

Fusion nucléaire: Eléments d'introduction

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicatio

1

NUCLÉIDES

Définition & Notation

- Nucléide = Noyau atomique caractérisé par :
 - Son nombre de protons
 - Son nombre de neutrons
 - L'état d'énergie nucléaire dans lequel il se trouve
- Quelques nucléides importants en physique de la fusion

Représentation

Nombre de masse :
nombre de nucléons
(protons + neutrons)

Numéro atomique :
nombre de protons



Atome		Noyau atomique	
${}^1_1\text{H}$ Protium	1 proton 0 neutron 1 électron	${}^1_1\text{H}^+ = \text{H}^+$ Proton	1 proton 0 neutron 0 électron
${}^2_1\text{H} = \text{D}$ Deutérium	1 proton 1 neutron 1 électron	${}^2_1\text{H}^+ = {}^2\text{H}^+$ Deutéron	1 proton 1 neutron 0 électron
${}^3_1\text{H} = \text{T}$ Tritium	1 proton 2 neutrons 1 électron	${}^3_1\text{H}^+ = {}^3\text{H}^+$ Triton	1 proton 2 neutrons 0 électron
${}^3_2\text{He}$	2 protons 1 neutron 2 électrons	${}^3_2\text{He}^+ = {}^3\text{He}^+$	2 protons 1 neutron 1 électron
${}^4_2\text{He}$	2 protons 2 neutrons 2 électrons	${}^4_2\text{He}^{2+} = {}^4\text{He}^{2+} = \alpha$	2 protons 2 neutrons 0 électrons

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicatio

2

NUCLÉIDES

Types de nucléides

Panorama

Isomères

Quelle est la différence entre un isotope, un isobare, un isotone et un isomère ?

Soient 2 noyaux atomiques	Exemples	Nombre de ...			Même élément chimique ?	Nom	Carte des nucléides
		Protons	Neutrons	Nucléons			
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 = Z_2$	$^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{14}\text{C}$						
$A_1 = A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{14}\text{N}, ^{14}\text{O}$						
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{15}\text{N}, ^{16}\text{O}$						
$A_1 = A_2$ $Z_1 = Z_2$	^{179}Ta						

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

3

NUCLÉIDES

Types de nucléides

Panorama

Isomères

Quelle est la différence entre un isotope, un isobare, un isotone et un isomère ?

Soient 2 noyaux atomiques	Exemples	Nombre de ...			Même élément chimique ?	Nom	Carte des nucléides
		Protons	Neutrons	Nucléons			
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 = Z_2$	$^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{14}\text{C}$	=	≠	≠			
$A_1 = A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{14}\text{N}, ^{14}\text{O}$	≠	≠	=			
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{15}\text{N}, ^{16}\text{O}$	≠	=	≠			
$A_1 = A_2$ $Z_1 = Z_2$	^{179}Ta	=	=	=			

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

4

NUCLÉIDES

Types de nucléides

Panorama

Isomères

Quelle est la différence entre un isotope, un isobare, un isotone et un isomère ?

Soient 2 noyaux atomiques	Exemples	Nombre de ...			Même élément chimique ?	Nom	Carte des nucléides
		Protons	Neutrons	Nucléons			
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 = Z_2$	$^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{14}\text{C}$	=	\neq	\neq	Oui		
$A_1 = A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{14}\text{N}, ^{14}\text{O}$	\neq	\neq	=	Non		
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{15}\text{N}, ^{16}\text{O}$	\neq	=	\neq	Non		
$A_1 = A_2$ $Z_1 = Z_2$	^{179}Ta	=	=	=	Oui		

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

5

NUCLÉIDES

Types de nucléides

Panorama

Isomères

Quelle est la différence entre un isotope, un isobare, un isotone et un isomère ?

Soient 2 noyaux atomiques	Exemples	Nombre de ...			Même élément chimique ?	Nom	Carte des nucléides
		Protons	Neutrons	Nucléons			
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 = Z_2$	$^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{14}\text{C}$	=	\neq	\neq	Oui	Isotopes	Voisins verticalement
$A_1 = A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{14}\text{N}, ^{14}\text{O}$	\neq	\neq	=	Non	Isobares	Voisins en diagonale desc.
$A_1 \neq A_2$ $Z_1 \neq Z_2$	$^{14}\text{C}, ^{15}\text{N}, ^{16}\text{O}$	\neq	=	\neq	Non	Isotones	Voisins horizontalement
$A_1 = A_2$ $Z_1 = Z_2$	^{179}Ta	=	=	=	Oui	Isomères	-

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

6

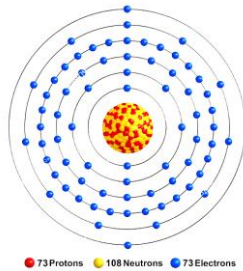
NUCLÉIDES

Types de nucléides

Panorama

Isomères

- **Définition**
 - Atomes ayant des nombres identiques de protons et de neutrons mais qui diffèrent de par l'organisation des nucléons au sein de chaque noyau et donc de par leurs états énergétiques
 - Un même noyau atomique peut exister dans des états énergétiques distincts caractérisés chacun par un spin et une énergie d'excitation particuliers
- **Exemple : le Tantale**



Etat	Notation	Energie d'excitat°	Spin	Période
Fondamental	^{179}Ta	0 keV	7/2+	1,82 an
Excité	$^{179m1}\text{Ta}$	30,7 keV	9/2-	1,42 μs
	$^{179m2}\text{Ta}$	520,2 keV	1/2+	335 ns
	$^{179m3}\text{Ta}$	1252,5 keV	21/2-	322 ns
	$^{179m4}\text{Ta}$	1317,3 keV	25/2+	9 ms
	$^{179m5}\text{Ta}$	1327,9 keV	23/2-	1,6 μs
	$^{179m6}\text{Ta}$	2639,3 keV	37/2+	54,1 ms

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

7

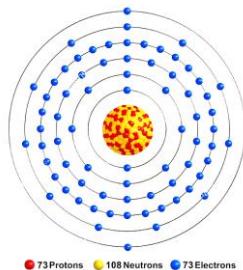
NUCLÉIDES

Types de nucléides

Panorama

Isomères

- Un isomère dans un état excité subit une transition qui le ramène :
 - Soit vers l'état fondamental
 - Soit vers un état excité moins énergétique
- Au cours de cette transition, il y a émission de photons très énergétiques (rayons X ou rayons γ)
- Souvent les états excités sont très instables \Rightarrow La demi-vie de l'état fondamental est très grande par rapport à celle de l'état excité



Etat	Notation	Energie d'excitat°	Spin	Période
Fondamental	^{179}Ta	0 keV	7/2+	1,82 an
Excité	$^{179m1}\text{Ta}$	30,7 keV	9/2-	1,42 μs
	$^{179m2}\text{Ta}$	520,2 keV	1/2+	335 ns
	$^{179m3}\text{Ta}$	1252,5 keV	21/2-	322 ns
	$^{179m4}\text{Ta}$	1317,3 keV	25/2+	9 ms
	$^{179m5}\text{Ta}$	1327,9 keV	23/2-	1,6 μs
	$^{179m6}\text{Ta}$	2639,3 keV	37/2+	54,1 ms

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

8

NUCLÉIDES

Types de nucléides

Panorama

- Isomères nucléaires pour des applications

Isomères

	Propriétés intéressantes	Applications actuelles/futures
^{99m}Tc	<ul style="list-style-type: none"> • Technétium • Emission de photons de 140 keV 	Energie correspondant aux rayons γ employés en radiologie.
$^{178m2}\text{Hf}$	<ul style="list-style-type: none"> • Hafnium • Très énergétique, plutôt stable : période de 31 ans. • Sa transition isomérique peut être déclenchée par rayonnement X 	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de stockage à très haute densité d'énergie • Armes de destruction massive compactes de nouvelle génération.
^{229m}Th	Thorium Isomère ayant la plus faible énergie d'excitation ($\approx 7,6 \pm 0,5$ eV)	Batteries à haute densité d'énergie, voire horloges nucléaire très précises (en excitant ^{229}Th par laser UV)
^{242m}Am	<ul style="list-style-type: none"> • Isomère plus stable dans son état excité que dans son état fondamental • Masse critique = qq. Kg 	Possible combustible nucléaire pour des applications de propulsion spatiale par fragments de fission

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

9

NUCLÉIDES

(In)stabilité temporelle des nucléides

Présentation

Nucléides naturels stables

Nucléides naturels instables (radionucléides)

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



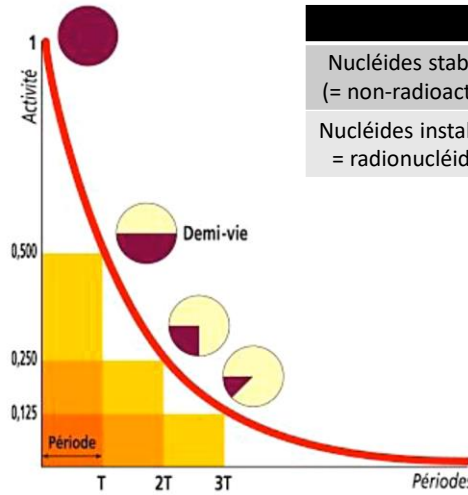
SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

10

NUCLÉIDES

(In)stabilité temporelle des nucléides

- Présentation
- Nucléides naturels stables
- Nucléides naturels instables (radionucléides)



	Nucléides naturels	Nucléides artificiels
Nucléides stables (= non-radioactifs)	252	0
Nucléides instables = radionucléides	85	3000

nucléides	temps de demi-vie
Uranium 238	$4,5 \cdot 10^9$ ans
Potassium 40	$1,3 \cdot 10^9$ ans
Thorium 230	$8,0 \cdot 10^4$ ans
Carbone 14	$5,7 \cdot 10^3$ ans
Radium 226	$1,6 \cdot 10^3$ ans
Plomb 210	22 ans

NUCLÉIDES

(In)stabilité temporelle des nucléides

- Présentation
- Nucléides naturels stables
- Nucléides naturels instables (radionucléides)

Hydrogen-1	Phosphorus-31	Manganese-55	Selenium-78	Ruthenium-99	Tin-120	Cerium-138	Dysprosium-164	Rhenium-185
Hydrogen-2	Sulfur-32	Iron-54	Selenium-80	Ruthenium-100	Tin-122	Cerium-140	Holmium-165	Osmium-184
Helium-3	Sulfur-33	Iron-56	Bromine-79	Ruthenium-101	Tin-124	Cerium-142	Erbium-162	Osmium-187
Helium-4	Sulfur-34	Iron-57	Bromine-81	Ruthenium-102	Antimony-121	Praseodymium-141	Erbium-164	Osmium-188
Lithium-6	Sulfur-36	Iron-58	Krypton-80	Ruthenium-104	Antimony-123	Neodymium-142	Erbium-166	Osmium-189
Lithium-7	Chlorine-35	Cobalt-59	Krypton-82	Rhodium-103	Tellurium-120	Neodymium-143	Erbium-167	Osmium-190
Beryllium-9	Chlorine-37	Nickel-58	Krypton-83	Palladium-102	Tellurium-122	Neodymium-145	Erbium-168	Osmium-192
Boron-10	Argon-36	Nickel-60	Krypton-84	Palladium-104	Tellurium-123	Neodymium-146	Erbium-170	Iridium-191
Boron-11	Argon-38	Nickel-61	Krypton-86	Palladium-105	Tellurium-124	Neodymium-148	Thulium-169	Iridium-193
Carbon-12	Argon-40	Nickel-62	Rubidium-85	Palladium-106	Tellurium-125	Samarium-144	Ytterbium-168	Platinum-192
Carbon-13	Potassium-39	Nickel-64	Strontium-84	Palladium-108	Tellurium-126	Samarium-149	Ytterbium-170	Platinum-194
Nitrogen-14	Potassium-41	Copper-63	Strontium-86	Palladium-110	Iodine-127	Samarium-150	Ytterbium-171	Platinum-195
Nitrogen-15	Calcium-40	Copper-65	Strontium-87	Silver-107	Xenon-126	Samarium-152	Ytterbium-172	Platinum-196
Oxygen-16	Calcium-42	Zinc-64	Strontium-88	Silver-109	Xenon-128	Samarium-154	Ytterbium-173	Platinum-198
Oxygen-17	Calcium-43	Zinc-66	Yttrium-89	Cadmium-106	Xenon-129	Europium-153	Ytterbium-174	Gold-197
Oxygen-18	Calcium-44	Zinc-67	Zirconium-90	Cadmium-108	Xenon-130	Gadolinium-154	Ytterbium-176	Mercury-196
Fluorine-19	Calcium-46	Zinc-68	Zirconium-91	Cadmium-110	Xenon-131	Gadolinium-155	Lutetium-175	Mercury-198
Neon-20	Scandium-45	Zinc-70	Zirconium-92	Cadmium-111	Xenon-132	Gadolinium-156	Hafnium-176	Mercury-199
Neon-21	Titanium-46	Gallium-69	Zirconium-94	Cadmium-112	Xenon-134	Gadolinium-157	Hafnium-177	Mercury-200
Neon-22	Titanium-47	Gallium-71	Niobium-93	Cadmium-114	Caesium-133	Gadolinium-158	Hafnium-178	Mercury-201
Sodium-23	Titanium-48	Germanium-70	Molybdenum-92	Indium-113	Barium-132	Gadolinium-160	Hafnium-179	Mercury-202
Magnesium-24	Titanium-49	Germanium-72	Molybdenum-94	Tin-112	Barium-134	Terbium-159	Hafnium-180	Mercury-204
Magnesium-25	Titanium-50	Germanium-73	Molybdenum-95	Tin-114	Barium-135	Dysprosium-156	Tantalum-180	Thallium-203
Magnesium-26	Vanadium-51	Germanium-74	Molybdenum-96	Tin-115	Barium-136	Dysprosium-158	Tantalum-181	Thallium-205
Aluminium-27	Chromium-50	Arsenic-75	Molybdenum-97	Tin-116	Barium-137	Dysprosium-160	Tungsten-182	Lead-204
Silicon-28	Chromium-52	Selenium-74	Molybdenum-98	Tin-117	Barium-138	Dysprosium-161	Tungsten-183	Lead-206
Silicon-29	Chromium-53	Selenium-76	Ruthenium-96	Tin-118	Lanthanum-139	Dysprosium-162	Tungsten-184	Lead-207
Silicon-30	Chromium-54	Selenium-77	Ruthenium-98	Tin-119	Cerium-136	Dysprosium-163	Tungsten-186	Lead-208

NUCLÉIDES

(In)stabilité temporelle des nucléides

Présentation

85 radionucléides naturels (ou nucléides instables naturels)

Nucléides naturels stables

Nucléides naturels instables (radionucléides)

	Radionucléides primordiaux	Radionucléides cosmogéniques		
Demi-vie	$\tau_{1/2} \approx$ Age de la Terre ($4,6 \cdot 10^9$ ans) \Rightarrow Ils n'ont pas complètement disparu	<ul style="list-style-type: none"> $\tau_{1/2} <$ Age de la Terre Production permanente - Soit par décomposition radioactive d'un radionucléide primordial (chaîne de désintégration) - Soit par des réactions nucléaires issues des rayons cosmiques 		
Exemples	$\tau_{1/2}({}^{238}\text{U}) \approx 4,5 \cdot 10^9$ ans	Radionucléide	$\tau_{1/2}$ (ans)	Remarques
		Radium 226	1609	Issu de la décomposition radioactive de ${}^{238}\text{U}$
		Béryllium 10	$1,39 \cdot 10^6$	Produit dans l'atmosphère à partir de ${}^{14}\text{N}$. Il s'accumule dans le sol via les précipitations
		Carbone 14	5730	Produit dans l'atmosphère à partir de ${}^{14}\text{N}$. Il s'accumule dans le sol via la synthèse chlorophyllienne.

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

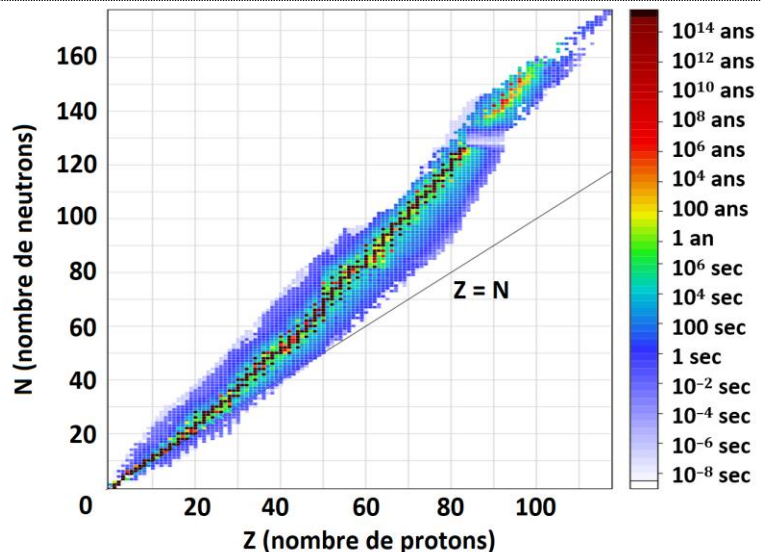
SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Application

13

NUCLÉIDES

Carte des nucléides (= Diagramme Z-N)

- Représentation de tous les éléments du tableau de Mendeleïev :
 - Axe X : nombre de protons (ou numéro atomique)
 - Axe Y : nombre de neutrons
- Tous les isotopes sont représentés
- Vallée de la stabilité : région contenant la plupart des isotopes stables (durée de demi-vie $> 10^{12}$ ans)
- Hormis ${}^1\text{H}$ et ${}^3\text{He}$, aucun nucléide stable n'a un plus grand nombre de protons que de neutrons.



thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Application

14

NUCLÉIDES

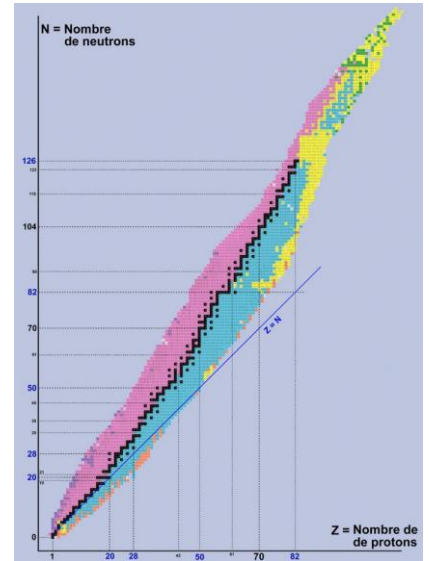
Carte des nucléides (= Diagramme Z-N)

Carte des nucléides par type de désintégration

- Nucléide stable ; $t > 10^{12}$ a
- Désintégration α
- Désintégration β^-
- Désintégration β^+
- Emission de neutron
- Emission de proton
- Fission spontanée

} Nucléides instables

} En limite de ces 2 régions, on distingue de petites zones où des protons ou neutrons sont éjectés par le noyau très fortement instable



NUCLÉIDES

Carte des nucléides (= Diagramme Z-N)

Nombre de protons (Z)	Z=7	N	^{11}N	^{12}N	^{13}N	^{14}N	^{15}N	^{16}N	^{17}N	^{18}N	^{19}N	^{20}N	^{21}N	^{22}N	^{23}N		
	Z=6	C	^8C	^9C	^{10}C	^{11}C	^{12}C	^{13}C	^{14}C	^{15}C	^{16}C	^{17}C	^{18}C	^{19}C	^{20}C	15	^{22}C
	Z=5	B	^7B	^8B	^9B	^{10}B	^{11}B	^{12}B	^{13}B	^{14}B	^{15}B	11	^{17}B	13	^{19}B		16
	Z=4	Be	^6Be	^7Be	^8Be	^9Be	^{10}Be	^{11}Be	^{12}Be	9	^{14}Be		12		14		
	Z=3	Li	^4Li	^5Li	^6Li	^7Li	^8Li	^9Li	^{10}Li	^{11}Li		10					
	Z=2	He	^3He	^4He	^5He	^6He	^7He	^8He	^9He	8							
Z=1	H		^2H	^3H	^4H	4	5	6	7								
		0	0	1	2	3											

Nombre de neutrons (A-Z)

NUCLÉIDES

Excès de masse & Défaut de masse

- Excès de masse d'un nucléide

$$\Delta m = m_{réelle} - m_{théo}$$

$$\Delta m = m_{réelle} - A \cdot u$$

- $m_{réelle}$: masse réelle du nucléide
- A : nombre de masse du nucléide (protons + neutrons)
- u : unité de masse atomique ($1,66 \cdot 10^{-27}$ kg)
- $\Delta m < 0$: le nucléide est mieux lié que le noyau ${}^{12}_6\text{C}$.
- $\Delta m > 0$: le nucléide est moins bien lié que le noyau ${}^{12}_6\text{C}$.

- Défaut de masse (B) d'un nucléide

$$m_{Noyau} < \sum m_{nucléons}$$

$$m_{Noyau} + \frac{E_{Liaison}}{c^2} = \sum m_{nucléons}$$

$$m_{Noyau} + \frac{E_{Liaison}}{c^2} < \sum m_{protons} + \sum m_{neutrons}$$

$$m_{Noyau} + \frac{E_{Liaison}}{c^2} < Z \cdot m_{protons} + (A - Z) \cdot m_{neutrons}$$

$$\frac{E_{Liaison}}{c^2} = Z \cdot m_{protons} + (A - Z) \cdot m_{neutrons} - m_{Noyau}$$

$$B = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{noyau}(A, Z)$$

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicatif

17

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Quelles différences entre réaction chimique et réaction nucléaire ?

	Réaction chimique	Réaction nucléaire
Etat quantique du noyau atomique	Inchangé	Modifié
Particules & liaisons mises en jeu	<ul style="list-style-type: none"> • Electrons • Liaisons entre les atomes 	Nucléons, électrons e-, positrons e+, ...
Élément chimique avant/après la réaction	L'élément chimique est conservé	L'élément chimique peut changer (réaction de transmutation)
Rapport de forces	$F_{Nucl} > 10^6 \cdot F_{Inter}$ F_{Nucl} : forces nucléaires qui s'exercent entre les nucléons F_{inter} : Forces s'exerçant entre les atomes ou les molécules.	

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicatif

20

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Définition

- Réaction conduisant à une transformation du noyau atomique
 - Modification du nombre de protons et/ou neutrons du noyau atomique
 - Libération d'énergie nucléaire : énergie associée à la force de cohésion des nucléons (protons et neutrons) au sein du noyau atomique

- 2 types de réactions nucléaires
 - Celles modifiant la composition du noyau : réactions de transmutation
 - ✓ Modifier le nombre de protons
 - ✓ Modifier le nombre de neutrons
 - ✓ Modifier le nombre de nucléons (protons et neutrons)
 - Celles ne modifiant pas la composition du noyau : réactions de diffusion

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de transmutation nucléaire

Principe

Energie nucléaire

Fission

Fusion

Radioactivité

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de transmutation nucléaire

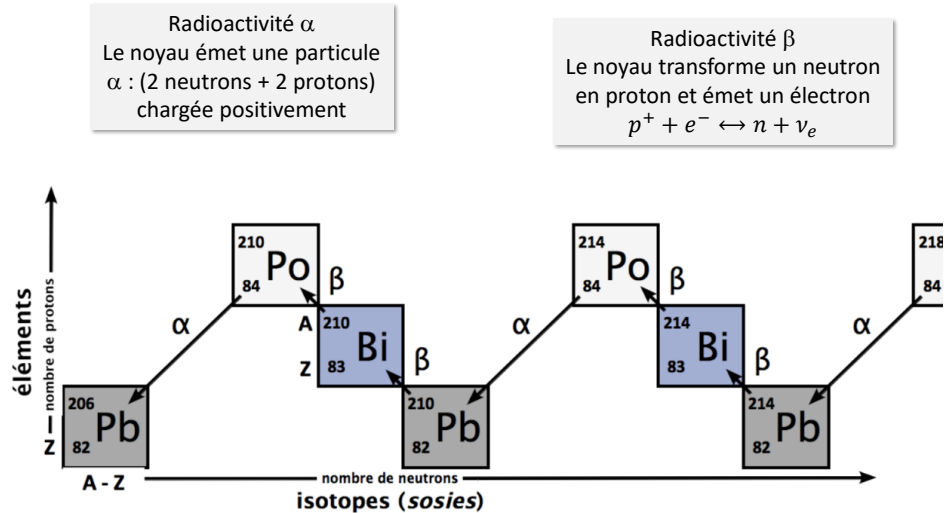
Principe

Energie nucléaire

Fission

Fusion

Radioactivité



thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicatif

23

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de transmutation nucléaire

Principe

Energie nucléaire

Fission

Fusion

Radioactivité

- Energie nucléaire = Energie de liaison = Energie libérée lors d'une réaction nucléaire (fission, fusion)
- Energie assurant la cohésion entre protons et neutrons au sein du même noyau atomique
 - L'interaction forte permet d'assurer la stabilité du noyau
 - A l'inverse, la répulsion coulombienne tend à séparer les protons au sein du même noyau.
- **Pour produire de l'énergie, il faut réaliser une transformation dans laquelle, entre l'état initial et l'état final, un peu de masse des corps mis en jeu disparaît. Ce défaut de masse se retrouve alors sous forme d'énergie par la formule $E = \Delta m \cdot c^2$**
 - E : énergie produite
 - Δm : masse disparue

$$m(\text{atomes réactifs}) = m(\text{atomes produits}) + \Delta m$$

$$m(\text{atomes réactifs}) = m(\text{atomes produits}) + \frac{E}{c^2}$$

- 2 types de transmutations permettent de libérer de grandes quantités d'énergie :
 - Noyaux d'atomes très légers (ex : D, T) \Rightarrow Atomes plus lourds : fusion
 - Noyau d'un atome suffisamment lourd (ex : U) \Rightarrow Atomes plus légers : la fission

thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicatif

24

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de transmutation nucléaire

Principe

- Soit un matériau composé d'atomes lourds (^{235}U) et impacté par un faisceau de neutrons.
- Chacun de ces atomes lourds peut se fissurer, conduisant à la production de :
 - Emission de 2-3 nouveaux neutrons, qui cassent d'autres noyaux \Rightarrow Réaction en chaîne
 - Produits résiduels
 - Energie (thermique)

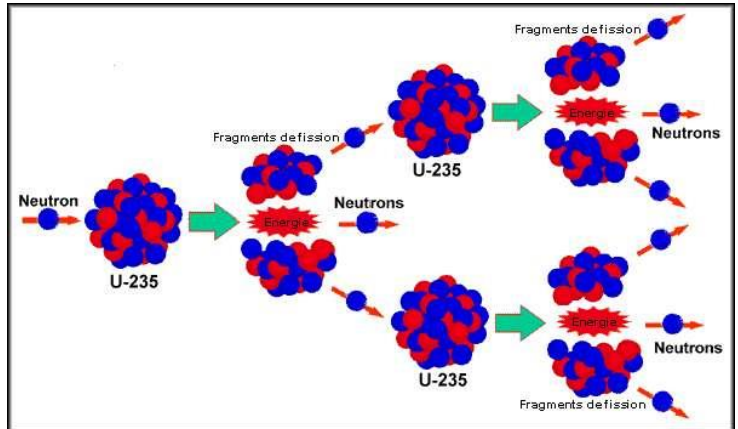
Energie nucléaire

Fission

Fusion

Radioactivité

- Applications
 - Bombe atomique A
 - Centrales nucléaires
- Masse critique d'un matériau fissile : quantité de matériau nécessaire pour déclencher une réaction en chaîne de fission nucléaire



thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Application

25

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de transmutation nucléaire

Principe

- 2 noyaux légers (hydrogène, hélium...) collisionnent
- Ils parviennent à fusionner pour ne former qu'un élément unique.
- Cette fusion s'accompagne d'un dégagement d'énergie

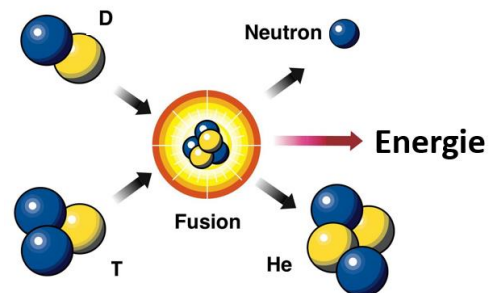
Energie nucléaire

Fission

Fusion

Radioactivité

- Applications
 - Soleil (la fusion est le mode de production d'énergie des étoiles.)
 - Bombes thermonucléaire H
 - Production d'énergie civile (projet ITER)



thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Application

26

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de transmutation nucléaire

Principe

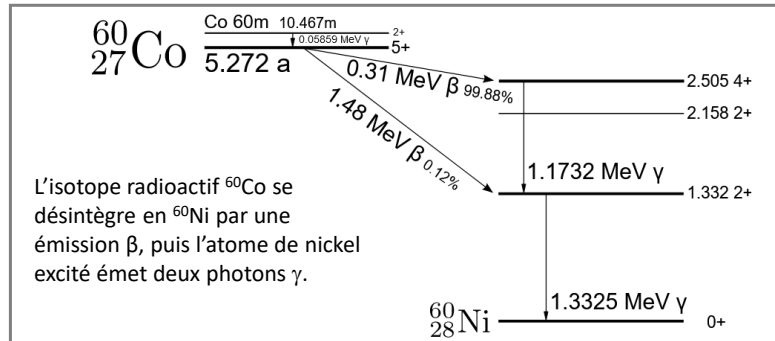
- Radioactivité : un noyau perd de l'énergie en émettant spontanément une ou plusieurs particules.
- Radioactivité α : émission d'un noyau ${}^4\text{He}$
- Radioactivité β : émission
 - Soit d'un électron et d'un anti-neutrino électronique (β^-)
 - Soit d'un positron et d'un neutrino électronique (β^+)
- Radioactivité γ : émission de type rayonnement électromagnétique de haute énergie

Energie nucléaire

Fission

Fusion

Radioactivité



thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



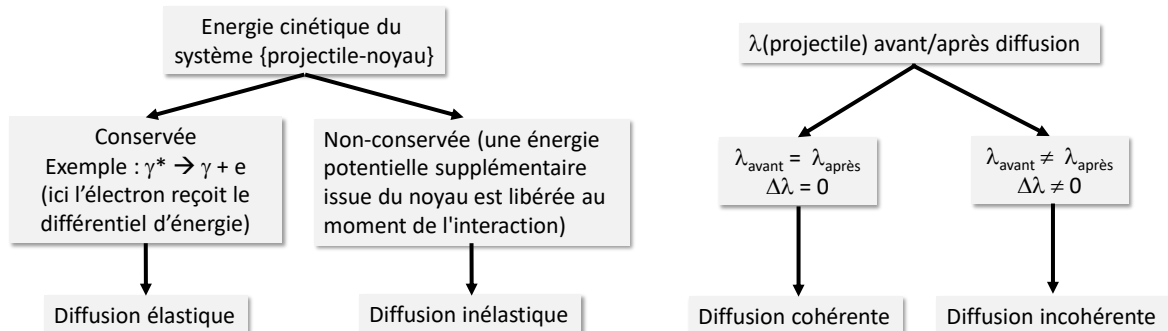
SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

27

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de diffusion nucléaire

- Interaction entre un noyau atomique et un projectile
- Projectile :
 - Photon, nucléon ou ensemble de nucléons
 - Il impacte le noyau atomique mais ne modifie pas sa composition
 - Sa trajectoire peut être modifiée du fait de l'interaction



thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



SU / FSI / UFR925 / Master M1
Physique Fondamentale & Applicator

28

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Réactions de diffusion nucléaire

	Diffusion Thomson		Diffusion Rayleigh	Diffusion par effet photo-électrique
	Sans effet Compton	Par effet Compton		
Particules mises en jeu	Le photon incident interagit avec un électron libre		Le photon incident interagit avec un électron apparié (molécule ayant un moment dipolaire comme N ₂ ou O ₂ . Le barycentre du nuage électronique d'un (des 2) atome ne coïncide pas avec le noyau)	Le photon incident « disparaît » en transmettant son énergie sous forme d'énergie cinétique à un électron
Energie du photon incident	Qq. 10 keV - 100 keV	>100 keV	Qq. eV	< qq. 10 keV.
Cohérence	Oui	Non	Oui	Non
Elasticité	Oui	Oui		