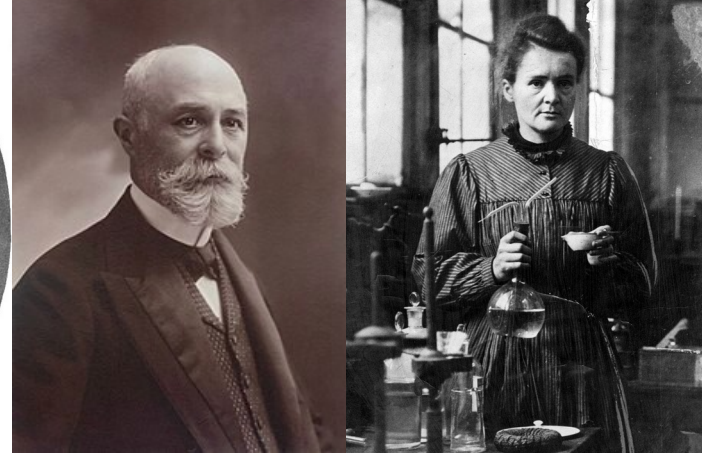


# Rayonnement et radioactivité

- Un peu d'histoire
- Rappels
- Stabilité du noyau
- Les différents types de radioactivité
- Applications



Wilhelm Röntgen



Henri Becquerel

Marie Skłodowska-Curie

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées  
Images : Wikipedia sauf mention contraire

## Notions utilisées :

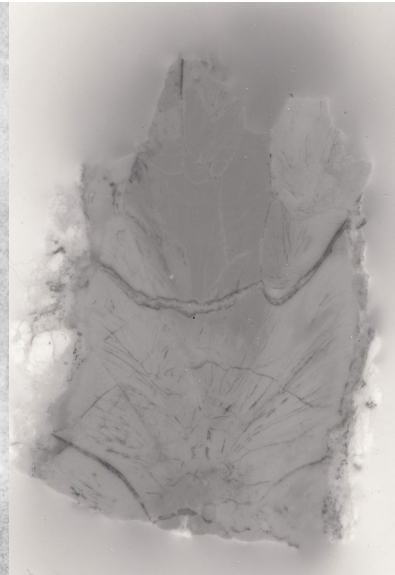
1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
8. Relativité restreinte
10. Mécanique quantique

# Un peu d'histoire

- 1895 : Röntgen découvre les « **rayons X** » (provoqués par un courant électrique), 1<sup>er</sup> prix Nobel de physique 1901
- 1896 : Lors de travaux suggérés par Poincaré, Becquerel découvre par hasard les « **rayons uraniques** », qui s'avèrent **différents des rayons X** (propriété intrinsèque)
- 1897 : Marie Curie choisit ce sujet pour son doctorat
  - Elle révèle les propriétés **ionisantes** de ce rayonnement
  - Elle découvre avec son époux Pierre Curie les **éléments chimiques** qui en sont à l'origine
  - Elle baptise ces rayons « **radioactivité** » (du latin *radius*, rayon)
- Prix Nobel de physique en 1903 pour Becquerel, Marie et Pierre Curie
- Marie Curie découvrira le **radium** et le **polonium**
  - Prix Nobel de chimie en 1911
- 1934 : Irène Curie et F. Joliot(-Curie) découvrent les **radioactivités induite et artificielle**
  - Prix Nobel de chimie en 1935



Photographie de la main d'Anna Bertha Ludwig Röntgen (déc 1895)

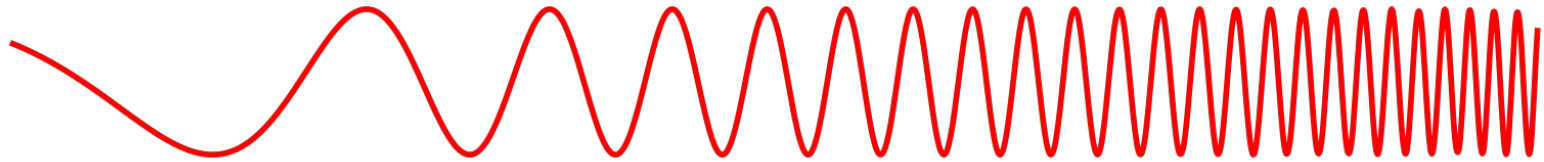
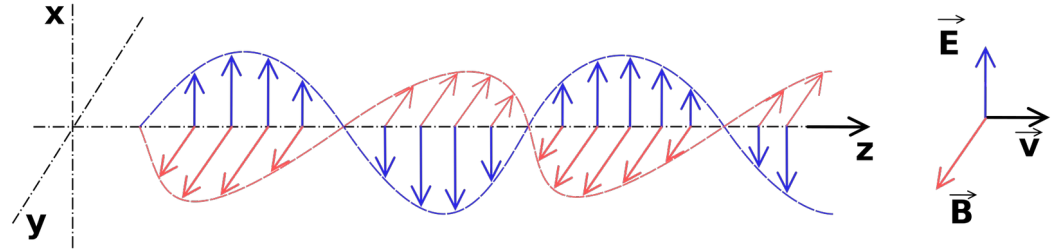


Papier photographique impressionné par le rayonnement de la pechblende

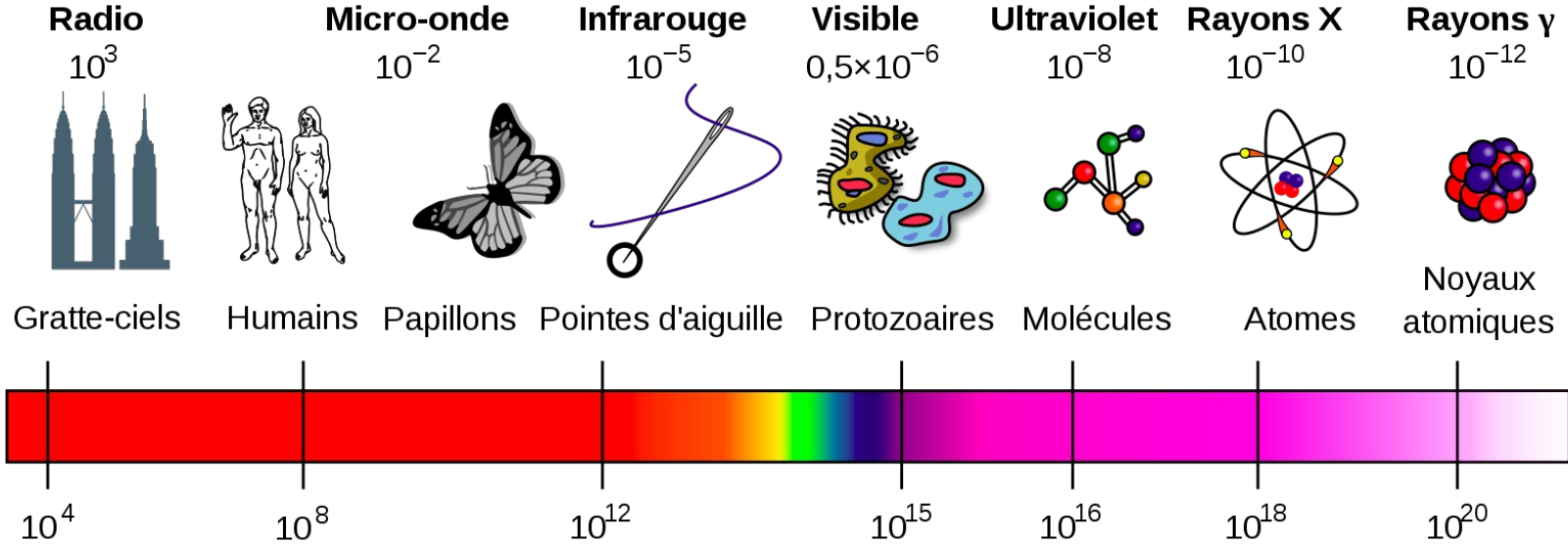
- **Radioactivité induite** : radioactivité d'un **corps jusque-là stable** consécutive à son exposition à un rayonnement
- **Radioactivité artificielle** : radioactivité des **radioisotopes créés artificiellement** en bombardant des éléments stables avec divers faisceaux de particules

# Rayonnements électromagnétiques

- Dualité onde-corpuscule :
  - Onde électromagnétique
  - Photon (« grain » de lumière)

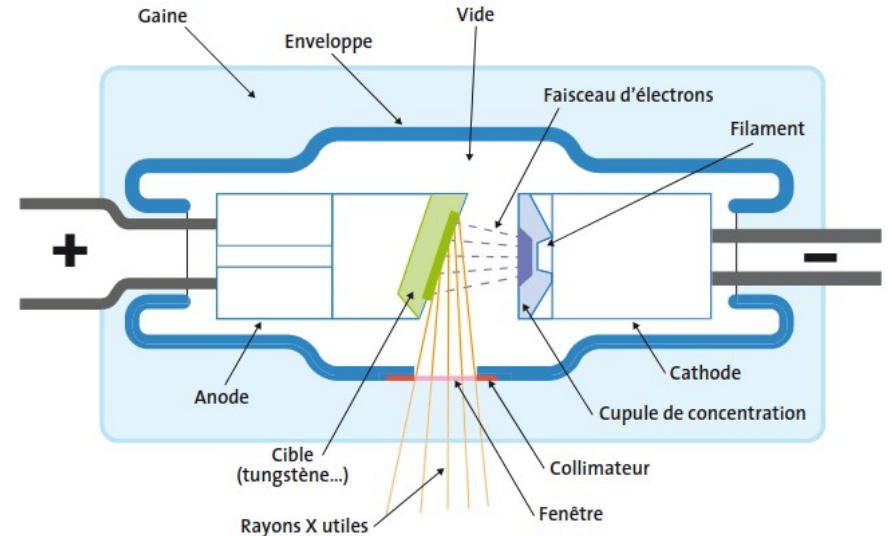


Type de rayonnement  
Longueur d'onde (m)  
Échelle approximative

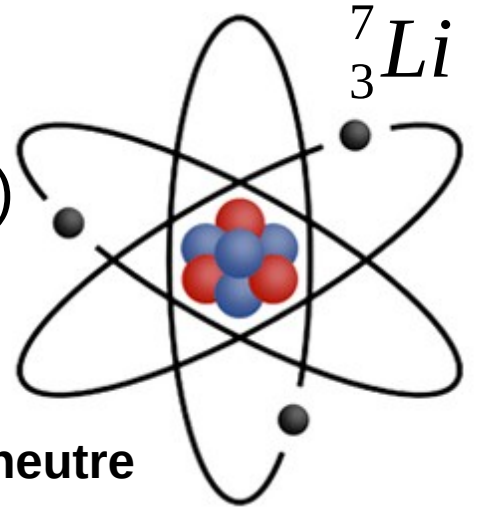


# Les rayons X

- Découverts en 1895 par Wilhelm Röntgen
  - X comme « inconnu »
  - Ce ne sont pas vraiment de la radioactivité
- Rayonnement électromagnétique à **haute fréquence**
  - « mous » ou « durs » selon leur énergie
  - Moins énergétiques que les rayons  $\gamma$  (mais recouvrement possible)
- Peuvent être :
  - naturels (cosmologie, astronomie)
  - artificiels : résultent
    - du bombardement d'électrons sur une cible
    - de changements d'orbites électroniques
    - du rayonnement synchrotron
- Propriété : ils traversent la matière en étant **progressivement absorbés** en fonction de la **densité** et de leur **énergie**
  - Radiographie (imagerie médicale et contrôle non destructif)
  - Utilisés en cristallographie
- Fenêtre d'observation de l'espace (« astronomie X »)
  - Astronomie optique, radioastronomie, astronomie gamma, ondes gravitationnelles, ...



# Structure de l'atome



Atome de lithium

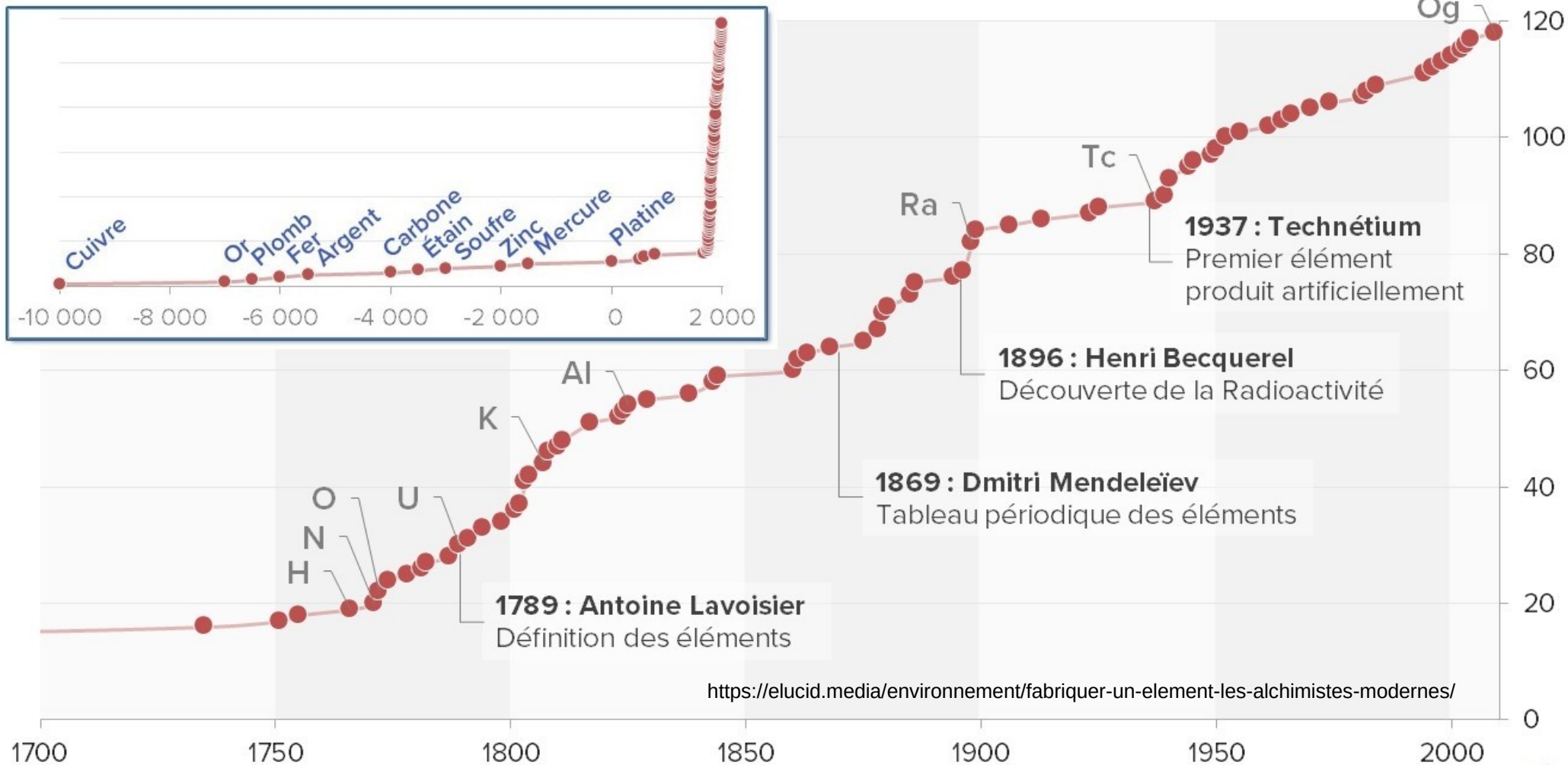
$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

- Un atome contient un **noyau** (+) et des **électrons** (-)
- Un noyau est caractérisé par 2 nombres :
  - **Z = nombre de protons** ( $q=+e$ ) = nature de l'atome
    - **Egal au nombre d'électrons** ( $q=-e$ ) – atome **électriquement neutre**
    - Exemple : l'atome d'oxygène a 8 protons (et 8 électrons)
  - **N = nombre de neutrons** ( $q=0$ )
    - Peut varier à Z constant : différence des « **isotopes** » (Atomes avec le même Z mais des N différents)
  - **A = nombre de masse = Z + N**
    - Nombre de **nucléons** (protons + neutrons)
    - Permet de nommer les isotopes
      - carbone ( $Z=6$ ) 12, 13 et 14
      - uranium ( $Z=92$ ) 235 et 238

		$A$ $Z$		
		16 8 O	17 8 O	18 8 O
éléments ↑ nombre de protons Z		13 7 N	14 7 N	15 7 N
		12 6 C	13 6 C	14 6 C
	$A - Z$	nombre de neutrons		
		isotopes ( <i>sosies</i> )		



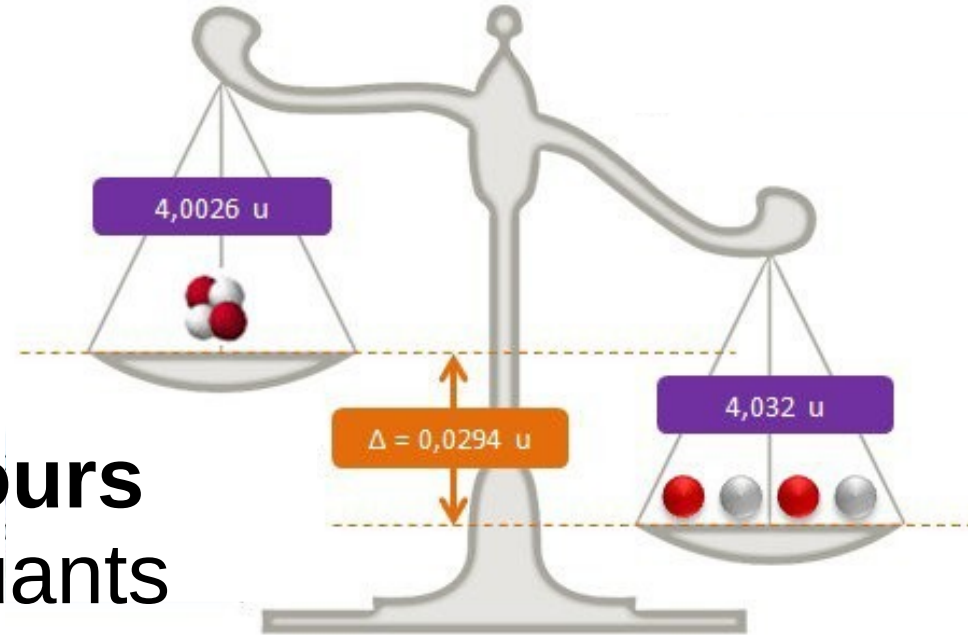
en  $10^{-30}$ g | Source : Huang et al. (2021)



<https://elucid.media/environnement/fabriquer-un-element-les-alchimistes-modernes/>

# Le défaut de masse d'un noyau

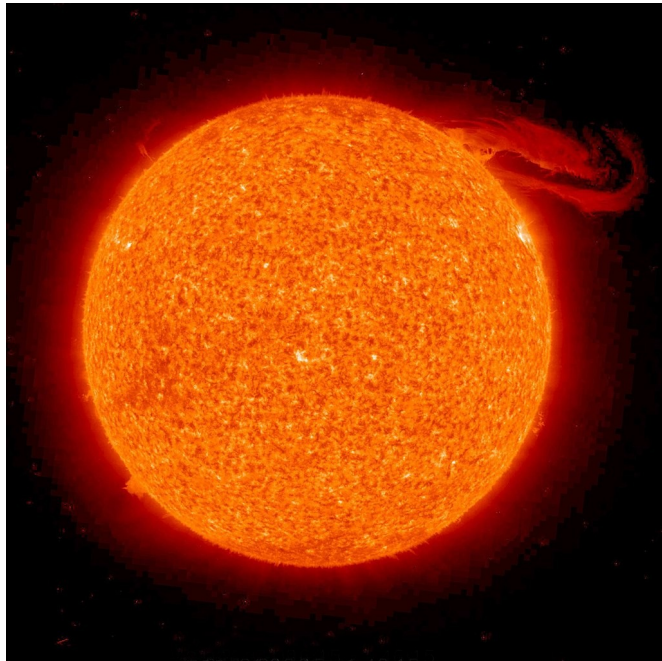
- C'est la **différence** entre
  - La **masse des nucléons** :  
masse des  $Z$  protons +  
masse des  $N$  neutrons
  - et la **masse du noyau**
- $\Delta > 0$  car un noyau est **toujours plus léger** que ses constituants



$u$  = unité de masse atomique unifiée  $\approx m_p \approx m_n$

# L'énergie de liaison nucléaire

- Principe d'équivalence masse–énergie :  $E = mc^2$
- **Énergie de liaison nucléaire** = défaut de masse  $\times c^2$

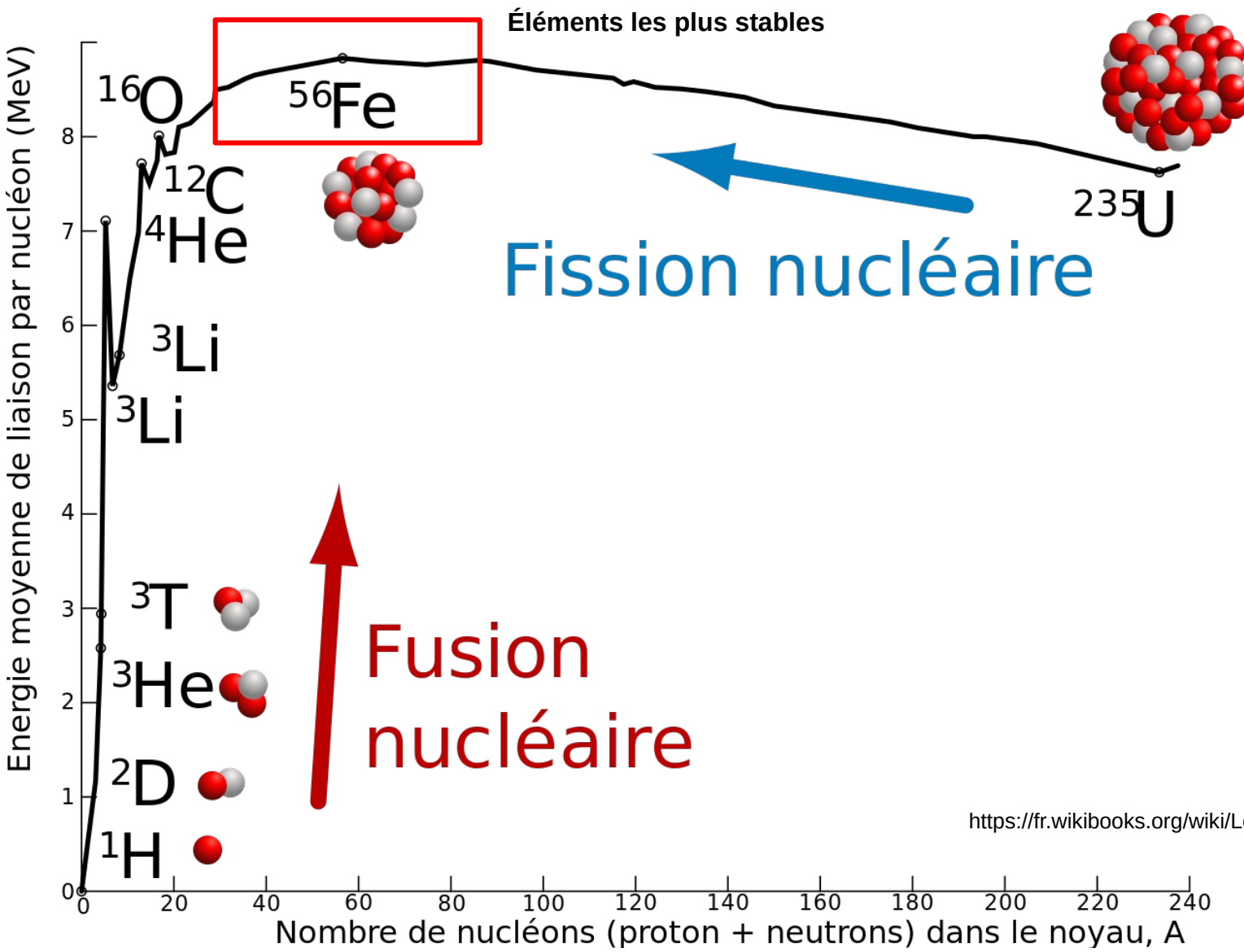


Éruption solaire vue en ultraviolet  
avec de fausses couleurs

- C'est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour **séparer ses constituants**
- On étudie en général **l'énergie de liaison par nucléon**
  - Permet de comparer des noyaux avec des nombres de nucléons **différents**
  - **Plus elle est forte, plus le noyau est stable**



# Courbe d'Aston



1 électronvolt = **énergie cinétique** acquise par un électron accéléré depuis le repos par une **différence de potentiel d'un volt** :

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

$\approx 1 / 10^{12}$  de l'énergie cinétique d'un moustique (2,5 mg, 20 cm/s)

[https://fr.wikibooks.org/wiki/Le\\_noyau\\_atomique/Les\\_réactions\\_nucléaires](https://fr.wikibooks.org/wiki/Le_noyau_atomique/Les_réactions_nucléaires)

# Stabilité du noyau

- On connaît **118 éléments**, soit ~ **3500 noyaux** (isotopes) dont ~ **300 stables** (ne se désintègrent pas)

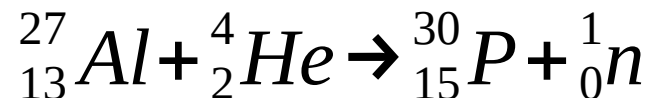
$$Z_{stab} \approx \frac{A}{2} \frac{1}{1+0,03 A^{2/3}}$$

- pour  $Z < 20$ ,  **$Z \approx N$  pour les noyaux stables**
- pour les atomes lourds, il faut  **$N > Z$**  afin de **minimiser la répulsion électrostatique** croissante entre les protons → formule de Weizsäcker

- Tous les noyaux contenant **83+** protons (au-delà du  $^{82}\text{Pb}$ ) sont **radioactifs**

Il est possible de **synthétiser** des **radio-isotopes artificiels** :

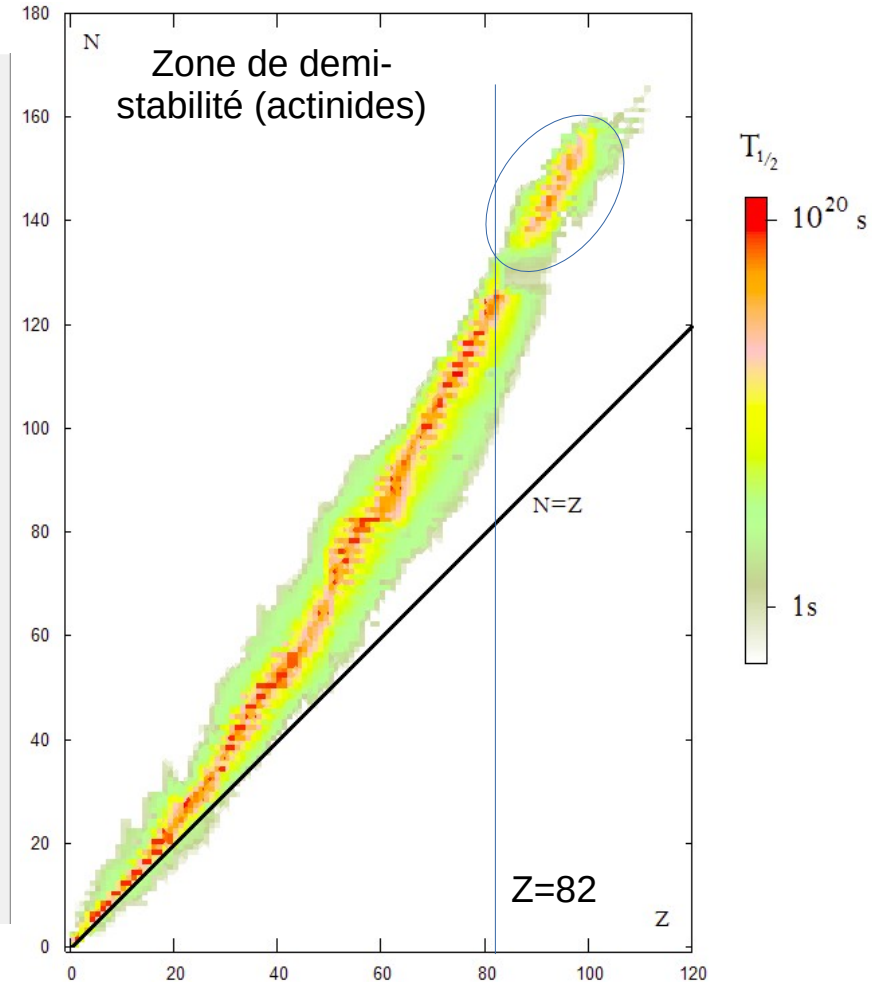
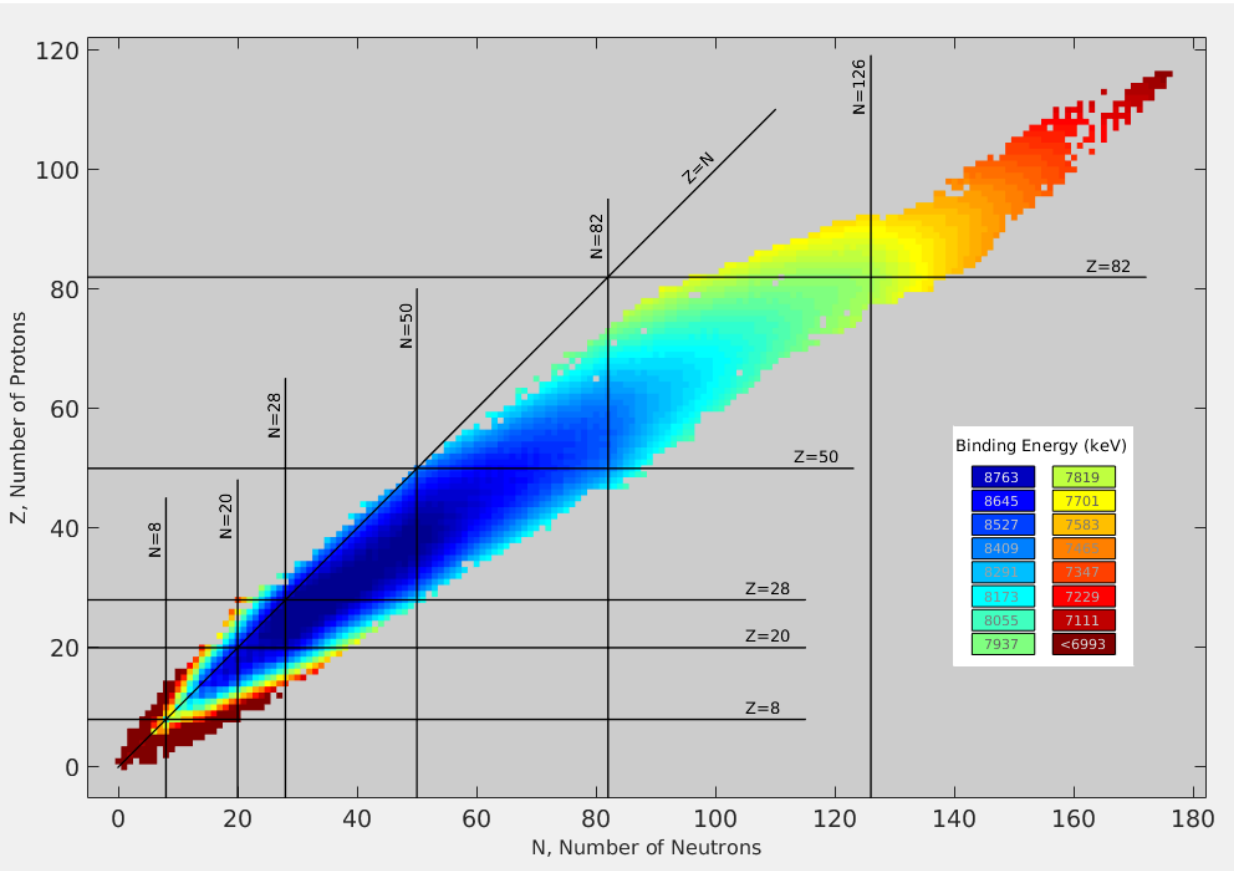
- Première synthèse en 1934 par Pierre Curie et Irène Joliot-Curie :



- 26 éléments de synthèse ( $Z > 95$ ) : curium, einsteinium, fermium, mendelevium, rutherfordium, bohrium, meitnerium, roentgenium, copernicium

# Vallée de stabilité

- Cartes des nucléides
- Stabilité :  $T_{1/2} > 10^{12}$  années

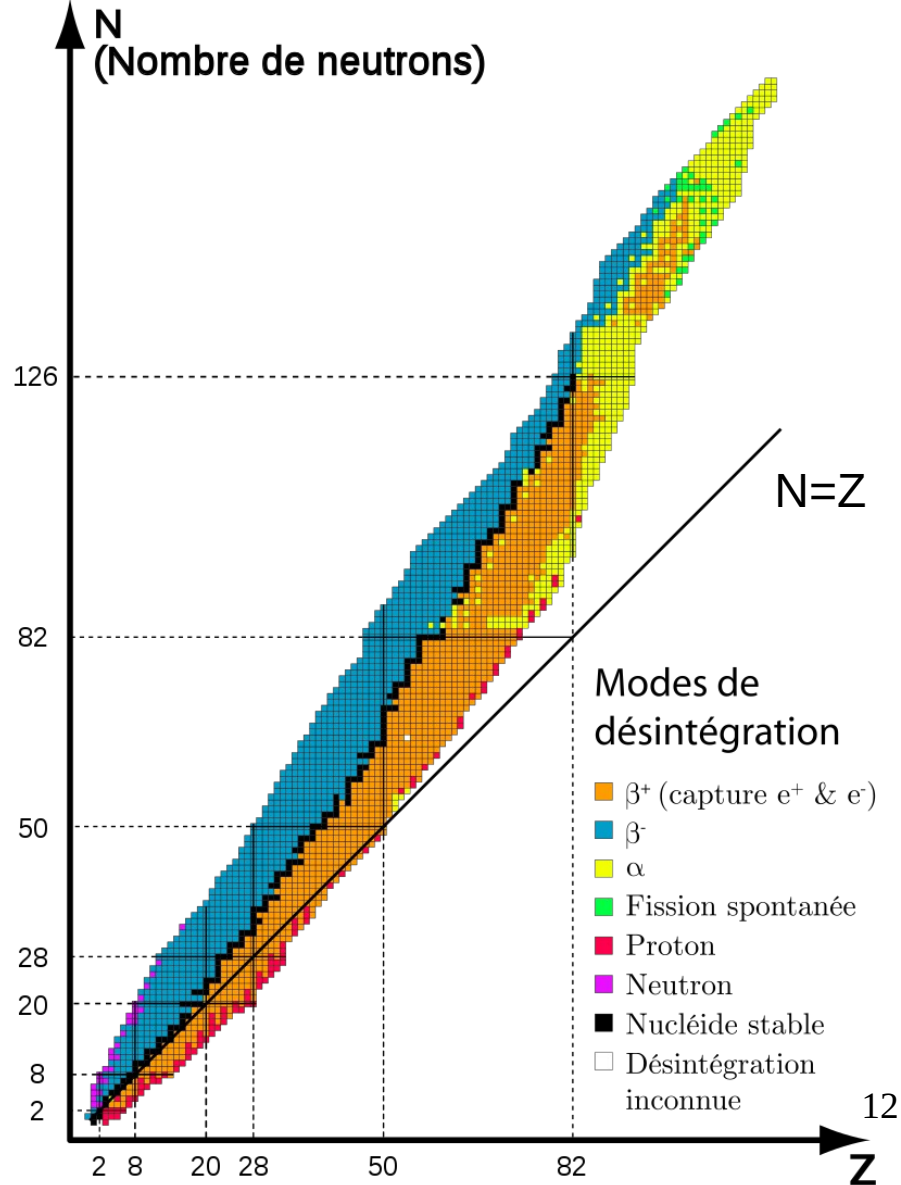
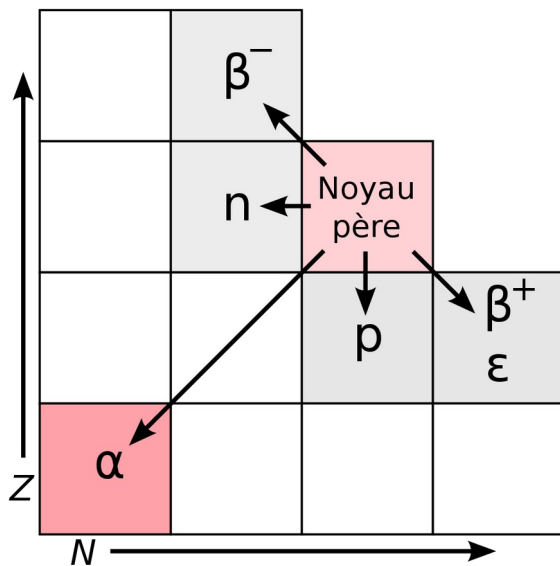


Énergie de liaison nucléaire en fonction de N et Z plutôt que  $A=Z+N$

# Diagramme de Segré

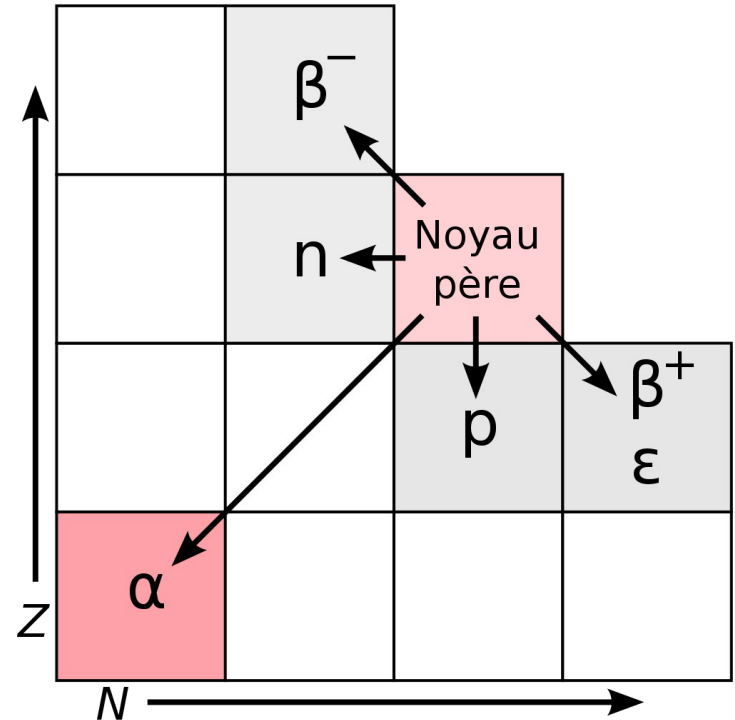
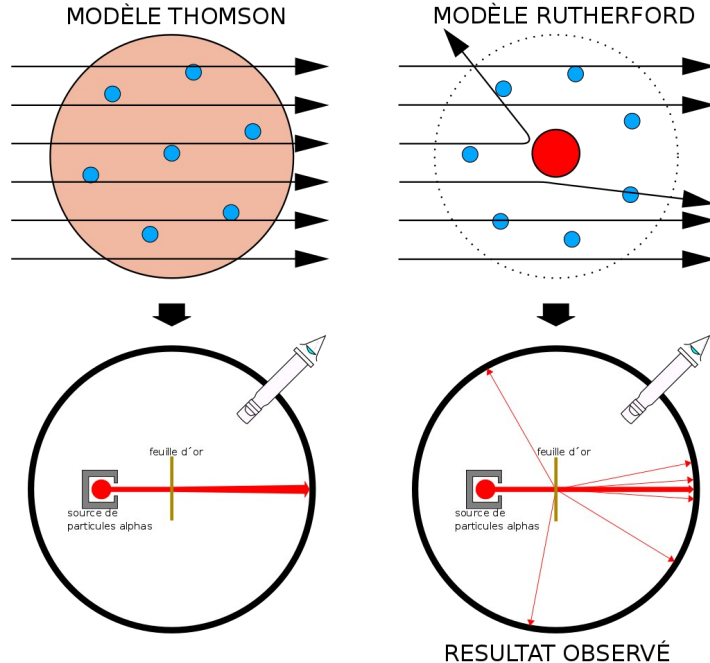
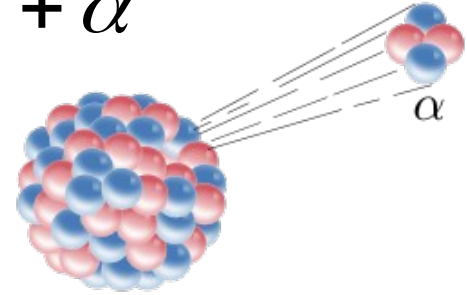
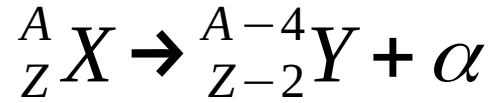
- Stabilité et modes de désintégration des noyaux
- Modes de désintégration principaux :

- $\alpha$  : noyau d'hélium
- $\beta^-$  : électron
- $\beta^+$  : positron
- n : neutron
- p : proton
- Fission spontanée



# La radioactivité $\alpha$

- $\alpha$  = noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$
- A permis à Rutherford de **découvrir le noyau atomique**





# La radioactivité $\beta$

- **Transformation** d'une particule en une autre (**force faible**)
  - $\beta^-$  (un neutron est transformé en proton) : émission d'un  $e^-$
  - $\beta^+$  (un proton est transformé en neutron) : émission d'un  $e^+$
  - **Capture électronique  $\epsilon$**  : un proton absorbe un  $e^- \rightarrow$  neutron

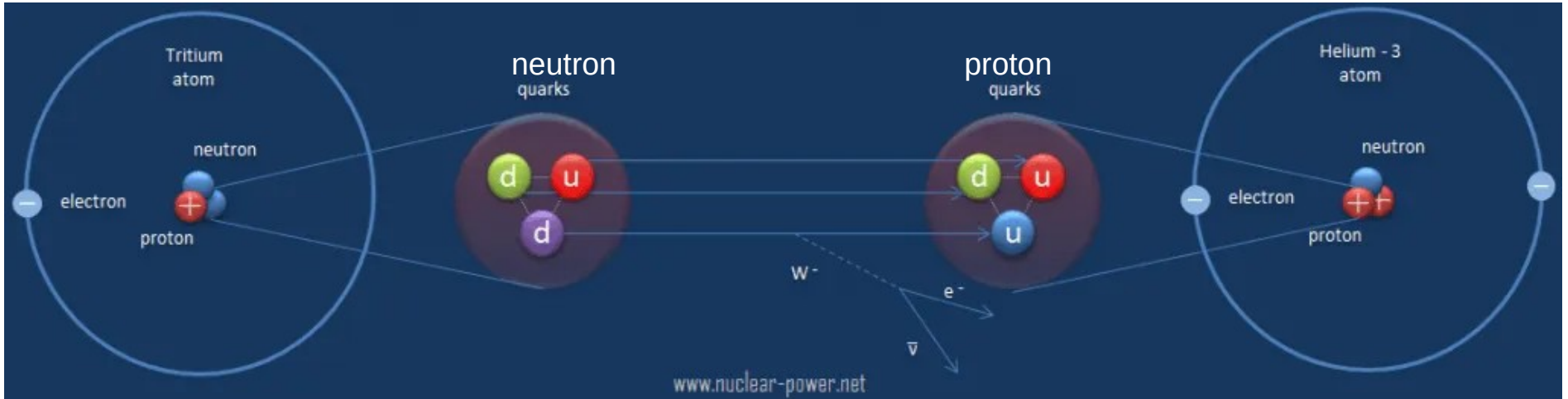
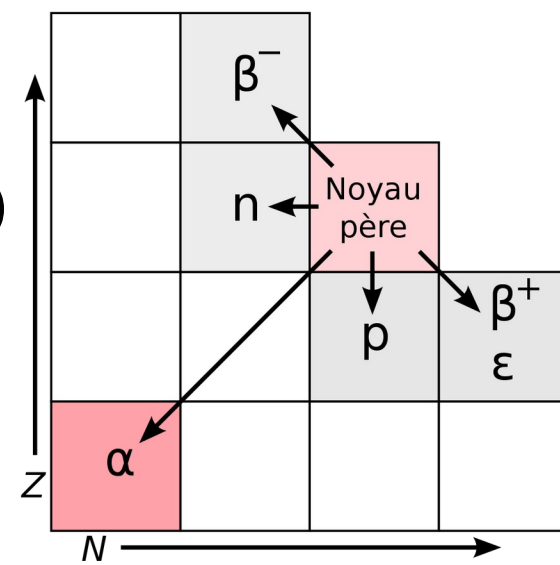
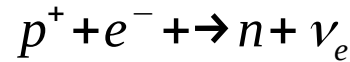
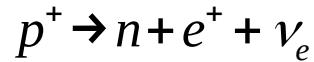
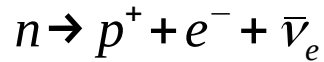
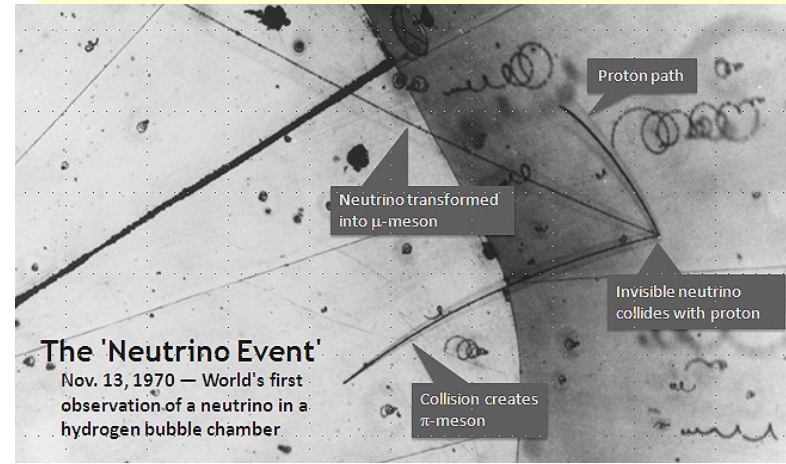
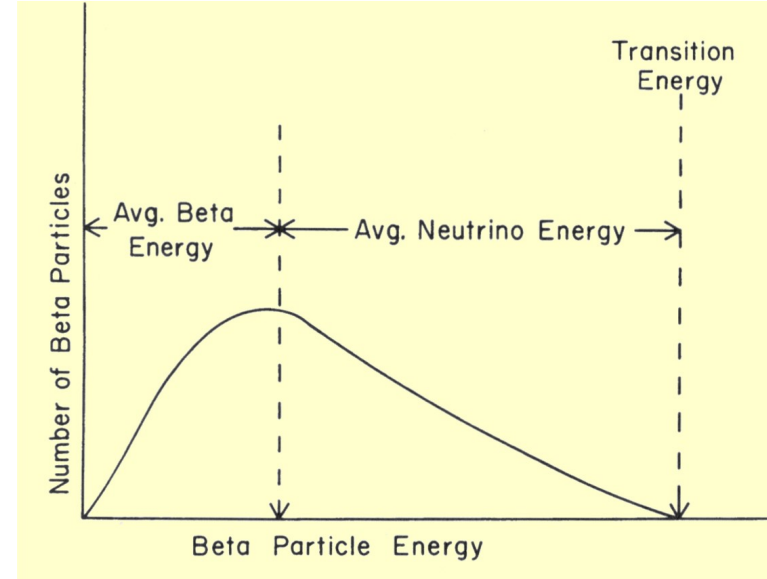


Diagramme de Feynman de la radioactivité  $\beta^-$

# Le neutrino

- Problème en 1930 concernant la désintégration  $\beta^-$  : le spectre de vitesse des électrons est **continu**
  - Article de Lise Meitner : la vitesse devrait être constante (quantifiée) et dépendante du corps observé
  - Cette réaction semble **ne pas respecter la conservation de l'énergie** (et de la quantité de mouvement et du spin)
- Réactions
  - Certains physiciens (dont Bohr) étaient prêts à y **renoncer**
  - Pauli postule l'émission d'une **autre particule** qui emporte l'énergie manquante → il existe une **nouvelle particule**, de charge électrique nulle, qu'il nomme initialement « neutron »
- 1932 : **découverte du neutron**, beaucoup plus massif (et qui ne pouvait résoudre la question du spectre beta)
- Lors d'une conversation avec Fermi, E. Amaldi nomme cette particule « **neutrino** » (petit neutron)
- Fait partie du « **modèle standard** »
- Particule qui interagit **extrêmement peu** avec la matière



Première observation d'un neutrino en 1970 dans une chambre à bulles : un neutrino (non visible) percute un proton, ce qui produit un muon et un pion.

# La radioactivité $\gamma$

- Un rayon gamma est un **rayonnement électromagnétique** (ou photon) émis lors de la **désexcitation** d'un noyau **suite à certaines désintégrations  $\alpha$  ou  $\beta$**

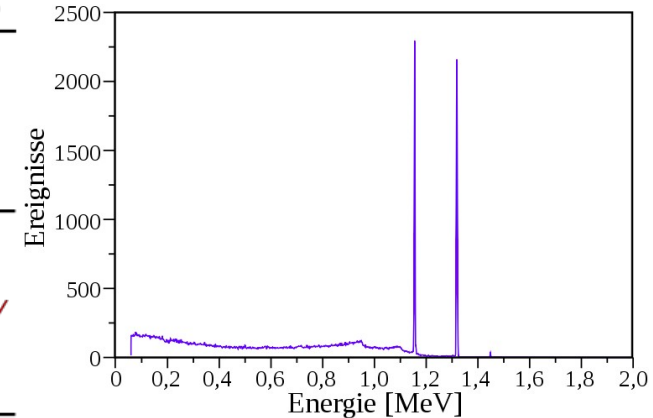
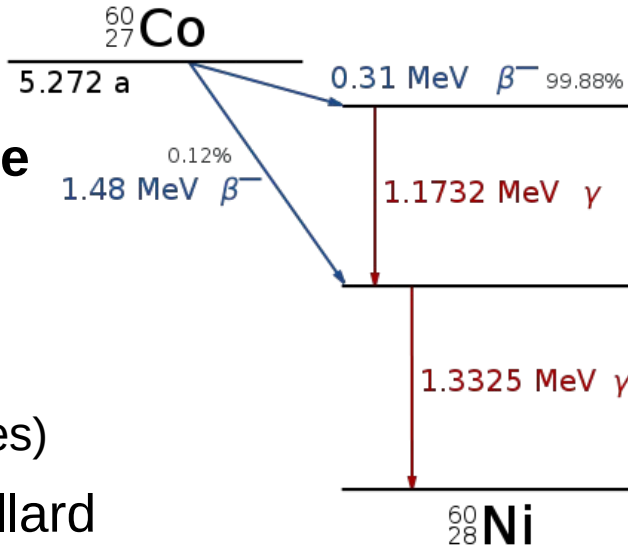


- Ils sont de **même nature que les rayons X** mais sont d'**origine** et de **fréquence différentes**

- $\gamma$ : transition nucléaire
- X : transitions électroniques
- (mais chevauchement des énergies)

- Découverte en 1900 par Paul Villard

- Il a observé des rayonnements radioactifs **non déviés** dans un champ magnétique (donc neutres) et **beaucoup plus pénétrants** que les rayons  $\beta$



En 1950, pendant la guerre de Corée, le général états-unien MacArthur aurait souhaité créer une ceinture de cobalt radioactif qui aurait empêché toute vie dans cette région pendant des décennies et interdit la pénétration de troupes chinoises et soviétiques par le Nord de la péninsule...

# La fission spontanée

- Le noyau se divise en 2+ noyaux plus légers, **sans apport d'énergie extérieure** ( $\neq$  induite)
- Caractéristique des isotopes très lourds :
  - $N > 100$  en théorie,  $N > 230$  en pratique
- Application : datation par les traces de fission
  - Défaut cristallins créés lors de la désintégration de l'  $^{238}\text{U}$  (car recul des produits de fission)
    - $T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,5 \times 10^9$  années
    - $T_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5730$  ans...
  - On mesure le nombre de désintégrations et la quantité d'uranium encore présente
    - $\rightarrow$  calcul de l'âge de l'échantillon

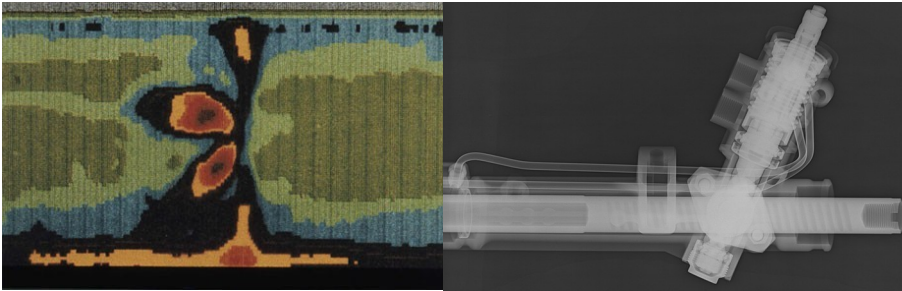


Traces de fission révélées dans un minéral observé au microscope optique

# Des applications très nombreuses

- Dater ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{238}\text{U}$ )

- Contrôler, sonder



Gammadensitométrie en fausses couleurs mettant en évidence des singularités dans une planche de bois

Gammagraphie industrielle

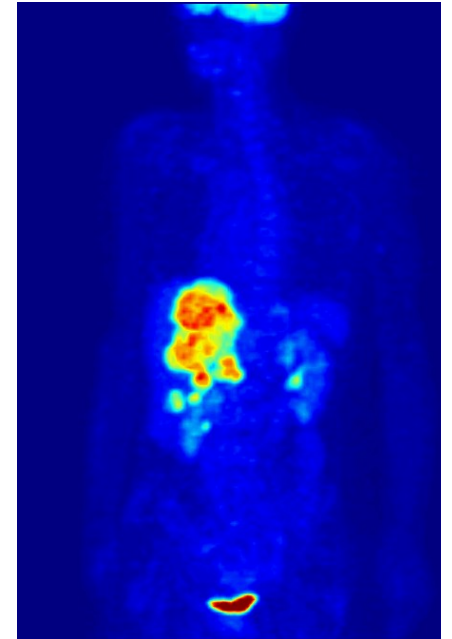
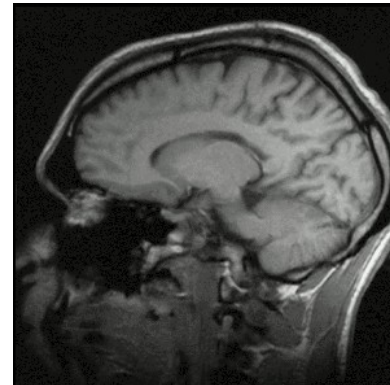
- Produire de l'énergie

EPR de  
Flamanville,  
EDF



- Santé

- Visualiser (imagerie médicale)
- Irradier (radiothérapie)
- Purifier (débarrasser fruits et légumes de larves, insectes et bactéries)



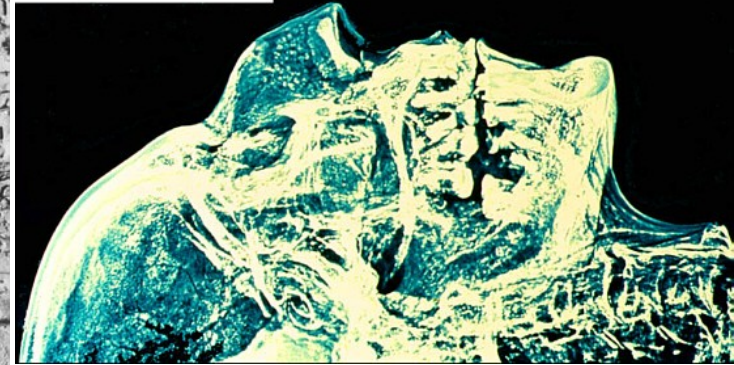


# Ramsès II

- 1975 : la momie de Ramsès II est en très mauvais état → décision de la confier à la France pour examens et traitements
- 1976 : la momie arrive au Bourget
  - Elle passe 8 mois au Musée de l'Homme avant de retourner en Égypte
- Une cinquantaine de spécialistes se penchent minutieusement sur la momie
- L'ensemble est stérilisé aux rayons gamma à la centrale nucléaire de Saclay



Docteur C. MASSARE - Docteur H. BARD  
XERORADIOGRAPHIE  
RAMSES II - le 20.XII.1976



Xérogaphie montrant la présence des grains de poivre dans le nez, destinés à éviter l'effondrement des tissus mous du nez après momification.

Radiographie du crâne de Ramsès II, montrant le remplissage de la partie postérieure de la boîte crânienne par la résine introduite après excrébration



# Pour aller plus loin

- <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-noyaux-des-atomes.aspx>
- [https://fr.wikibooks.org/wiki/Le\\_noyau\\_atomique](https://fr.wikibooks.org/wiki/Le_noyau_atomique)
- <https://laradioactivite.com/>
- <https://www.andra.fr/les-dechets-radioactifs/la-radioactivite/lhistoire-de-la-radioactivite>
- <https://elucid.media/environnement/stabilite-instabilite-noyaux-atomiques-fusion-fission-radioactivite/>