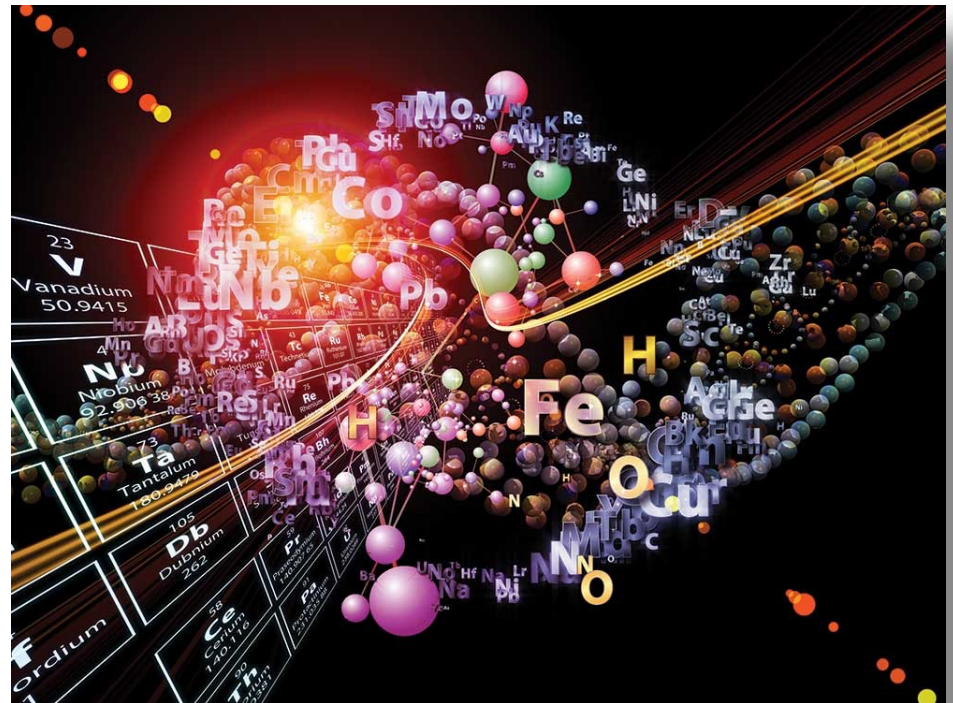


Ecole thématique IN2P3  
“de la physique au détecteur”

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

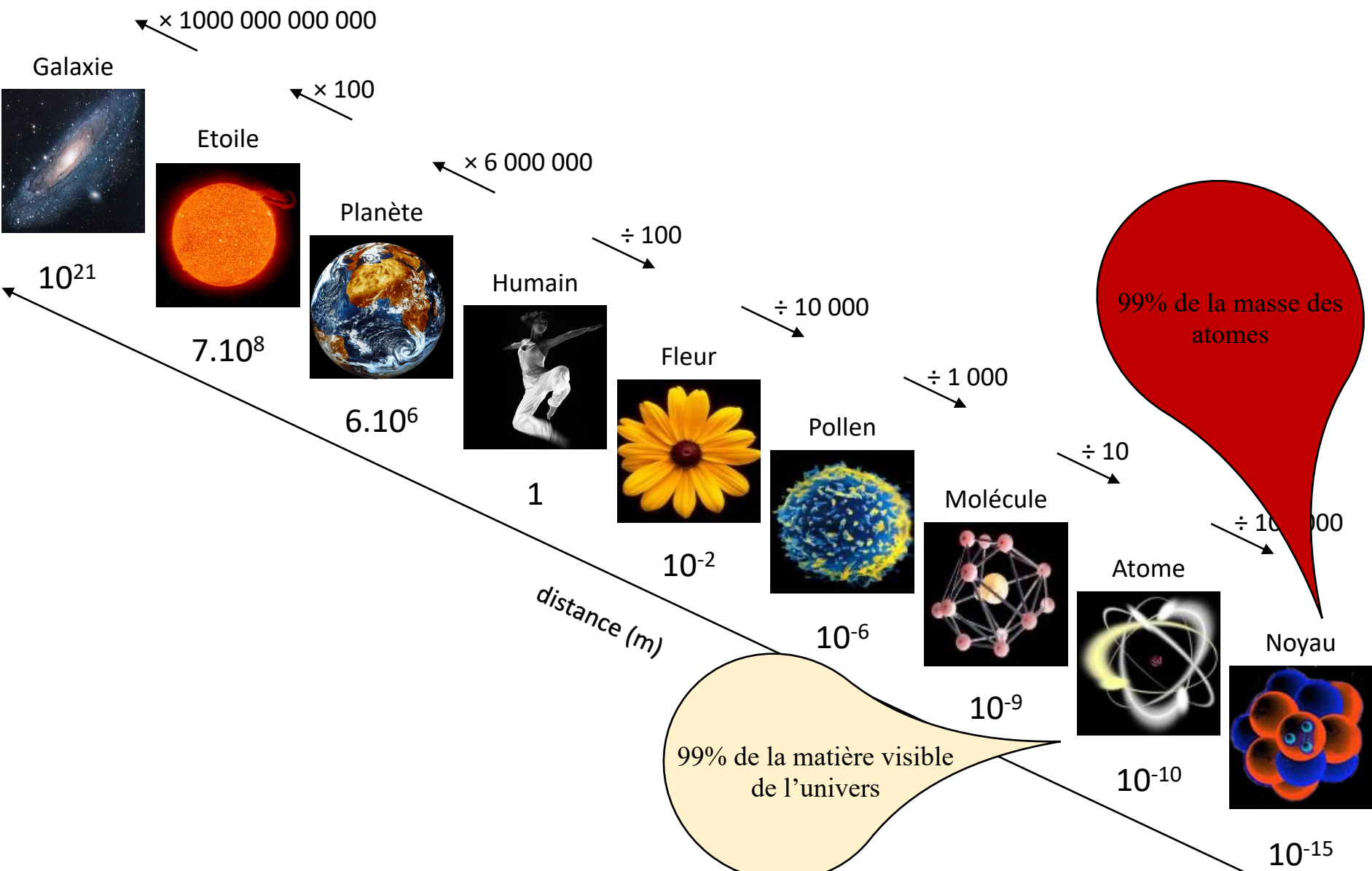
cea

**Cours de physique nucléaire 1/3**  
**Le paysage de la physique nucléaire**



Marine VANDEBROUCK  
CEA Saclay Irfu/DPhN

# Introduction



## Cours de physique nucléaire 1/3 Le paysage de la physique nucléaire

### 1. Un peu d'histoire

1. La découverte de l'atome
2. La découverte de la radioactivité
3. La découverte du noyau
4. La découverte du neutron

### 2. Le noyau atomique

1. L'atome
2. Les éléments
3. Le noyau
4. Les isotopes
5. La carte des noyaux
6. Les radioactivités

### 3. Les Modèles en physique nucléaire

1. La grande question
2. Les difficultés
3. La carte des noyaux des modèles
4. Exemple de modèle macroscopique
5. Exemple de modèle microscopique
6. Comment sonder un modèle ?
7. Le modèle de la goutte liquide est-il démodé ?

# 1. Un peu d'histoire – 1.1 La découverte de l'atome



Démocrite  
460 - 370 av JC

**450 av JC**  
« On doit supposer l'existence  
d'éléments réels, indivisibles et  
insécables appelés donc atomes »

- Atome = indivisible en grec



John Dalton  
1766 - 1844

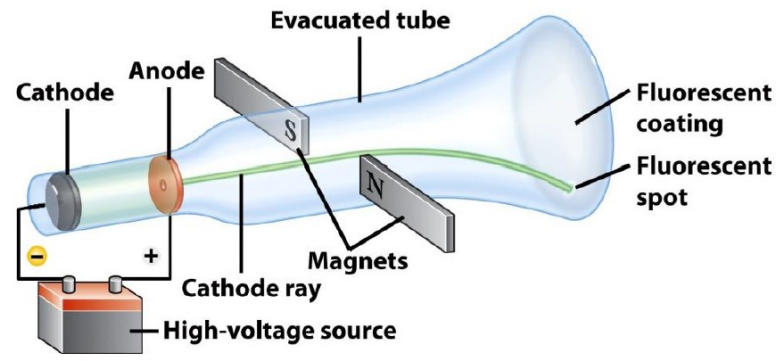
1803

- Observation de Dalton : 2 gaz se combinent toujours dans les mêmes proportions de poids
- Conclusions de Dalton :
  - La matière est composée d'atomes
  - Les atomes d'un même élément sont identiques
  - Des éléments différents ont des atomes distincts
  - Les atomes se combinent dans des rapports simples pour former de nouveaux composés

# 1. Un peu d'histoire – 1.1 La découverte de l'atome

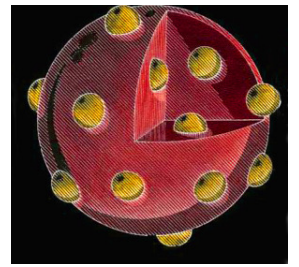
1895

Jean Perrin démontre que les rayons cathodiques sont des particules chargées négativement



1897

- Expérience de Thomson : mesure le rapport charge/masse des particules composant les rayons cathodiques
- Observation de Thomson : ce rapport ne varie pas quelques soient les matériaux/gaz utilisés
- Conclusion de l'expérience de Thomson :
  - Les rayons cathodiques sont composés de corpuscules qui proviennent de l'intérieur des atomes
  - Chargés négativement, ils ont une masse mille fois plus faible que celle de l'hydrogène
- **Modèle atomique de Thomson = modèle « plum pudding »** : l'atome est composé d'électrons plongés dans une « soupe » de charge positive pour équilibrer la charge négative des électrons



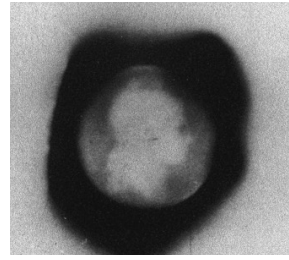
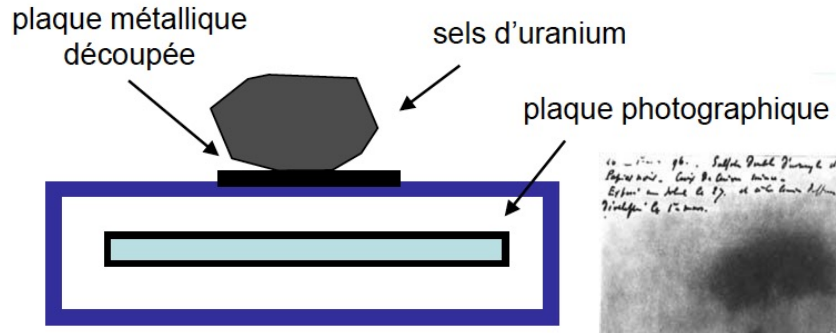
# 1. Un peu d'histoire – 1.2 La découverte de la radioactivité

1896

- Röntgen vient de découvrir les rayons X



- Expérience de Becquerel



**Henri Becquerel**  
1852 - 1908

- Observation de Becquerel : observation d'une image sur les plaques photographiques même quand le dispositif est à l'abri de la lumière dans un tiroir
- Conclusion de l'expérience de Becquerel : le sel d'uranium émet un rayonnement qui est indépendant de la fluorescence de l'uranium. L'uranium émet spontanément ces rayonnements pénétrants qu'il y ait ou non exposition à la lumière.



# 1. Un peu d'histoire – 1.3 La découverte du noyau

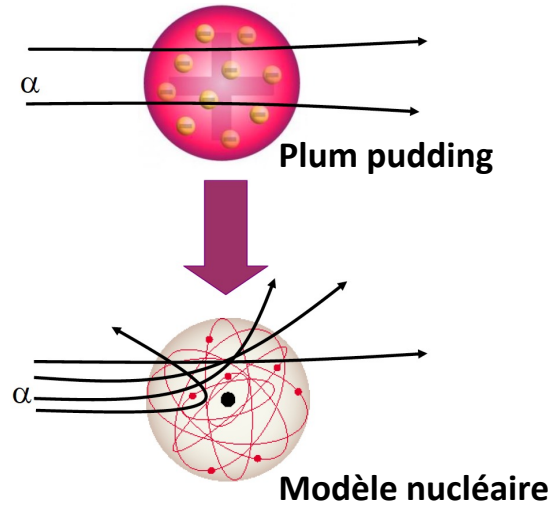
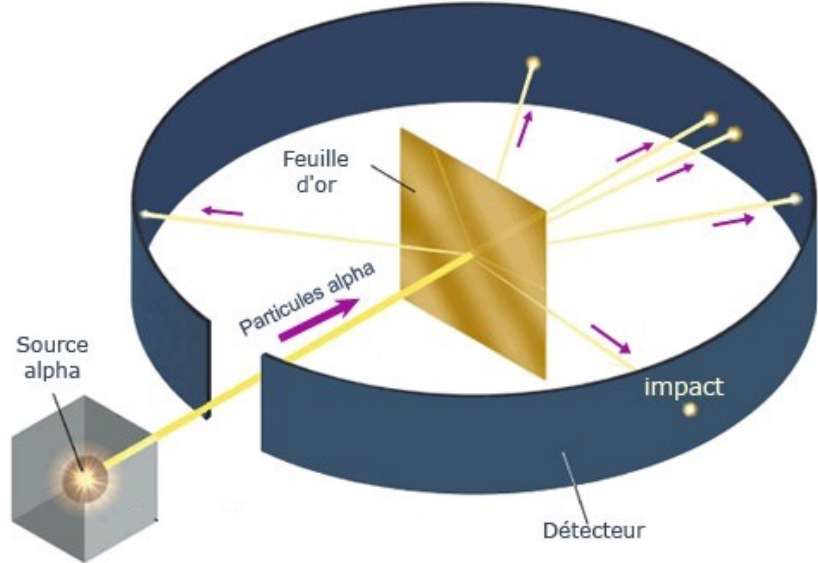


« C'est aussi peu croyable que si nous avons tiré un obus sur du papier de soie et que l'obus nous soit revenu en plein figure »

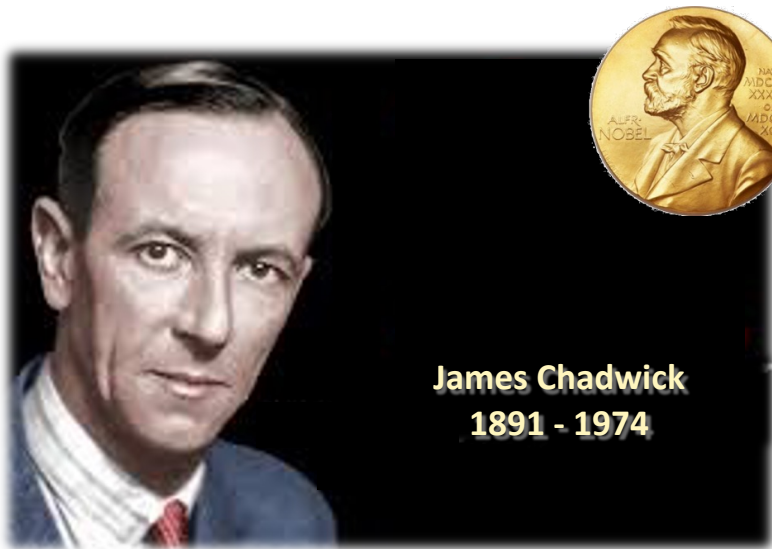
1911

- Observations de Rutherford :
  - La plupart des  $\alpha$  traversent la feuille d'or sans déviation
  - Plusieurs  $\alpha$  sont légèrement déviées
  - Certaines  $\alpha$  rebondissent vers la source comme si elles avaient frappées un mur
- **Modèle proposé par Rutherford = modèle nucléaire**
  - L'atome offre des espaces vides immenses
  - Le centre de l'atome, qu'il nomme « noyau » est minuscule, dense et chargé positivement
  - Les électrons négatifs circulent autour du noyau et sont retenus au noyau par des forces électriques

Expérience de Rutherford



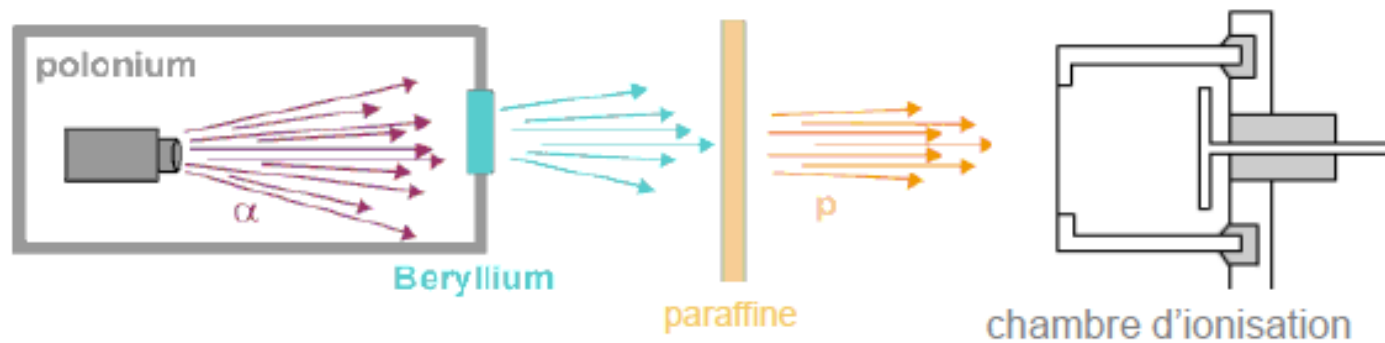
# 1. Un peu d'histoire – 1.4 La découverte du neutron



**James Chadwick**  
1891 - 1974

**1932**

- Expérience de Chadwick : bombardement d'une cible légère par des particules alpha
- Observation : Emission d'un rayonnement très pénétrant qui peut éjecter des noyaux (proton, hélium...) d'un écran (à noter les travaux antérieurs de Bothe/Becker et Irène Curie/Frédéric Joliot)
- Identification d'une nouvelle particule neutre de masse comparable à celle du proton : le **neutron**



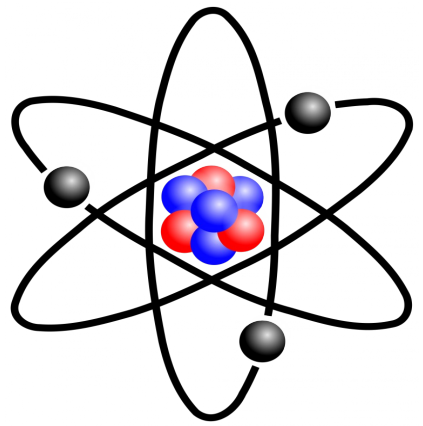


## Cours de physique nucléaire 1/3

### Le paysage de la physique nucléaire

1. Un peu d'histoire
  1. La découverte de l'atome
  2. La découverte de la radioactivité
  3. La découverte du noyau
  4. La découverte du neutron
2. **Le noyau atomique**
  1. L'atome
  2. Les éléments
  3. Le noyau
  4. Les isotopes
  5. La carte des noyaux
  6. Les radioactivités
3. Les Modèles en physique nucléaire
  1. La grande question
  2. Les difficultés
  3. La carte des noyaux des modèles
  4. Exemple de modèle macroscopique
  5. Exemple de modèle microscopique
  6. Comment sonder un modèle ?
  7. Le modèle de la goutte liquide est-il démodé ?

# 2. Le noyau atomique – 2.1 L'atome



- Les **électrons** forment un nuage autour du noyau. Ils sont liés par la force Coulombienne. Distance électron - noyau  $\sim 10^{-10}$  m
- Le **noyau**, très petit, est formé de **protons** et de **neutrons**. Cohésion du noyau grâce à l'interaction forte. Dimension  $\sim 10^{-15}$  m
- Masse proton  $\sim$  masse neutron =  $1.7 \times 10^{-27}$  kg  
Masse électron =  $9.1 \times 10^{-31}$  kg (2000 fois plus faible)
- Un élément est caractérisé par son nombre de protons

## La matière est vide !!!

Si on grossit trois mille milliard de fois un atome d'hydrogène...

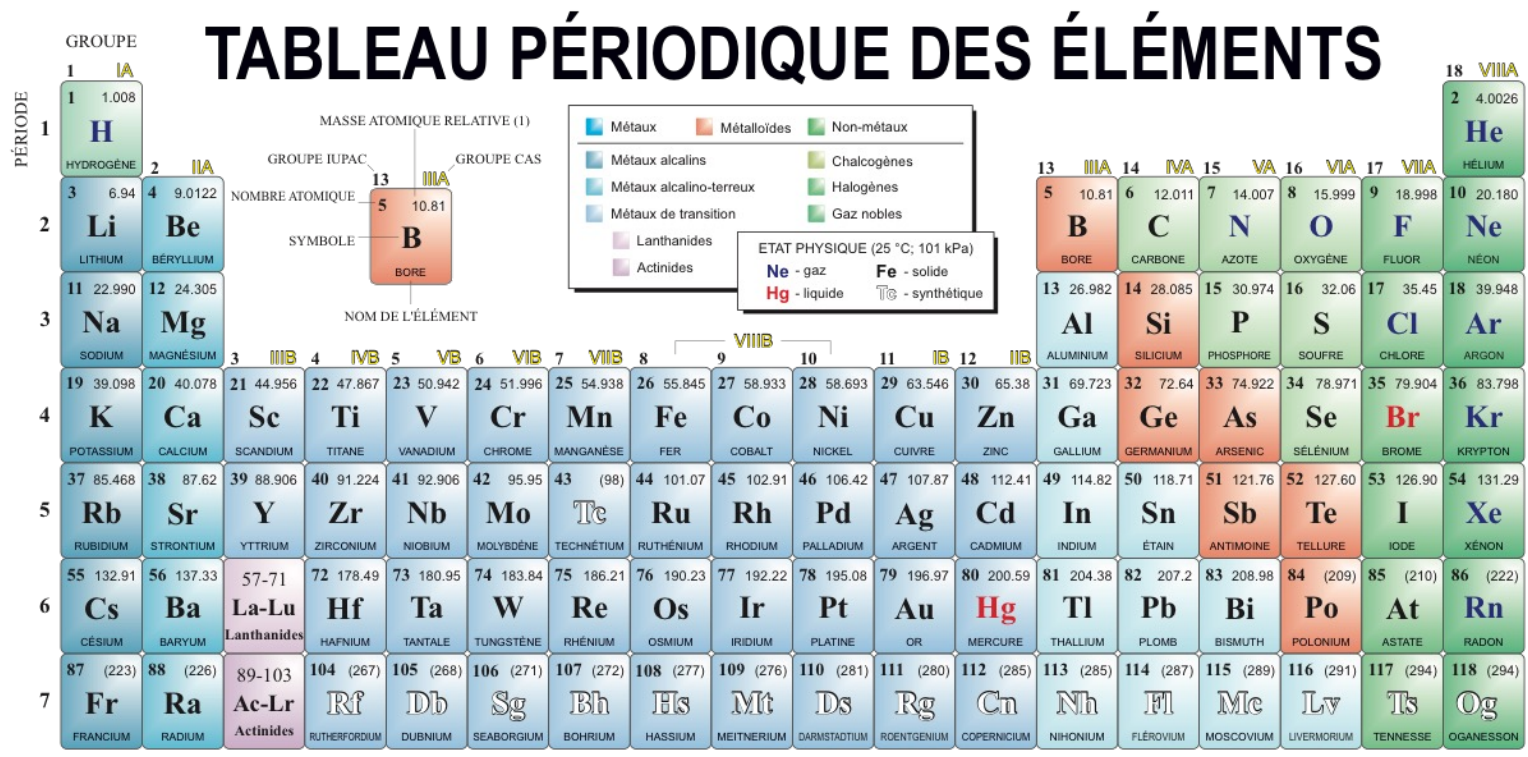


Le noyau (1 proton)



Orbite de l'électron  
diamètre  $\sim 300$  m

# 2. Le noyau atomique – 2.2 Les éléments



(1) Atomic weights of the elements 2013, Pure Appl. Chem., 88, 265-291 (2016)

Copyright © 2017 Eni Generali

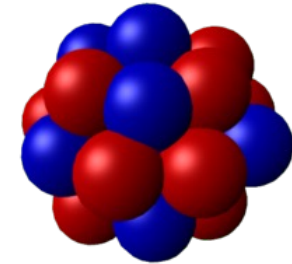
LANTHANIDES													
57 138.91 <b>La</b> LANTHANE	58 140.12 <b>Ce</b> CÉRIUM	59 140.91 <b>Pr</b> PRASÉODYME	60 144.24 <b>Nd</b> NÉODYME	61 (145) <b>Pm</b> PROMÉTHIUM	62 150.36 <b>Sm</b> SAMARIUM	63 151.96 <b>Eu</b> EUROPIUM	64 157.25 <b>Gd</b> GADOLINIUM	65 158.93 <b>Tb</b> TERBIUM	67 164.93 <b>Dy</b> DYSPROSIUM	68 167.26 <b>Ho</b> HOLMIUM	69 168.93 <b>Er</b> ERBIUM	70 173.05 <b>Tm</b> THULIUM	71 174.97 <b>Lu</b> LUTÉTIUM

ACTINIDES														
89 (227) <b>Ac</b> ACTINIUM	90 232.04 <b>Th</b> THORIUM	91 231.04 <b>Pa</b> PROTACTINIUM	92 238.03 <b>U</b> URANIUM	93 (237) <b>Np</b> NEPTUNIUM	94 (244) <b>Pu</b> PLUTONIUM	95 (243) <b>Am</b> AMÉRICIUM	96 (247) <b>Cm</b> CURIUM	97 (247) <b>Bk</b> BERKÉLIUM	98 (251) <b>Cf</b> CALIFORNIUM	99 (252) <b>Es</b> EINSTEINIUM	100 (257) <b>Fm</b> FERMIUM	101 (258) <b>Md</b> MENDELÉVIUM	102 (259) <b>No</b> NOBÉLIUM	103 (262) <b>Lr</b> LAWRENCIUM

## 2. Le noyau atomique– 2.3 Le noyau

---

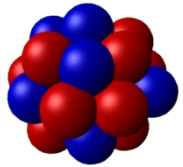
- Le noyau de l'atome est composé de **Z protons** + **N neutrons** :
  - Les protons et les neutrons sont appelés les **nucléons**
  - **Z** est appelé **numéro atomique**, il est caractéristique de l'élément
  - **A = Z + N** est appelé **nombre de masse**



- Classification des noyaux
  - **Isotope** : noyau de même Z, mais N différent  
Exemple : l'hydrogène  ${}^1\text{H}$  ( $Z = 1, N = 0$ ), le deutérium D ou  ${}^2\text{H}$  ( $Z = 1, N = 1$ ) et le tritium T ou  ${}^3\text{H}$  ( $Z = 1, N = 2$ ), sont des isotopes de l'hydrogène
  - **Isotone** : noyau de même N, mais Z différent
  - **Isobare** : noyau de même A, mais Z et N différents

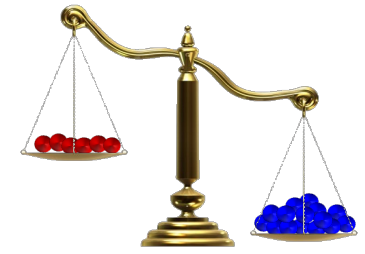
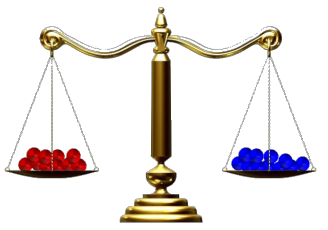
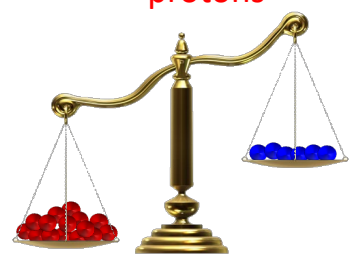
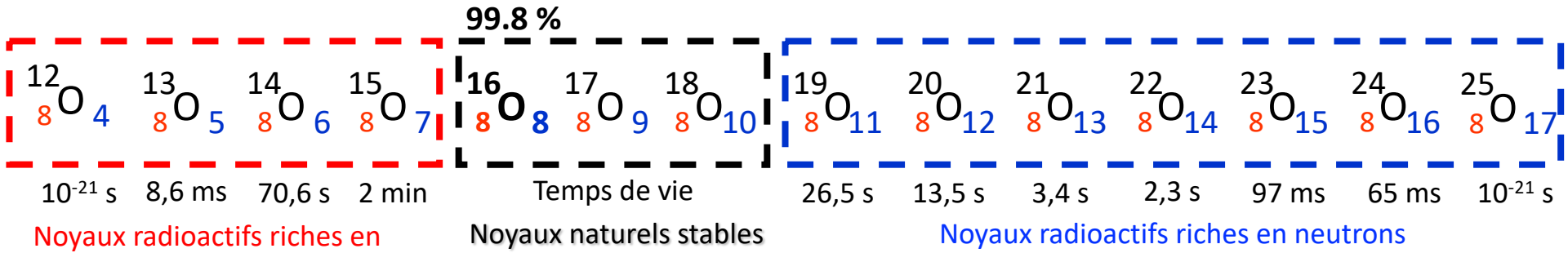
# 2. Le noyau atomique – 2.4 Les isotopes

- Nombre de protons et de neutrons dans un noyau :
  - Un élément est caractérisé par son nombre de **protons Z**
  - Qu'en est-il du nombre de **neutrons N**? Un noyau stable a globalement autant de neutrons que de protons



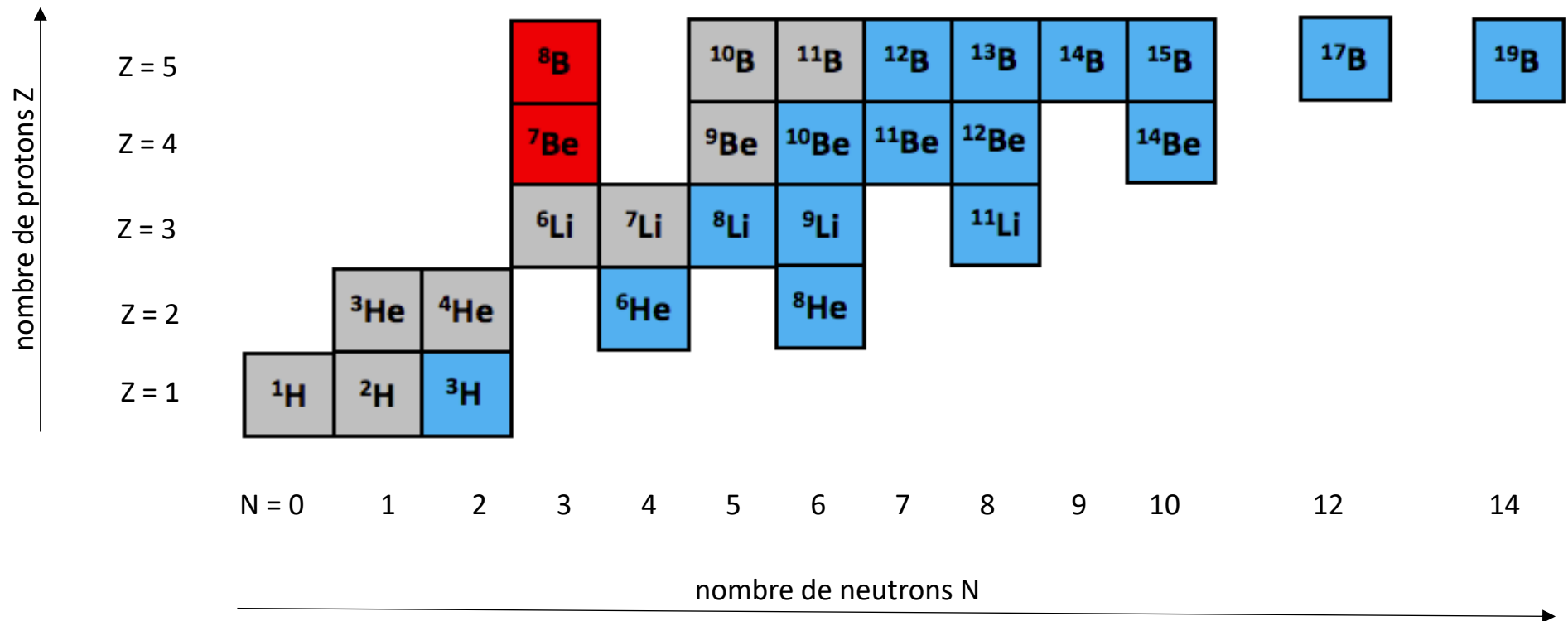
Ex noyau d'oxygène  $^{16}\text{O}$  :  
**8 protons + 8 neutrons**

- Stabilité d'un noyau :
    - Un **noyau radioactif** se désintègre en un autre élément spontanément, au bout d'un temps caractérisé par sa **durée de vie**
    - Un **noyau stable** ne présente pas de radioactivité détectable
- Suivant le nombre de neutrons, le noyau sera stable ou radioactif  
 La durée de vie sera d'autant plus courte que le déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons est important



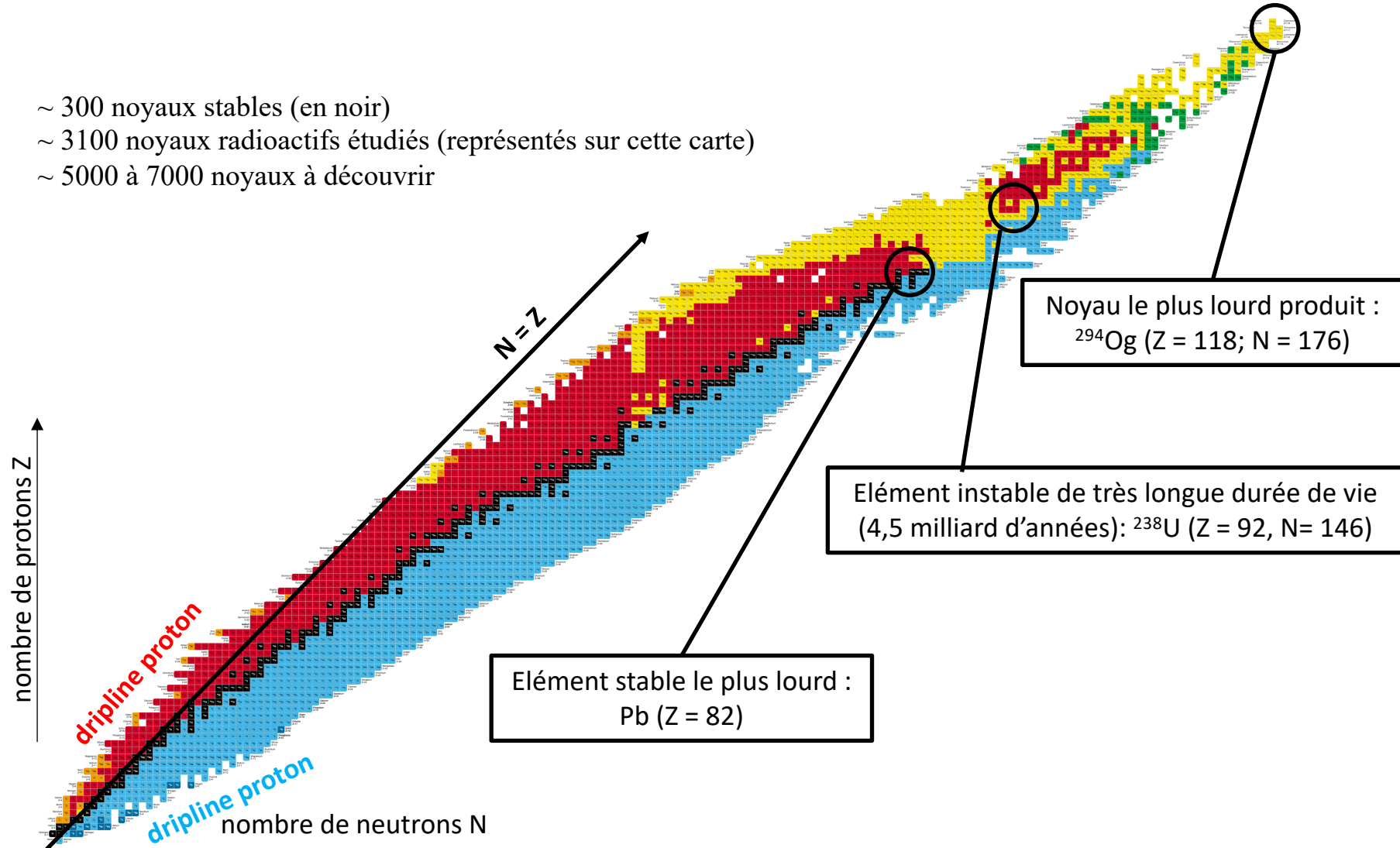
# 2. Le noyau atomique – 2.5 La carte des noyaux

- Chaque élément aura des isotopes stables (gris), des isotopes radioactifs riches en protons (rouge) et des isotopes radioactifs riches en neutrons (bleu)

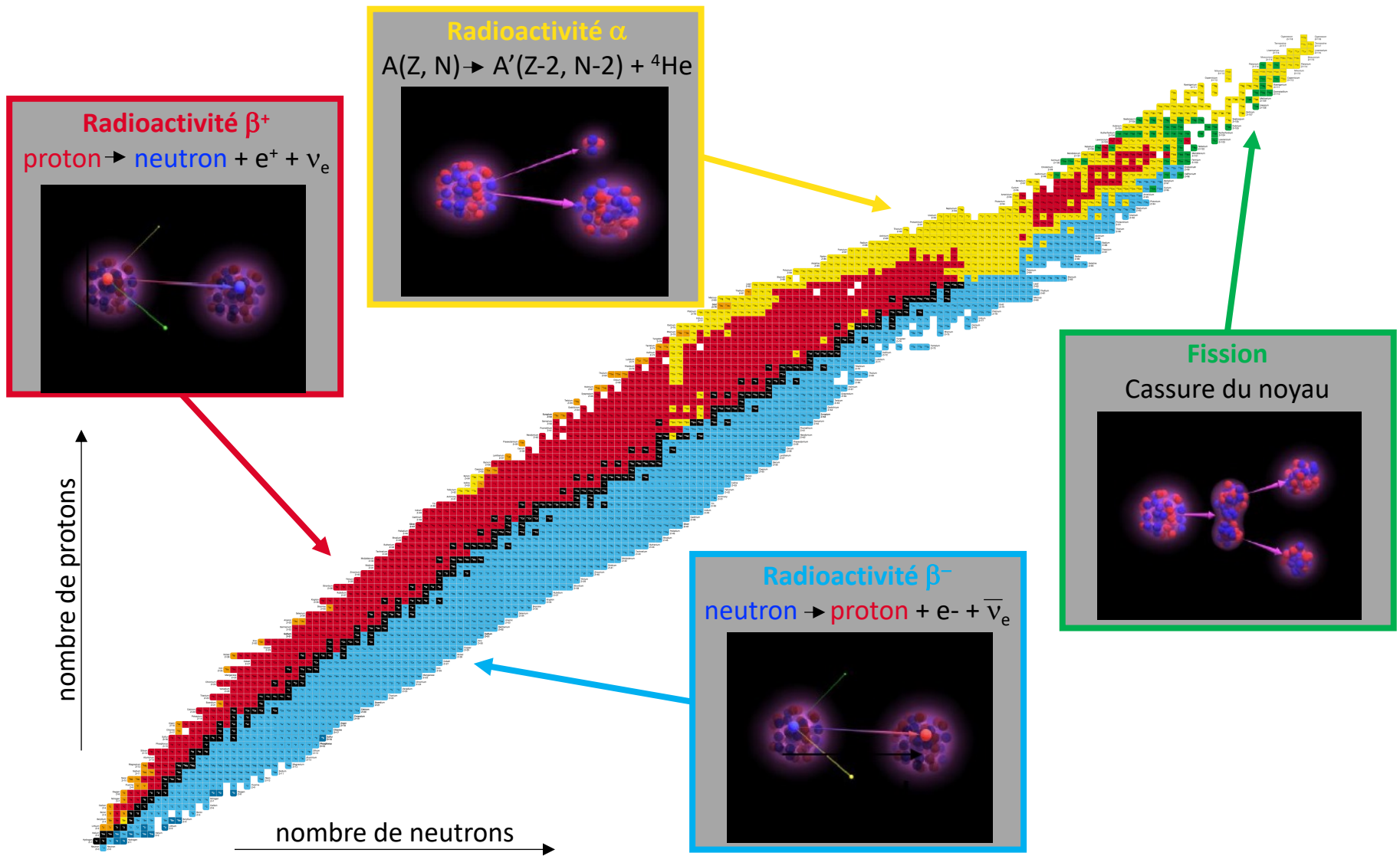


# 2. Le noyau atomique – 2.5 La carte des noyaux

- ~ 300 noyaux stables (en noir)
- ~ 3100 noyaux radioactifs étudiés (représentés sur cette carte)
- ~ 5000 à 7000 noyaux à découvrir



# 2. Le noyau atomique – 2.6 Les radioactivités





# 3. Le noyau atomique

---

**Résumé : film « la vallée de stabilité »**

## Cours de physique nucléaire 1/3 Le paysage de la physique nucléaire

1. Un peu d'histoire
  1. La découverte de l'atome
  2. La découverte de la radioactivité
  3. La découverte du noyau
  4. La découverte du neutron
2. Le noyau atomique
  1. L'atome
  2. Les éléments
  3. Le noyau
  4. Les isotopes
  5. La carte des noyaux
  6. Les radioactivités
3. **Les Modèles en physique nucléaire**
  1. La grande question
  2. Les difficultés
  3. La carte des noyaux des modèles
  4. Exemple de modèle macroscopique
  5. Exemple de modèle microscopique
  6. Comment sonder un modèle ?
  7. Le modèle de la goutte liquide est-il démodé ?

## 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.1 La grande question



Structure du noyau

...

Astrophysique nucléaire

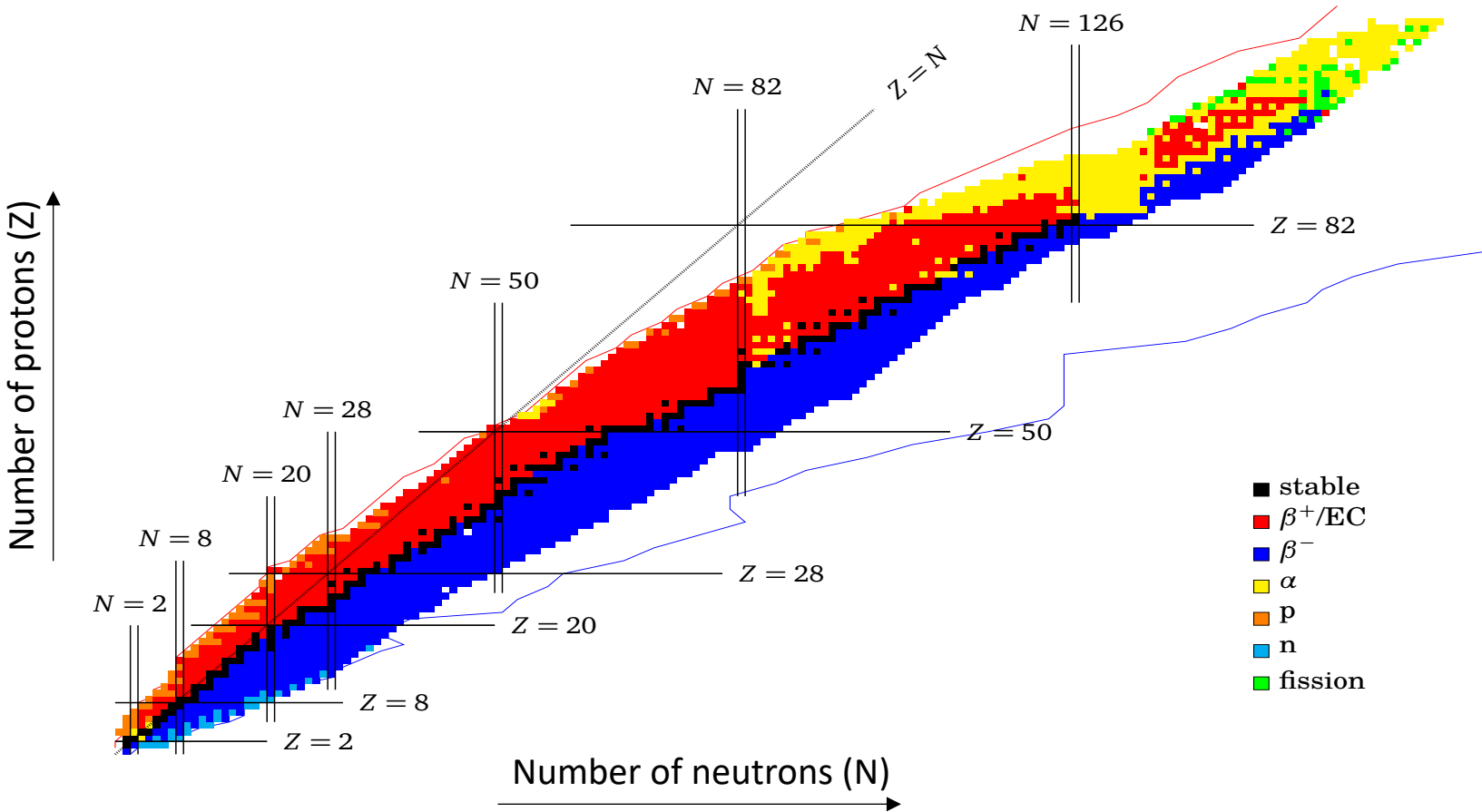
...

Mécanismes de réaction

- Notre travail en tant que chercheur en physique nucléaire fondamentale : pousser le noyau dans ses retranchements pour observer les manifestations de cette interaction forte dans le noyau et pouvoir la caractériser
- Principales difficultés : système à  $N$  corps + système mésoscopique

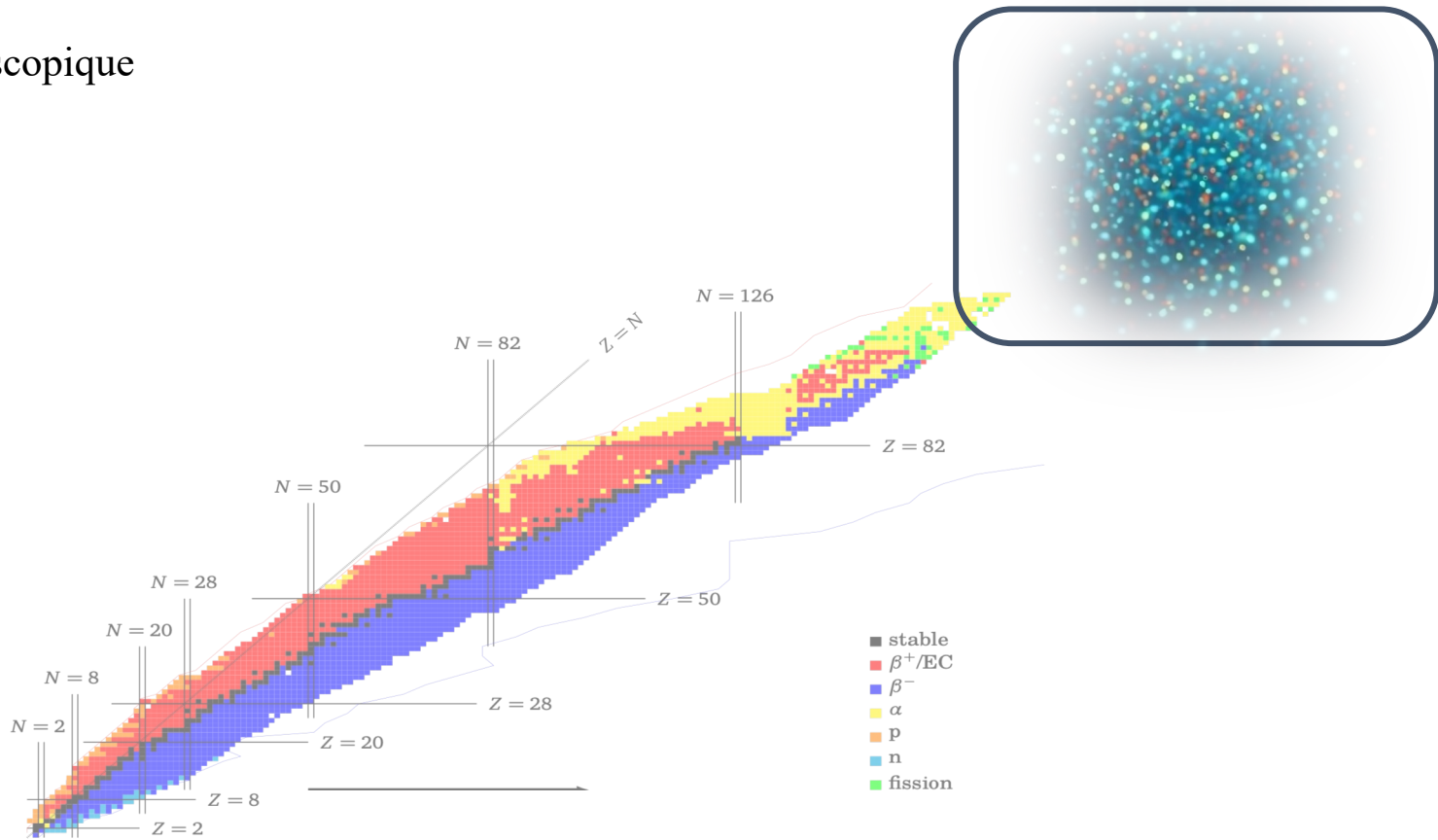
# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.2 Les difficultés

1) Une combinaison de p protons et n neutrons



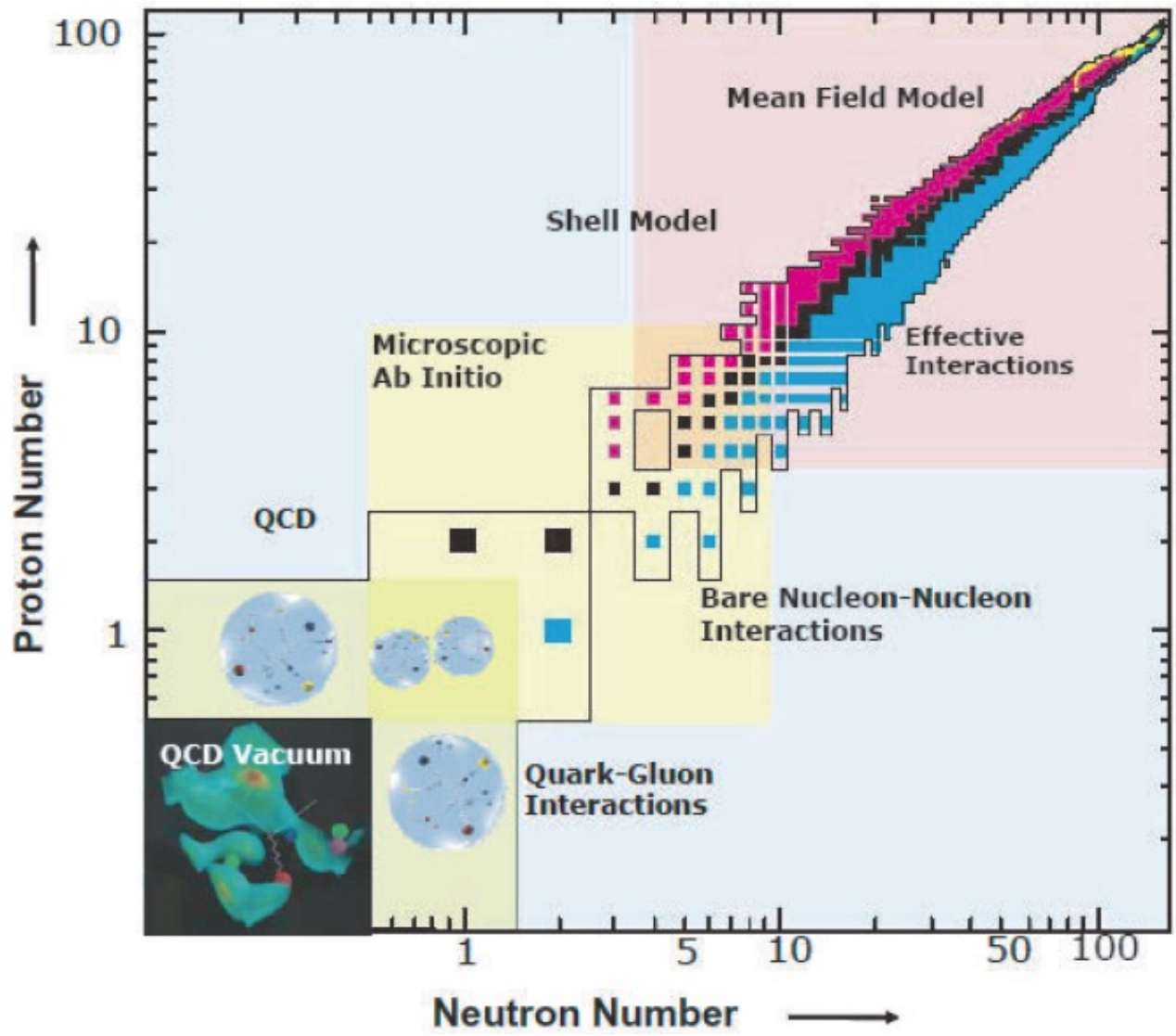
# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.2 Les difficultés

## 2) Un système mésoscopique



<p>masse → +2.3 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 2/3</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>u</b></p> <p>up</p>	<p>masse → +1.275 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 2/3</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>c</b></p> <p>charm</p>	<p>masse → +173.07 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 2/3</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>t</b></p> <p>top</p>	<p>masse → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b>g</b></p> <p>gluon</p>	<p>masse → +126 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 0</p> <p><b>H</b></p> <p>boson de Higgs</p>
<p>masse → +4.3 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → -1/3</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>d</b></p> <p>down</p>	<p>masse → +95 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → -1/3</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>s</b></p> <p>strange</p>	<p>masse → +4.18 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → -1/3</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>b</b></p> <p>bottom</p>	<p>masse → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b>γ</b></p> <p>photon</p>	
<p>masse → 0.511 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → -1</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>e</b></p> <p>électron</p>	<p>masse → 105.7 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → -1</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>μ</b></p> <p>muon</p>	<p>masse → 1.777 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → -1</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>τ</b></p> <p>tau</p>	<p>masse → 91.2 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b>Z</b></p> <p>boson Z<sup>0</sup></p>	<p><b>BOSONS DE JAUGE</b></p>
<p>masse → &lt;2.2 eV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>ν<sub>e</sub></b></p> <p>neutrino électronique</p>	<p>masse → &lt;0.17 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>ν<sub>μ</sub></b></p> <p>neutrino muonique</p>	<p>masse → &lt;15.5 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1/2</p> <p><b>ν<sub>τ</sub></b></p> <p>neutrino tauique</p>	<p>masse → 80.4 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>charge → ±1</p> <p>spin → 1</p> <p><b>W</b></p> <p>boson W<sup>±</sup></p>	

# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.3 La carte des noyaux des modèles

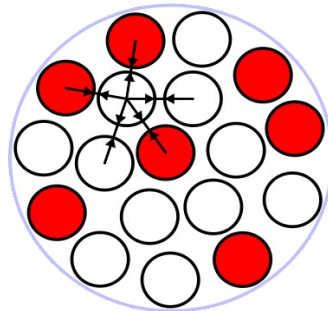


# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.4 Exemple de modèle macroscopique

Le modèle de la goutte liquide

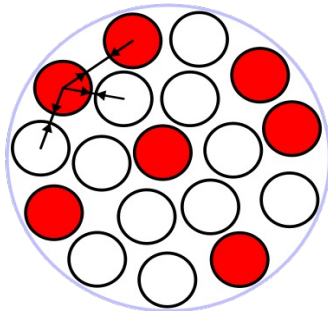


$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \delta(A, Z)$$



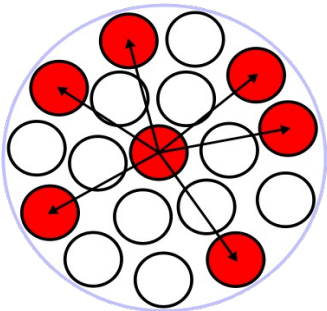
Volume

Pas de compression des nucléons



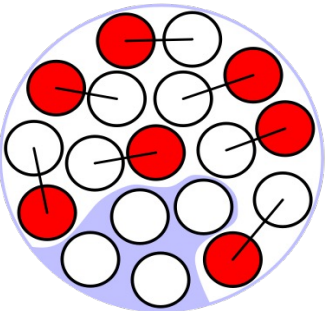
Surface

Nucléons à la surface ont moins de liaisons



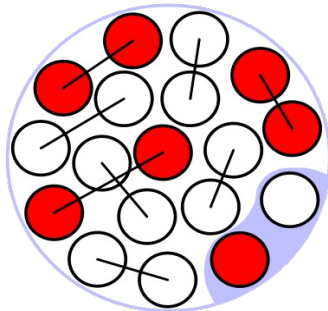
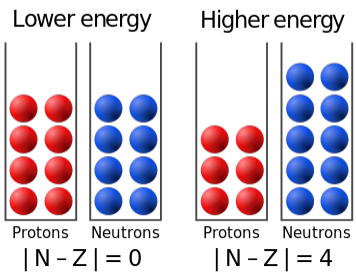
Coulomb

Répulsion coulombienne



Asymmetry

$A - 2Z = N - Z$   
 $A = 16$



Pairing

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} +\delta_0 & Z, N \text{ pair} \\ 0 & A \text{ impair} \\ -\delta_0 & Z, N \text{ impair} \end{cases}$$

# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.4 Exemple de modèle macroscopique

- Succès du modèle de la goutte liquide

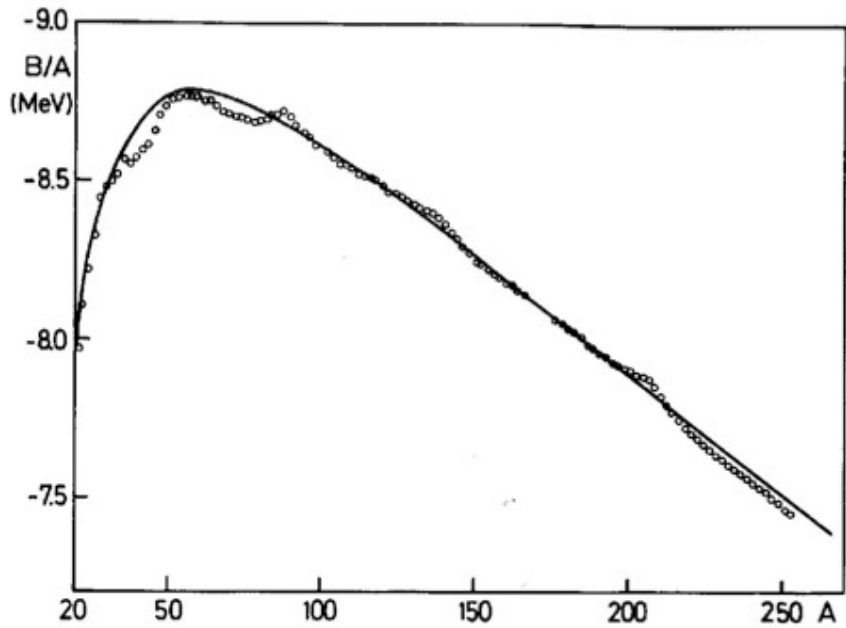
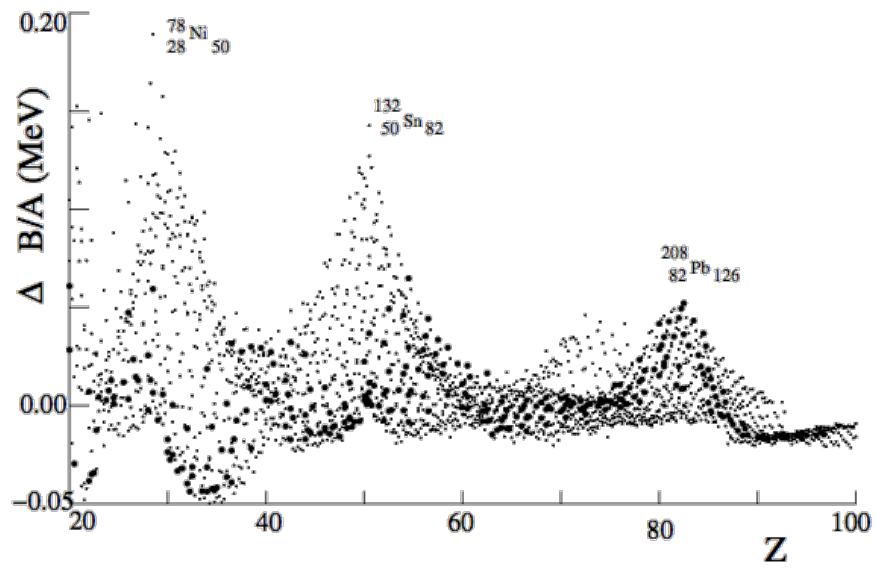


Figure 1.2. Experimental values of  $B/A$  for  $\beta$ -stable odd- $A$  ( $\circ$ ) nuclei and the calculated curve using a mass formula similar to Eq. (1.4). (From [Ho 75].)

- Valeurs expérimentales
- Courbe calculée avec la formule de la goutte liquide

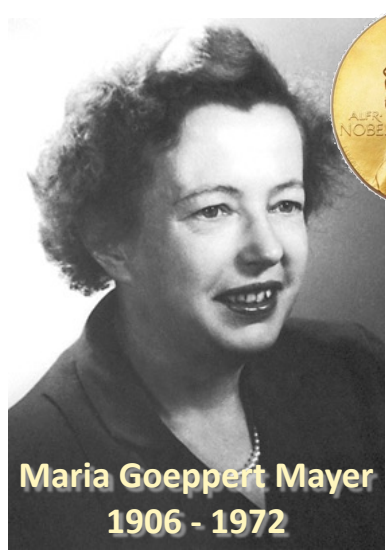
- Limite du modèle de la goutte liquide



Ne tient pas compte des effets de structure liés à la **nature quantique du noyau** (ex : existence des noyau superlourds)



# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.5 Exemple de modèle microscopique



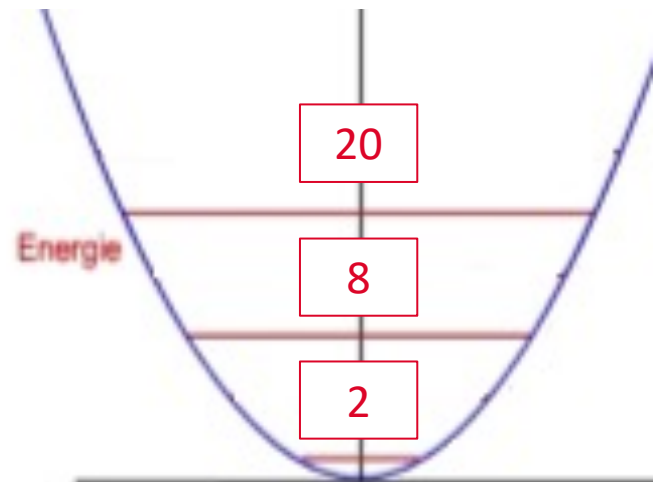
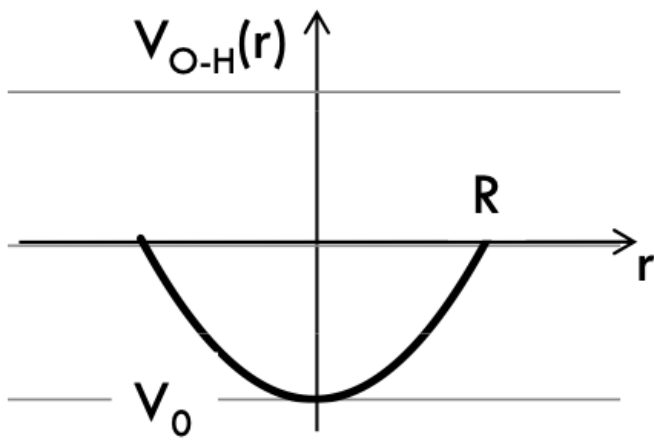
Dans les années 1950, M. Goeppert Mayer remarque que les noyaux ayant un nombre de neutrons et/ou de protons égal à 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 sont relativement plus abondants que leurs voisins  
Naissance du modèle en couche

- Quel potentiel d'interaction ?  
Transformation du problème à A corps en A problèmes à 1 corps.  
Approximation du champs moyen : les nucléons sont indépendants les uns des autres. Ils sont chacun soumis à un potentiel moyen généré par l'ensemble des nucléons.

L'oscillateur harmonique 3D

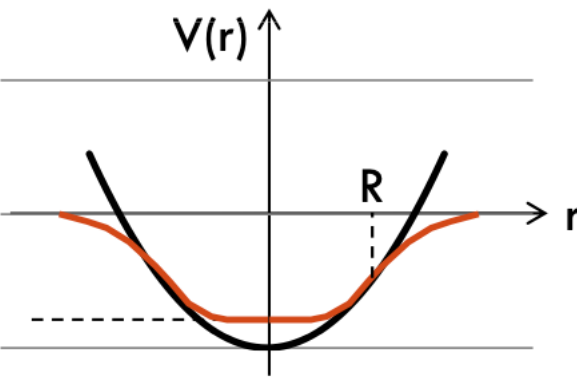


Energies propres / niveaux d'énergie  
 $E_N = (N+3/2) \hbar\omega$

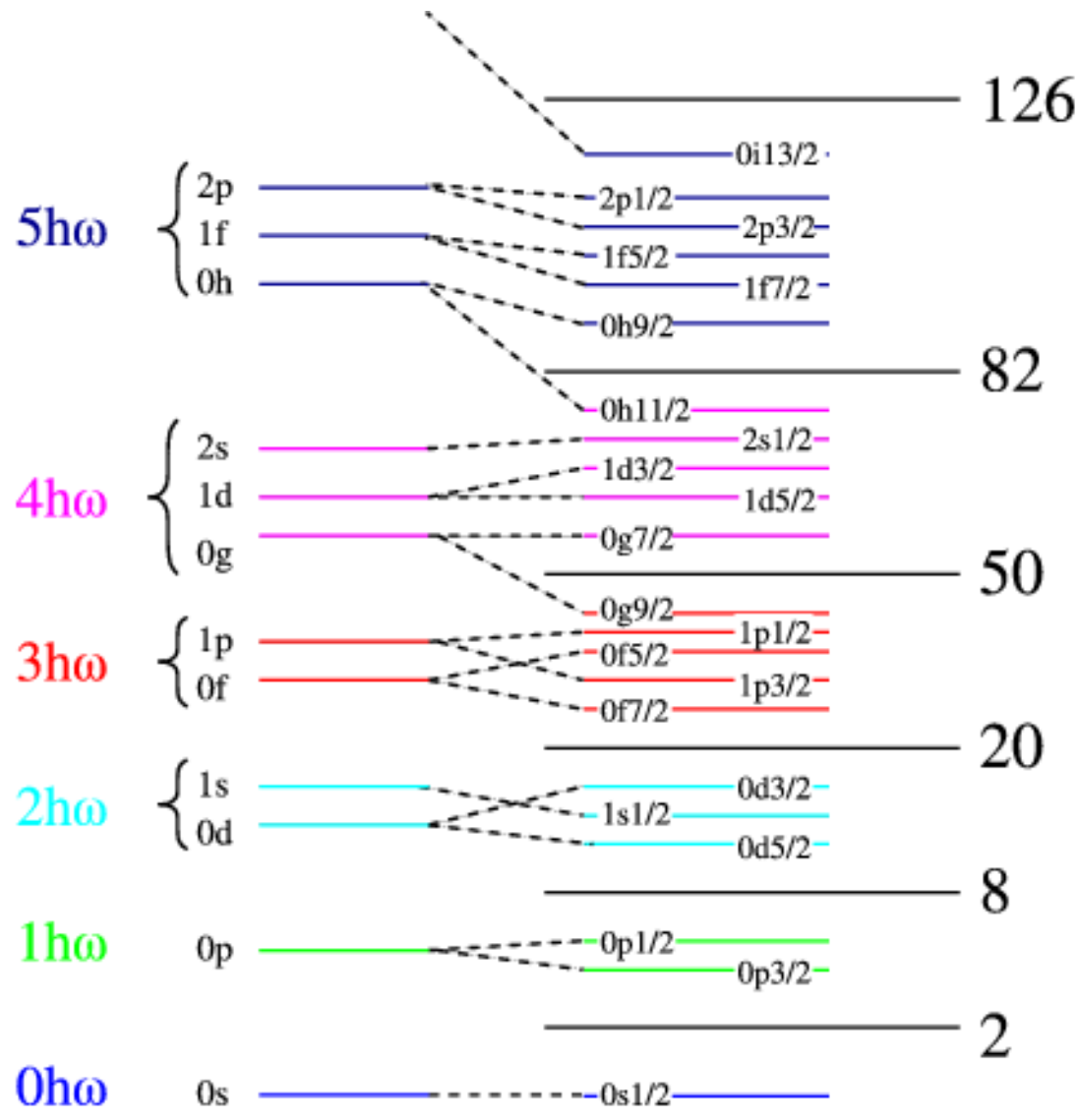
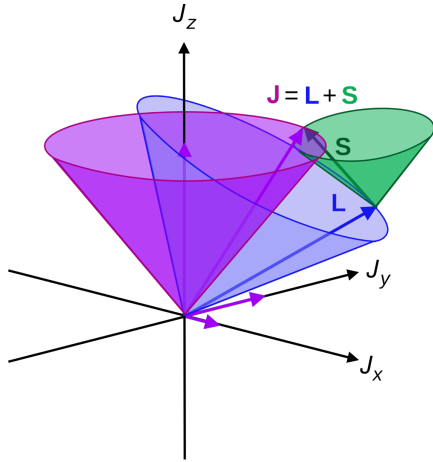


# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.5 Exemple de modèle microscopique

Vers un potentiel plus réaliste :  
le potentiel de Wood Saxon  
(bords diffus)



Ajout d'un terme inspiré de la  
physique atomique :  
L'interaction de spin-orbite

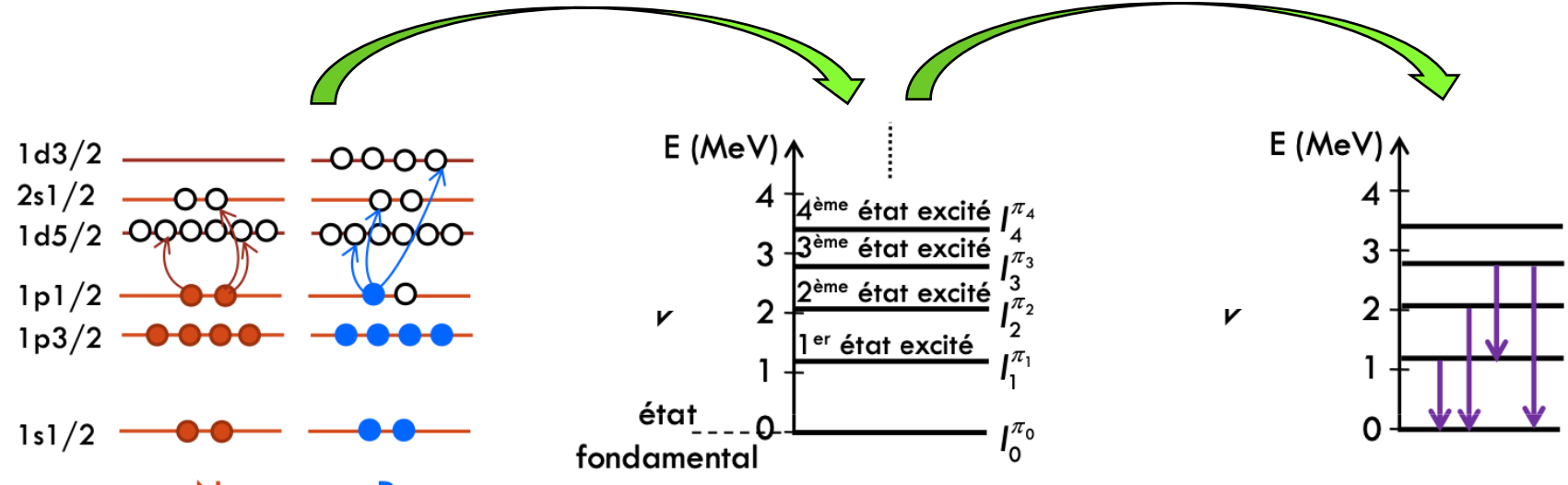


# 4. Les modèles en physique nucléaire – 4.6 Comment sonder un modèle ?

- Mesure des propriétés de l'état fondamental : masse, spin, rayon de charge, propriétés de décroissance ....
- Mesure des propriétés des états excités :

**Excitation du noyau**  
(individuelles ou collectives)  
lors d'une réaction nucléaire  
par exemple

**Déexcitation du noyau**  
Par émission de photons  $\gamma$   
par exemple  
( $E_\gamma = E_f - E_i$  de qq dizaines de keV à qq MeV)



On va chercher à mesurer les énergies, spin .... pour remonter aux propriétés des états individuels

**... et ainsi tester le modèle (et donc l'interaction nucléon-nucléon !)**

Article

## Smooth trends in fermium charge radii and the impact of shell effects

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08062-z>  
Received: 20 December 2023  
Accepted: 17 September 2024  
Published online: 30 October 2024  
Open access  
Check for updates

Jessica Warbinek<sup>1,2,3,26</sup>✉, Elisabeth Rickert<sup>1,2,3</sup>, Sebastian Raeder<sup>1,3</sup>✉,  
Thomas Albrecht-Schönzart<sup>4</sup>, Brankica Andelic<sup>1,3,5</sup>, Julian Auler<sup>2</sup>, Benjamin Bally<sup>6</sup>,  
Michael Bender<sup>7</sup>, Sebastian Berndt<sup>8</sup>, Michael Block<sup>1,2,3</sup>, Alexandre Brizard<sup>9</sup>, Pierre Chauveau<sup>13</sup>,  
Bradley Cheal<sup>9</sup>, Premaditya Chhetri<sup>1,3,10</sup>, Arno Claessens<sup>10</sup>, Antoine de Roubin<sup>10</sup>,  
Charlie Devlin<sup>9</sup>, Holger Dorrer<sup>2</sup>, Christoph E. Düllmann<sup>1,2,3</sup>, Julie Ezold<sup>10</sup>, Rafael Ferrer<sup>10</sup>,  
Vadim Gadelshin<sup>9</sup>, Alyssa Gaiser<sup>13,14</sup>, Francesca Giacompo<sup>1,3</sup>, Stephane Goriely<sup>15</sup>,  
Manuel J. Gutiérrez<sup>1,3</sup>, Ashley Harvey<sup>11</sup>, Raphael Hasse<sup>12</sup>, Reinhard Heinke<sup>12</sup>,  
Fritz-Peter Heßberger<sup>1</sup>, Stephane Hilaire<sup>16,17</sup>, Magdalena Kaja<sup>2</sup>, Oliver Kaleja<sup>1,18</sup>,  
Tom Kieck<sup>1,2,3</sup>, EunKang Kim<sup>7</sup>, Nina Kneip<sup>12</sup>, Ulli Köster<sup>19</sup>, Sandro Kraemer<sup>19</sup>,  
Mustapha Laatiaoui<sup>7</sup>, Jeremy Lantis<sup>7</sup>, Nathalie Leacesne<sup>8</sup>, Andrea Tzeitel Loria Basto<sup>2,3</sup>,  
Andrew Kishor Mistry<sup>1,30,21</sup>, Christoph Mokry<sup>2,3</sup>, Iain Moore<sup>22</sup>, Tobias Murböck<sup>1,5</sup>,  
Danny Münzberg<sup>1,2,3</sup>, Witold Nazarewicz<sup>13,23</sup>, Thorben Niemeyer<sup>12</sup>, Steven Nothhelfer<sup>1,2,3</sup>,  
Sophie Péru<sup>16,17</sup>, Andrea Raggio<sup>25</sup>, Paul-Gerhard Reinhard<sup>24</sup>, Dennis Renisch<sup>2,3</sup>,  
Emmanuel Rey-Herme<sup>25</sup>, Jekabs Romans<sup>10</sup>, Elisa Romero Romero<sup>7</sup>, Jörg Runke<sup>1,2</sup>,  
Wouter Ryssens<sup>16</sup>, Hervé Savajols<sup>8</sup>, Fabian Schneider<sup>2</sup>, Joseph Sperling<sup>4</sup>, Matou Stemmler<sup>12</sup>,  
Dominik Studer<sup>1,3,2</sup>, Petra Thörle-Pospiech<sup>2,3</sup>, Norbert Trautmann<sup>2</sup>, Mitzi Urquiza-González<sup>26,27</sup>,  
Kenneth van Beek<sup>21</sup>, Shelley Van Cleve<sup>1</sup>, Piet Van Duppen<sup>10</sup>, Marine Vandebrouck<sup>25</sup>,  
Elise Verstraeten<sup>10</sup>, Thomas Walther<sup>21</sup>, Felix Weber<sup>12</sup> & Klaus Wend

J. Warbinek *et al.*, Nature 634, 1075 (2024)

