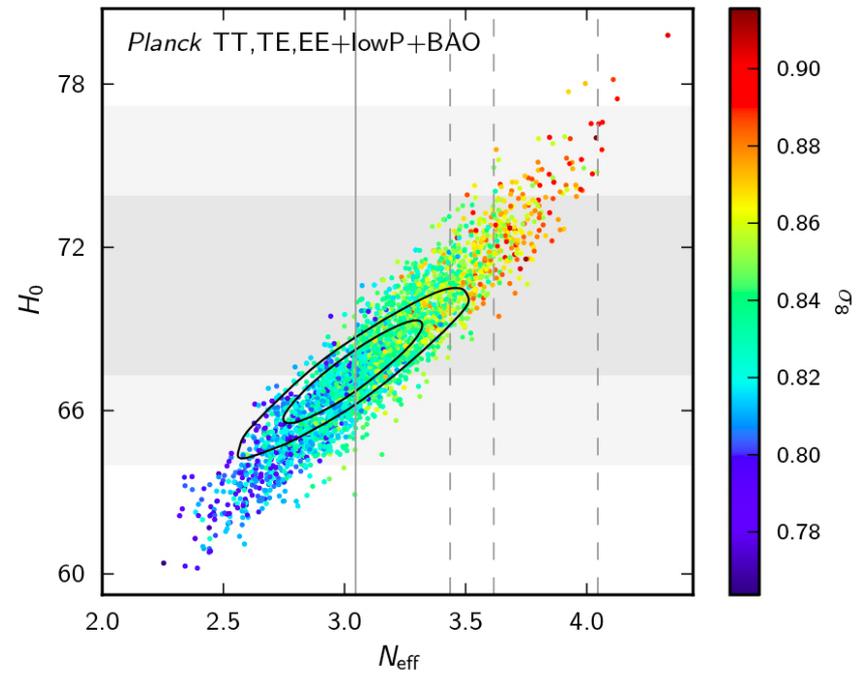
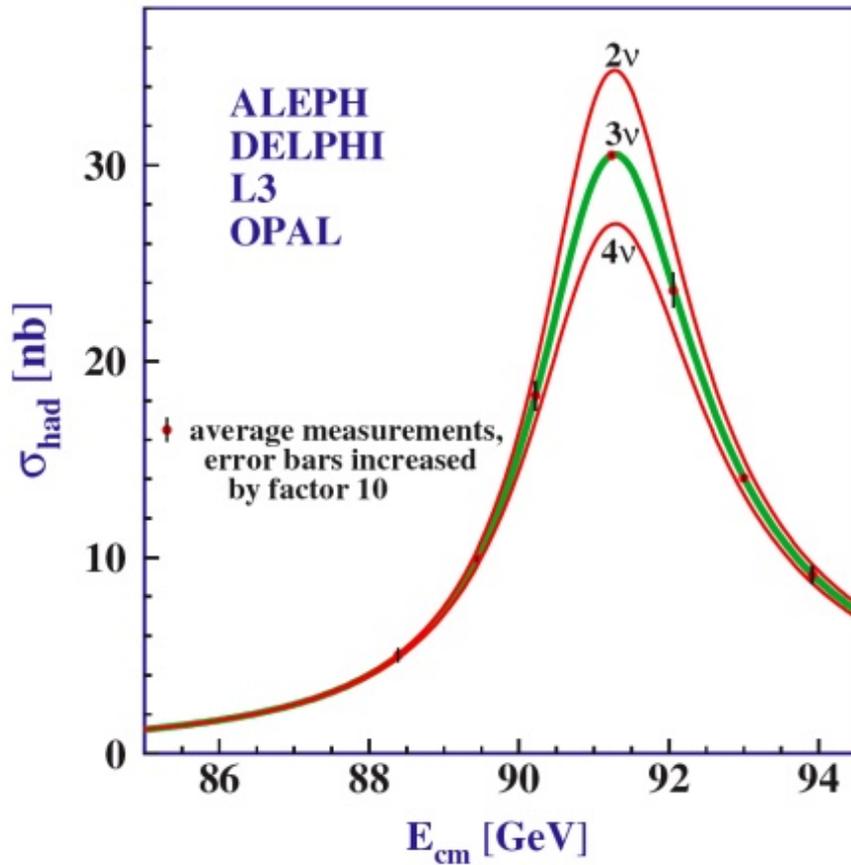
beauty

quark **bottom** ou *beauty* (980x masse down)



Les particules de matière (5)

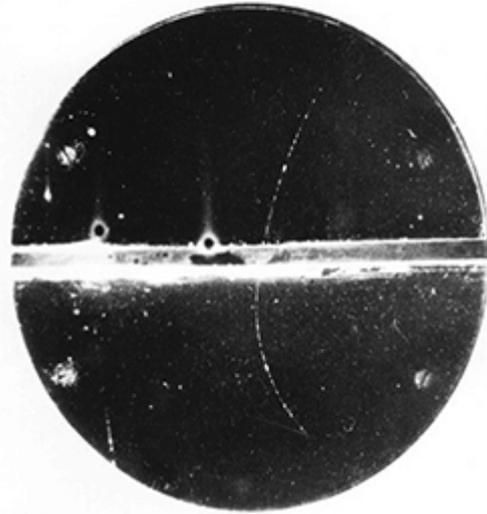
- ◆ Une **quatrième** famille ?
- ◆ A priori **non** : mesures du LEP et cosmologie



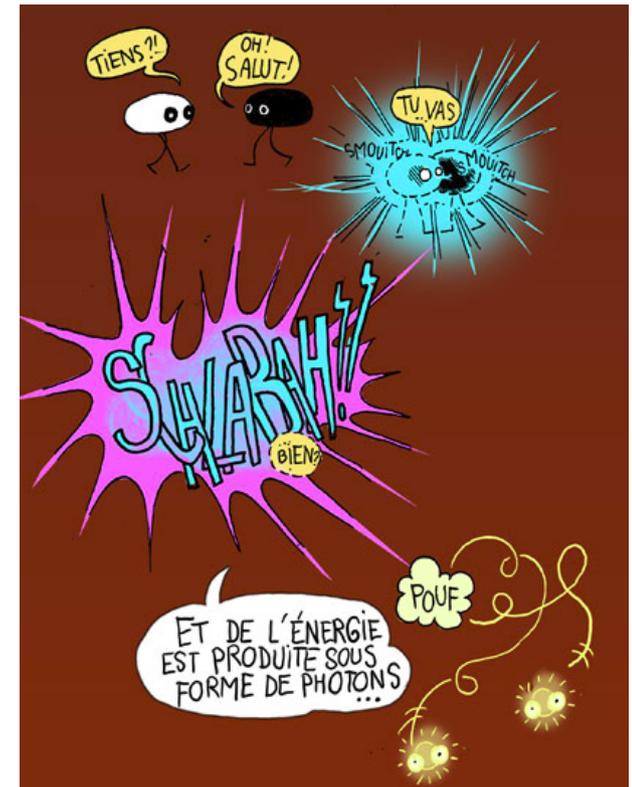
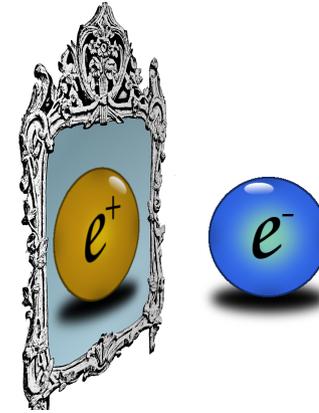


L'antimatière

- ◆ Il existe aussi les **anti-particules** : même particules mais charge inversée
 - exemple : positron e^+ antiparticule de l'électron e^-
- ◆ Prédite en 1923, découverte en 1932



- ◆ La matière et l'anti-matière s'annihilent pour donner des photons
- ◆ Il existe des toutes petites différences entre matière et anti-matière
 - au début de l'univers, $\sim 10^{-6}$ fois plus de matière



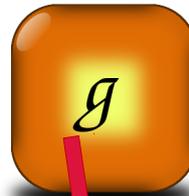
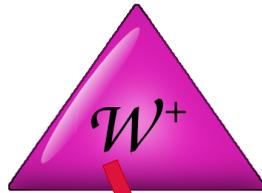
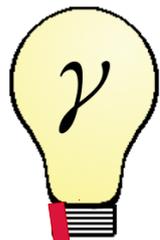


Les particules d'interaction (1)

◆ Appelées **bosons de jauge**



**Satyendra
Nath Bose**



◆ Elles portent les **interactions fondamentales**



électromagnétisme



interaction faible



interaction forte

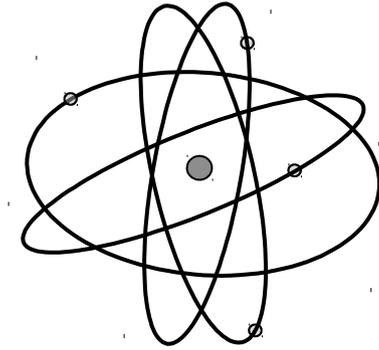


gravité



Interaction électromagnétique

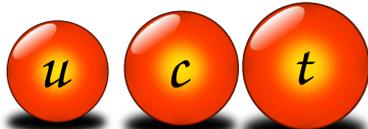
- ◆ Elle réunit dans un même formalisme
 - les phénomènes électriques
 - les phénomènes magnétiques
 - l'optique
- ◆ Elle est responsable de la cohésion de l'atome
- ◆ Au niveau fondamental : échange de **photons** entre particules chargées électriquement
 - portée infinie



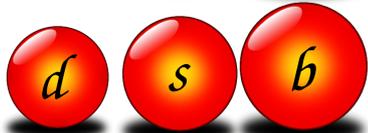
Charge électrique +1



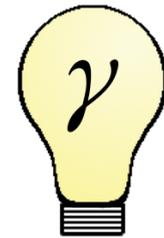
Charge électrique +1/-1



Charge électrique +2/3



Charge électrique -1/3

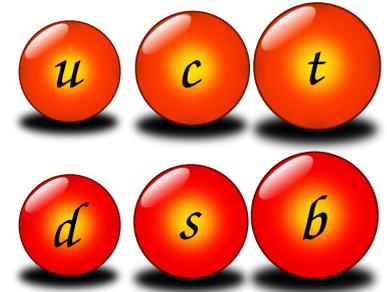
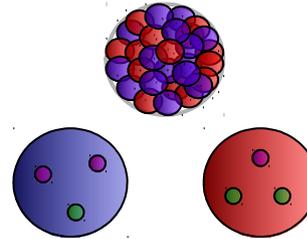


Photon

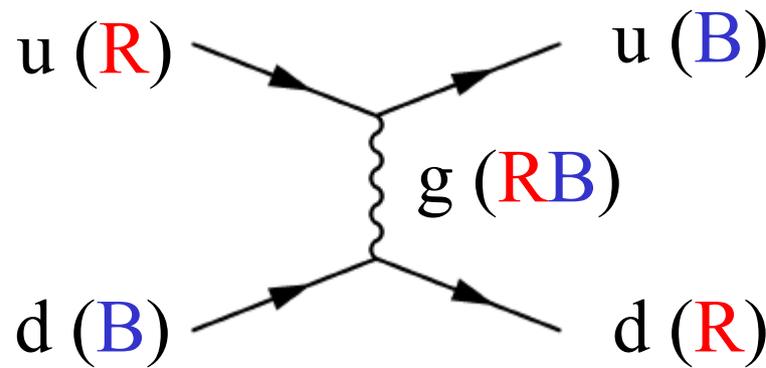


Interaction forte

- ◆ 20 à 60 plus forte que l'électromagnétisme
- ◆ Elle est responsable de la cohésion :
 - des nucléons dans le noyau atomique
 - des quarks dans les protons et neutrons



- ◆ Au niveau fondamental : échange de **gluons** entre particules qui portent une charge de "couleur" (quarks) : **rouge**, **bleu** ou **vert**
 - portée : ~ 1 fm (ie la taille d'un noyau), mais l'intensité augmente avec la distance

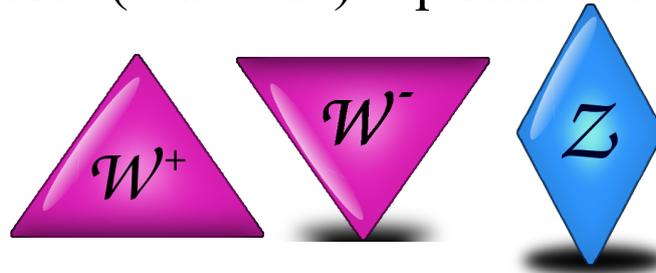


- ◆ Les particules observées sont blanches \Rightarrow les quarks ne s'observent jamais seuls : ils s'associent pour former des hadrons
 - baryons : trois quarks **RVB**
 - mésons : un quark et un anti-quark **Rouge-AntiRouge**, **Vert-AntiVert**, **Bleu-AntiBleu**

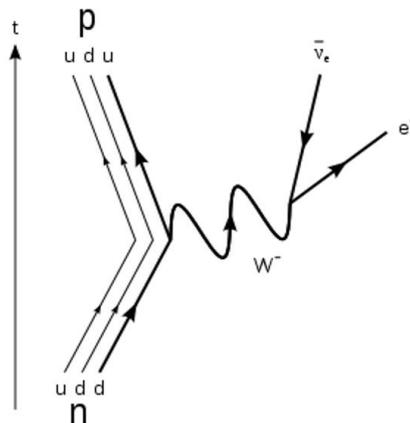
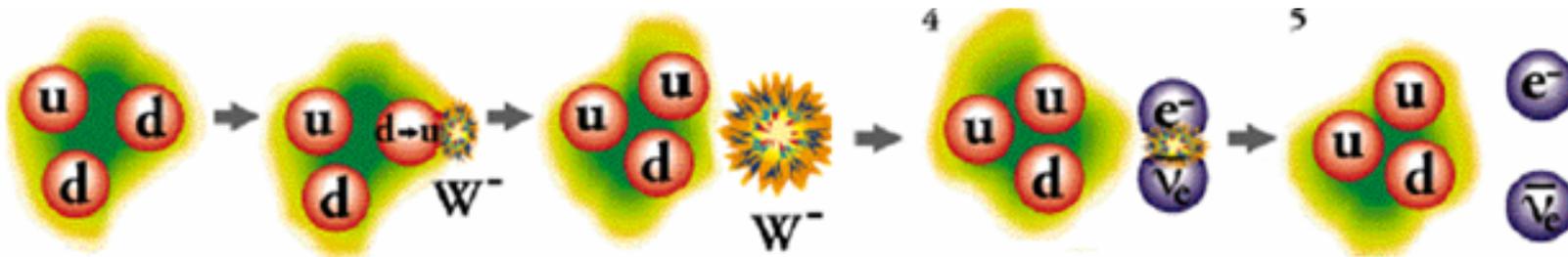


Interaction faible

- ◆ 10^{-7} à 0.8 plus faible que l'électromagnétisme
- ◆ Responsable des phénomènes nucléaires (fission, fusion)
- ◆ Au niveau fondamental : échange de bosons W^+ , W^- ou Z entre particules qui possèdent une charge faible ("saveur") : quarks et leptons
 - portée : $\sim 10^{-4}$ fm



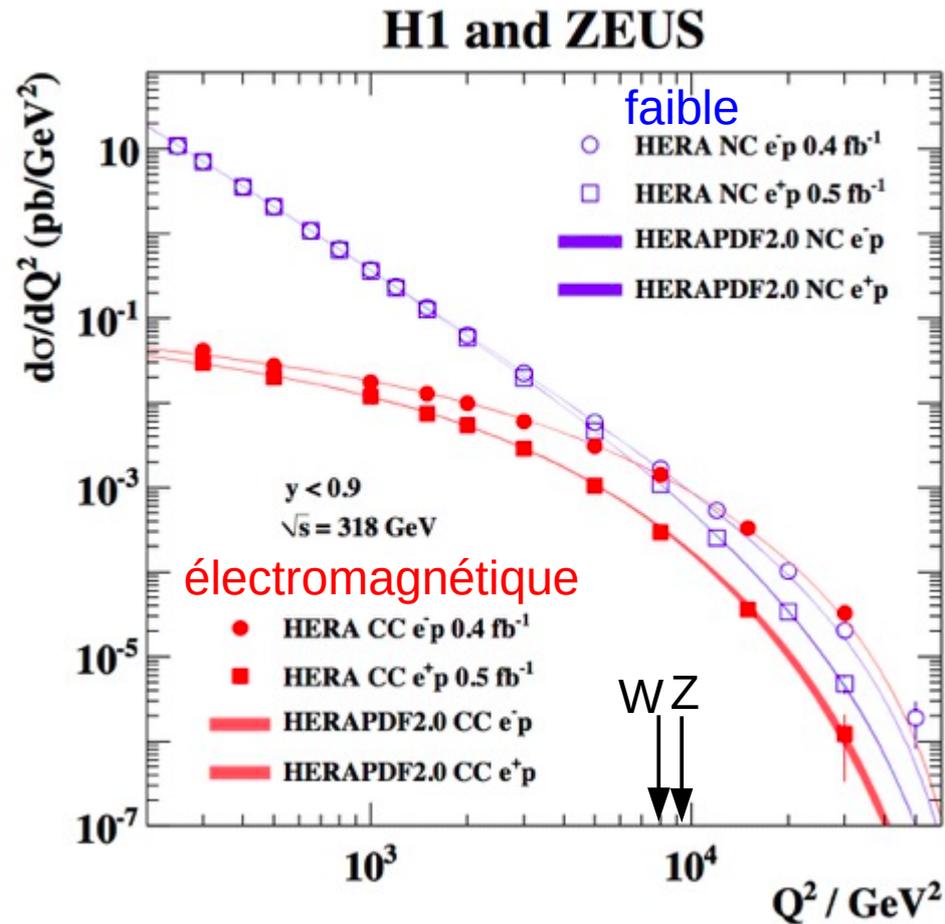
- ◆ Exemple : désintégration du neutron (demie-vie : 20 min)





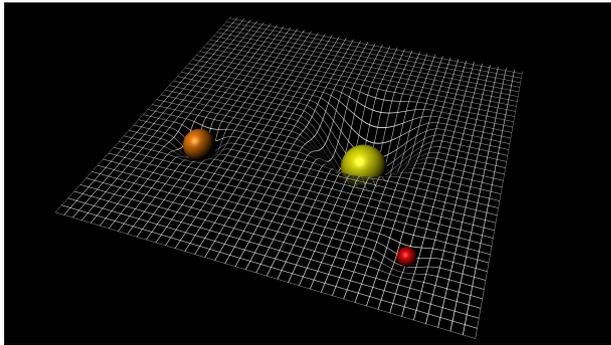
Interaction électrofaible

- ◆ À une certaine énergie il devient impossible de différencier les interactions électromagnétique et faible : on parle d'interaction “électrofaible”
- ◆ Expérimentalement on ne peut plus différencier un photon et un boson Z

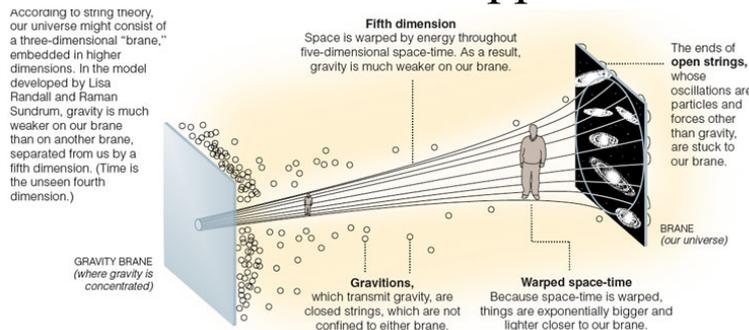


- ◆ Vrai jusqu'à $\sim 10^{-10}$ s après le Big-Bang

- ◆ Régit la structure de l'univers et la chute des pommes
- ◆ Effects **négligeables** à l'échelle de la physique des particules
 - 10^{-41} fois plus faible que l'interaction électromagnétique
- ◆ **Ne peut pas être décrite** par le Modèle Standard (théorie quantique)
 - décrite par la relativité générale : déformation de l'espace-temps par les masses

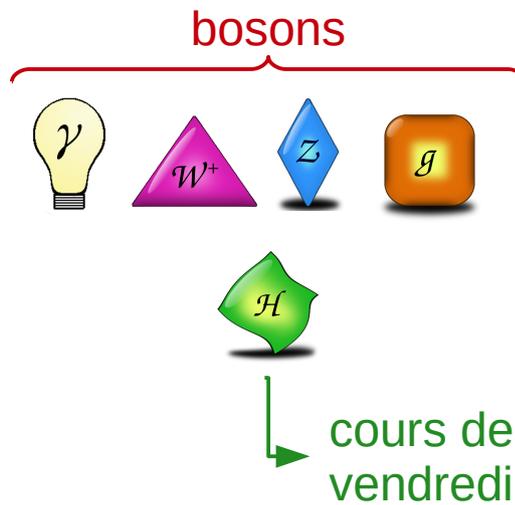
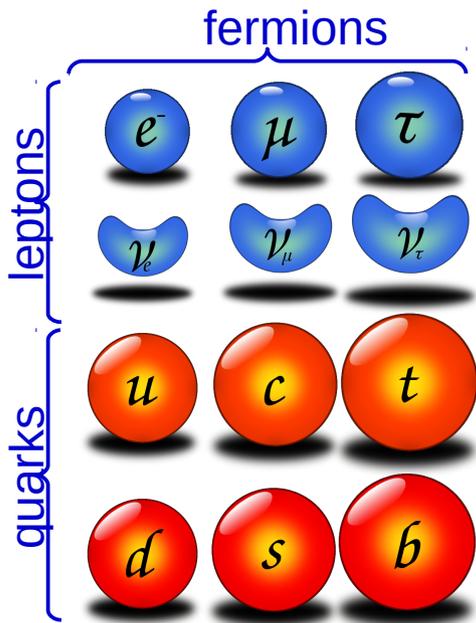


- ◆ Il existe des théories au-delà du Modèle Standard qui prévoient l'existence d'un boson qui transmet la gravité : le graviton
 - nécessite souvent des dimensions supplémentaires d'espace-temps...



Résumé : le Modèle Standard (1)

- ◆ < 20 particules pour décrire la matière et ses interactions



- ◆ Toutes ces interactions sont décrites dans le **Modèle Standard**

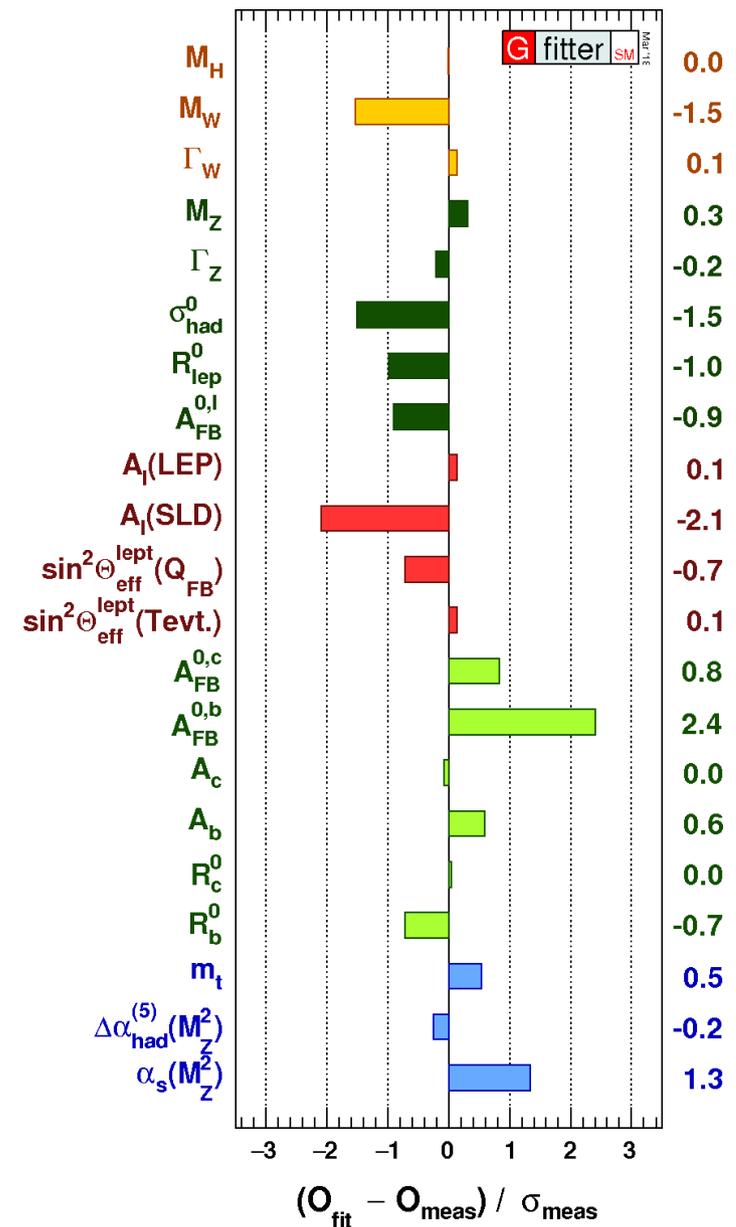
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & \sum_{\ell=e,\mu,\tau} i\bar{\psi}_\ell \gamma^\mu \partial_\mu \psi_\ell + \sum_{\ell'=\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} i\bar{\psi}_{\ell'} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{\ell'} + \sum_{q=u,c,t} i\bar{\psi}_q \gamma^\mu \partial_\mu \psi_q + \sum_{q'=d,s,b} i\bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{q'} \\ & - \frac{1}{2} (\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+) (\partial^\mu W^{-\nu} - \partial^\nu W^{-\mu}) - \frac{1}{4} (\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu) (\partial^\mu Z^\nu - \partial^\nu Z^\mu) \\ & - \frac{1}{4} (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) (\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu) - \frac{1}{4} \sum_{a=1}^8 (\partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a) (\partial^\mu G^{a\nu} - \partial^\nu G^{a\mu}) + \frac{1}{2} \partial_\mu h \partial^\mu h \\ & - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_\ell v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_\ell \psi_\ell - \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_q \psi_q - \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'} v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'} \psi_{q'} \\ & - \left(\frac{gv}{2}\right)^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{2} \left(\frac{gv}{2 \cos \theta_W}\right)^2 Z_\mu Z^\mu - \frac{1}{2} (-2m^2)^2 h^2 \\ & + \frac{g}{4 \cos \theta_W} \left(\sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu (4 \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_\ell Z_\mu + \sum_{\ell'=\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \bar{\psi}_{\ell'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell'} Z_\mu \right) \\ & + \frac{g}{4 \cos \theta_W} \left(\sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3} \sin^2 \theta_W - \gamma^5) \psi_q Z_\mu + \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu (\frac{4}{3} \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_{q'} Z_\mu \right) \\ & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_\ell W_\mu^+ + \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_\ell W_\mu^- \\ & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{q=u,c,t} V_{qq'} \bar{\psi}_q \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{q'} W_\mu^+ + V_{qq'}^* \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_q W_\mu^- \\ & + g_{em} \left(- \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \psi_\ell \gamma^\mu \psi_\ell A_\mu + \frac{2}{3} \sum_{q=u,c,t} \psi_q \gamma^\mu \psi_q A_\mu - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} A_\mu \right) \\ & + g_s \left(\sum_{\lambda,q=u,c,t} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_q \gamma^\mu \psi_q G_\mu^a T_{a_j} + \sum_{\lambda,q'=d,s,b} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} G_\mu^a T_{a_j} \right) \\ & - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_\ell}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_\ell \psi_\ell h - \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_q \psi_q h - \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'} \psi_{q'} h \\ & + i g_{em} [\partial_\mu A_\nu W^{-\mu} W^{+\nu} + \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\nu} A^\mu + \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} A^\mu - \partial_\mu A_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} \\ & \quad - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} A^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\mu} A^\nu] \\ & + i g \cos \theta_W [\partial_\mu Z_\nu W^{-\mu} W^{+\nu} + \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\nu} Z^\mu + \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} Z^\mu - \partial_\mu Z_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} \\ & \quad - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} Z^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\mu} Z^\nu] + \frac{g^2 v}{2} W_\mu^+ W^{-\mu} h + \frac{g^2 v}{4 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu h - \lambda v h^3 \\ & + g_{em}^2 [W_\nu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\mu - W_\mu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\nu] + g^2 \cos^2 \theta_W [W_\nu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\mu - W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\nu] \\ & + g^2 \cos \theta_W \sin \theta_W [2W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\nu} A_\nu Z^\mu - W_\mu^+ W^{-\nu} A^\mu Z_\nu] \\ & + \frac{g^2}{2} [W_\mu^+ W^{-\mu} W_\nu^+ W^{+\nu} - W_\mu^+ W^{-\mu} W_\nu^- W^{-\nu}] + \frac{g^2}{4} W_\mu^+ W^{-\mu} h^2 + \frac{g^2}{8 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu h^2 - \frac{\lambda}{4} h^4 \\ & - \frac{g_s}{2} \sum_{a,b,c} f^{abc} (\partial_\mu G_\mu^a - \partial_\nu G_\mu^a) G^{\mu b} G^{\nu c} - \frac{g_s^2}{4} \sum_{a,b,c,d,e,f} f^{abc} f^{ade} G_\mu^b G_\nu^c G^{\mu d} G^{\nu e} \end{aligned}$$

avec : $g_{em} = g \sin \theta_W$, $v^2 = \frac{-m^2}{\lambda}$, $m^2 < 0$, $\lambda > 0$

$$m_f = \frac{\lambda_f v}{\sqrt{2}}, m_w = \frac{gv}{2}, m_z = \frac{gv}{2 \cos \theta_W}, m_h = \sqrt{-2m^2}$$

Résumé : le Modèle Standard (2)

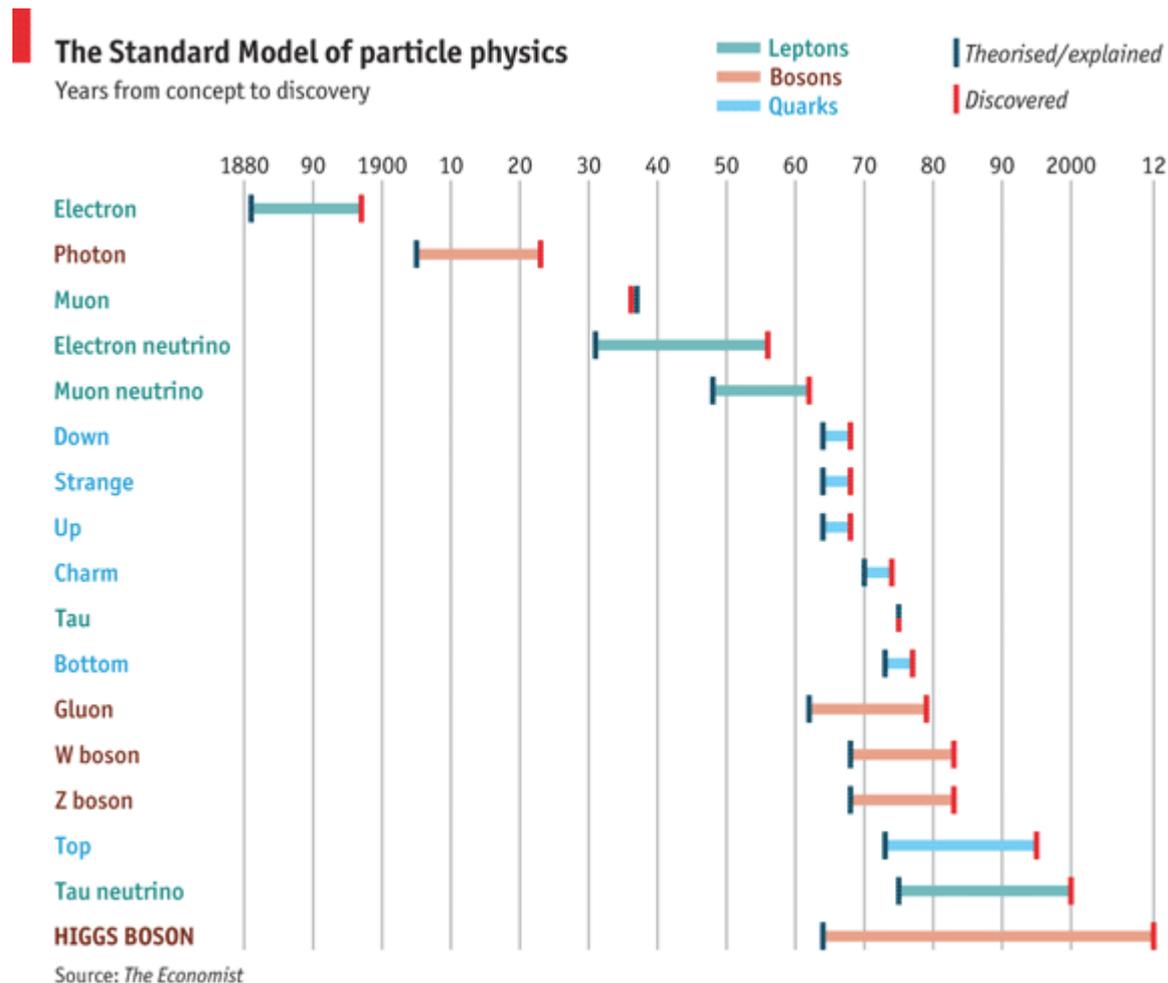
- ◆ Le Modèle Standard est vérifié parfaitement au niveau expérimental !
- ◆ Corollaire : toute nouvelle théorie doit être au moins aussi performante





Historique de la découverte des particules

- ◆ Souvent plusieurs dizaines d'années entre prédiction/découverte
- ◆ NB : jusqu'ici presque toutes les particules ont été prédites par la théorie avant d'être découvertes





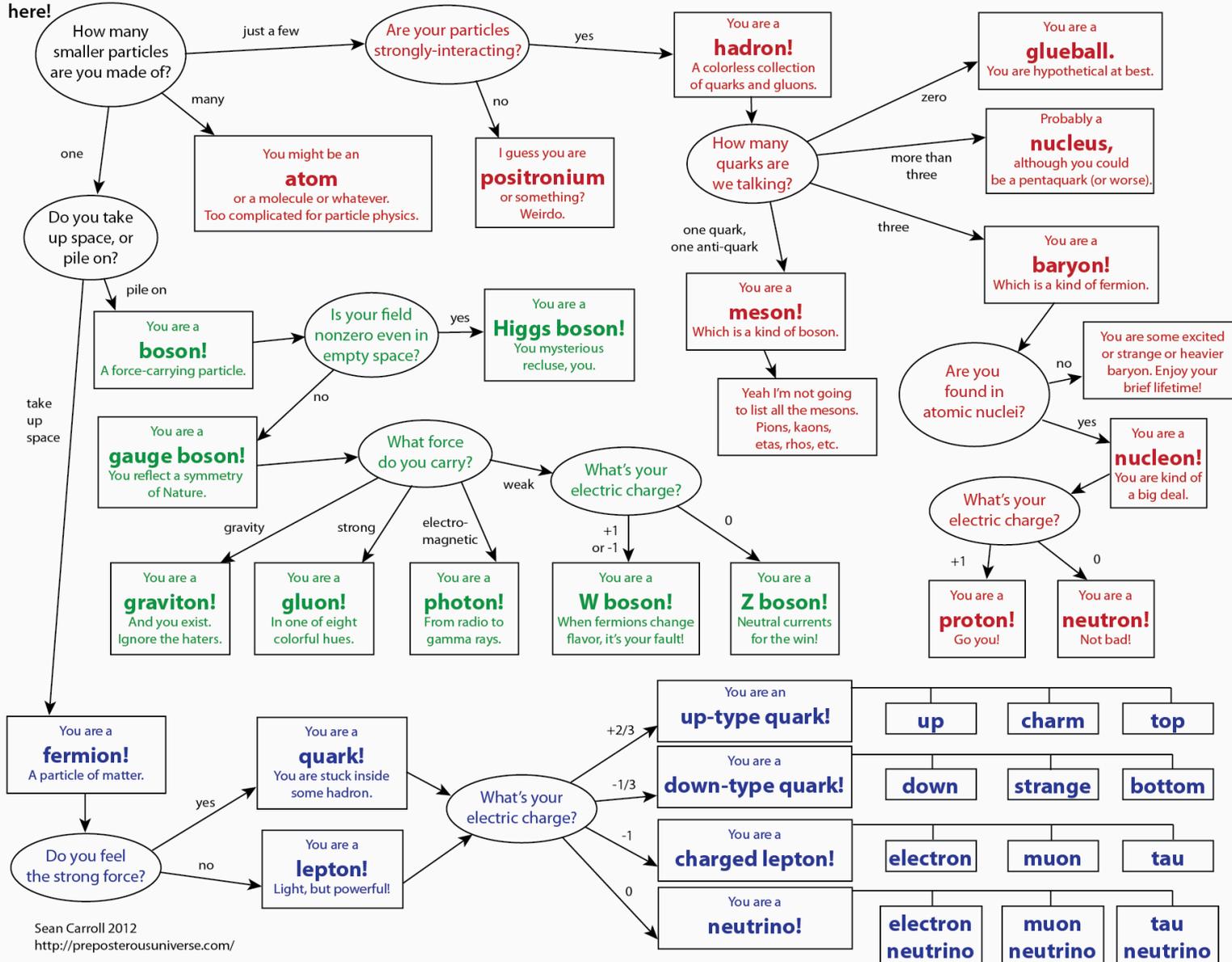
Quelle particule êtes-vous ?

What Particle Are You?

(Standard Model particles only! Dark matter and other exotica not welcome.)

Color code:
elementary fermions
elementary bosons
composite particles

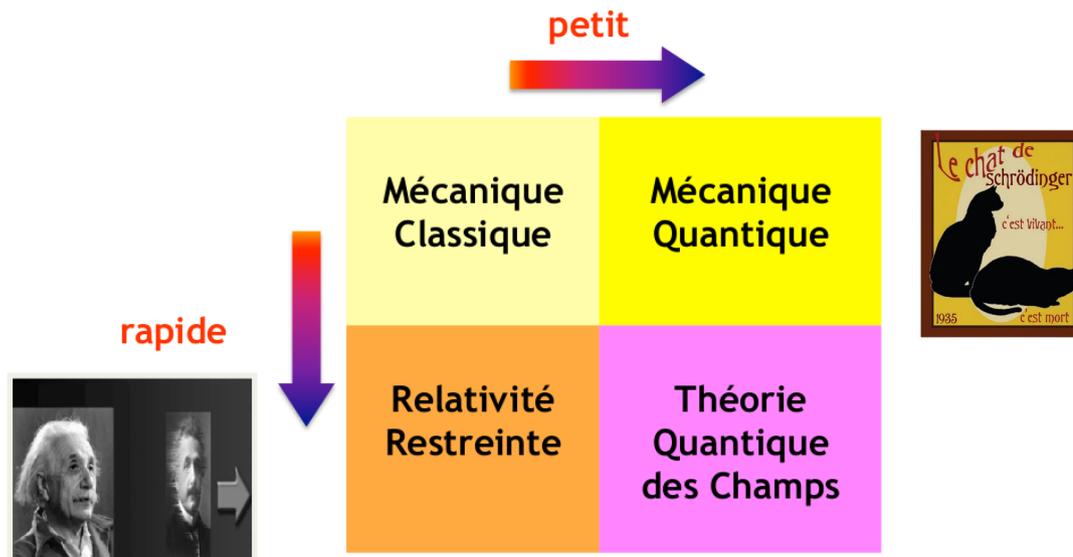
Start here!



Sean Carroll 2012
<http://preposterousuniverse.com/>

Le Modèle Standard des particules

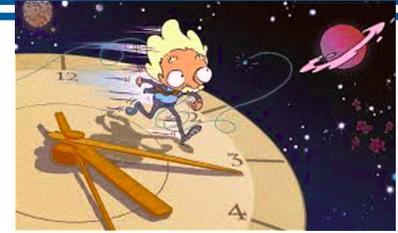
- ◆ Théorie physique qui décrit les **particules élémentaires** (les plus petits constituants de l'univers) et leurs **interactions**
 - constituants *élémentaires* : “particules” sans structure interne
 - *interactions* : les forces qui s'exercent entre ces composants élémentaires
- ◆ À cette échelle la physique des quantique et relativiste!



- ◆ Fin du XIXème siècle : la physique est “belle et claire”, il y a juste deux petits nuages :
 - le rayonnement du corps noir → donnera naissance à la mécanique quantique
 - l’expérience de Michelson et Morley de la vitesse de la lumière → donnera naissance à la relativité restreinte



Quelques mots sur la relativité restreinte (1)



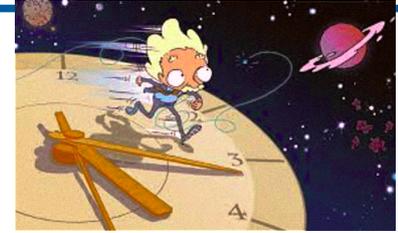
- ◆ Deux postulats, valable pour les référentiels galiléens (en mouvement de translation rectiligne uniforme) :
 - les lois de la physique ont la même forme dans tous les référentiels galiléens
 - la vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels galiléens

- ◆ Conséquence 1 : Contraction des longueurs et dilatation du temps
 - l'écoulement du temps dépend du référentiel
 - temps propre (t_0): temps mesuré dans le référentiel lié à l'objet considéré
 - temps mesuré par un observateur (fixe) pour qui l'objet se déplace à une vitesse v : $t = \gamma t_0$ où $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2} > 1$

 - Exemple : une particule avec un temps de vie de $2.2 \mu\text{s}$ parcourra avant de se désintégrer :
 - 660 m à une vitesse non-relativiste
 - 6.6 km à une vitesse de $99\%*c$ (impulsion de 1 GeV)
 - 66 km à une vitesse de $99.99\%*c$ (impulsion de 10 GeV)

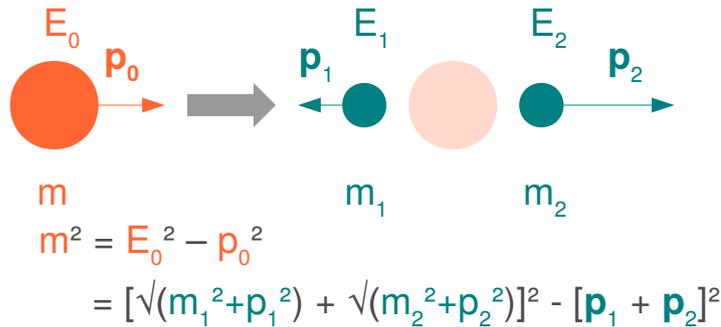


Quelques mots sur la relativité restreinte (2)



◆ Conséquence 2 : Équivalence masse-énergie

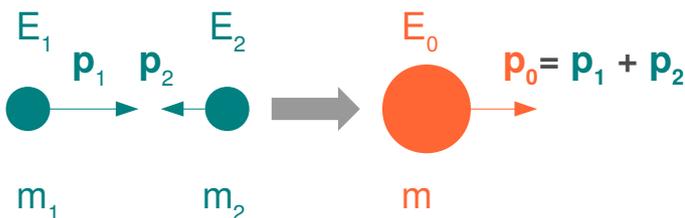
- La masse est une forme d'énergie
 - Si un corps perd une quantité d'énergie E , sa masse diminue de $\Delta m = E/c^2$
 - $E_0 = mc^2$: énergie au repos (dans le référentiel où le corps est immobile)
- Énergie totale d'un système : $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ (p : quantité de mouvement)
- Transformation de la masse en énergie cinétique :



exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.
En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

- Transformation de l'énergie cinétique en masse :



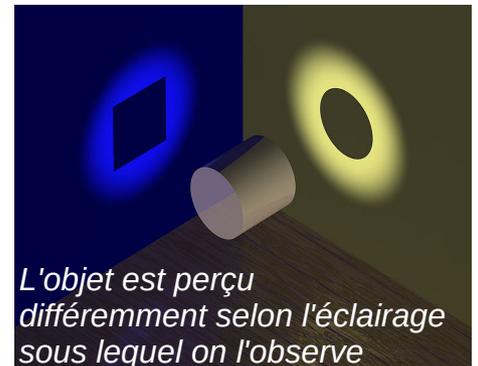
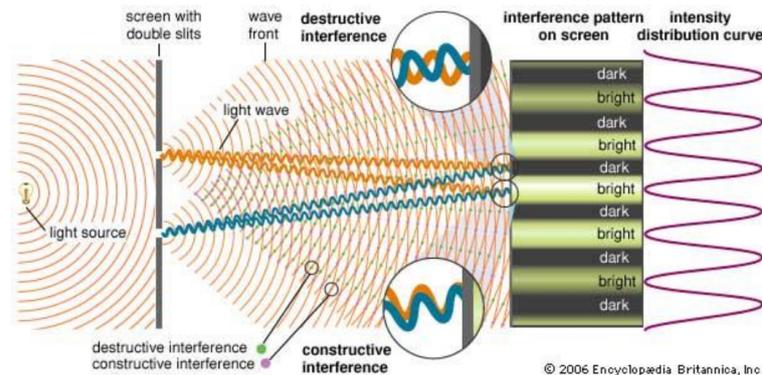
$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents !

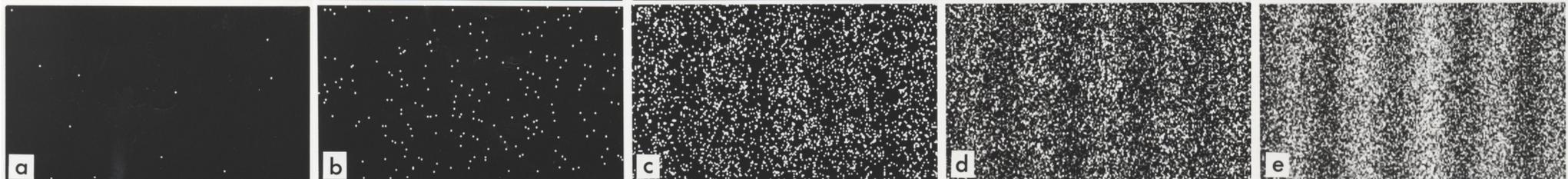


Quelques mots sur la mécanique quantique (1)

- ◆ Physique permettant de décrire la physique à l'échelle (sub)-atomique
 - valeurs discrètes : l'énergie ne peut s'échanger que par multiples de quantités proportionnelles à la fréquence du rayonnement : $E = h\nu$
- ◆ Dualité onde-corpuscule
 - les ondes présentent un aspect corpusculaire et vice-versa
 - conséquence : échanges d'énergie entre matière et ondes lumineuses sont le fait d'un corpuscule de lumière (photon) porteur de l'énergie des quanta de Planck
 - fentes de Young :
 - figure d'interférence avec de la lumière:



- apparaît même quand on envoie des électrons un par un !





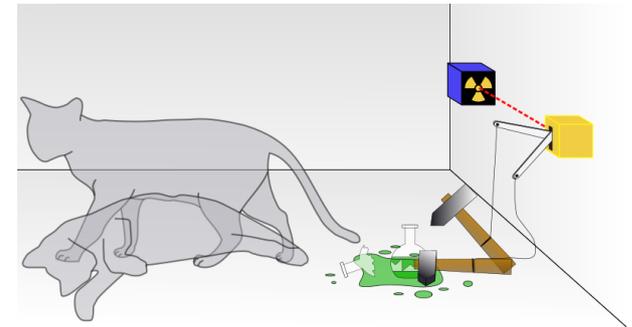
Quelques mots sur la mécanique quantique (2)

◆ Quantification:

| | classique | quantique |
|-------------------|--------------------------------|---|
| état d'un système | positions et impulsions | probabilités |
| évolution | une trajectoire (déterministe) | plusieurs états finaux, plusieurs chemins |

◆ Conséquences : utilisation de **probabilités**

- d'une désintégration : son moment, ses produits
- d'une production
- exemple : le chat de Schrödinger



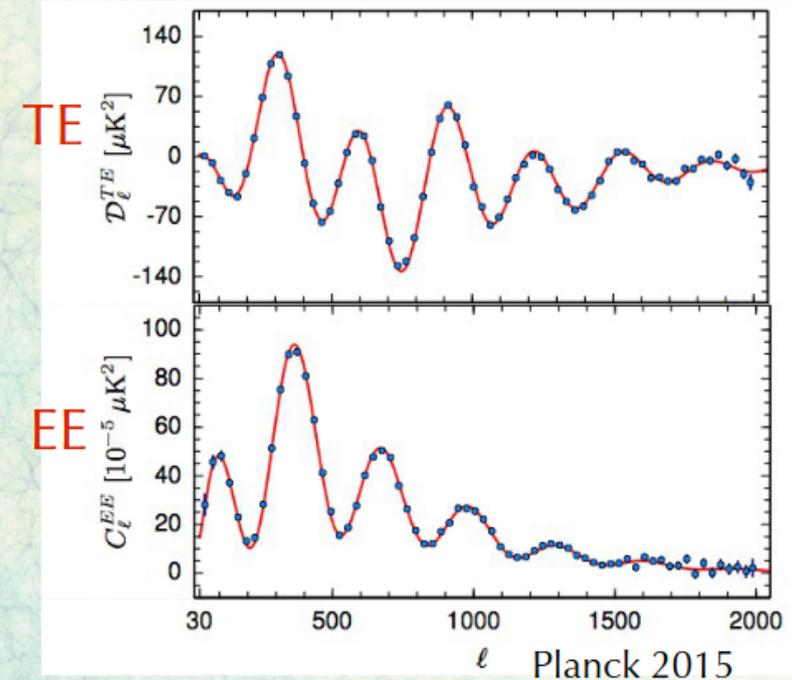
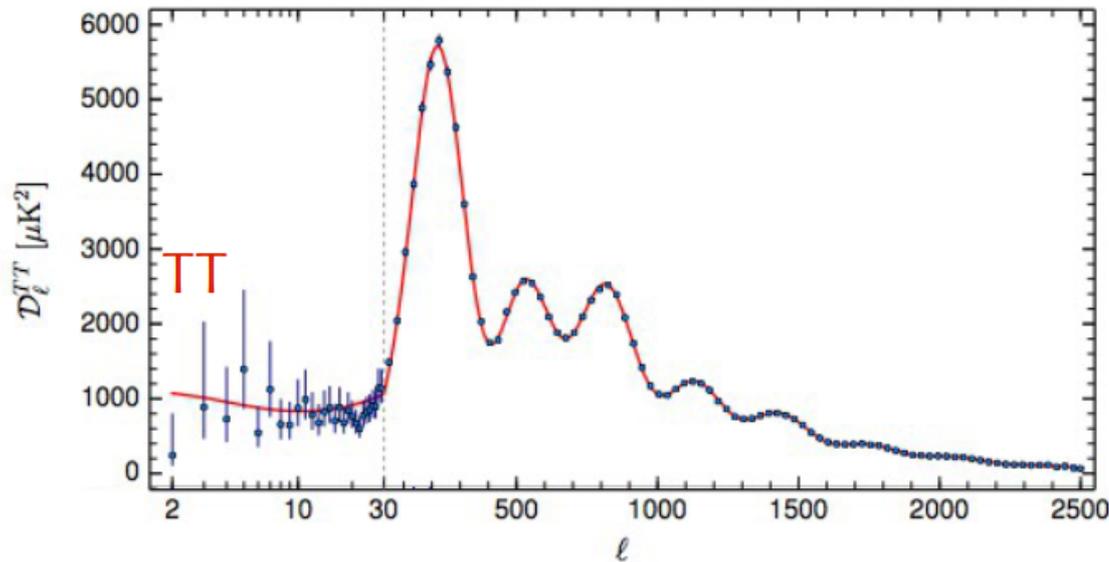
◆ Relations de **Heisenberg**

- si la précision sur la position d'une particule est Δx , son impulsion a une précision Δp telle que $\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$
- si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est Δt , son énergie a une précision ΔE telle que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

◆ Conséquence : une énergie ΔE peut être "**empruntée**" au vide pendant un laps de temps Δt suffisamment court

- et comme $E = mc^2$ des particules "virtuelles" peuvent être créées et vivre pendant un laps de temps d'autant plus court que la particule est lourde

CMB Cosmological fit : flat- Λ CDM



| Parameter | [1] <i>Planck</i> TT+lowP |
|-----------------------------|---------------------------|
| $\Omega_b h^2$ | 0.02222 ± 0.00023 |
| $\Omega_c h^2$ | 0.1197 ± 0.0022 |
| $100\theta_{MC}$ | 1.04085 ± 0.00047 |
| τ | 0.078 ± 0.019 |
| $\ln(10^{10} A_s)$ | 3.089 ± 0.036 |
| n_s | 0.9655 ± 0.0062 |
| H_0 | 67.31 ± 0.96 |
| Ω_m | 0.315 ± 0.013 |
| σ_8 | 0.829 ± 0.014 |
| $10^9 A_s e^{-2\tau}$ | 1.880 ± 0.014 |

6-parameter fit

- Baryon density
- Cold Dark Matter density
- Sound horizon
- Reionisation depth
- Amplitude of primordial fluctuation
- Spectral index of primordial fluctuations

Many degeneracies