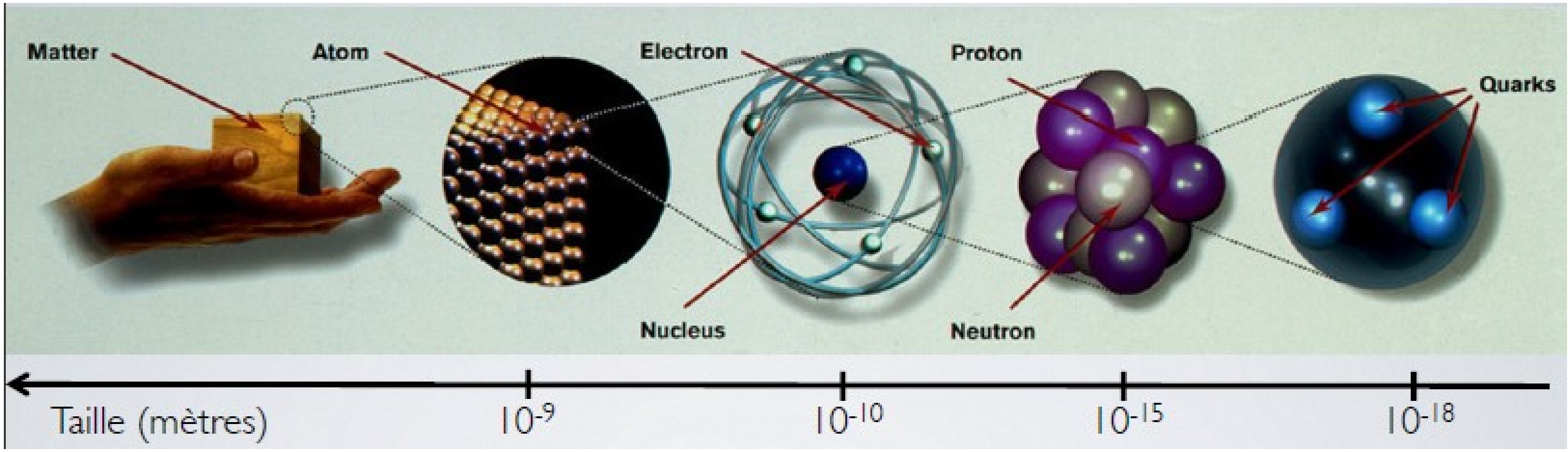
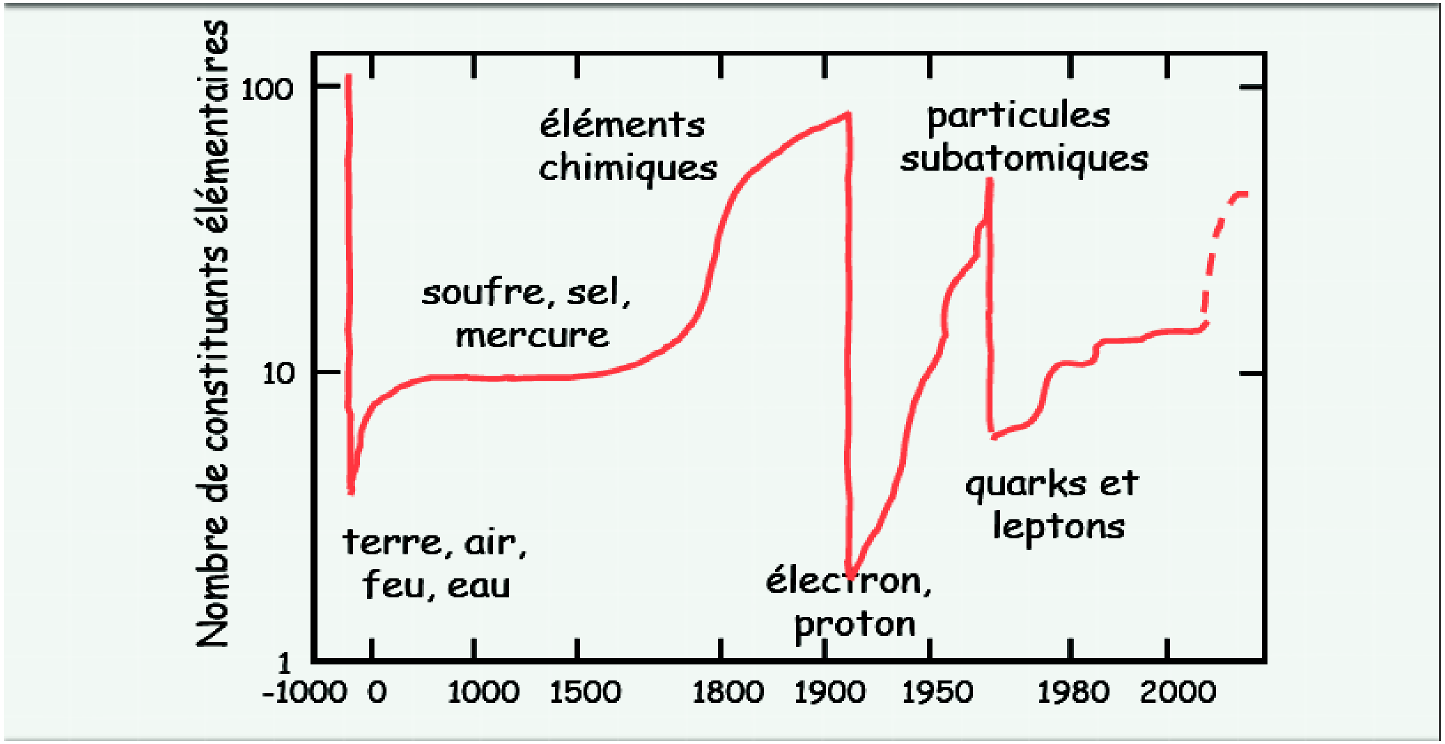
Particules élémentaires

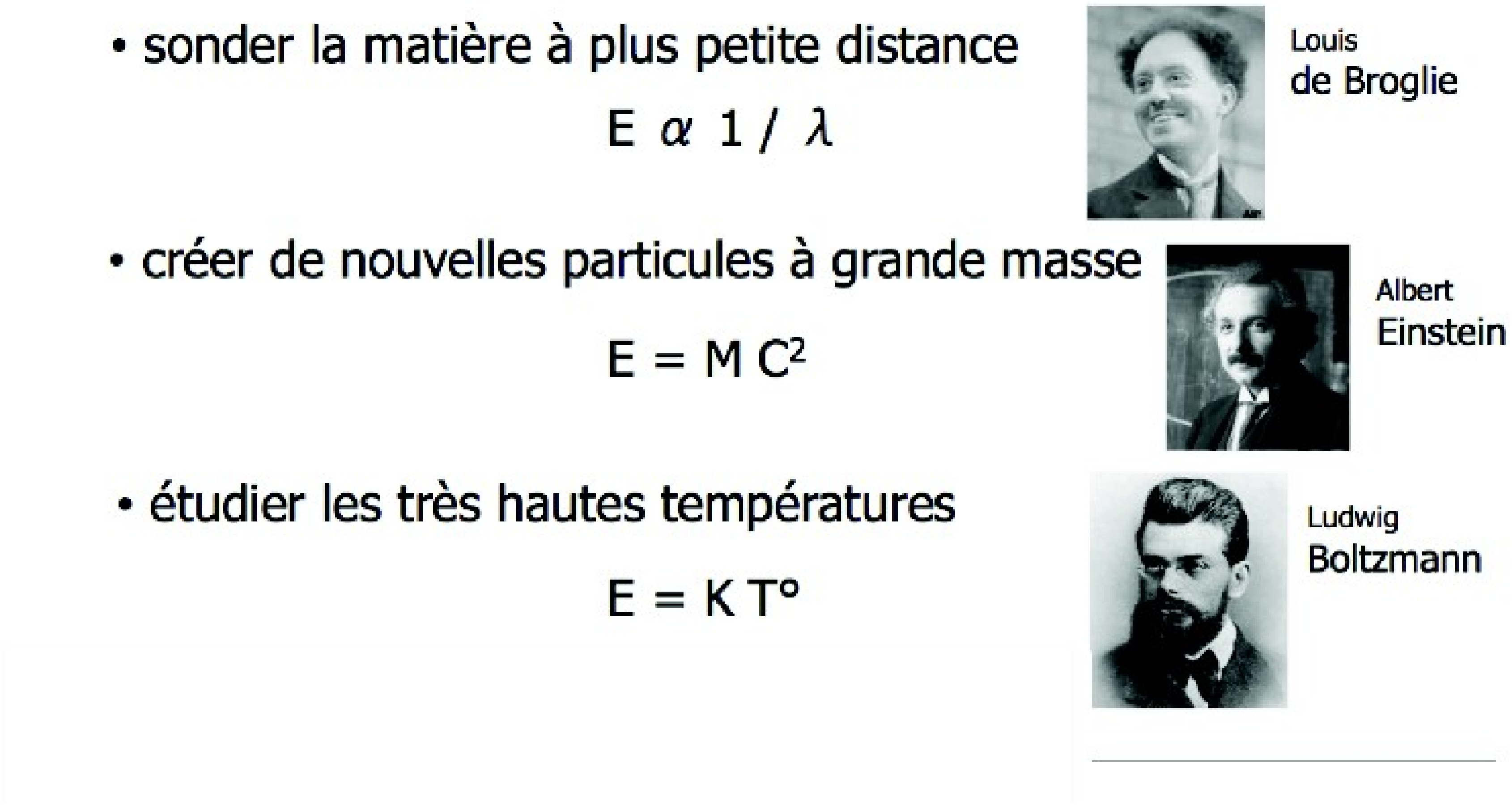


Evolution du nombre de constituants élémentaires dans l'histoire :



Physique des hautes énergies

Ce que permet l'étude aux hautes énergies :



- sonder la matière à plus petite distance

$$E \; \alpha \; 1 / \lambda$$

Louis
de Broglie

- créer de nouvelles particules à grande masse

$$E = M C^2$$

Albert
Einstein

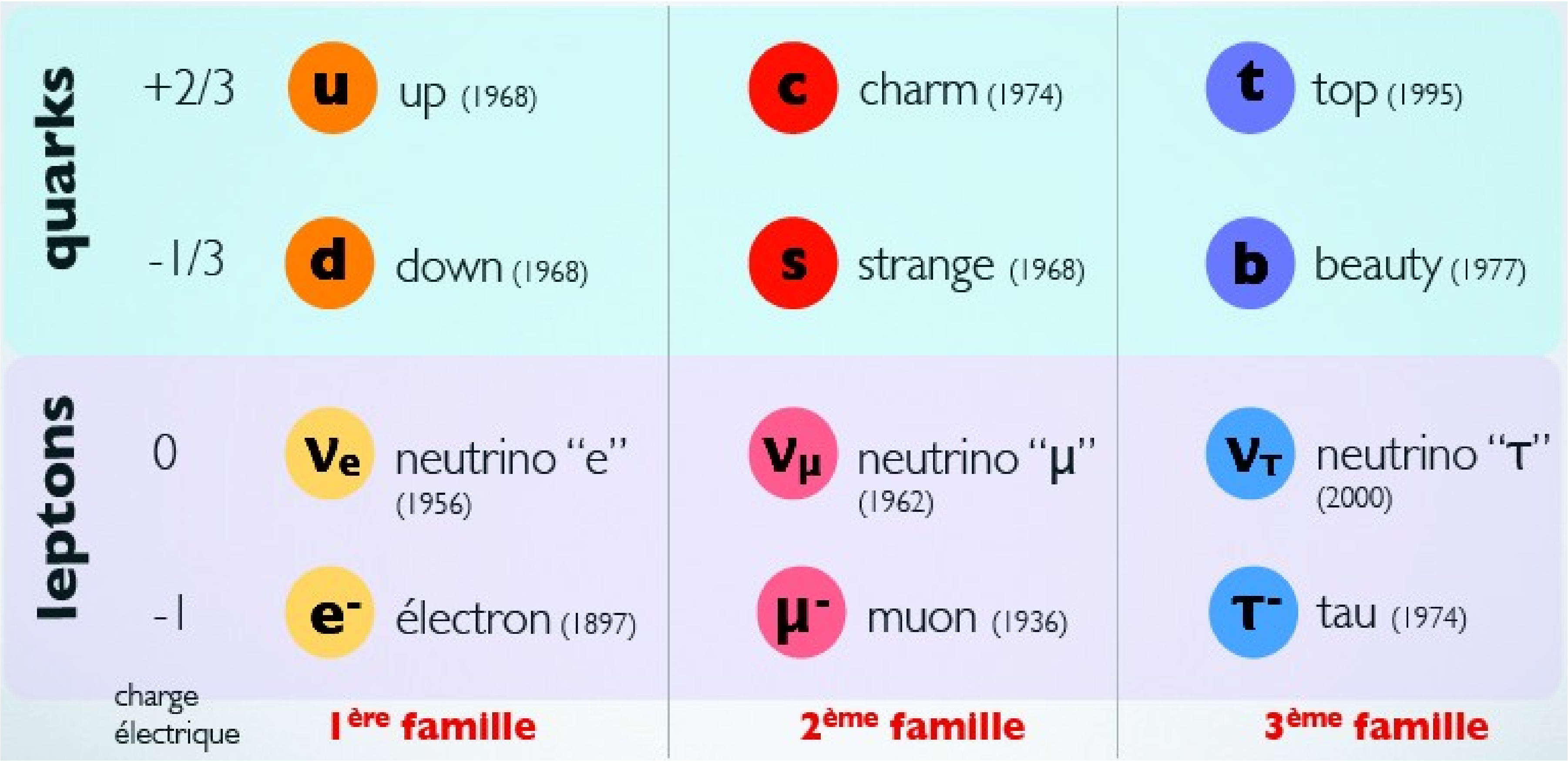
- étudier les très hautes températures

$$E = K T°$$

Ludwig
Boltzmann

Modèle standard

Classification des particules élémentaires :

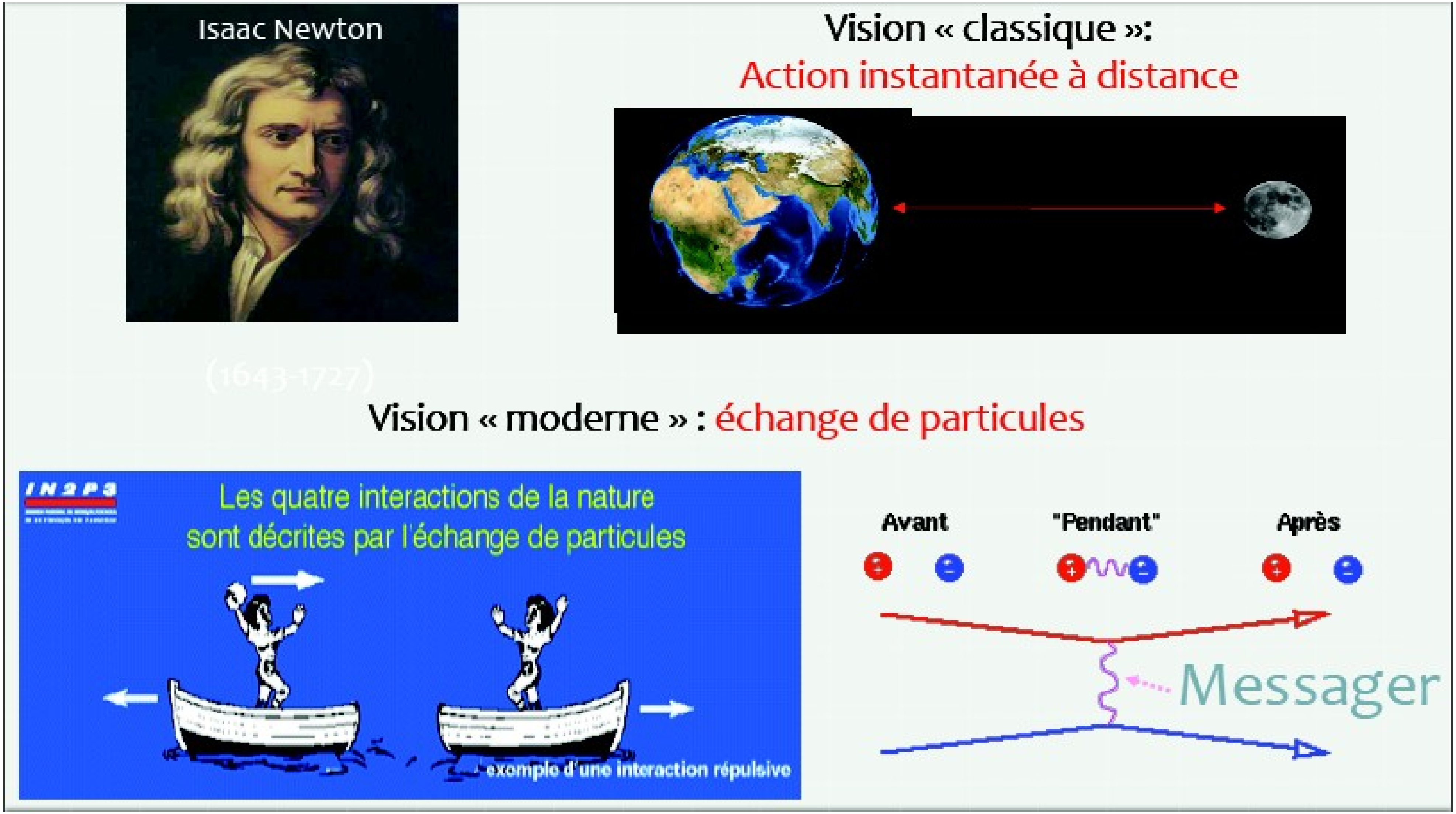


	charge électrique	1ère famille	2ème famille	3ème famille
quarks	+2/3	**u** up (1968)	**c** charm (1974)	**t** top (1995)
	-1/3	**d** down (1968)	**s** strange (1968)	**b** beauty (1977)
leptons	0	ν_e neutrino “e” (1956)	ν_μ neutrino “μ” (1962)	ν_τ neutrino “τ” (2000)
	-1	e^- électron (1897)	μ^- muon (1936)	τ^- tau (1974)

On double le spectre avec les anti-particules

Modèle standard

Mécanisme d'interactions :



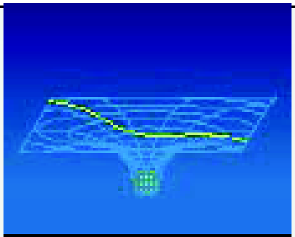
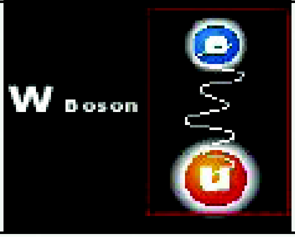
Vision « classique »:
Action instantanée à distance

Vision « moderne » : échange de particules

Les quatre interactions de la nature
sont décrites par l'échange de particules

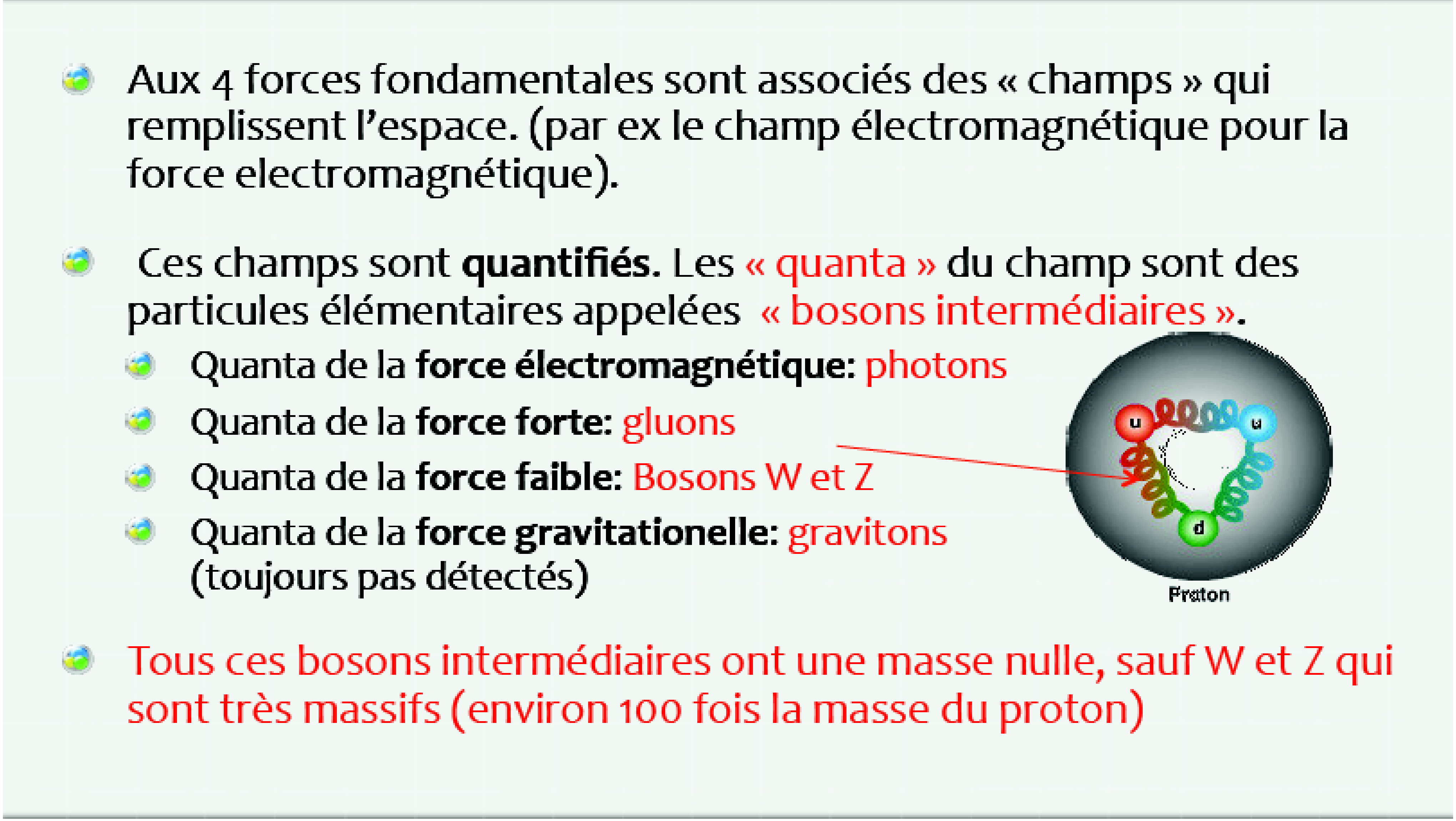
Modèle standard

Classification des interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Range	Charge	Relative intensity
	**Gravitation** Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	mass	10^{-39}
	**Electromagnetique** Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	10^{-2}
	**Forte** Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-15} m	Charge de couleur	1
	**Faible** Radioactivité β, Soleil	leptons et quarks	W^+, W^-, Z° bosons	10^{-18} m	Charge faible	10^{-7}

Modèle standard

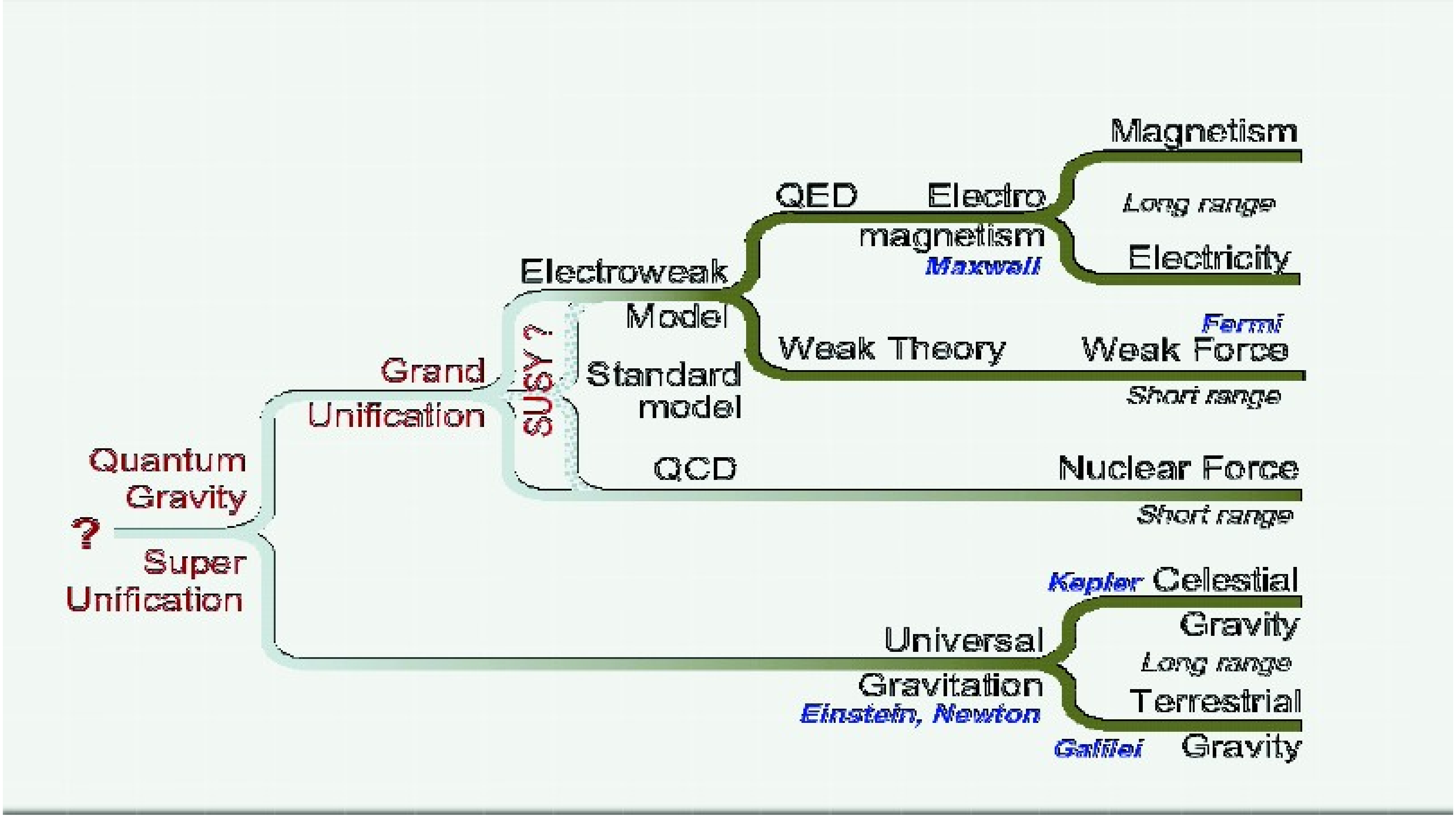
Quanta échangés : les bosons vecteurs



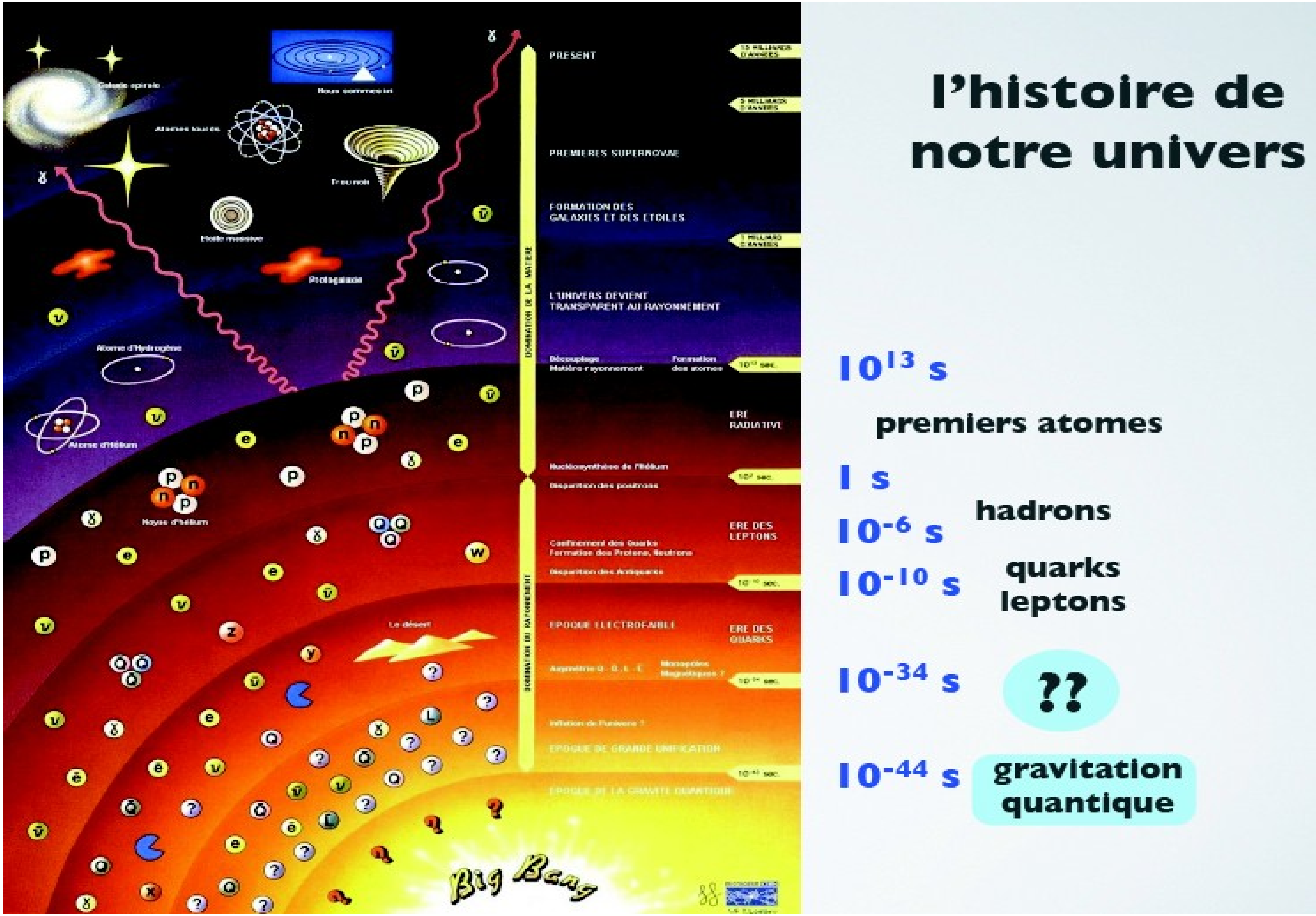
- Aux 4 forces fondamentales sont associés des « champs » qui remplissent l'espace. (par ex le champ électromagnétique pour la force electromagnétique).
- Ces champs sont **quantifiés.** Les « quanta » du champ sont des particules élémentaires appelées « bosons intermédiaires ».
  - Quanta de la **force électromagnétique:** photons
  - Quanta de la **force forte:** gluons
  - Quanta de la **force faible:** Bosons W et Z
  - Quanta de la **force gravitationelle:** gravitons (toujours pas détectés)
- Tous ces bosons intermédiaires ont une masse nulle, sauf W et Z qui sont très massifs (environ 100 fois la masse du proton)

Au-delà du MS

Le paradigme de l'unification :



Du big-bang au big-crunch ?



Accélérateurs & détecteurs

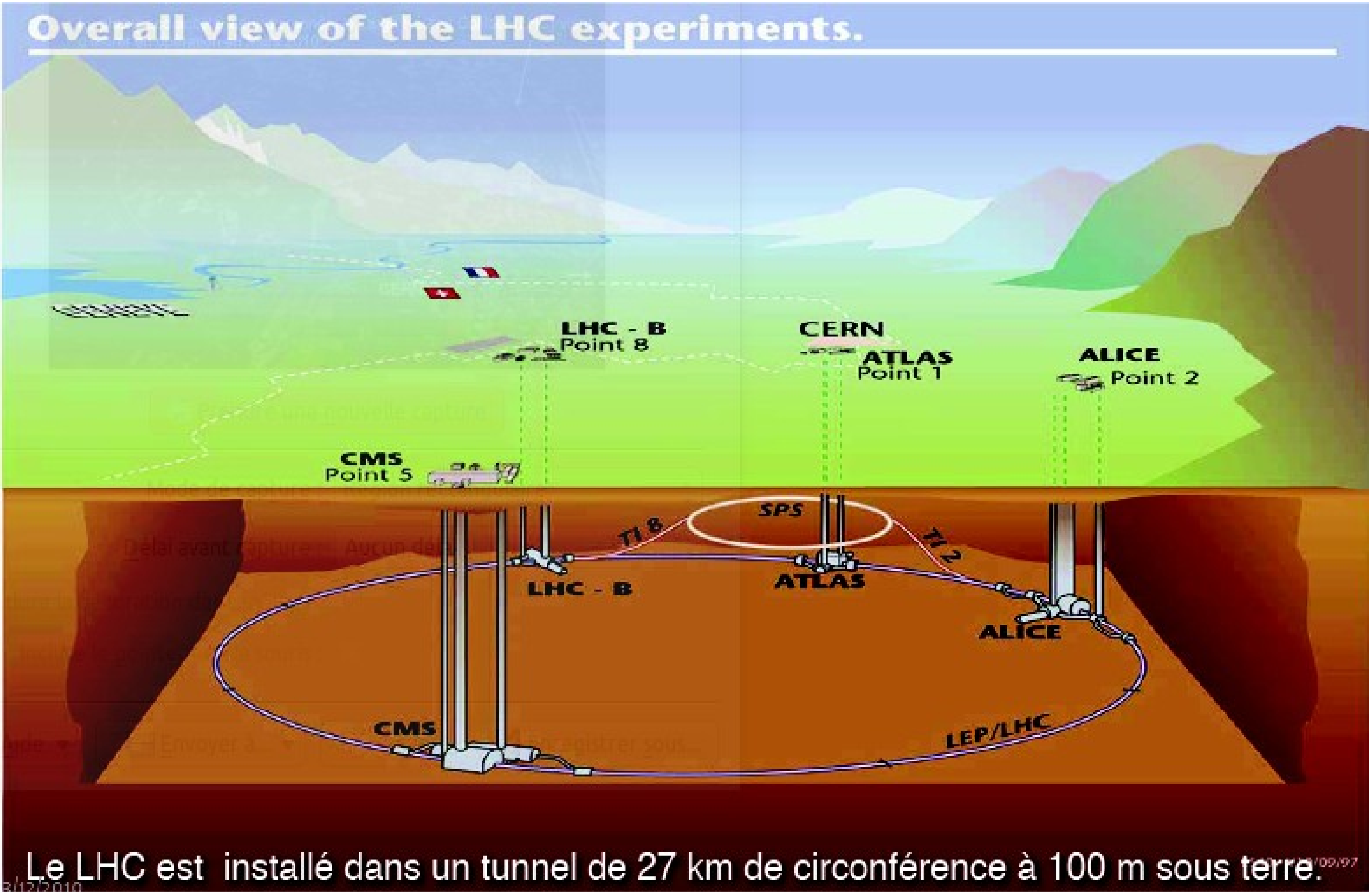
Le LHC du CERN

Le CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) est situé à la frontière franco-suisse près de Genève.

Le plus grand accélérateur du monde, le Large Hadron Collider (LHC) vient d'entrer en opération en Mars 2010.

03/12/2010

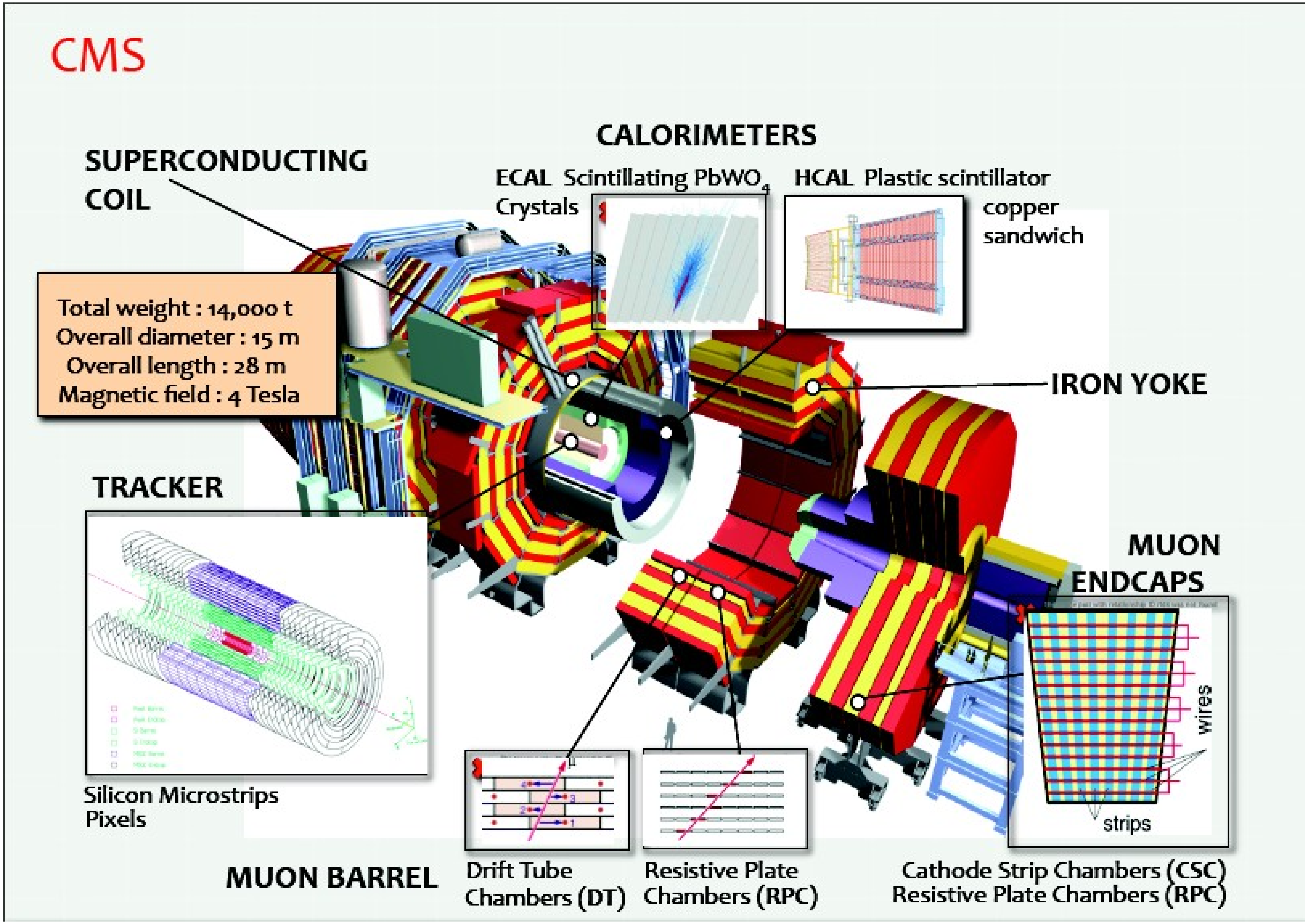
Accélérateurs & détecteurs



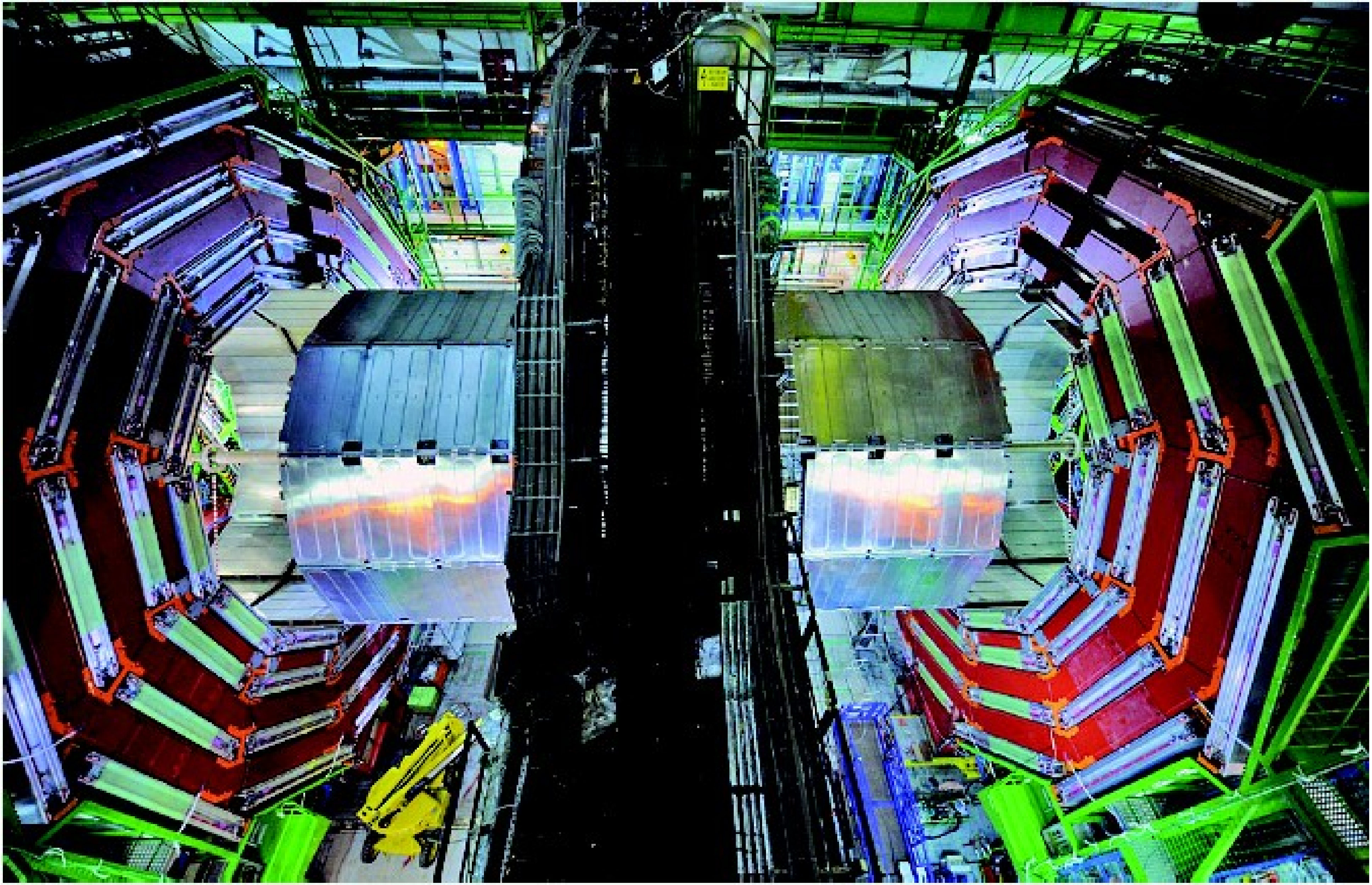
Overall view of the LHC experiments.

Le LHC est installé dans un tunnel de 27 km de circonférence à 100 m sous terre.

Accélérateurs & détecteurs

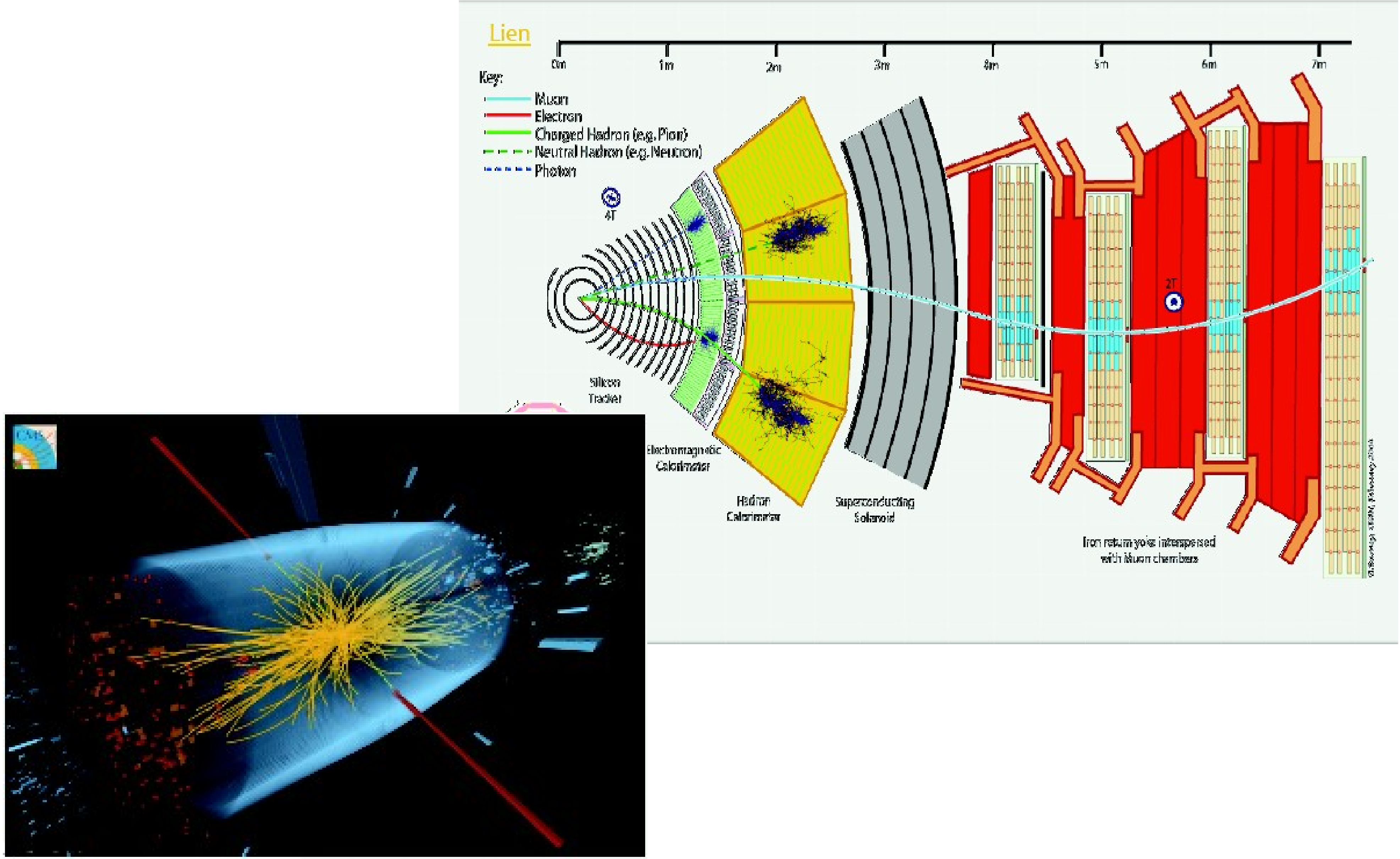


Accélérateurs & détecteurs

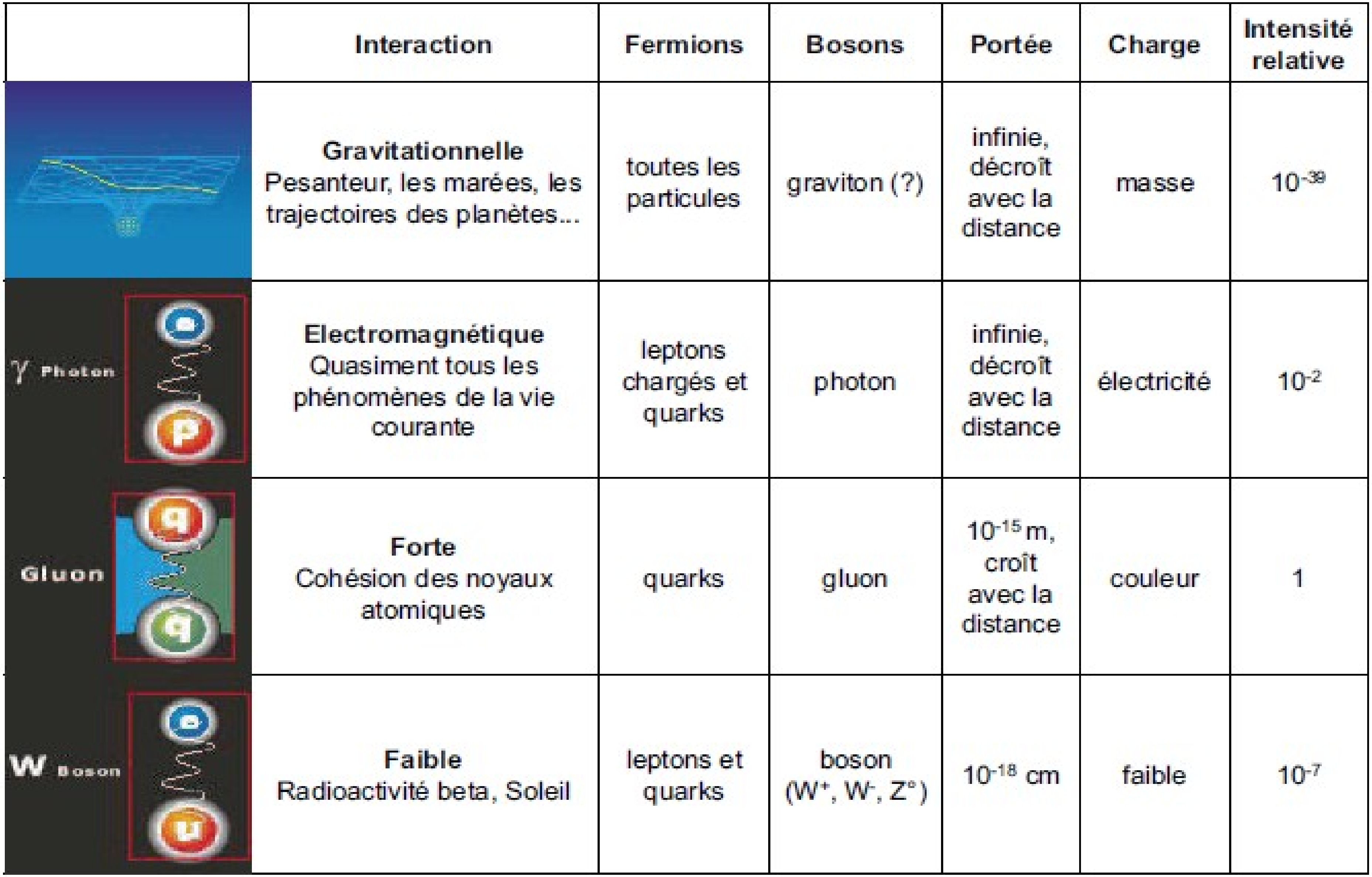


Accélérateurs & détecteurs

Accélérateurs & détecteurs

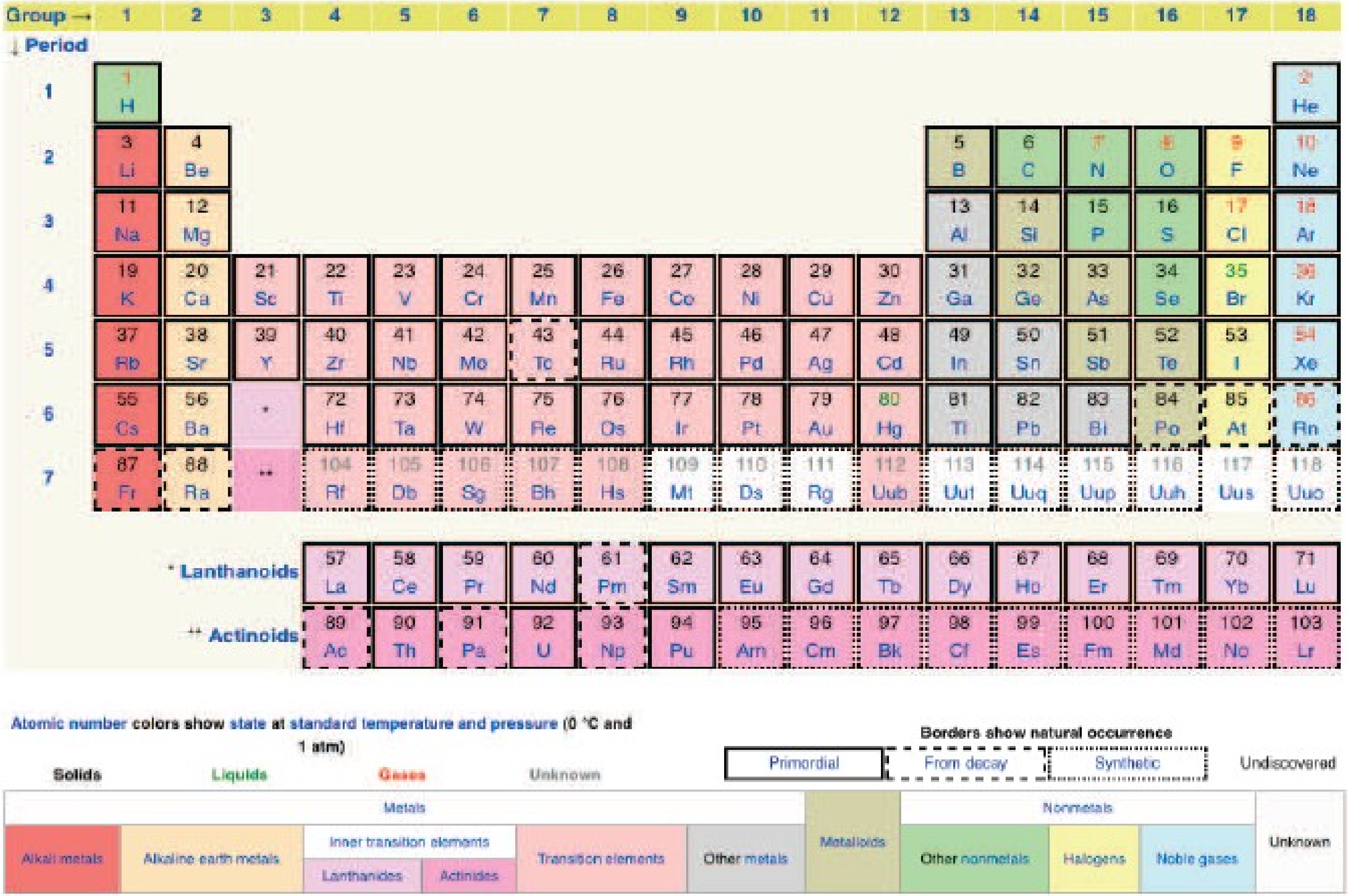


Physique Nucléaire



	Interaction	Fermions	Bosons	Portée	Charge	Intensité relative
	Gravitationnelle Pesanteur, les marées, les trajectoires des planètes...	toutes les particules	graviton (?)	infinie, décroît avec la distance	masse	10^{-39}
γ Photon	**Electromagnétique** Quasiment tous les phénomènes de la vie courante	leptons chargés et quarks	photon	infinie, décroît avec la distance	électricité	10^{-2}
Gluon	**Forte** Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-15} m, croît avec la distance	couleur	1
W Boson	**Faible** Radioactivité beta, Soleil	leptons et quarks	boson (W^+, W^-, $Z°$)	10^{-18} cm	faible	10^{-7}

Physique Nucléaire



Group → ↓ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
* Lanthanoids				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinoids				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Atomic number colors show state at standard temperature and pressure (0 °C and 1 atm)

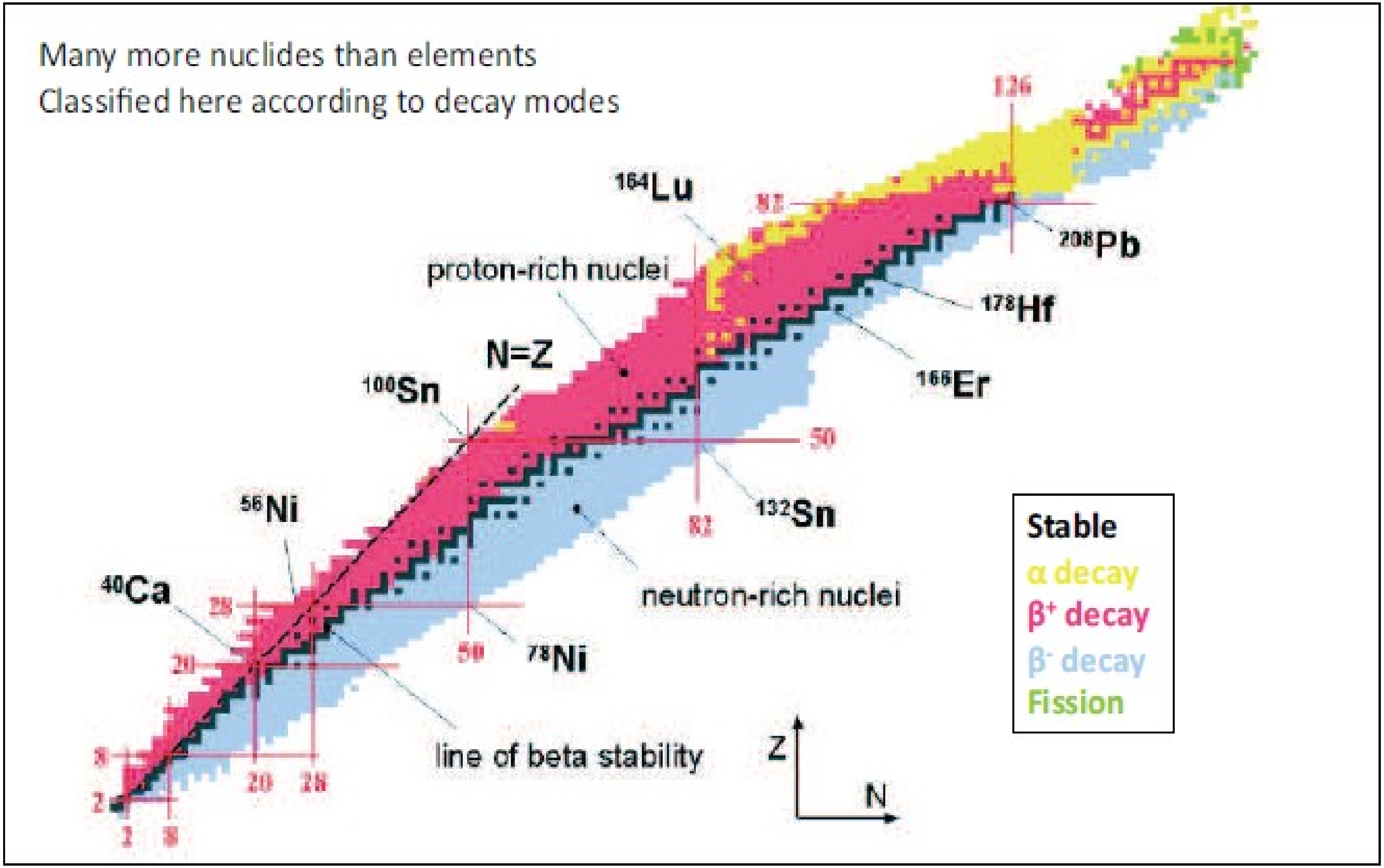
Solids Liquids Gases Unknown

Borders show natural occurrence

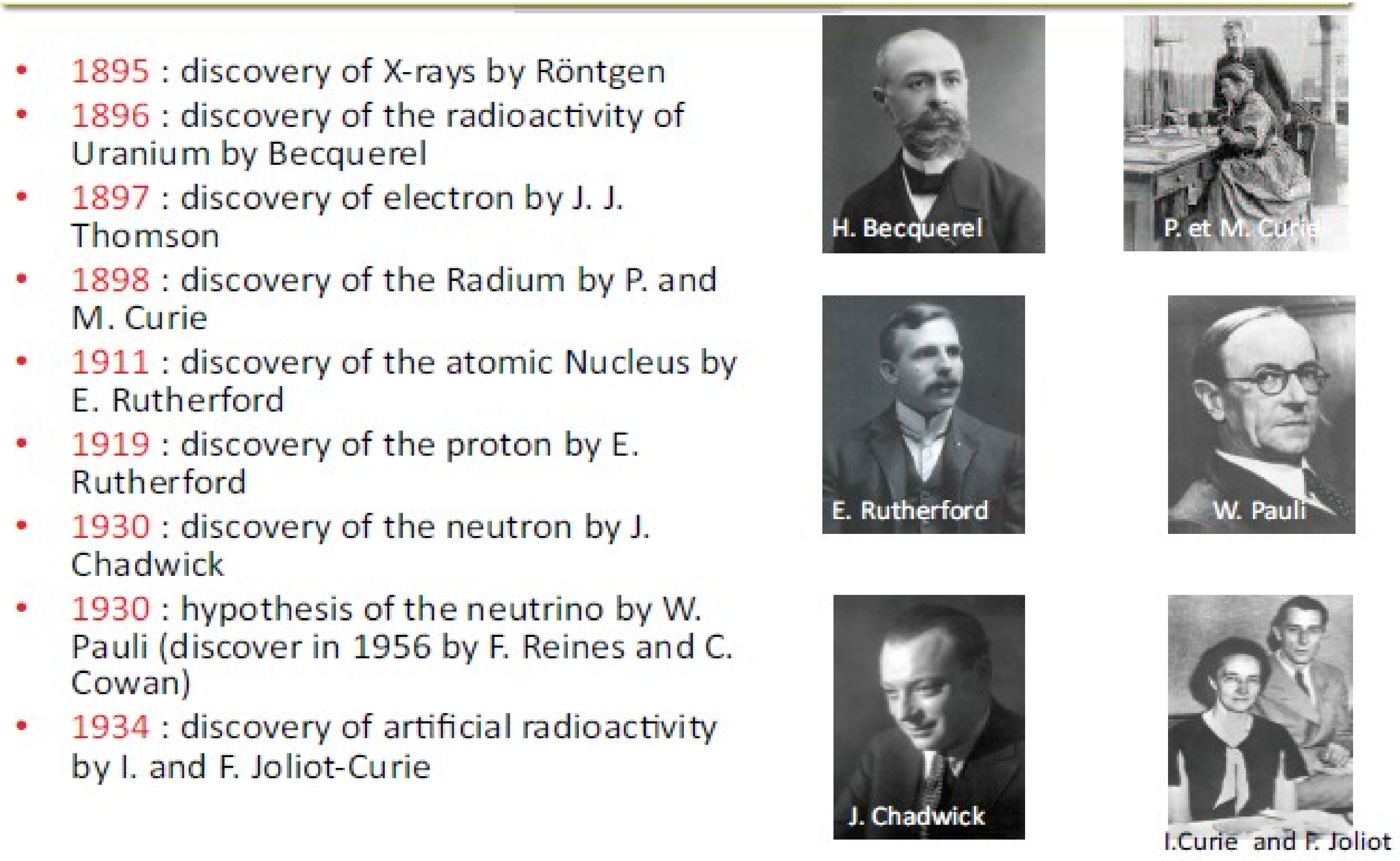
Primordial From decay Synthetic Undiscovered

Metals					Metalloids	Nonmetals			Unknown
Alkali metals	Alkaline earth metals	Inner transition elements Lanthanides Actinides	Transition elements	Other metals		Other nonmetals	Halogens	Noble gases	

Charte des nucléides



Historique de la radioactivité



- 1895 : discovery of X-rays by Röntgen
- 1896 : discovery of the radioactivity of Uranium by Becquerel
- 1897 : discovery of electron by J. J. Thomson
- 1898 : discovery of the Radium by P. and M. Curie
- 1911 : discovery of the atomic Nucleus by E. Rutherford
- 1919 : discovery of the proton by E. Rutherford
- 1930 : discovery of the neutron by J. Chadwick
- 1930 : hypothesis of the neutrino by W. Pauli (discover in 1956 by F. Reines and C. Cowan)
- 1934 : discovery of artificial radioactivity by I. and F. Joliot-Curie

Energie de liaison

- The Binding Energy *B* is the energy required to split a nucleus into his constituents

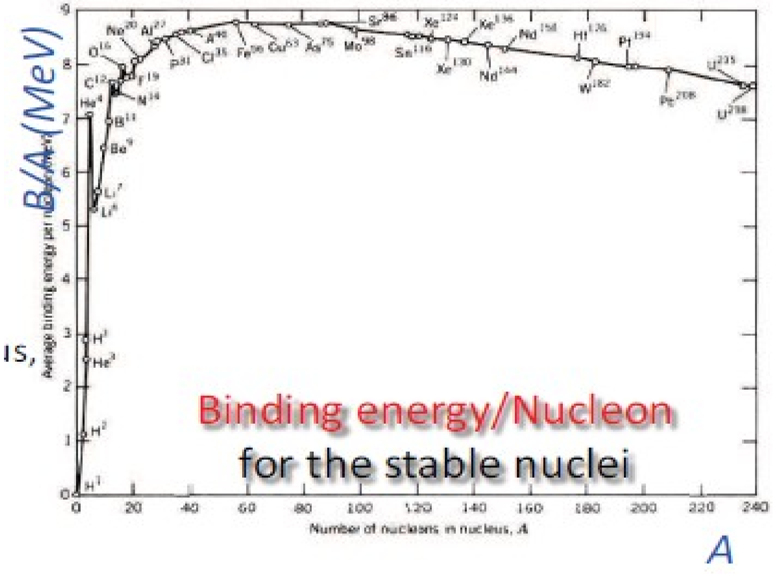
$$\boxed{m({}^{A}_{Z}\mathrm{X})c^2 = Zm_pc^2 + Nm_nc^2 - B(A,Z)}$$

- Convention : m stands for nucleus mass ≠ M stands for neutral atom mass
- Binding energy is very important: gives information on
  - Forces between nucleons
  - Stability of nucleus
  - Energy released or required in nuclear decays or reactions
- If B(A,Z)>0 the nucleus is bound. It is a necessary condition for the stability but not sufficient (as we will see later)

Energie de liaison

- It is often more convenient to use the Masses of the neutral atoms : $M({}^{A}_{Z}\mathrm{X})c^2 = m({}^{A}_{Z}\mathrm{X})c^2 + Zm_ec^2 - B(Ze)$
  the binding energy of the electron is negligible with respect to the nuclear binding energy, so

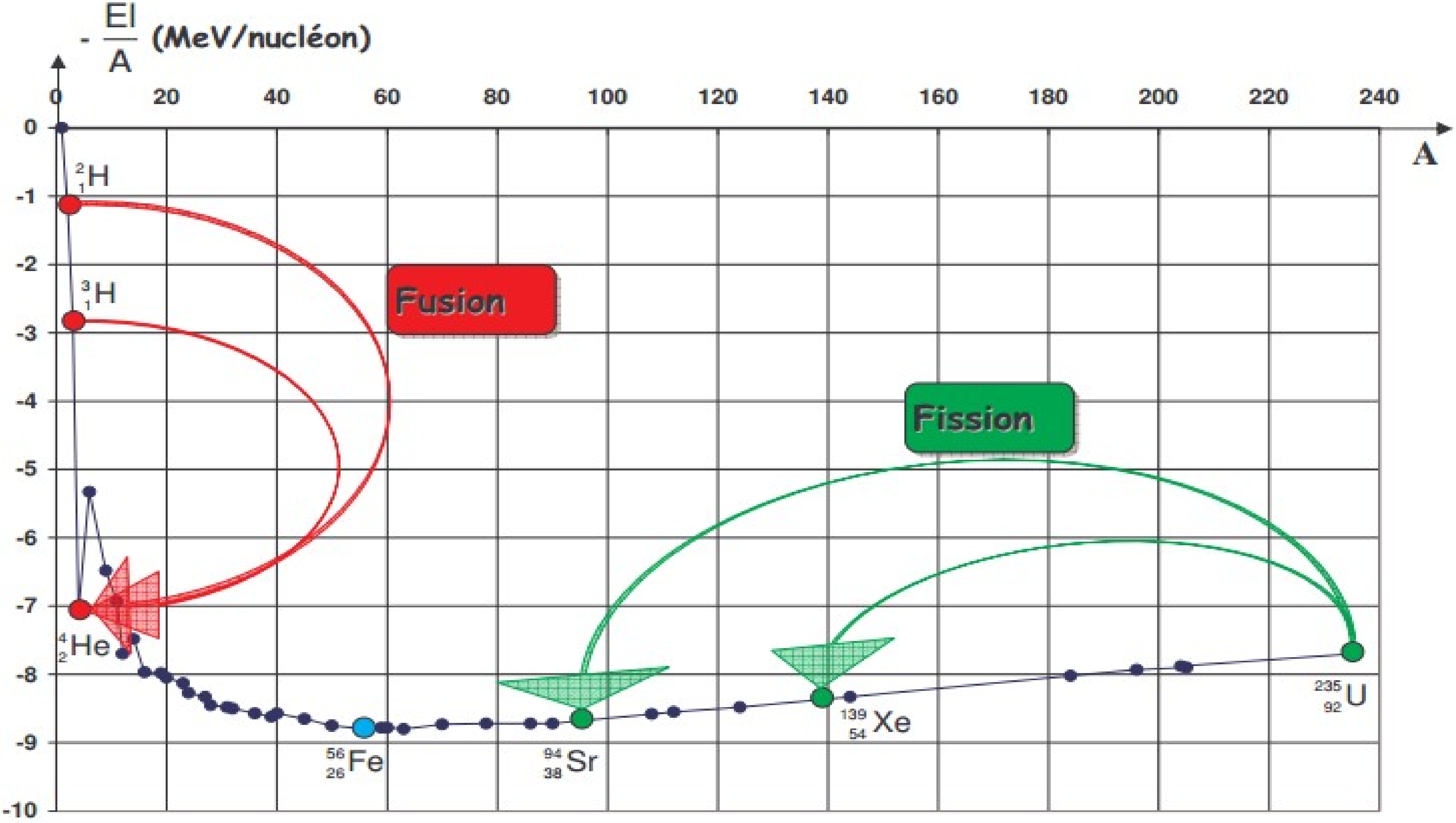
$$\boxed{M({}^{A}_{Z}\mathrm{X})c^2 = ZM({}^{1}_{1}\mathrm{H})c^2 + (A-Z)m_nc^2 - B(A,Z)}$$



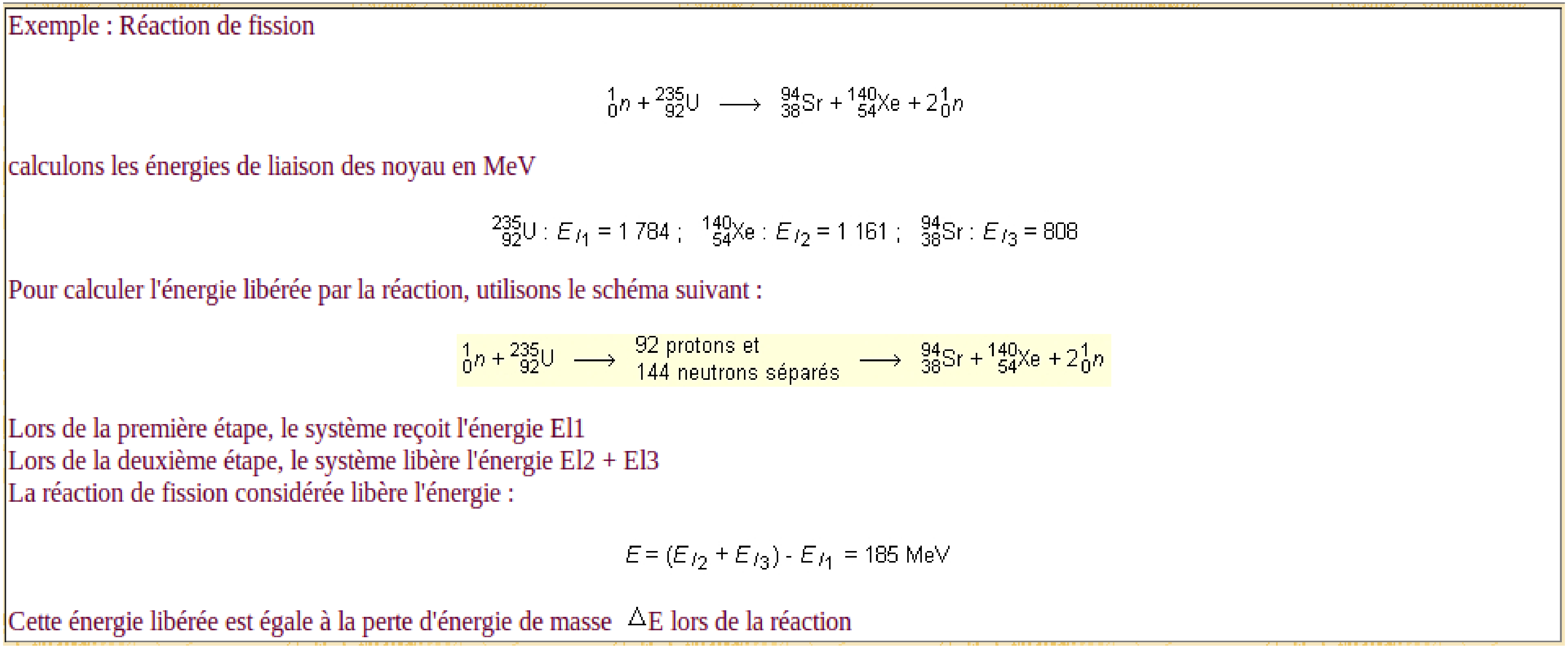
Binding energy/Nucleon
for the stable nuclei

- Some numerical values :
  - $M({}^4\mathrm{He}) = 3728.4\ \mathrm{MeV}/c^2 \rightarrow B = 28.30\ \mathrm{MeV}$
  - $M({}^2\mathrm{H}) = 1876.12\ \mathrm{MeV}/c^2 \rightarrow B = 2.22\ \mathrm{MeV}$
  - $M({}^{12}\mathrm{C}) = 12u - 6m_p - 6m_n - 6m_e = 92.16\ \mathrm{MeV} = 1.477\ 10^{-11}\mathrm{J}$
    small value, but in one mole of ^{12}C, there is $8.9\ 10^{12}$J i.e. $2.5\ 10^{6}$ kWh !
- Comparison of B/M for EM and strong nuclear force :
  - In the atom H : $B/M = B/(m_p+m_e) \approx 1.4\ 10^{-8}$
  - In the nucleus 12C : $B/M = B/(6m_p+6m_n) \approx 8.2\ 10^{-3}$

Energie de liaison



Energie de liaison



Exemple : Réaction de fission

$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}\mathrm{U} \longrightarrow {}_{38}^{94}\mathrm{Sr} + {}_{54}^{140}\mathrm{Xe} + 2\,{}_{0}^{1}n $$

calculons les énergies de liaison des noyau en MeV

$$ {}_{92}^{235}\mathrm{U} : E_{l_1} = 1\,784 \;;\quad {}_{54}^{140}\mathrm{Xe} : E_{l_2} = 1\,161 \;;\quad {}_{38}^{94}\mathrm{Sr} : E_{l_3} = 808 $$

Pour calculer l'énergie libérée par la réaction, utilisons le schéma suivant :

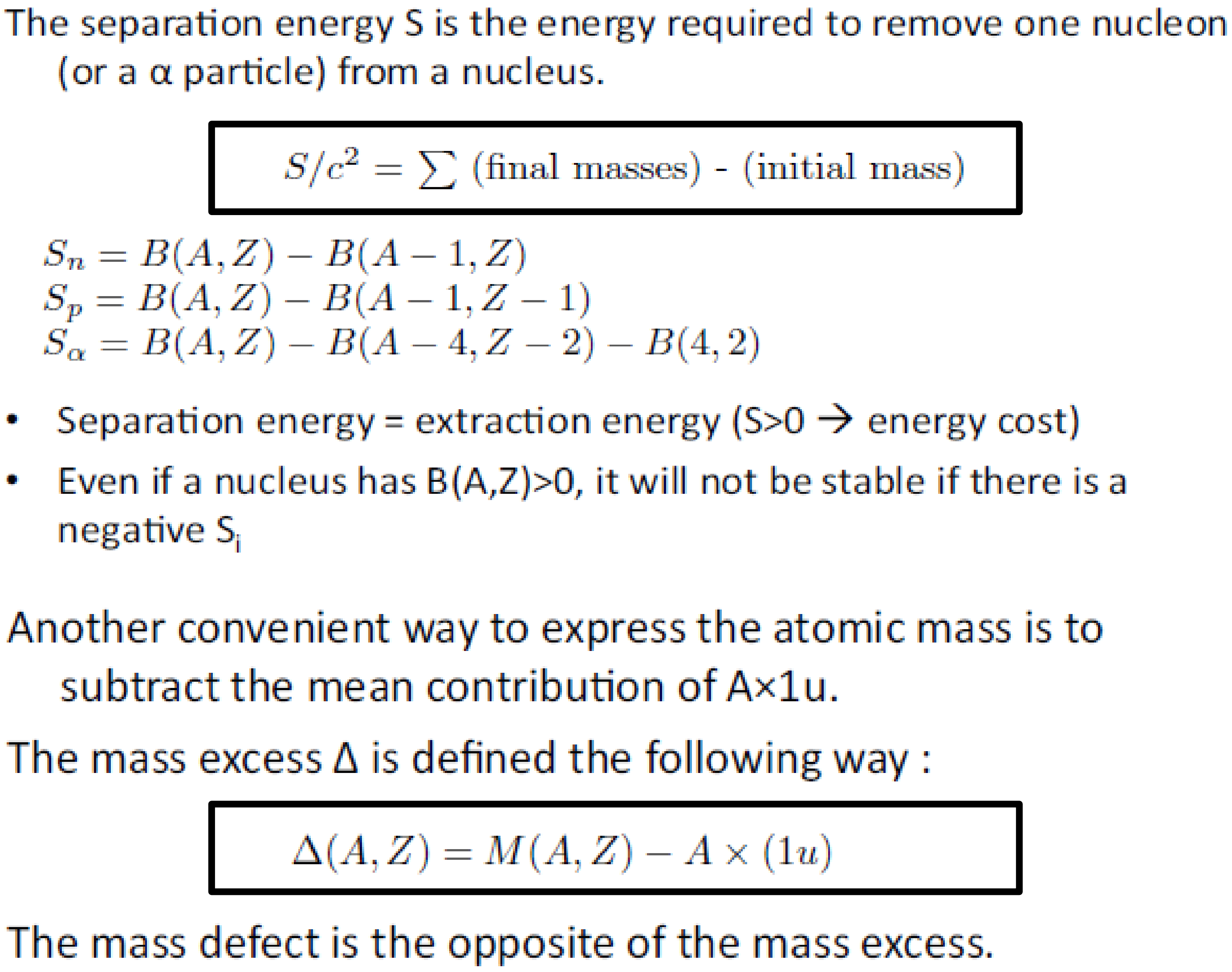
$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}\mathrm{U} \longrightarrow \begin{array}{l}\text{92 protons et}\\ \text{144 neutrons séparés}\end{array} \longrightarrow {}_{38}^{94}\mathrm{Sr} + {}_{54}^{140}\mathrm{Xe} + 2\,{}_{0}^{1}n $$

Lors de la première étape, le système reçoit l'énergie El1
Lors de la deuxième étape, le système libère l'énergie El2 + El3
La réaction de fission considérée libère l'énergie :

$$ E = (E_{l_2} + E_{l_3}) - E_{l_1} = 185 \text{ MeV} $$

Cette énergie libérée est égale à la perte d'énergie de masse ΔE lors de la réaction

Energie de séparation
Excès de masse



The separation energy S is the energy required to remove one nucleon (or a α particle) from a nucleus.

$$\boxed{S/c^2 = \sum \text{(final masses) - (initial mass)}}$$

$$S_n = B(A,Z) - B(A-1,Z)$$
$$S_p = B(A,Z) - B(A-1,Z-1)$$
$$S_\alpha = B(A,Z) - B(A-4,Z-2) - B(4,2)$$

- Separation energy = extraction energy (S>0 → energy cost)
- Even if a nucleus has B(A,Z)>0, it will not be stable if there is a negative S_i

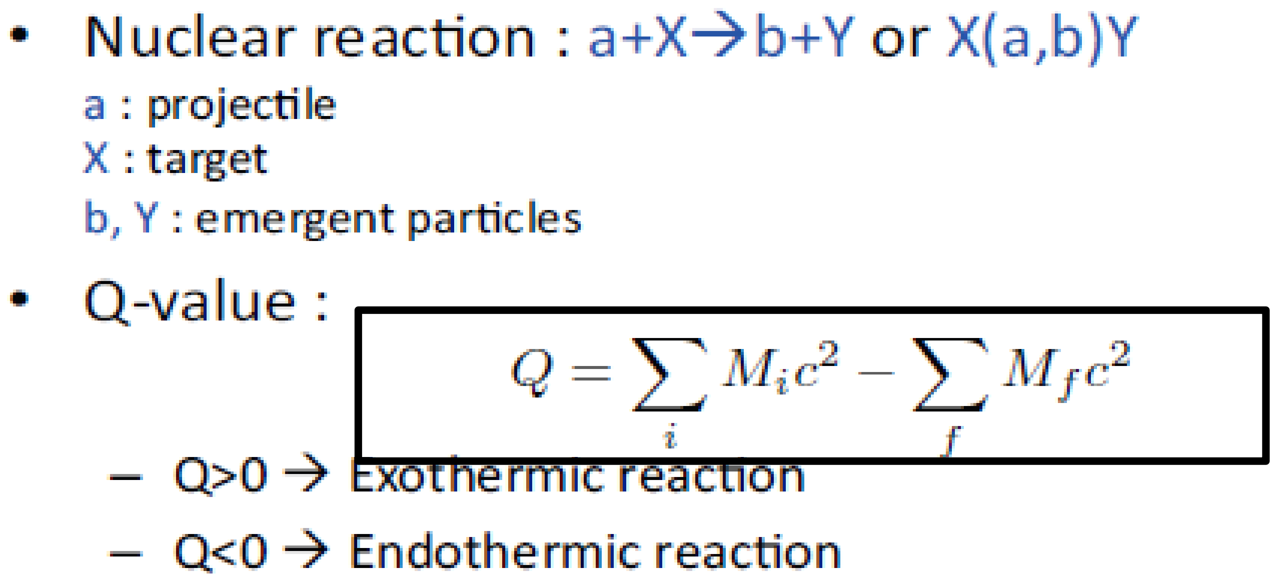
Another convenient way to express the atomic mass is to subtract the mean contribution of A×1u.

The mass excess Δ is defined the following way :

$$\boxed{\Delta(A,Z) = M(A,Z) - A \times (1u)}$$

The mass defect is the opposite of the mass excess.

Energie de réaction
Q-values



- Nuclear reaction : a+X→b+Y or X(a,b)Y

  a : projectile
  X : target
  b, Y : emergent particles

- Q-value :

$$\boxed{Q = \sum_i M_i c^2 - \sum_f M_f c^2}$$

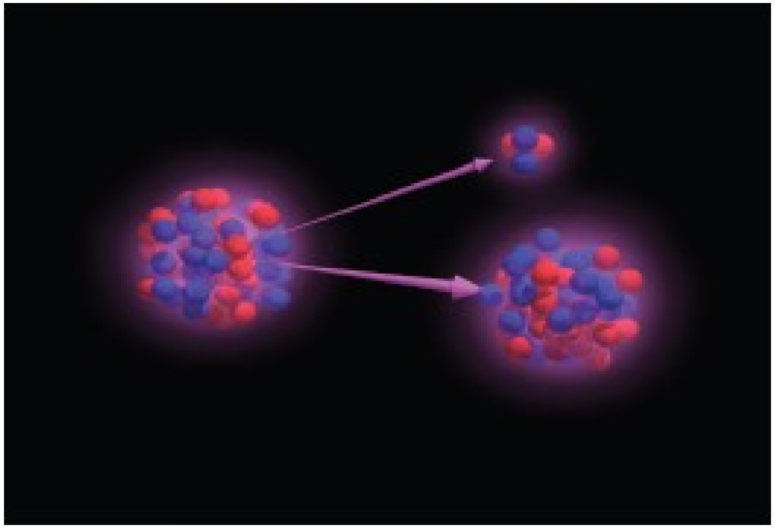
  - Q>0 → Exothermic reaction
  - Q<0 → Endothermic reaction

Modes de désintégration

- α decay

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\,\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\,\mathrm{He}$$

$$Q_\alpha = M(X) - M(Y) - M(^4He)$$



- γ decay $^{A}_{Z}\mathrm{X}^* \longrightarrow {}^{A}_{Z}\,\mathrm{X} + \gamma$

$$Q_\gamma = M(X^*) - M(X)$$

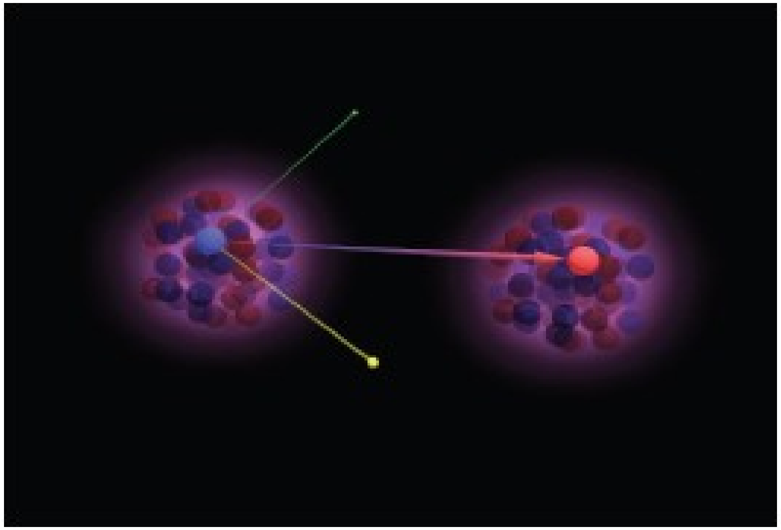
- β⁻ decay

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}\,\mathrm{Y} + e^- + \bar{\nu}_e$$

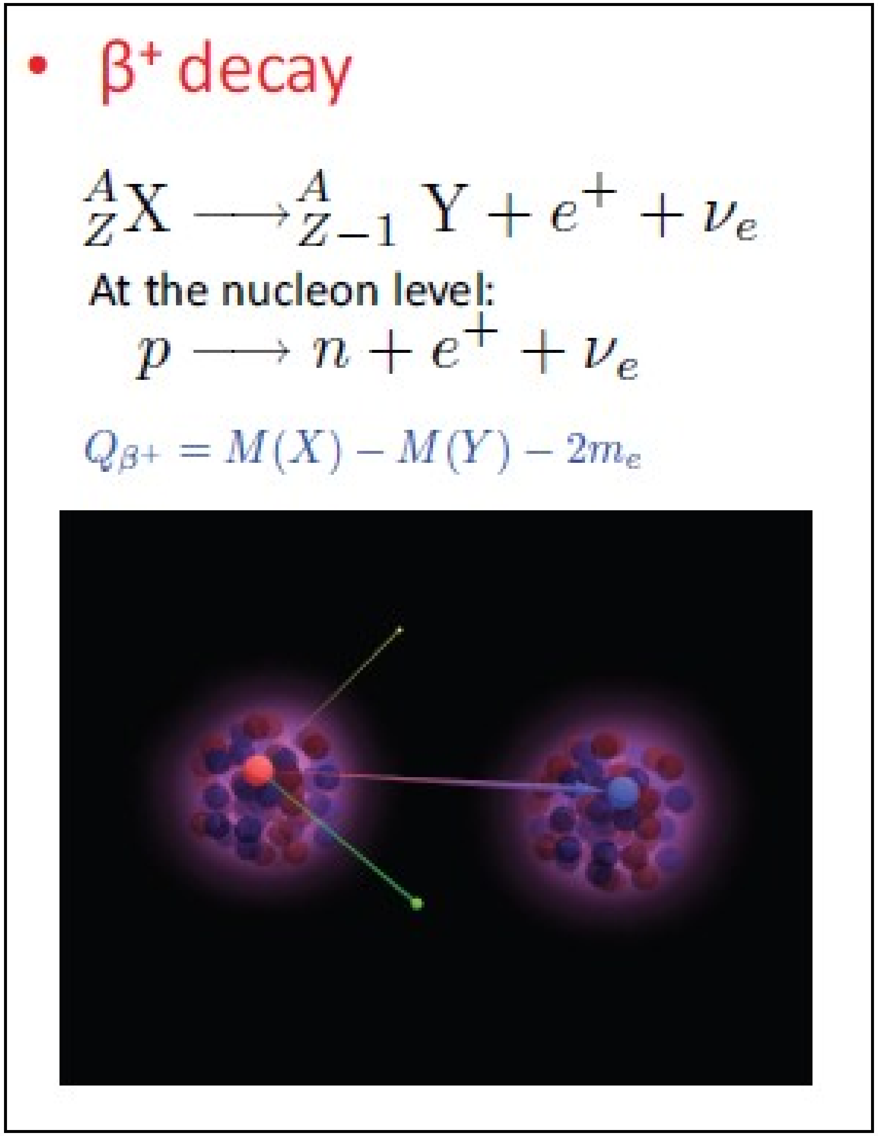
At the nucleon level:

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$Q_{\beta^-} = M(X) - M(Y)$$



Modes de désintégration



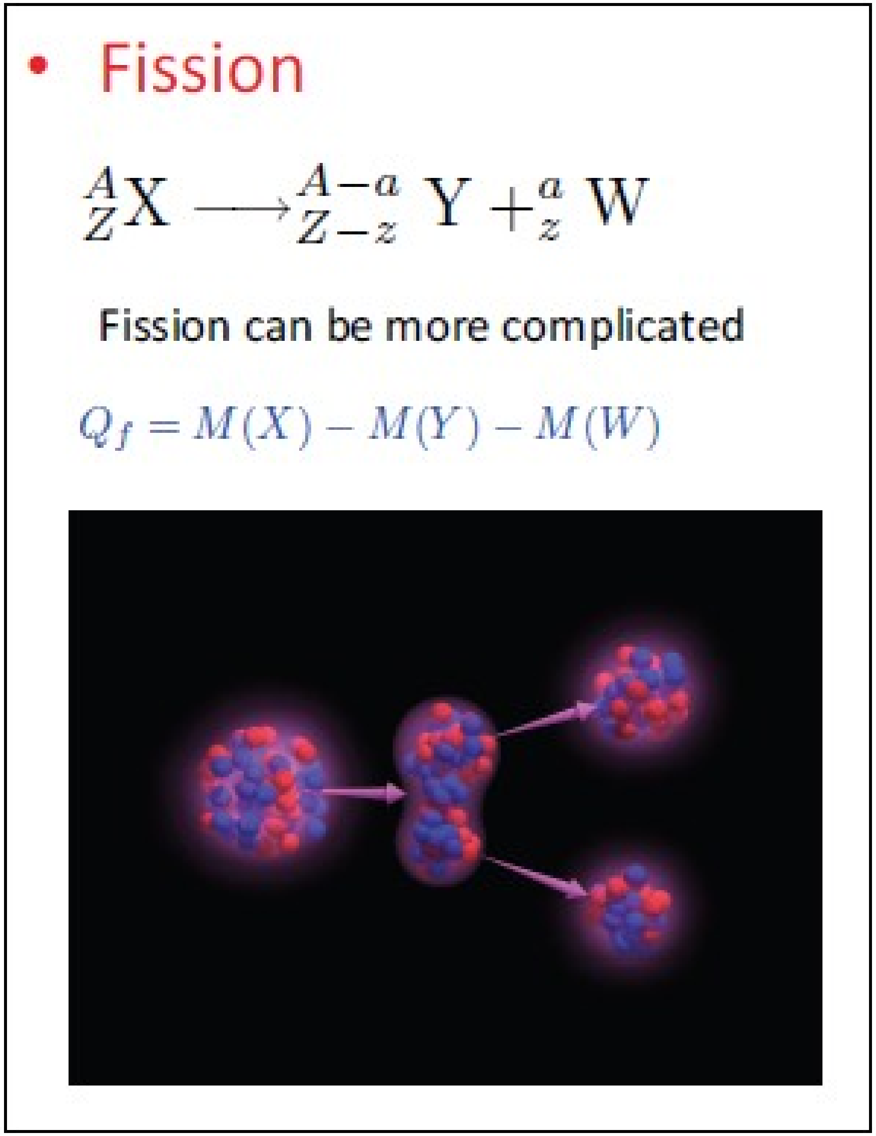
- β^+ decay

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + e^{+} + \nu_e $$

At the nucleon level:

$$ p \longrightarrow n + e^{+} + \nu_e $$

$$ Q_{\beta+} = M(X) - M(Y) - 2m_e $$



- Fission

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A-a}_{Z-z}\mathrm{Y} + {}^{a}_{z}\mathrm{W} $$

Fission can be more complicated

$$ Q_f = M(X) - M(Y) - M(W) $$

Loi de désintégration

- Number of nuclei remaining at time t :

$$\boxed{N(t) = N(0)\,p(t) = N(0)\,e^{-\lambda t}}$$

where *N(0)* is the number of nuclei at time *t*=0

- Number of nuclei remaining after the lifetime τ:

$$\frac{N(\tau)}{N(0)} = e^{-\tau/\tau} = e^{-1} \simeq 36.8\%$$

- Half-life $T_{1/2}$ (or period): time over which 50% of the nuclei decay

$$\frac{N(T_{1/2})}{N(0)} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \Longrightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.693\tau$$

the radioactive periods have a wide range :

^{238}U	**$T_{1/2}$=4.5 10^9 years**
^{226}Ra	$T_{1/2}$=1617 years

^{222}Rn	**$T_{1/2}$=3.8 days**
^{214}Po	$T_{1/2}$=1.6 10^{-4} s

Loi de désintégration

- Rate of decays:

$$-\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = \lambda N(0)e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

- Activity: number of decays per unit time at time t. This is the instantaneous decay speed.

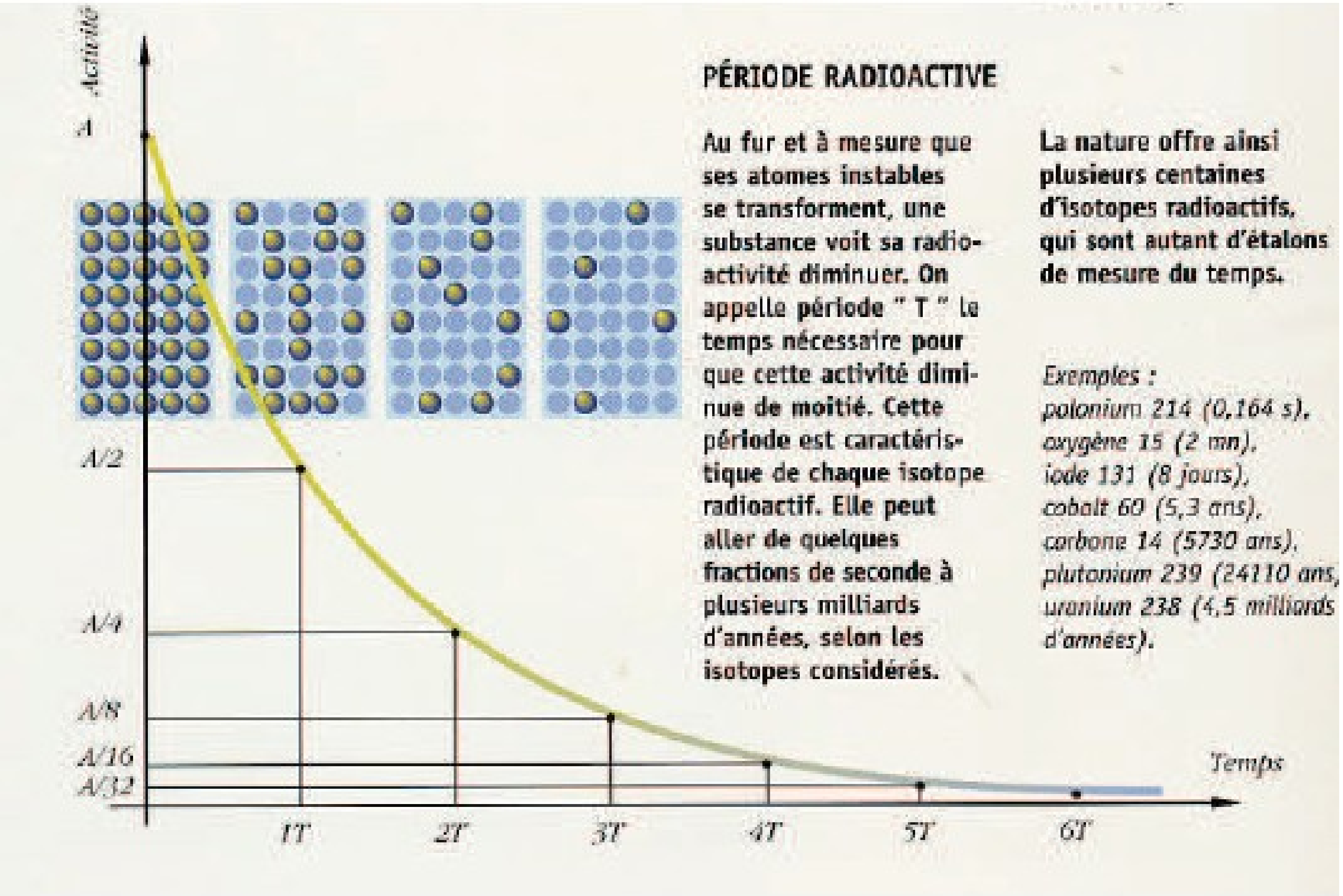
$$A(t) = \left|\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}\right| = \lambda N(0)e^{-\lambda t} = \lambda N(t) = N(t)/\tau$$

$$A(t) = \lambda N(0)e^{-\lambda t} = A(0)e^{-\lambda t}$$

- Units of radioactivity: defined as the number of decays per unit time = activity

  Becquerel (Bq) = 1 decay per second
  Curie (Ci) = 3.7 10^{10} decays per second (originally the activity of 1 gram of radium)

Loi de désintégration



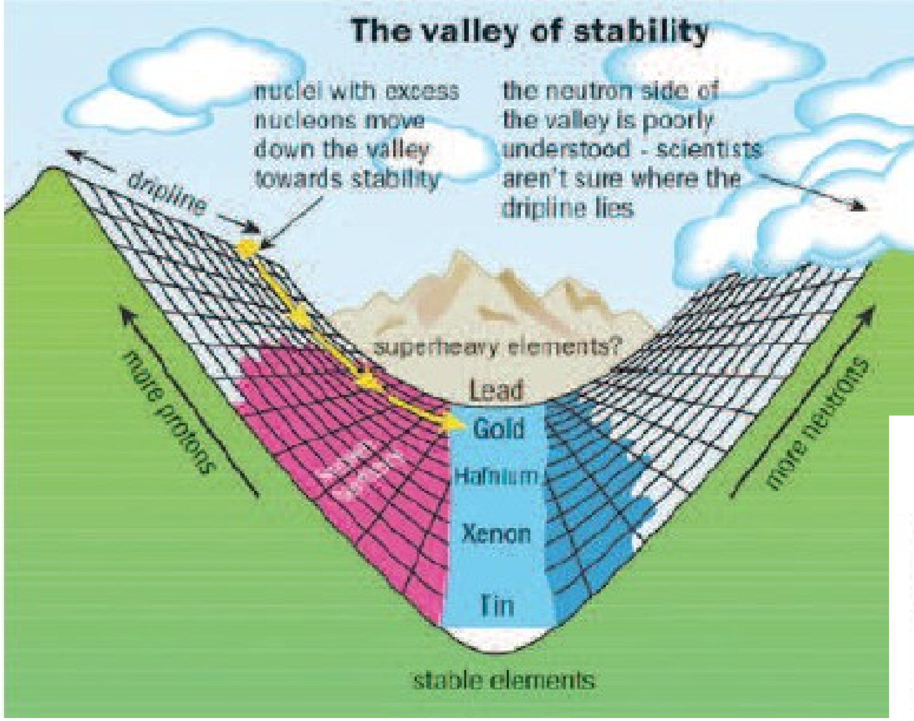
PÉRIODE RADIOACTIVE

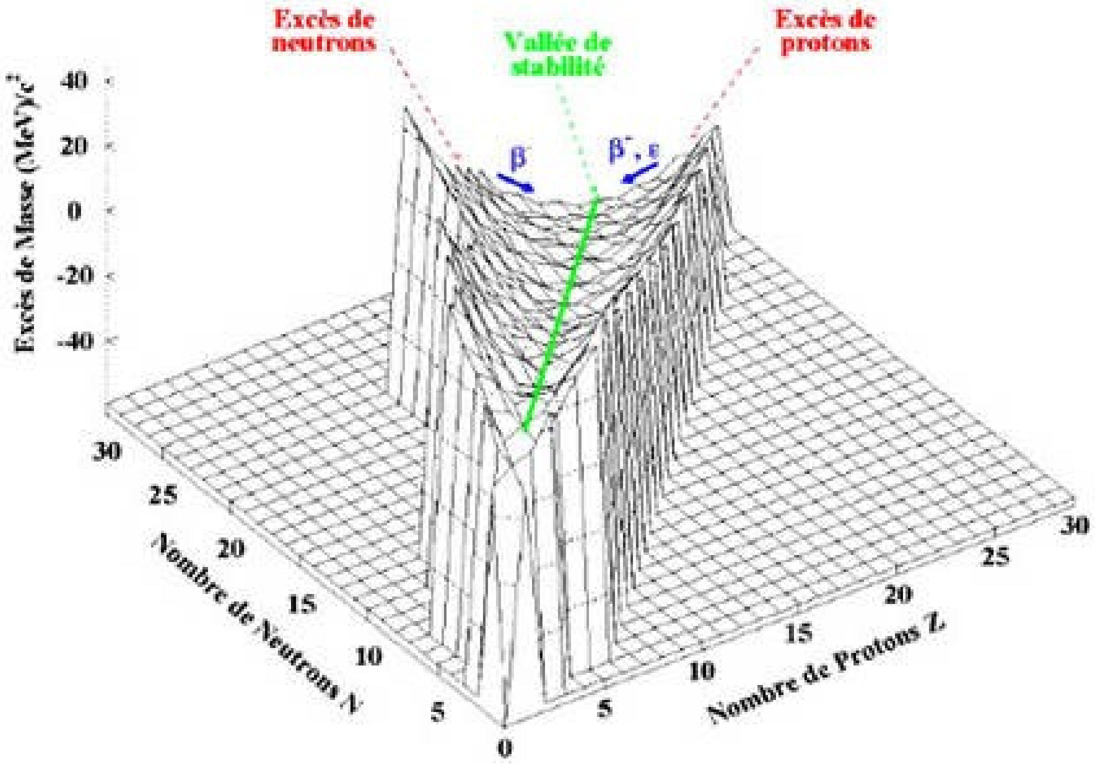
Au fur et à mesure que ses atomes instables se transforment, une substance voit sa radioactivité diminuer. On appelle période " T " le temps nécessaire pour que cette activité diminue de moitié. Cette période est caractéristique de chaque isotope radioactif. Elle peut aller de quelques fractions de seconde à plusieurs milliards d'années, selon les isotopes considérés.

La nature offre ainsi plusieurs centaines d'isotopes radioactifs, qui sont autant d'étalons de mesure du temps.

Exemples :
polonium 214 (0,164 s),
oxygène 15 (2 mn),
iode 131 (8 jours),
cobalt 60 (5,3 ans),
carbone 14 (5730 ans),
plutonium 239 (24110 ans,
uranium 238 (4,5 milliards d'années).

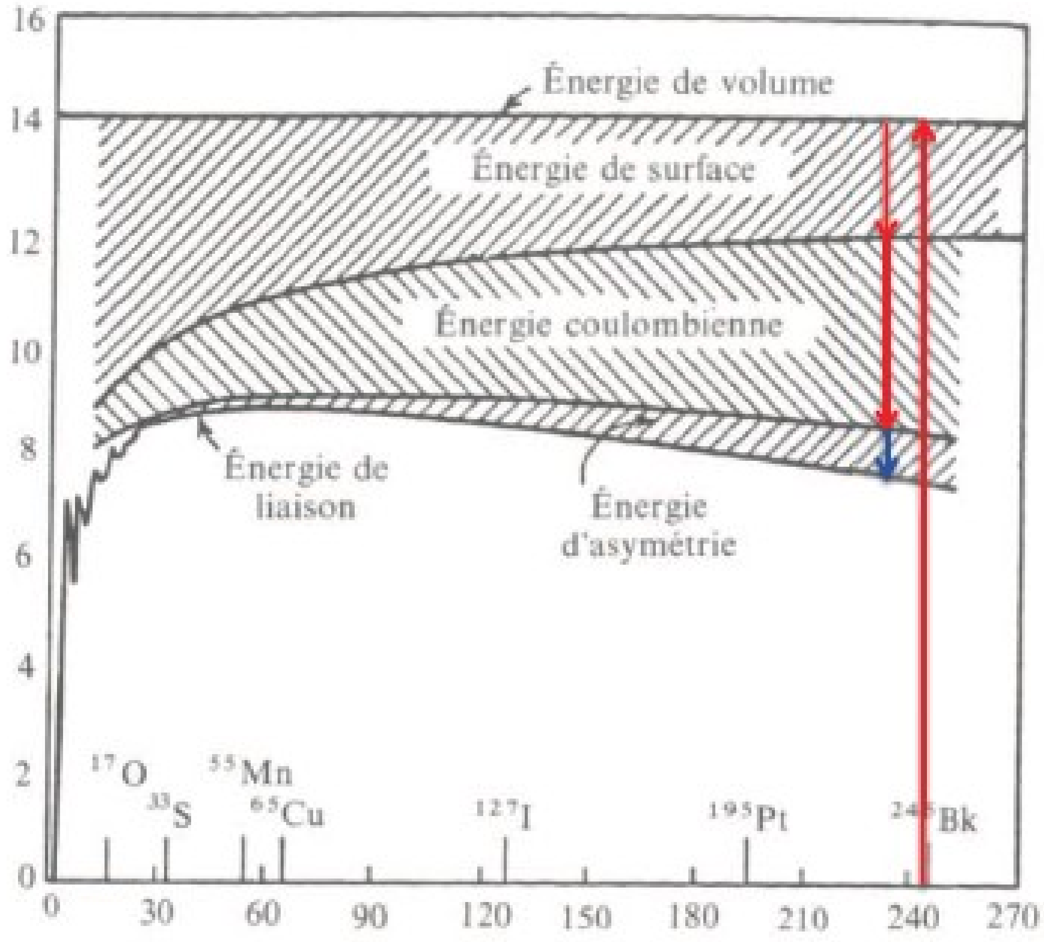
Vallée de stabilité





Modèle de la goutte liquide
Formule de masse

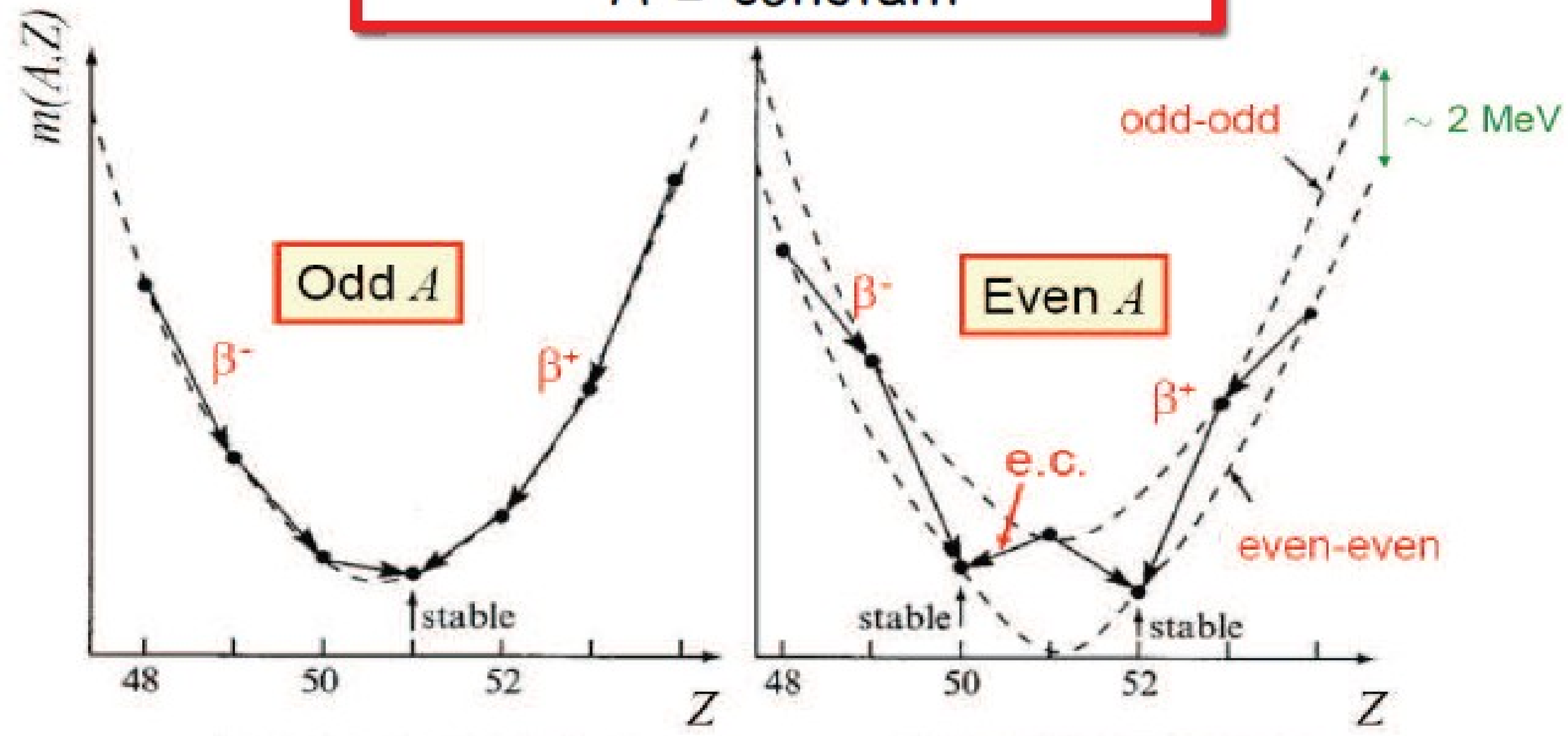
$$B(A,Z) = u_v A - u_s A^{2/3} - u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - u_T \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta$$



- This formula works Well for the nuclei with A>20.
- For the very light nuclei, the agreement is poor :
  - ✓ To few nucleons to allow a description in term of a drop a nuclear matter
  - ✓ predominance of shell effects

Application aux chaînes isobariques

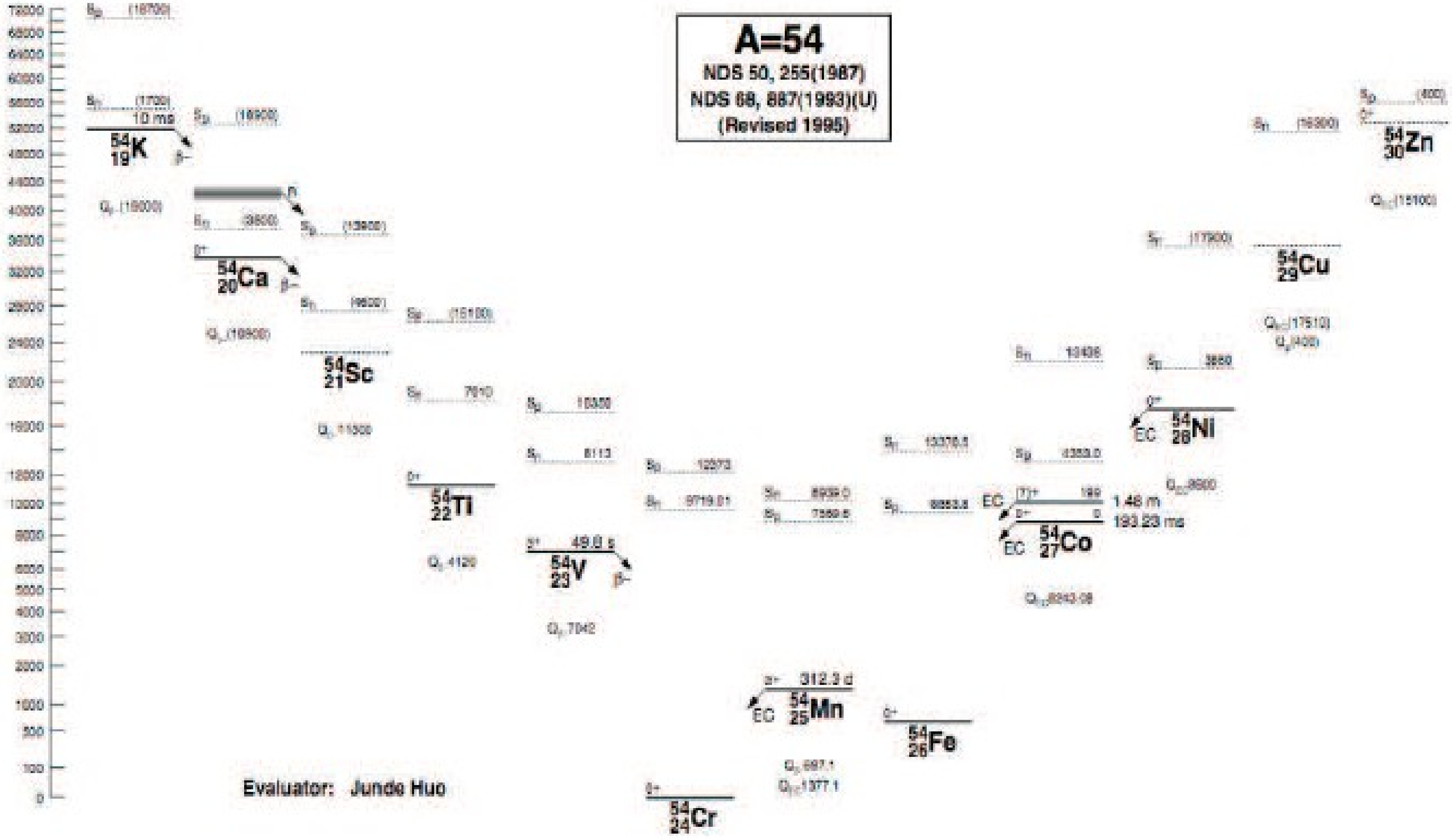
Examples of isobaric chains
A = constant



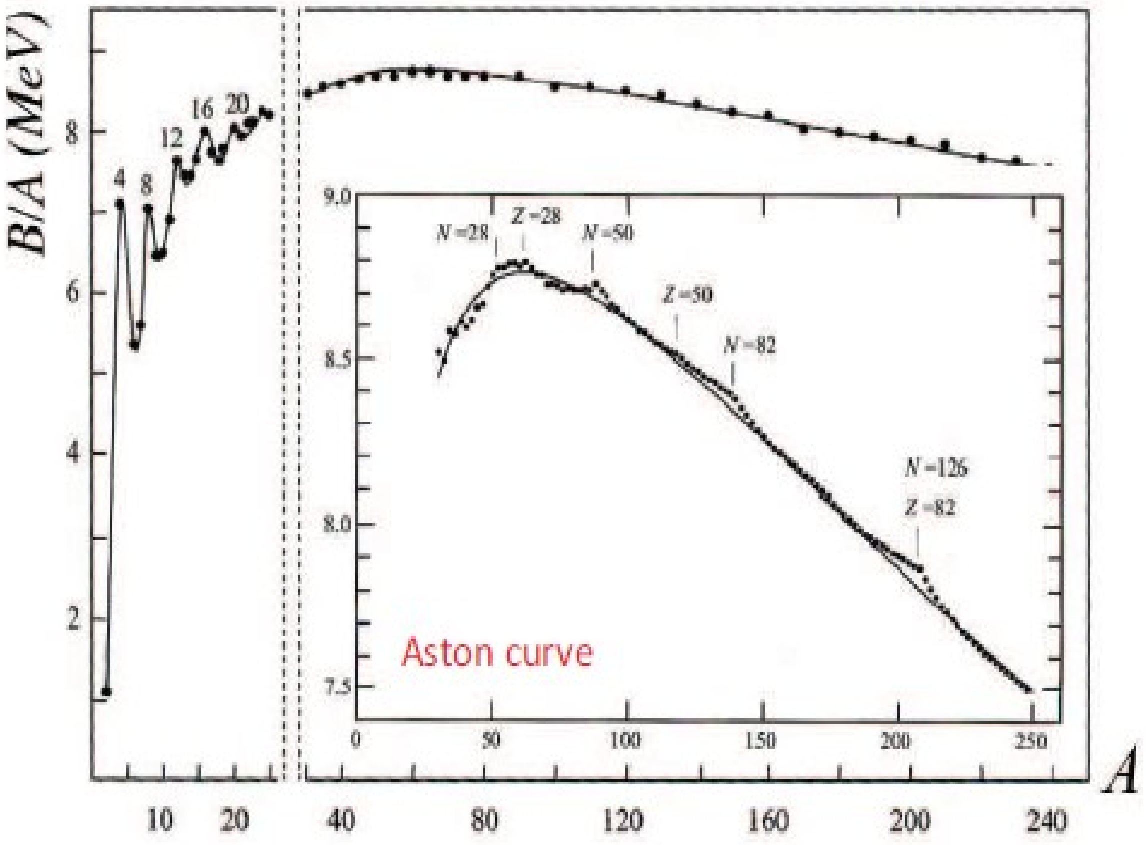
Usually only one isotope stable against β-decay; maybe two.

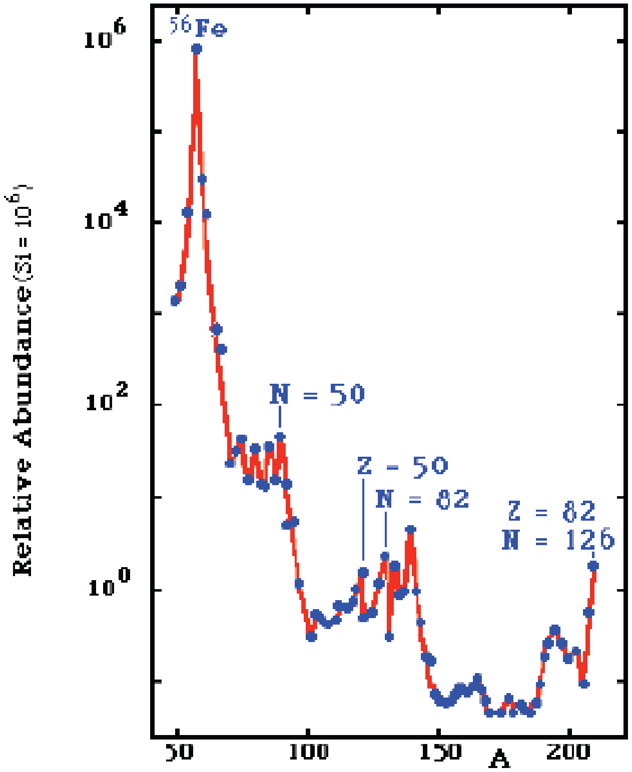
Typically two even-even nuclides stable against β-decay; no odd-odd ones.

Application aux chaînes isobariques



Nombres magiques





For some values of Z or N, nuclei are very stable and show significant departures from the average nucleus behavior (LDM model):

Z or N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 **“Magic numbers”**

Modèle en couches

- Basic idea: solve Schrödinger equation $H_0\Psi = E\Psi$ with

$$H_0 = \sum_{\alpha=1}^{A}\left[T_\alpha + V(r_\alpha) + g\vec{L}_\alpha.\vec{S}_\alpha\right]$$

- Treat each nucleon independently and solve A one-body problems, i.e. Solve A decoupled Schrödinger equations for the nuclear potential:

$$\left[T_\alpha + V(r_\alpha) + g\vec{L}_\alpha.\vec{S}_\alpha\right]\psi_\alpha(\vec{r}_\alpha) = \epsilon_\alpha\psi_\alpha(\vec{r}_\alpha)$$

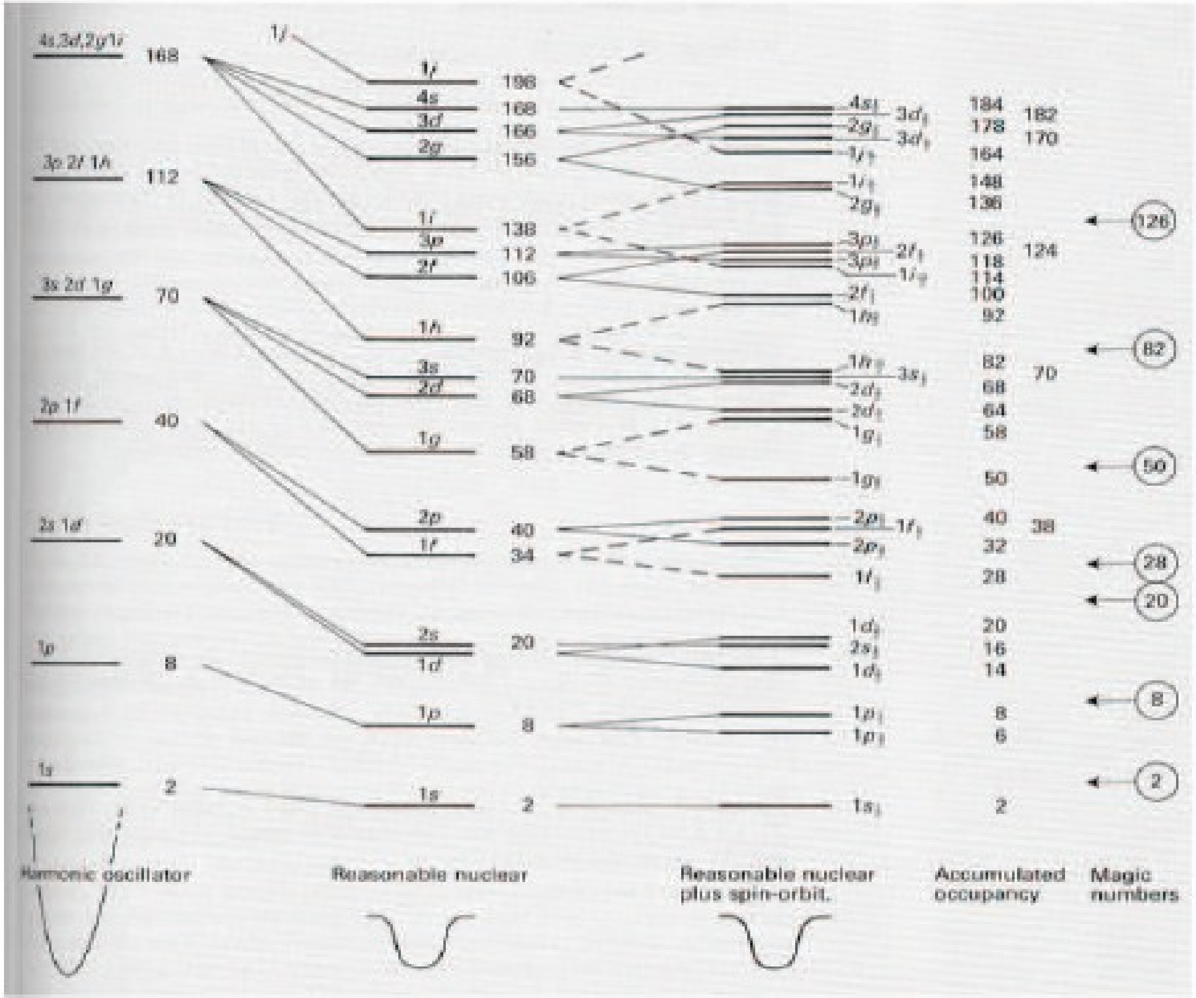
  - $\psi_\alpha(\vec{r}_\alpha)$: wavefunction of the nucleon α
  - ϵ_α: Energy of the nucleon α

- For the nucleus:

$$E = \sum_{\alpha=1}^{A}\epsilon_\alpha$$

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_1, ..., \vec{r}_A) = \left[\prod_{\substack{n=1\\ \text{antisymmetric}}}^{N} \psi_n(\vec{r}_n)\right]\left[\prod_{\substack{p=1\\ \text{antisymmetric}}}^{Z} \psi_p(\vec{r}_p)\right]$$ ⇒Slater determinant

Modèle en couches



Explain magic numbers:
2,8,20,28,50,82,126

Experimentally, after 82 protons and neutrons magic numbers differ:

- p: 114 and 126
- n: 126 and 184

strong coulomb effect