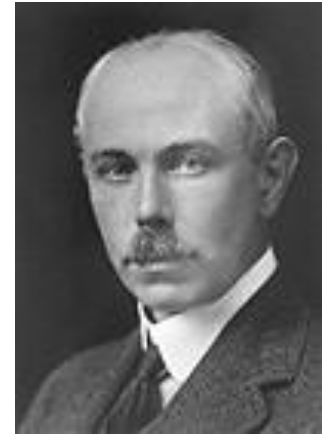
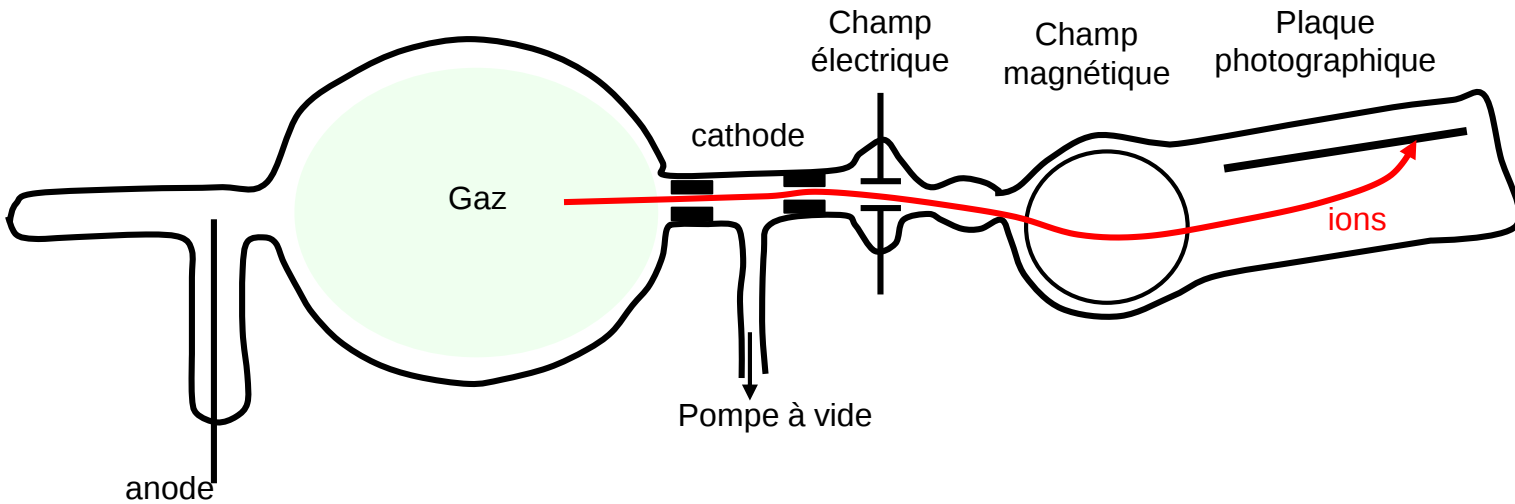


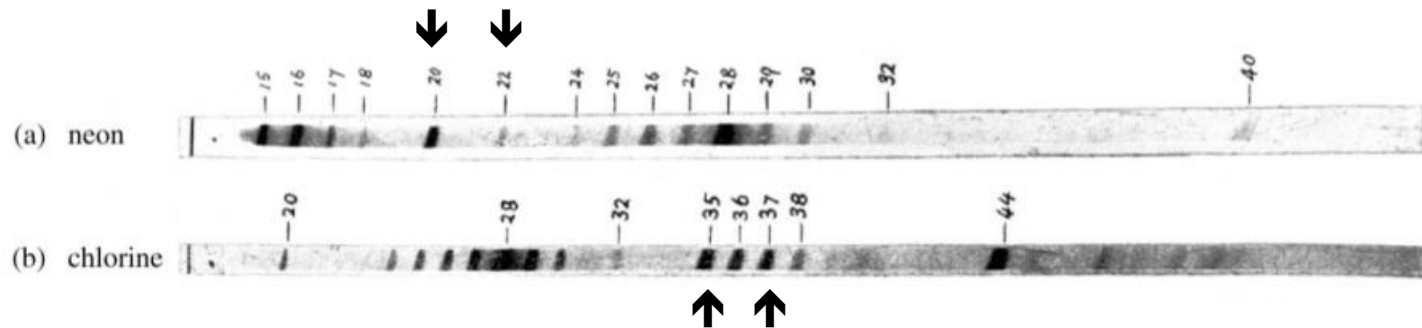
Deuxième Partie

Les débuts de la spectrométrie de masse



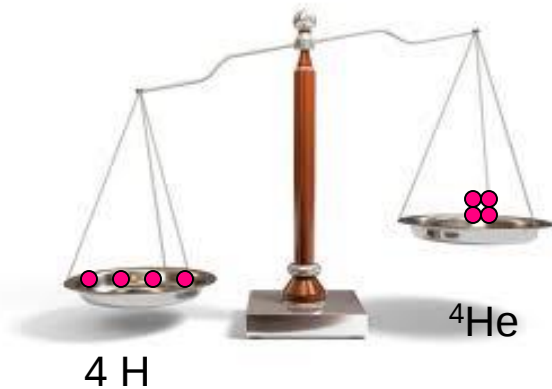
Francis Aston

1919: Avec le premier spectromètre de masse, F. Aston apporte la preuve expérimentale du concept d'isotope



Il mesure des abondances isotopiques et observe que les masses relatives des isotopes ($M(^{16}\text{O})=16$) sont des nombres entiers à l'exception de l'H (1.008)

Excès de masse

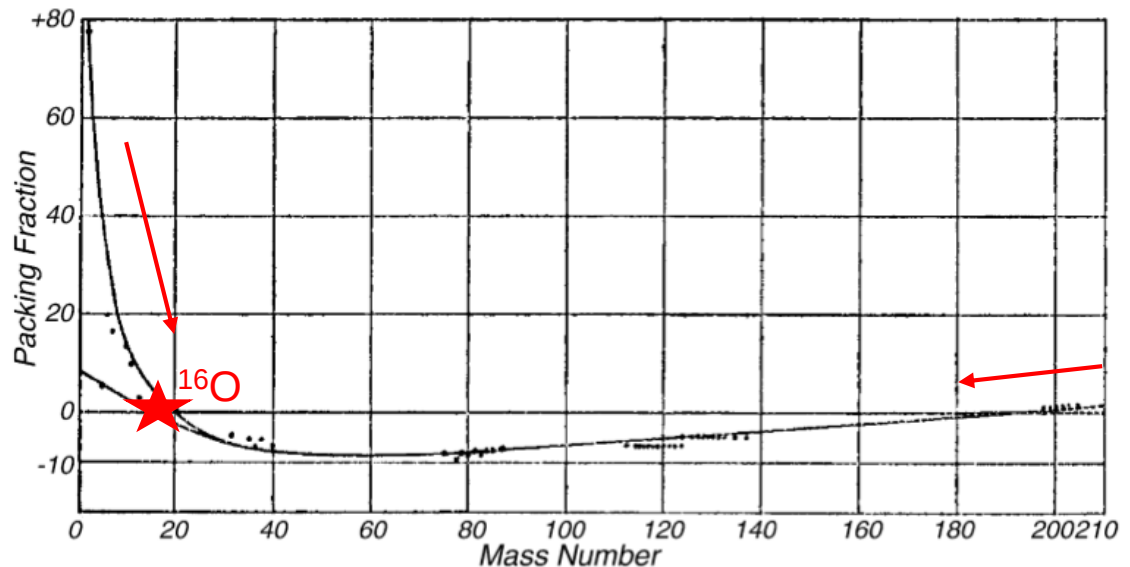


F. Aston propose que la masse est perdue pour former les noyaux == énergie de liaison

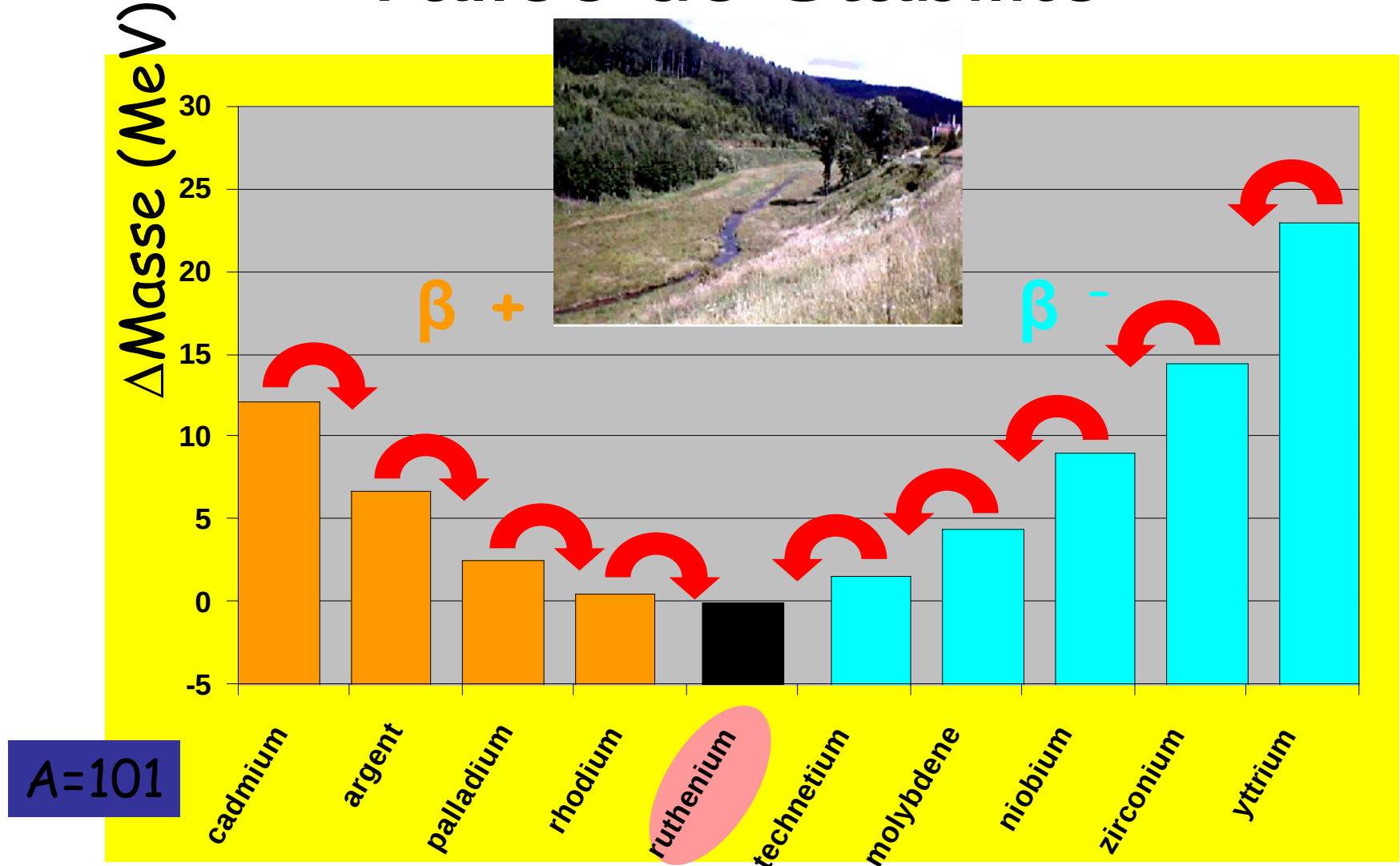
A. Eddington et J. Perrin suggèrent que la transformation d'H en He est la source de l'énergie du soleil

1927: Avec un spectromètre amélioré, il découvre que les masses relatives des ions plus lourds ne sont pas tout à fait des nombres entiers

'packing fraction' = $10\,000 (M - A)/A$



Vallée de Stabilité



$A=101$

protons 48
neutrons 53

44
57

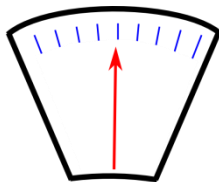
39
62

Des mesures de masse toujours plus précises.....

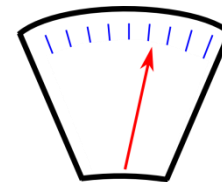
Précision $\sim 1/10^8$



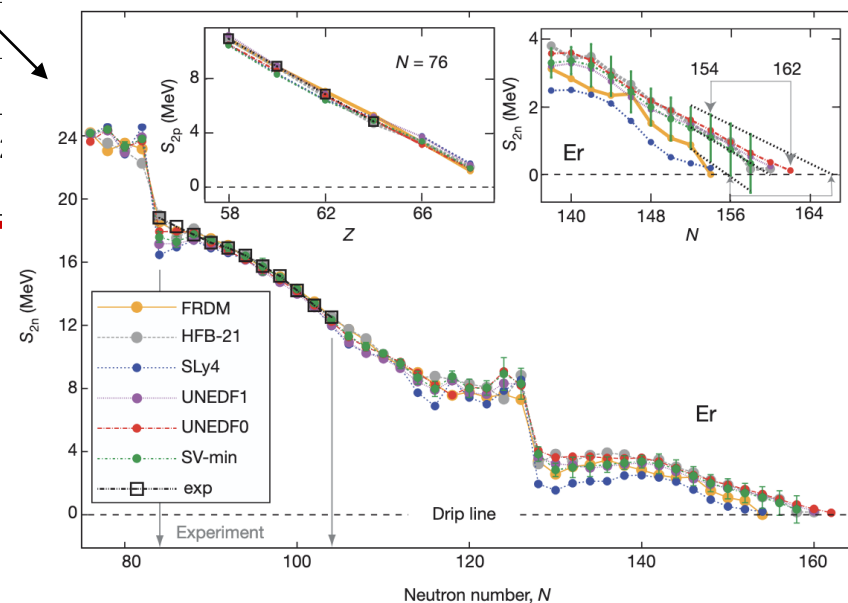
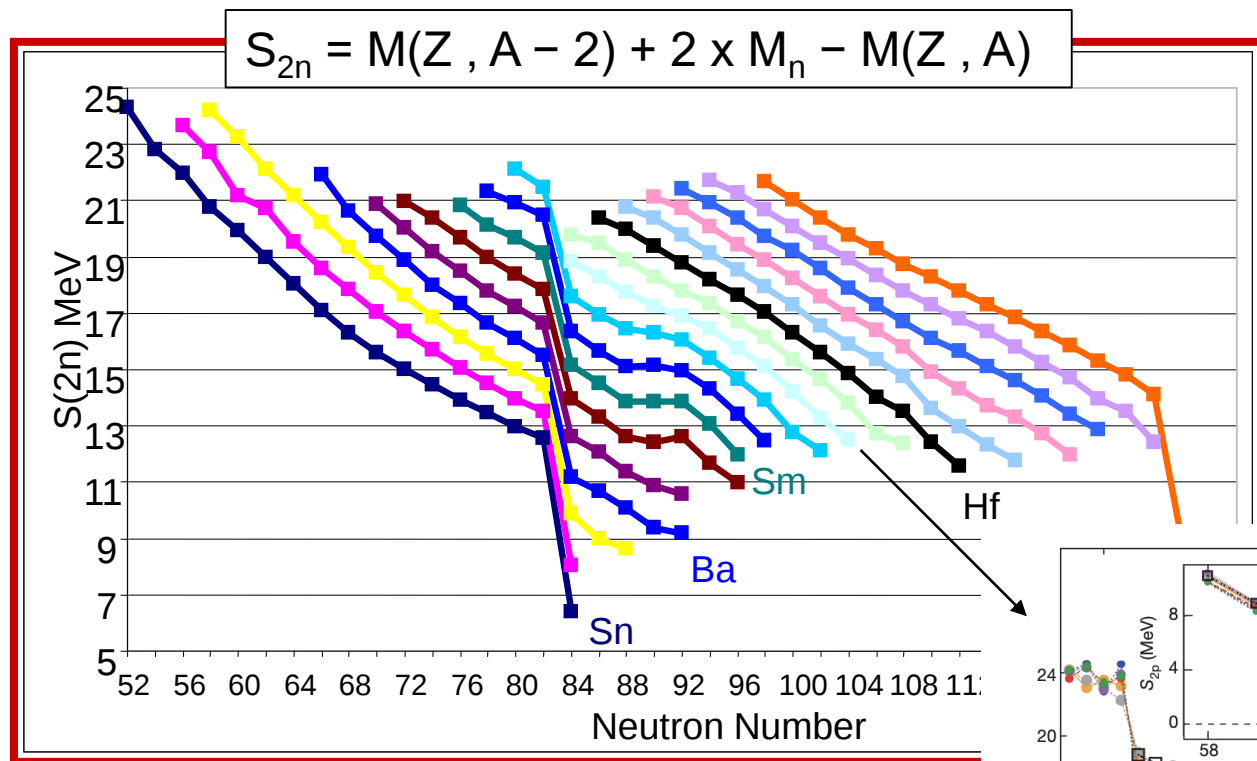
Airbus A380-800F:
252.2 tonnes (à vide)



Airbus A380-800F +
1 mini-carambar (4 g)

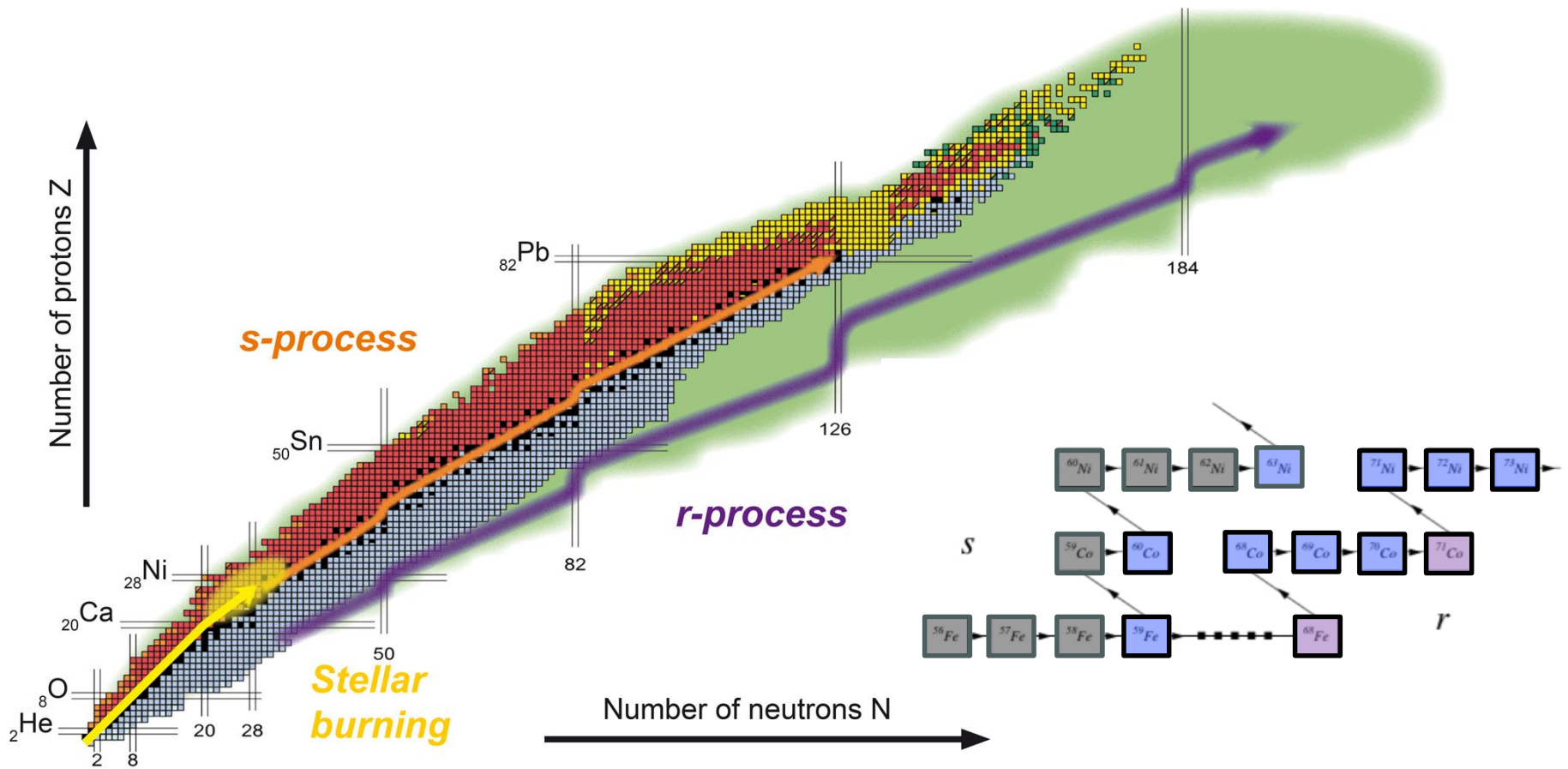


Energies de séparation & drip line



Jochen Erler et al., Nature 486 (2012)

Energies de séparation & drip line



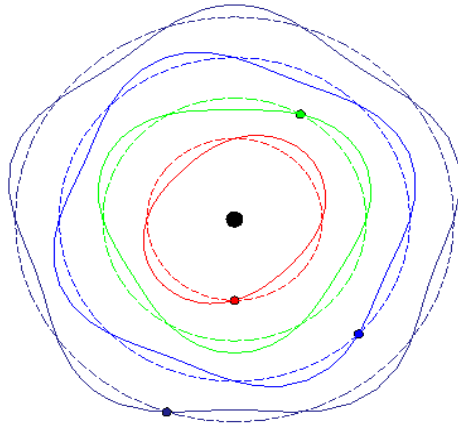
credit: EMMI, GSI / Different Arts

Mécanique Quantique et Fonction d'Onde

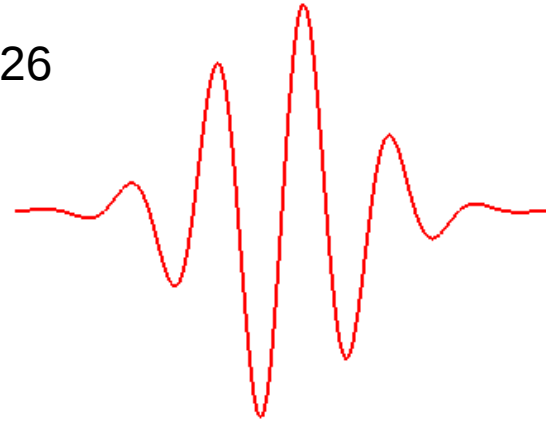
1924



L. de Broglie



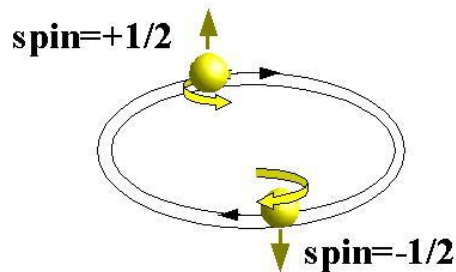
1926



1924-1925



W. Pauli



M. Born



W. Heisenberg



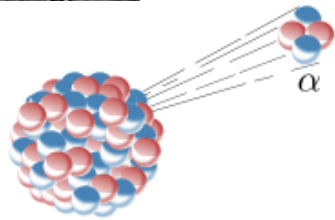
E. Schrödinger

La radioactivité α expliquée



1928:

G. Gamow propose un modèle de la radioactivité α basé sur la Mécanique Quantique
Z. Physik 51, 204 (1928)



^{212}Po

$E_\alpha = 8.78 \text{ MeV}$

$E_B \sim 25 \text{ MeV}$

Energy

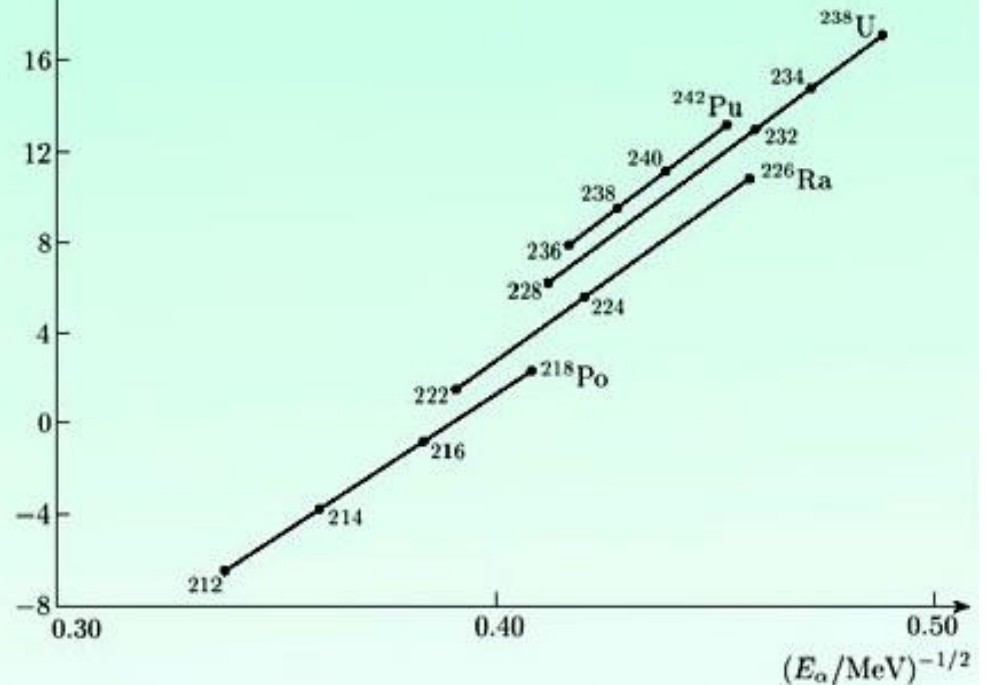
Barrière de
potentiel due à la
répulsion
électrostatique

r

Potentiel nucléaire dans
lequel la particule alpha
est confinée

$\log(T_{1/2}/\text{s})$

Loi de Geiger-Nuttall (1911)



L'Antimatière

Relativité Restreinte

Mécanique Quantique

électron relativiste



1928 : Equation de Dirac

L'équation de Dirac a 2 solutions !

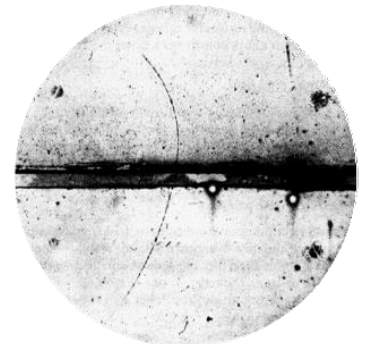
{ l'électron
????

1931: P. Dirac invente l'anti-électron

1932 : C. Anderson découvre l'anti-électron
et l'appelle positron

e^-
électron

e^+
anti-électron

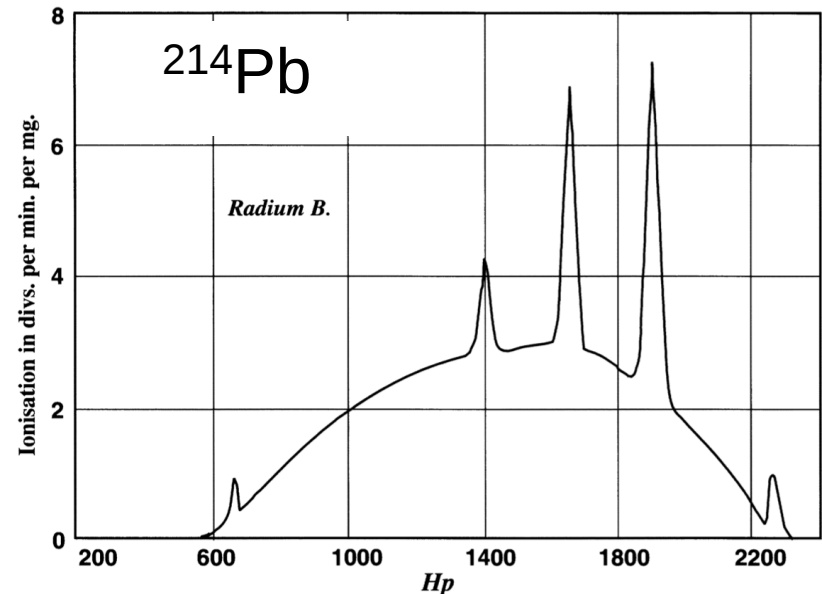


Radioactivité β et l'hypothèse du neutrino

1914 J. Chadwick met en évidence le spectre continu du rayonnement beta (très différent du spectre du rayonnement alpha et gamma)



la loi de la conservation d'énergie est-elle violée ?



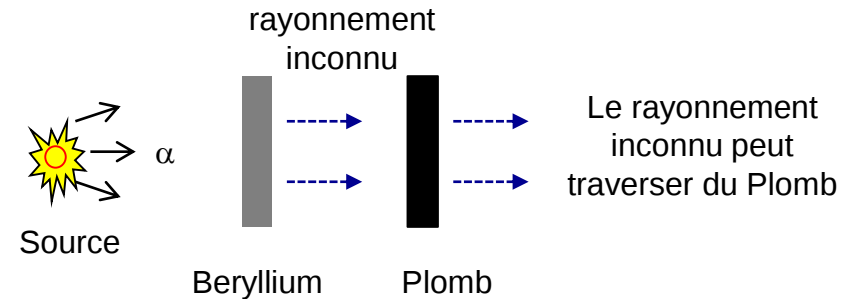
Chadwick à Rutherford: “Je ne trouve pas l’ombre d’une raie. Il y probablement une erreur stupide quelque part...!”

1930: W. Pauli suggère l’existence d’une nouvelle particule neutre de masse ~ 0 qu’il appelle ‘neutronen’ et qui partagerait l’énergie de désintégration β avec l’e⁻

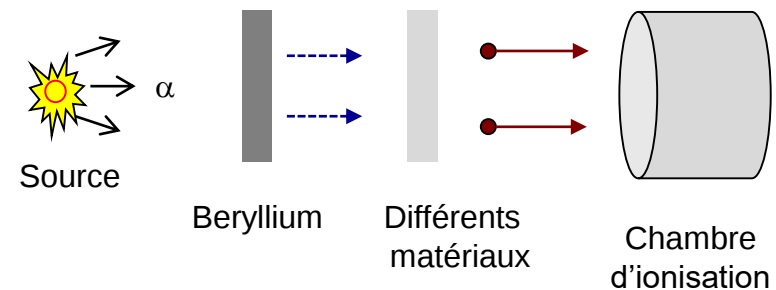
Découverte du neutron

1930-32

W. Bothe & H. Becker
découvrent une étrange
réaction



James
Chadwick

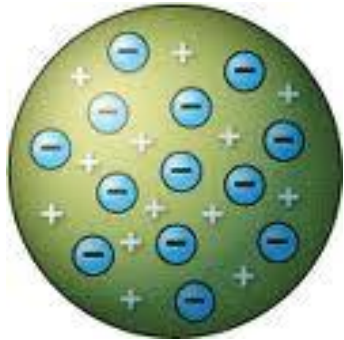


J. Chadwick démontre que le rayonnement correspond à une
particule de masse ~ 1 : le neutron

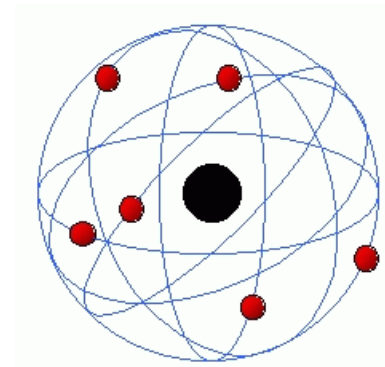
Le noyau au complet

1932: D. Ivanenko, W. Heisenberg et E. Majorana : le noyau est composé de Z protons et N neutrons. Heisenberg introduit le concept d'isospin.

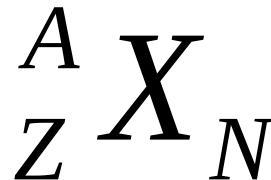
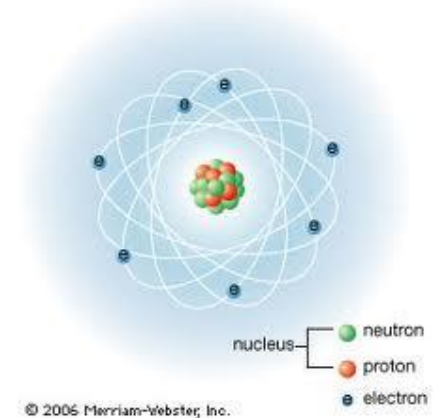
1898



1911



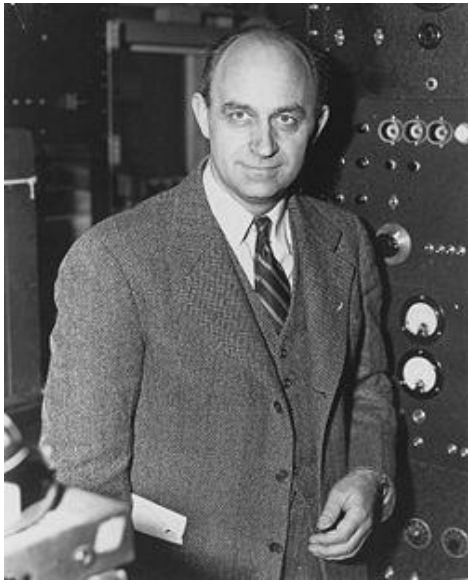
1932



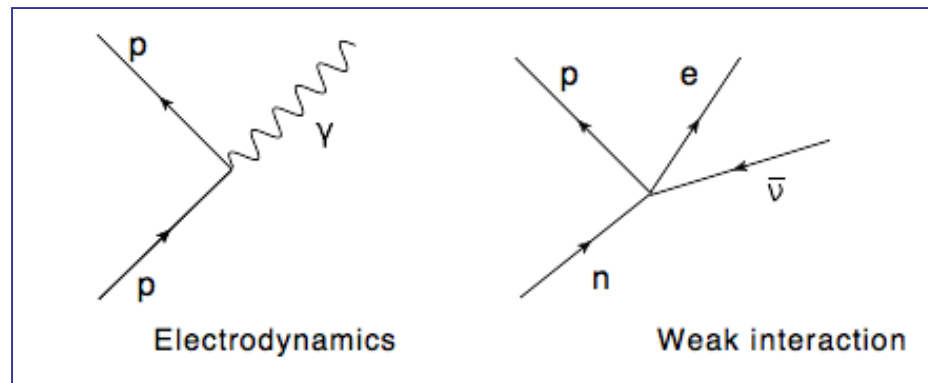
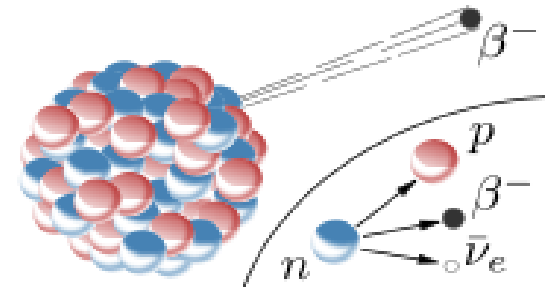
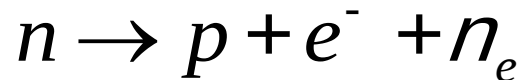
La présence des neutrons dans le noyau explique l'isotopie et résout certains problèmes de spin, moment magnétique et confinement des e⁻

Origine des e^- de la radioactivité β^- ?

1934: E. Fermi propose l'existence d'une nouvelle force, la force faible, et énonce sa théorie de la décroissance β^-



Enrico Fermi



Analogie de Fermi

Il soumet ces travaux à la revue Nature - mais le papier sera rejeté sous prétexte qu'il contient "des spéculations trop éloignées de la réalité"

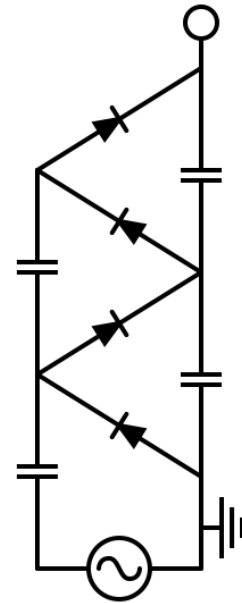
Des accélérateurs pour sonder le noyau



Ernest Walton, Ernest Rutherford, John Cockcroft

J. Cockcroft se lance avec E. Walton dans la construction d'une machine capable de produire une tension de 800 kV

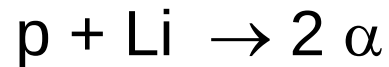
Nature 129, Février 1932, 242



multiplicateur de
tension de Cockcroft-Walton

Cockroft et Walton cassent l'atome

1932: En bombardant du Li avec des protons d'énergie **250 keV**, Cockroft et Walton observent la réaction:



Li



L'énergie des 2 particules alpha est mesurée: **~17 000 keV**

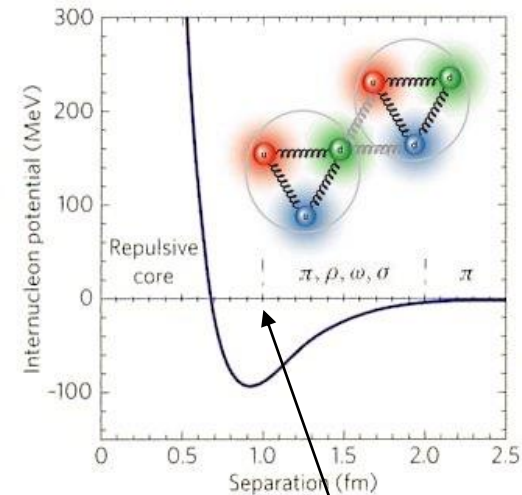
Première confirmation expérimentale de $E = mc^2$: l'énergie est préservée si **mc^2** est considéré comme une forme d'énergie

L'interaction nucléaire

- interaction attractive forte, répulsive à très courtes distances
- courte portée
- ~indépendante du type de nucléon: n-n, n-p, p-p

Modern Nuclear Chemistry, W. Loveland et al.,

<i>A</i>	<i>Nucleus</i>	<i>Total Binding Energy (MeV)</i>	<i>Coulomb Energy (MeV)</i>	<i>Net nuclear binding energy (MeV)</i>
3	³ H	-8.486	0	-8.486
	³ He	-7.723	0.829	-8.552
13	¹³ C	-97.10	7.631	-104.734
	¹³ N	-94.10	10.683	-104.770
23	²³ Na	-186.54	23.13	-209.67
	²³ Mg	-181.67	27.75	-209.42
41	⁴¹ Ca	-350.53	65.91	-416.44
	⁴¹ Sc	-343.79	72.84	-416.63



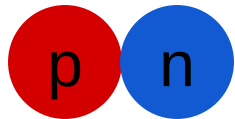
Taille des nucléons

7/2-
3/2-
3/2+
3/2-
5/2-
1/2-
1/2+
5/2+

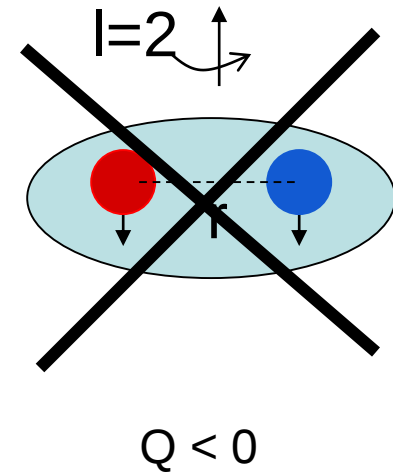
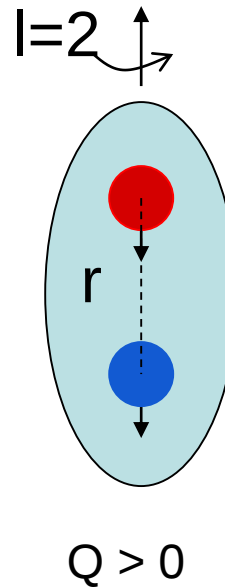
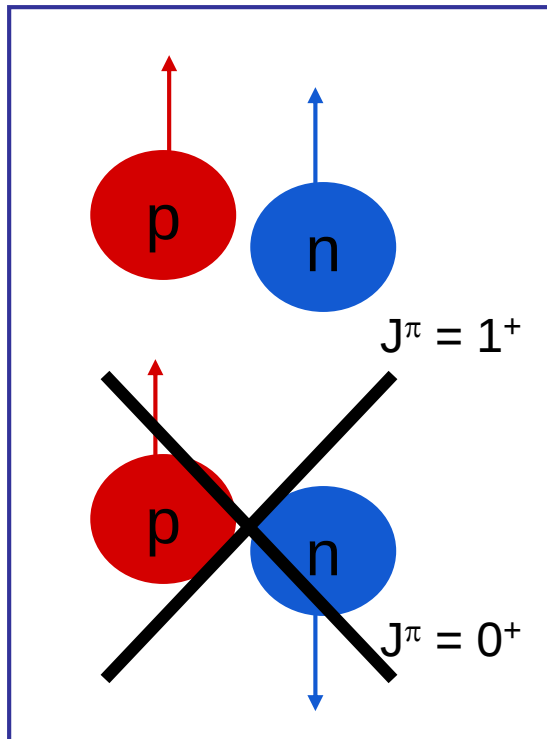
L'interaction nucléaire

- dépendante des orientations & positions relatives des spins des nucléons

deuteron

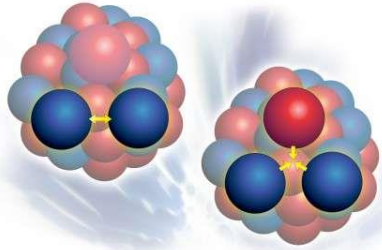


$J^\pi = 1^+$
 $\mu_d = 0.8574 \mu_N$ ($\mu_p = +2.7928 \mu_N$, $\mu_n = -1.9130 \mu_N$)
 faible moment quadripolaire électrique positif : $Q = 0.2859 e \cdot fm^2$

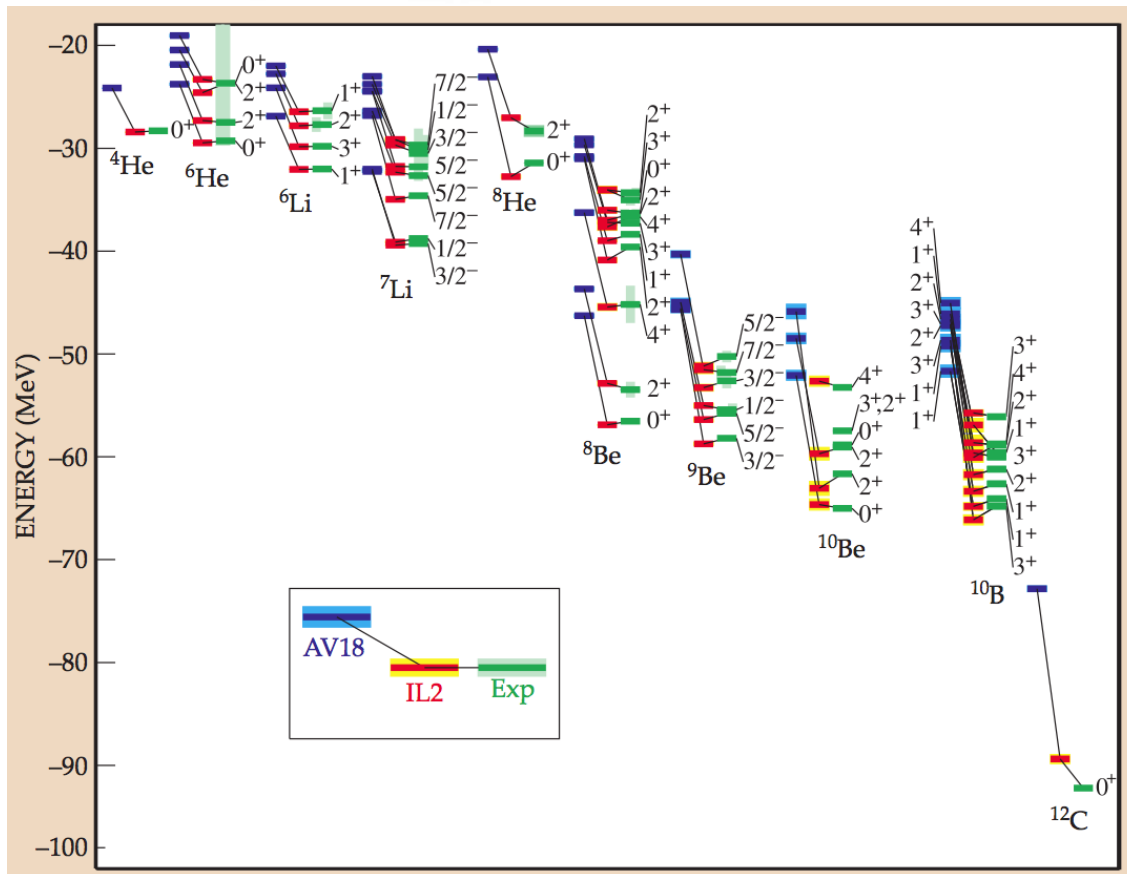


⇒ terme spin-spin et terme tenseur dans la force NN

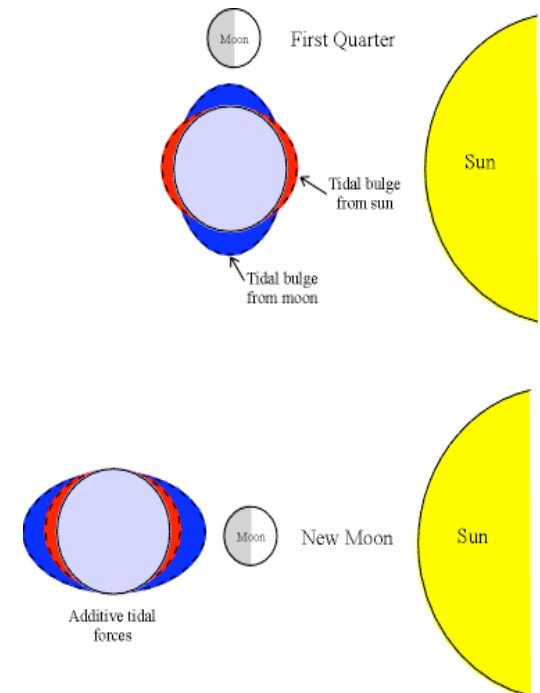
L'interaction nucléaire



Importance des forces à 3 corps NNN



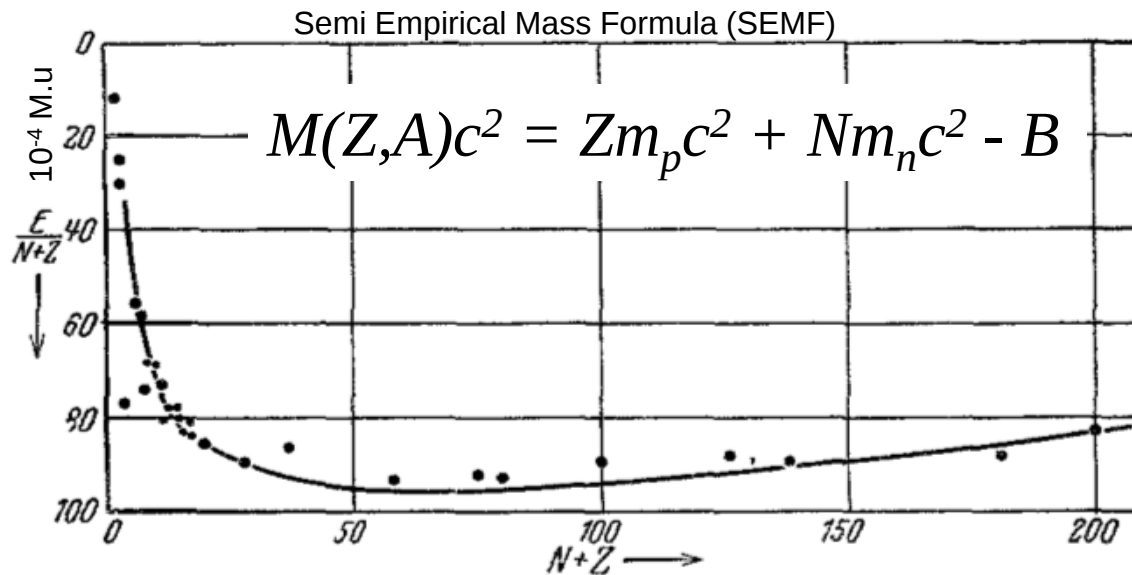
tidal effects lead to 3-body forces
in earth-sun-moon system



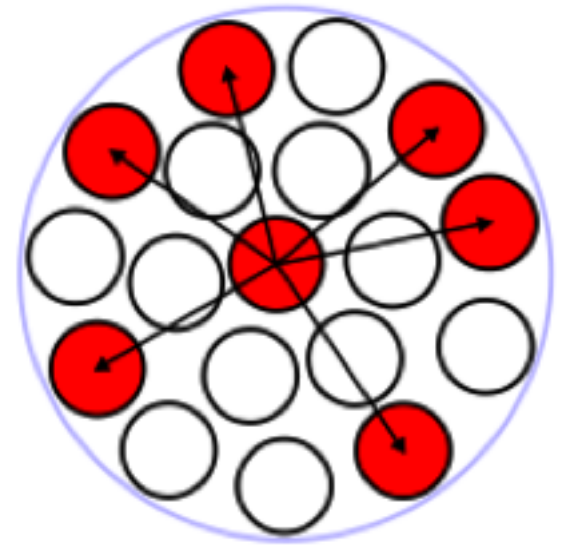
La goutte liquide

similarité avec la force qui lie les molécules d'eau dans une goutte liquide

W. Heisenberg, Congrès de Solvay 1933 d'après une idée originale de G. Gamow (Proc. Roy. Soc. 126 (1930) 637)



C.F. v. Weizsäcker, Z. Phys. 96 (1935) 431



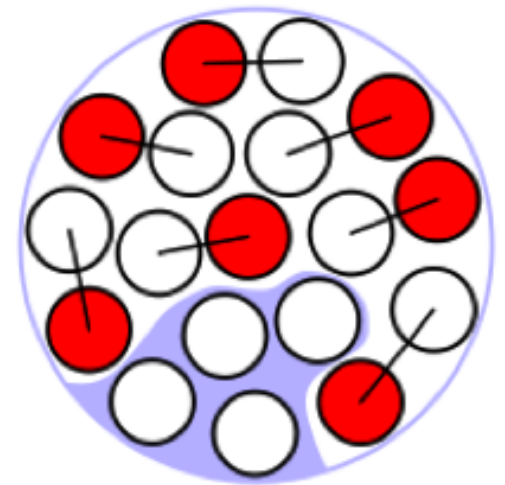
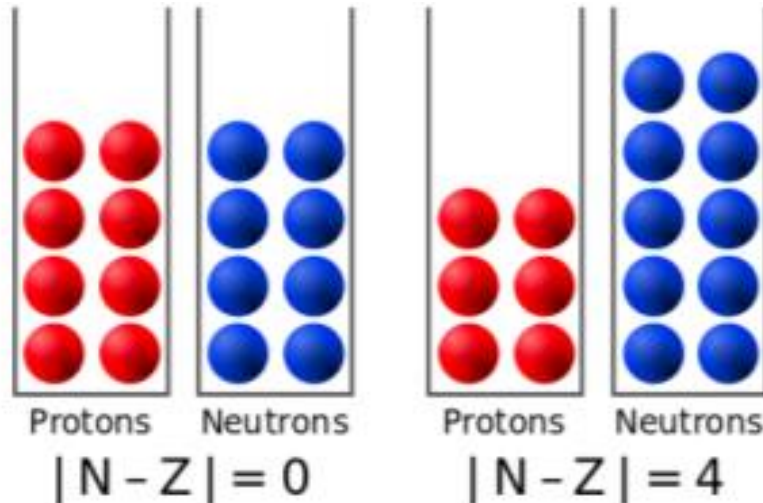
Volume term	Surface term	Coulomb term	Asymmetry term	Pairing term
$a_v A$	$-a_s A^{2/3}$	$-a_c Z^2 A^{-1/3}$	$-a_a (A - 2Z)^2 A^{-1}$	$-\delta$

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1} - \delta$$

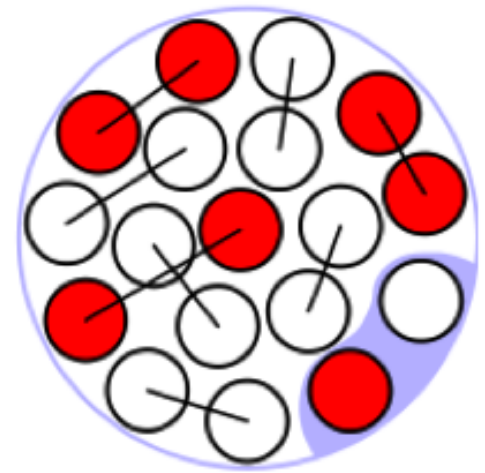
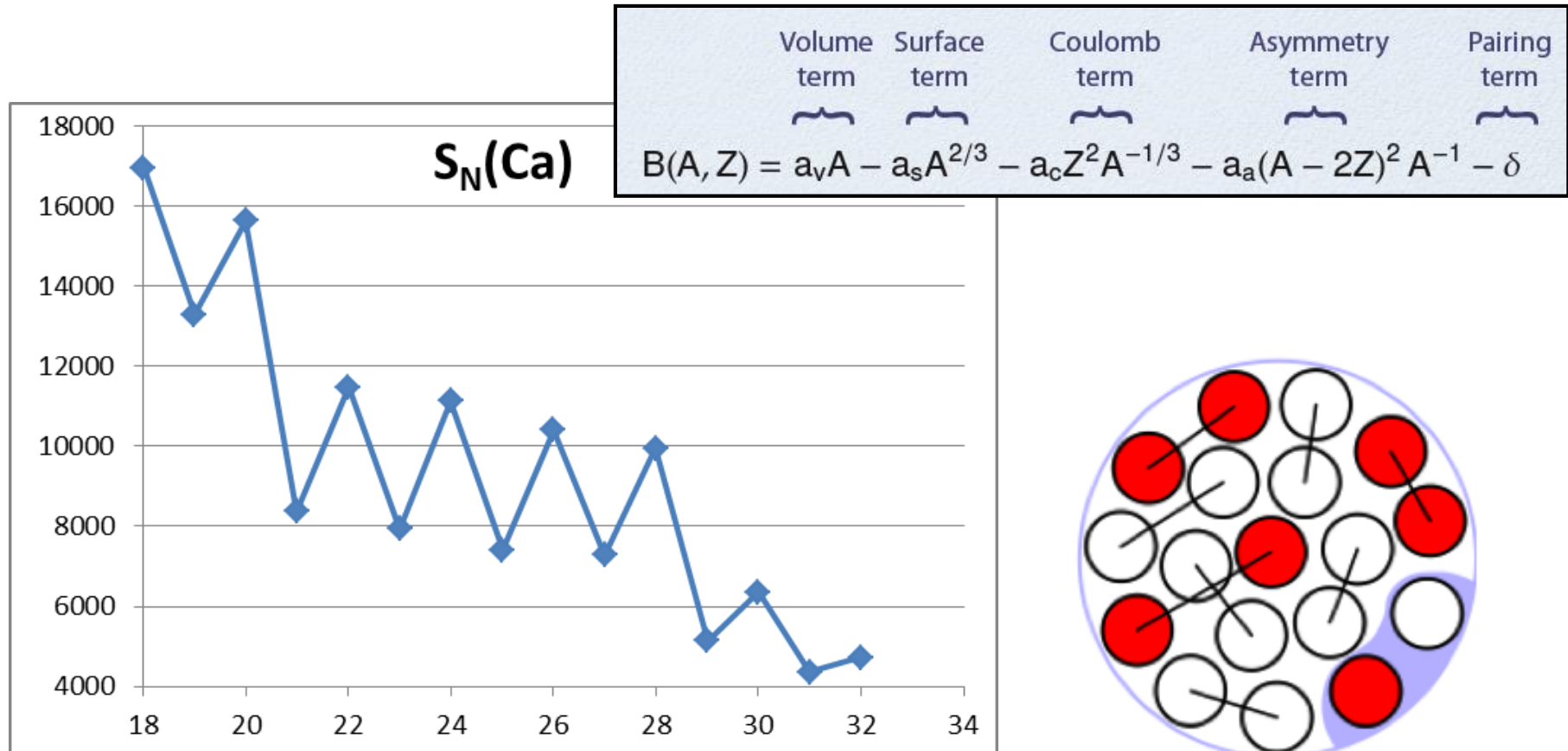
Termes d'asymétrie

Volume term	Surface term	Coulomb term	Asymmetry term	Pairing term
$a_v A$	$-a_s A^{2/3}$	$-a_c Z^2 A^{-1/3}$	$-a_a (A - 2Z)^2 A^{-1}$	$-\delta$

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1} - \delta$$



Terme d'appariement



$$\begin{aligned} \delta &= +a_p A^{-1/2} && \text{for both } N \text{ \& } Z \text{ odd} \\ &= 0 && \text{for } N \text{ even, } Z \text{ odd / } Z \text{ even, } N \text{ odd} \\ &= -a_p A^{-1/2} && \text{for both } N \text{ \& } Z \text{ even} \end{aligned}$$

Applications aux données

Wapstra (1971):

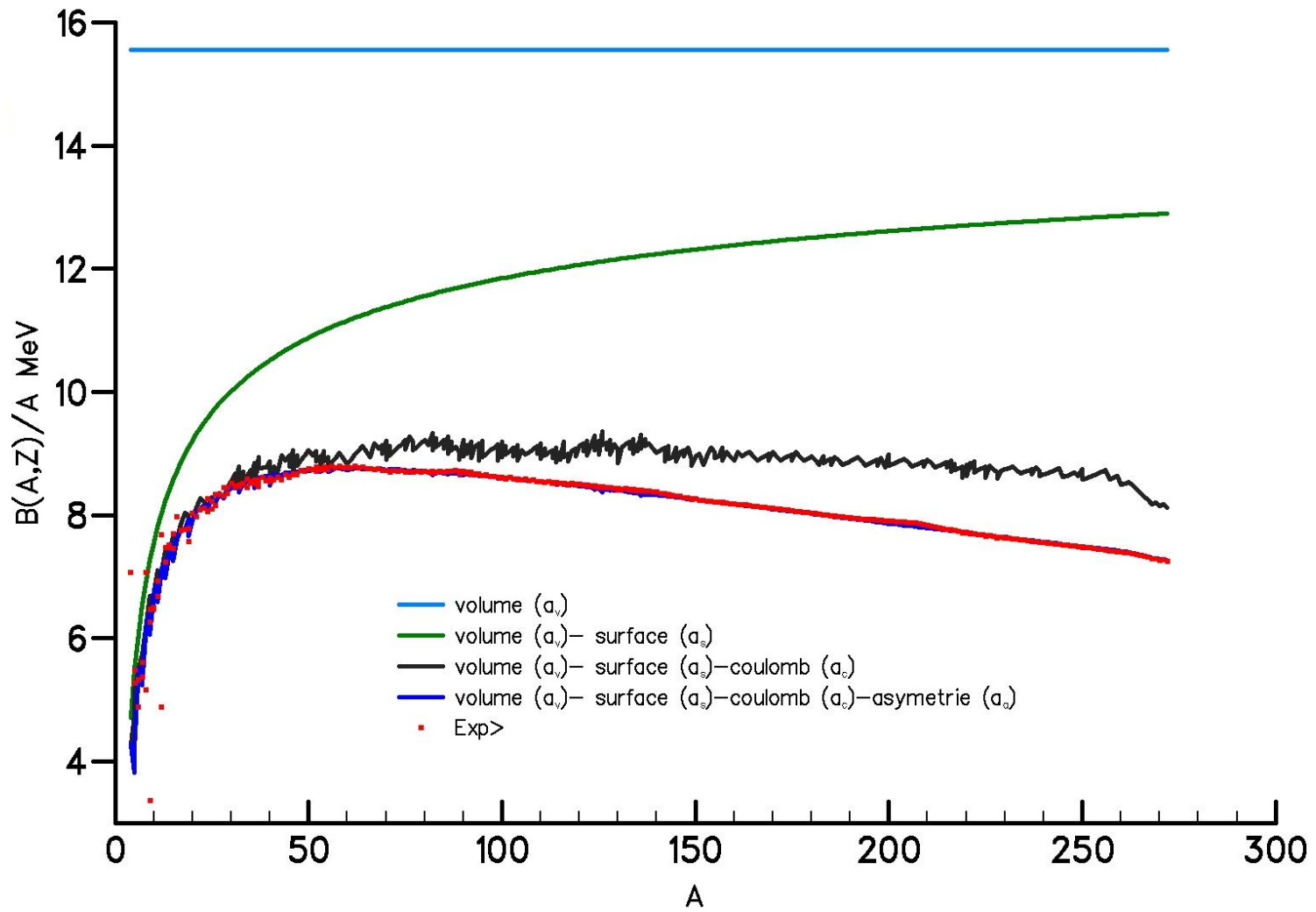
$$a_v = 15.85 \text{ MeV}$$

$$a_s = 18.34 \text{ MeV}$$

$$a_c = 0.71 \text{ MeV}$$

$$a_A = 23.21 \text{ MeV}$$

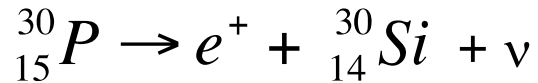
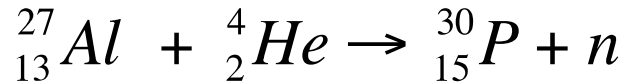
$$a_p = 12 \text{ MeV}$$



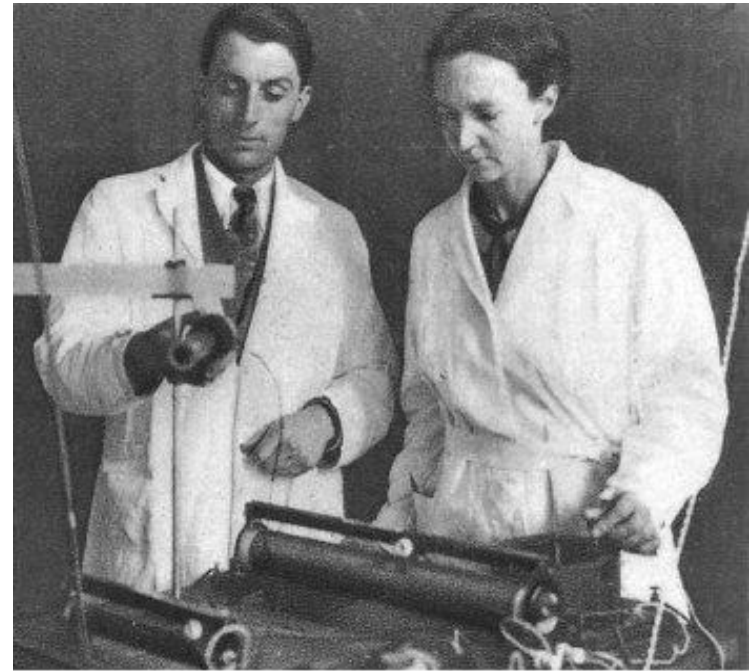
Radioactivité artificielle

1934 I. Curie et F. Joliot

découverte de la radioactivité artificielle



↑
radio-phosphore !



Irène Curie et
Frédéric Joliot

1936: John H. Lawrence est le premier à utiliser un radioélément artificiel à des fins thérapeutiques: ${}^{32}\text{P}$ pour traiter la leucémie

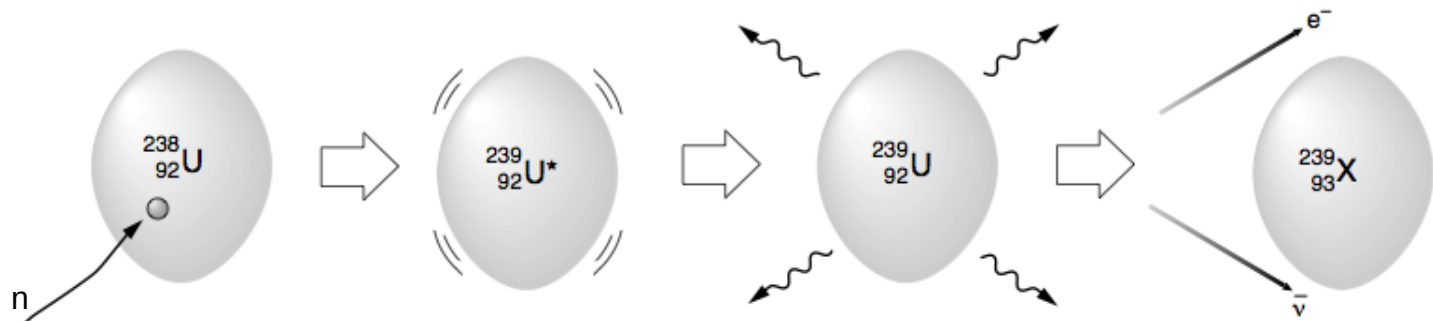
L'ère du neutron

1934 E. Fermi propose de bombarder des matériaux avec des neutrons

Il découvre que l'irradiation aux neutrons lents est plus apte à provoquer des transmutations

Son groupe découvre 40 nouveaux isotopes en 3 ans !

Il propose d'irradier des noyaux lourds pour synthétiser des éléments transuraniens et pense avoir découvert les éléments $Z=93$ et 94 (Ausonium et Hesperium)



La quête des transuraniens...

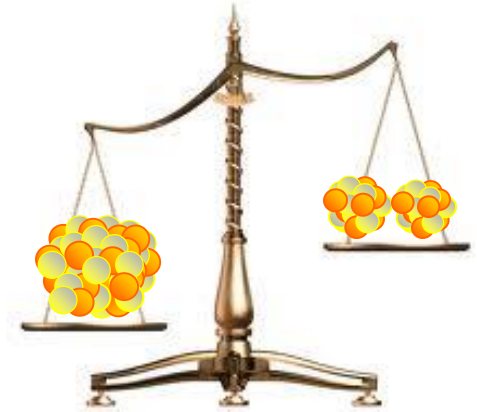
1935-1938: Otto Hahn, Lise Meitner et Fritz Strassmann comptabilisent plus de 10 nouveaux radio-isotopes transuraniens (jusqu'à $Z=96$)

S-ELECTRONS																			
1s ¹	1s ²																		
H	He																		
2s ¹	2s ²																		
Li	Be																		
3s ¹	3s ²																		
Na	Mg																		
										P-ELECTRONS									
										2p ¹	2p ²	2p ³	2p ⁴	2p ⁵	2p ⁶				
										B	C	N	O	F	Ne				
										3p ¹	3p ²	3p ³	3p ⁴	3p ⁵	3p ⁶				
										Al	Si	P	S	Cl	Ar				
d-ELECTRONS																			
4s ¹	4s ²	4s ² 3d ¹	4s ² 3d ²	4s ² 3d ³	4s ² 3d ⁴	4s ² 3d ⁵	4s ² 3d ⁶	4s ² 3d ⁷	4s ² 3d ⁸	4s ² 3d ⁹	4s ² 3d ¹⁰	4p ¹	4p ²	4p ³	4p ⁴	4p ⁵	4p ⁶		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
5s ¹	5s ²	5s ² 4d ¹	5s ² 4d ²	5s ² 4d ³	5s ² 4d ⁴	5s ² 4d ⁵	5s ² 4d ⁶	5s ² 4d ⁷	5s ² 4d ⁸	4d ¹⁰	5s ² 4d ¹⁰	5s ² 4d ¹⁰	5p ¹	5p ²	5p ³	5p ⁴	5p ⁵	5p ⁶	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
6s ¹	6s ²	6s ² 5d ¹	6s ² 5d ²		6s ² 5d ⁴	6s ² 5d ⁵		5d ¹⁰	5d ¹⁰	6s ² 5d ¹⁰	6s ² 5d ¹⁰	6p ¹	6p ²	6p ³	6p ⁴	6p ⁵	6p ⁶		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
7s ¹	7s ²																		
Ra	Ac	Th	Pa	U															
										f-ELECTRONS									
5d ⁴ f ³	5d ⁴ f ²	5d ⁴ f ³	5d ⁴ f ⁴	5d ⁴ f ⁵	5d ⁴ f ⁶	5d ⁴ f ⁷	5d ⁴ f ⁸	5d ⁴ f ⁹	5d ⁴ f ¹⁰	5d ⁴ f ¹¹	5d ⁴ f ¹²	5d ⁴ f ¹³	5d ⁴ f ¹⁴	5d ⁴ f ¹⁵	5d ⁴ f ¹⁶	5d ⁴ f ¹⁷	5d ⁴ f ¹⁸		
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						

La fission

1939: L. Meitner donne une explication à cette découverte avec son neveu Otto Frisch: **la fission** de l'uranium

L. Meitner and O. Frisch, Nature 143 (1939) 239



L'hypothèse est tout de suite confirmée expérimentalement par O. Frisch puis par d'autres (F. Joliot)

O. Frisch, Nature 143 (1939) 276

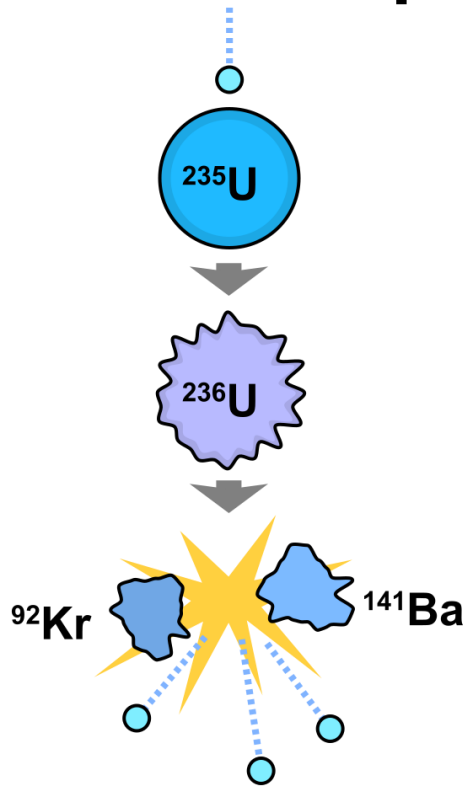
N. Bohr et J.A. Wheeler élaborent une théorie de la fission basée sur la goutte liquide

N. Bohr et A. Wheeler, Phys. Rev. 56 (1939) 426

Propriétés de la fission

Chaque fission de l'Uranium produit des neutrons

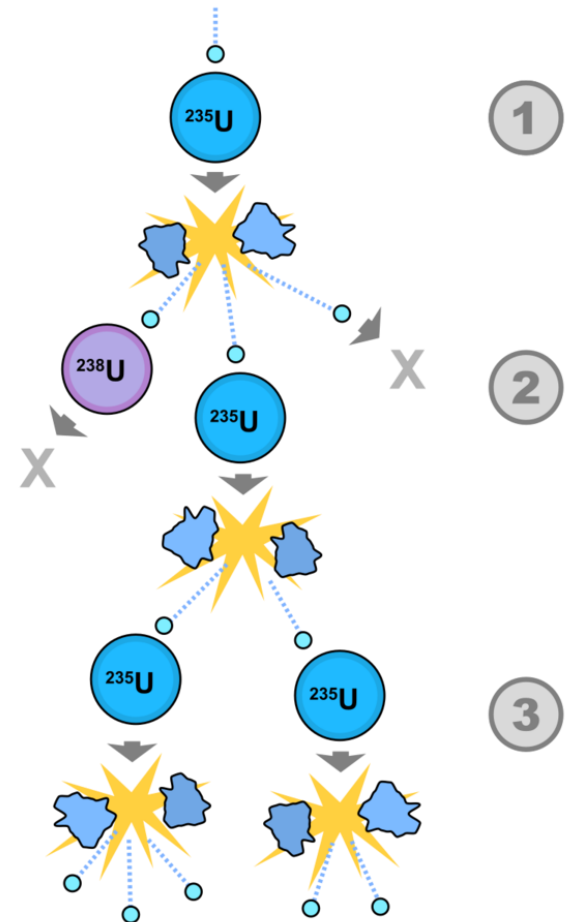
Hans Von Halban, Frédéric Joliot et Lew Kowarski, Nature 143 (1939) 470



F. Joliot voit la possibilité d'une réaction en chaîne

Francis Perrin introduit la notion de masse critique pour obtenir une réaction en chaîne

Des brevets sont déposés



Le projet Manhattan et C_{hicago}P_{ile}-1

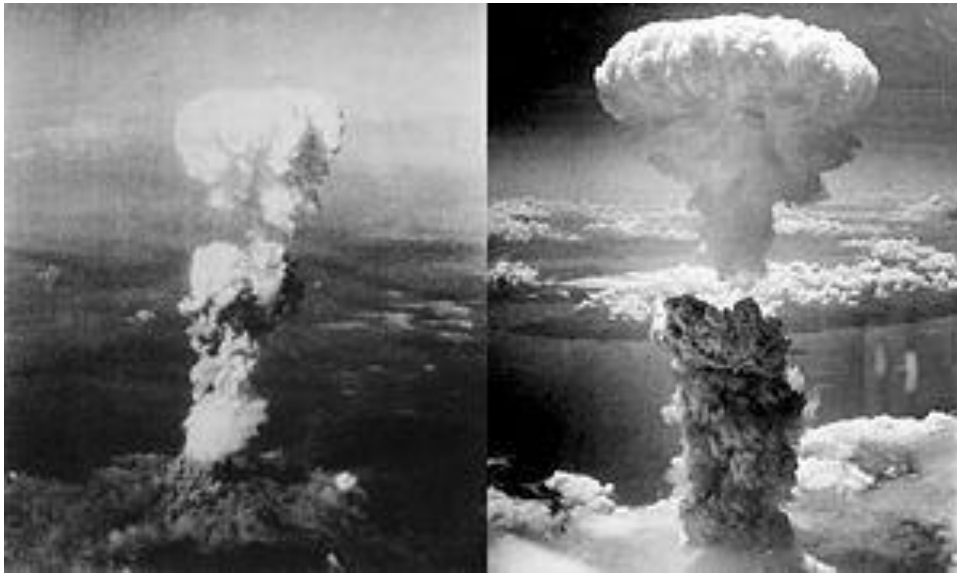
Leo Szilard fait signer à A. Einstein une lettre au président Franklin D. Roosevelt en 1939 sur la possibilité d'une bombe atomique.



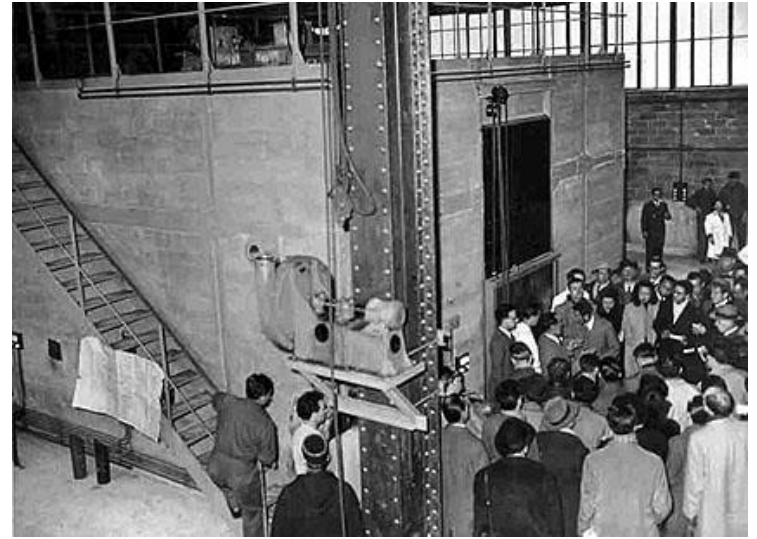
La première pile atomique est inaugurée en décembre 1942

La réaction en chaîne est maintenue pendant 28 minutes

La fission pour la guerre et la paix....



Hiroshima et Nagasaki les 6 et 9 Août 1945



1948: Inauguration de la première pile atomique française: ZOE



1951: Première production d'électricité nucléaire à EBR-I dans l'Idaho (USA)

1954: Premiers kWh d'une centrale nucléaire: Obninsk AES-1 (URSS)

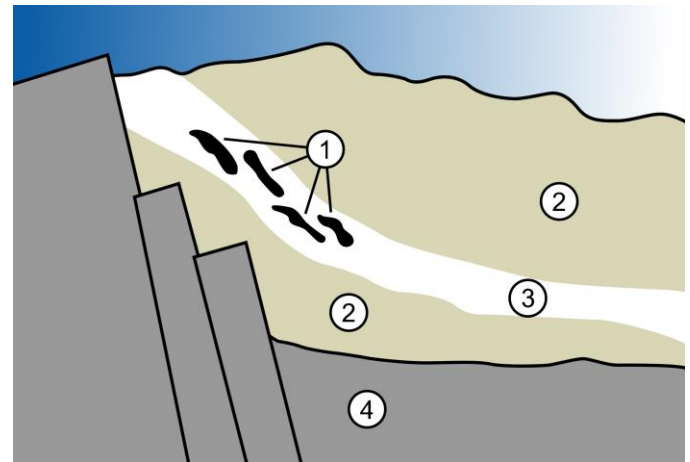


Réacteurs naturels d'Oklo

Découverte en 1972 dans une mine d'U au Gabon (déficit anormal de ^{235}U , plus tard confirmé par des traces de produits de fission)

Concours de circonstances:

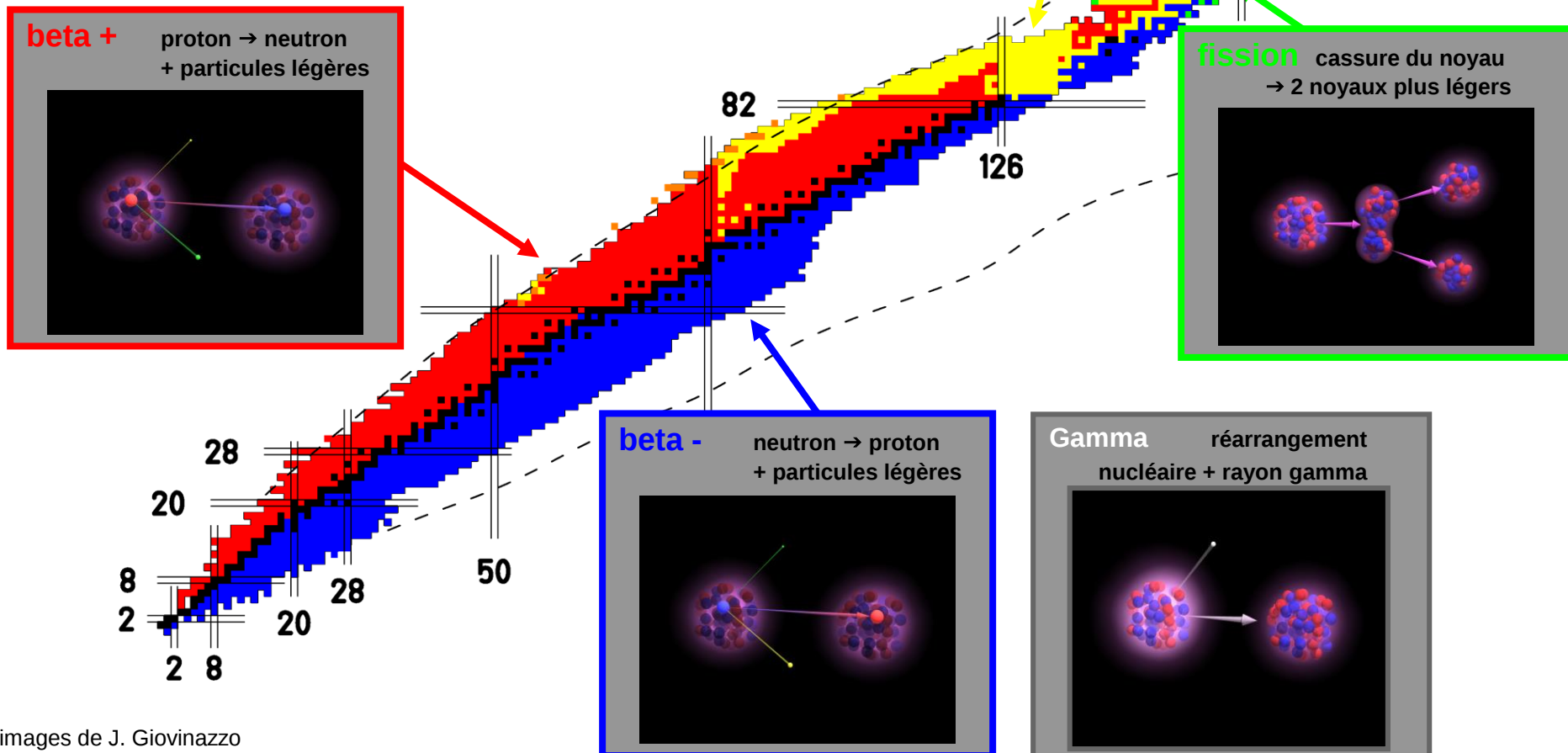
- Zone riche en U
- Concentration suffisante de ^{235}U
(concentration plus élevée il y a 2 milliards d'années: 3.8% au lieu de 0.7%)
- Présence d'un modérateur pour entretenir la réaction: l'eau
- Absence de métaux/minéraux absorbeurs de neutrons



Ces réacteurs ont fonctionné pendant des centaines de milliers d'années par cycle de ~ 2.5 h

Nouvelles décou

1940: G. Flerov et K. Petrzhak découvrent la fission spontanée en travaillant sur des noyaux d'Uranium



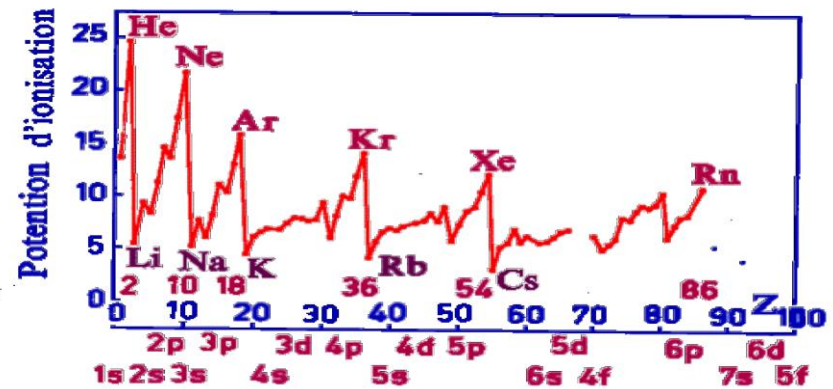
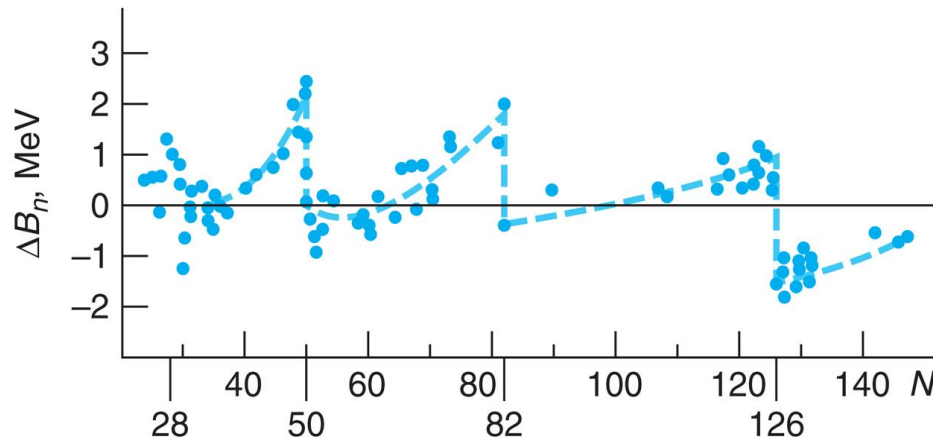
Nombres Magiques



Maria G.
Mayer

M. Goeppert Mayer remarque que les noyaux ayant un nombre de neutrons et/ou de protons égal à 2, 8, 20, 50, 82, 126 sont relativement plus abondants que leurs voisins

Les noyaux associés à ces nombres sont également particulièrement liés et génèrent des discontinuités par rapport à l'énergie de la goutte liquide



⇒ structure périodique dans le noyau ?

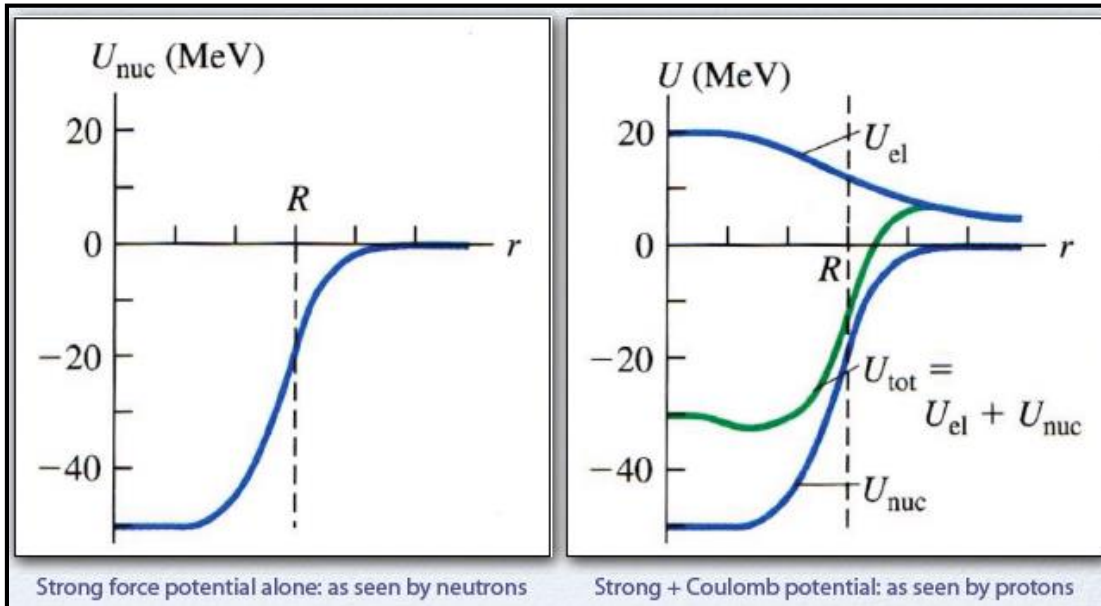
'On closed shells in nuclei', M G. Mayer *Phys. Rev.* 74 (1948) 235

La mécanique quantique ne reproduit pas ces nombres au delà de 20 ...

potentiel nucléaire moyen ressenti par les nucléons



niveaux d'énergie



2p	=====	6	40
1f	=====	14	
2s	=====	2	20
1d	=====	10	
1p	●●●●●●	6	8
1s	●●	2	2

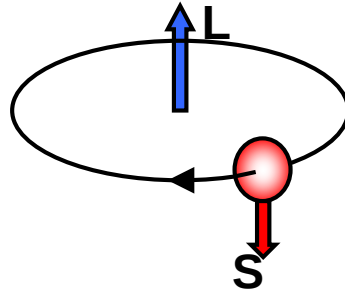
Nombre total de neutrons (ou protons) que peuvent accommoder les couches:

2, 8, 20, 40, 58, 92, 138

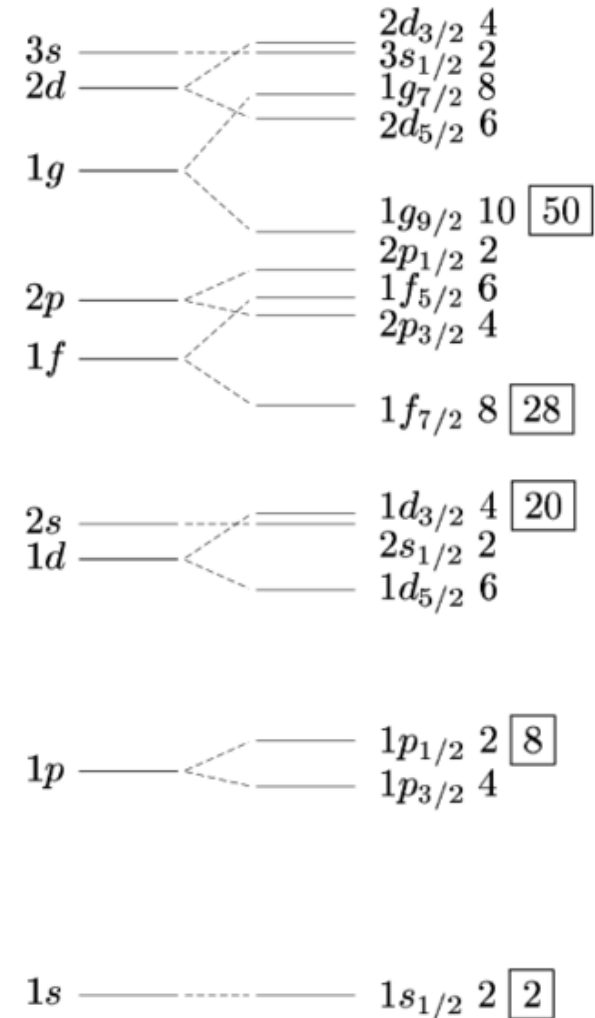
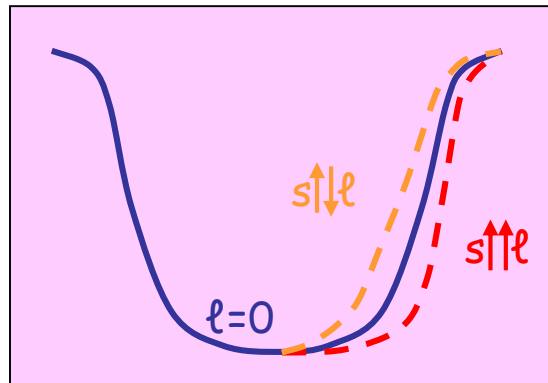
La question qui fait tilt !

Thanks are due to Enrico Fermi for the remark, "Is there any indication of spin-orbit coupling?" which was the origin of this paper.

'On closed shells in nuclei. II',
M. G. Mayer Phys. Rev. 75 (1949) 1969

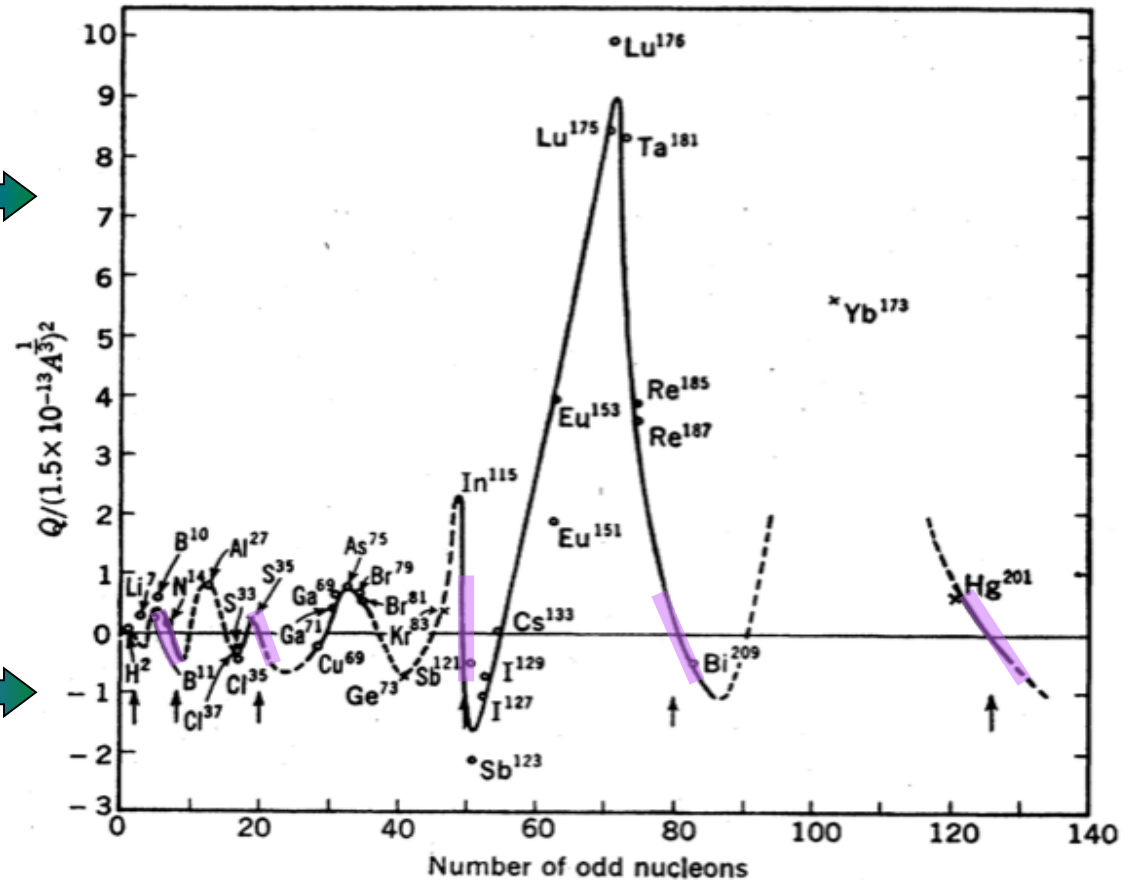
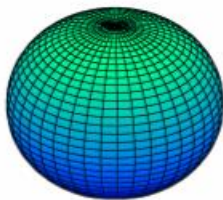
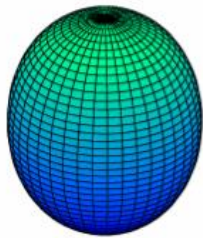


Hans Jensen



Distributions de charge expérimentales

C.H. Townes et al., Phys. Rev. 76 (1949) 1415



Certains moments sont jusqu'à 30 fois plus élevés que les prédictions du modèle en couches !

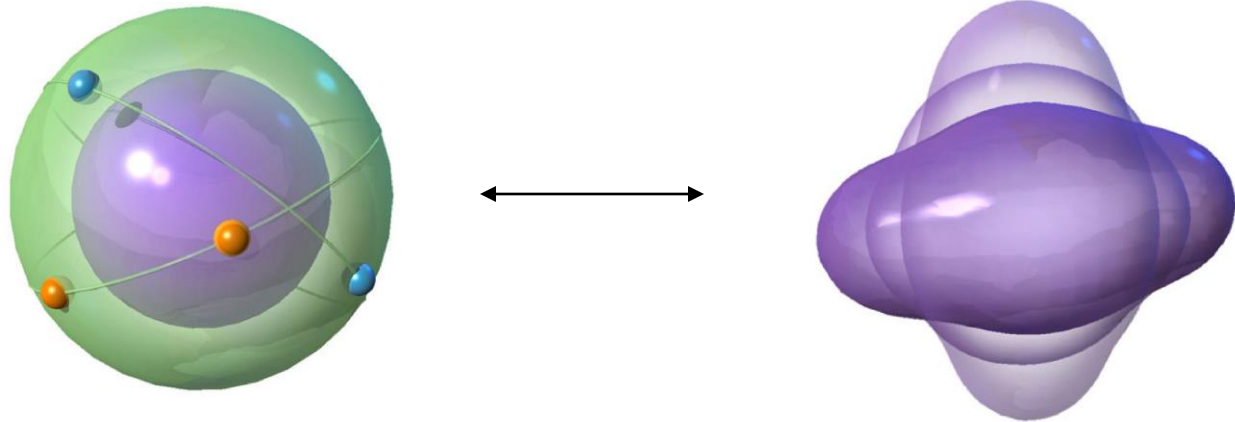
Et si le noyau gagnait à se déformer....?



James Rainwater

Distorsion de la goutte liquide sous l'influence des trajectoires des nucléons de valence pour gagner en stabilité

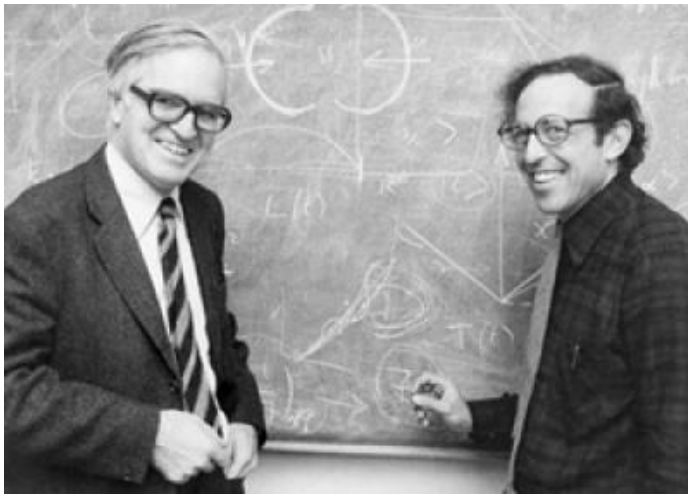
J. Rainwater, Phys. Rev. 79 (1950) 432



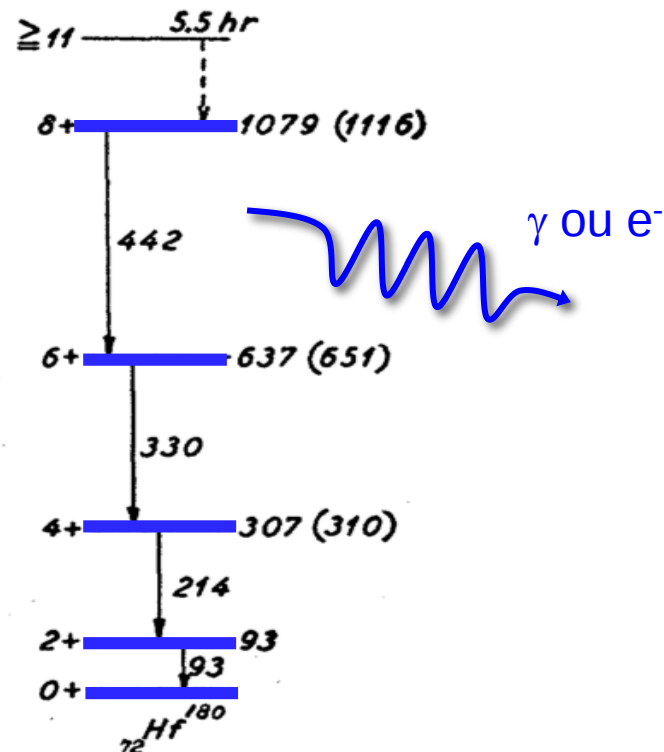
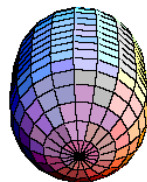
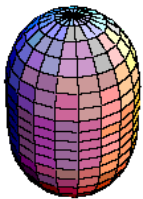
Etats individuels et collectifs du noyau

Le modèle unifié couple les oscillations et rotations de la goutte aux mouvements des nucléons individuels

A. Bohr et B. Mottelson, Kgl. Danske Videnskab. Selskab, Mat.-fys. Medd. 27 (1953) 16



Aage Bohr et Ben Mottelson



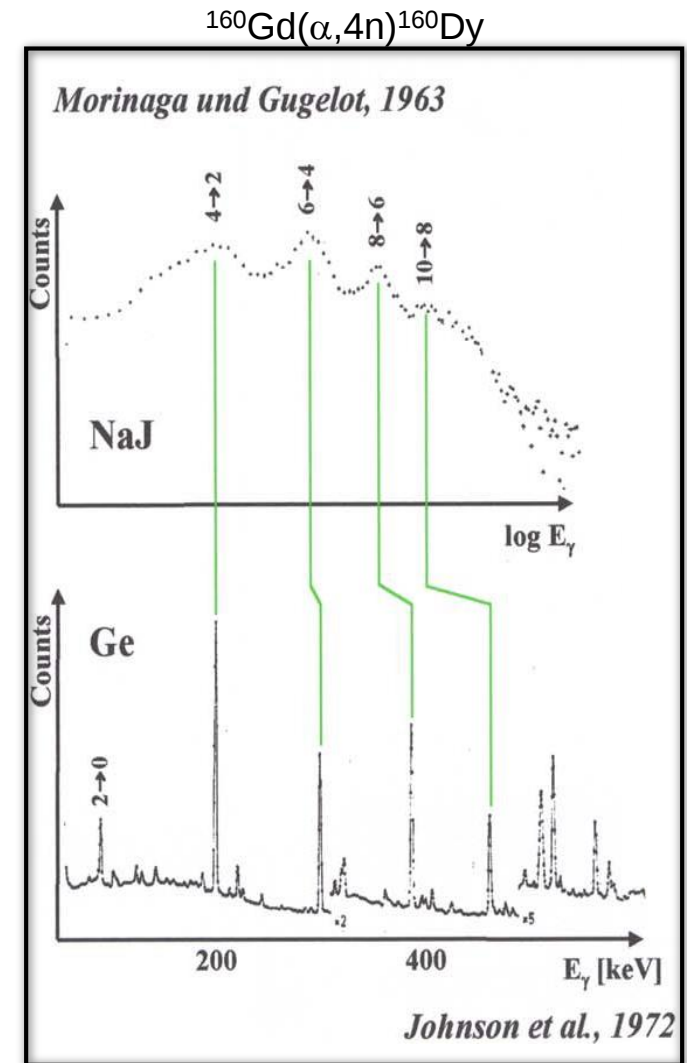
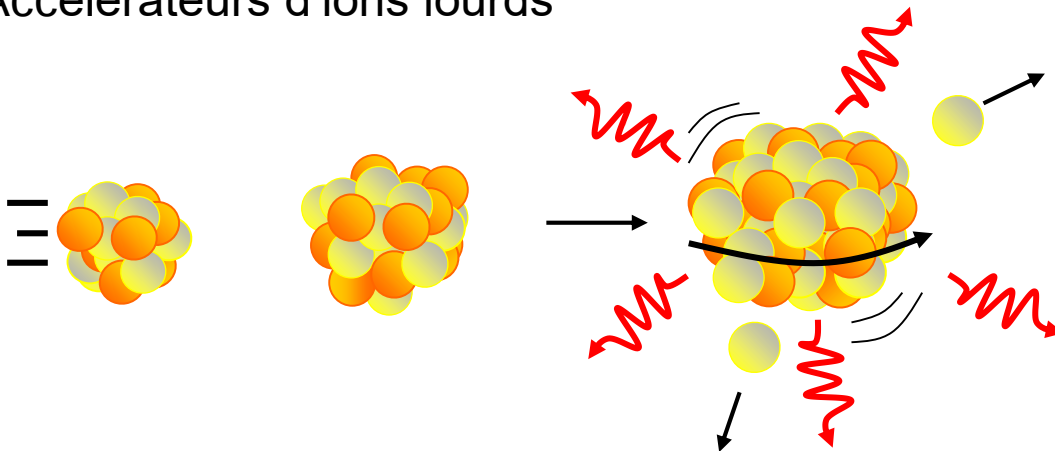
1975

Développements techniques des années 1950-70

Détecteurs scintillateurs puis semi-conducteurs

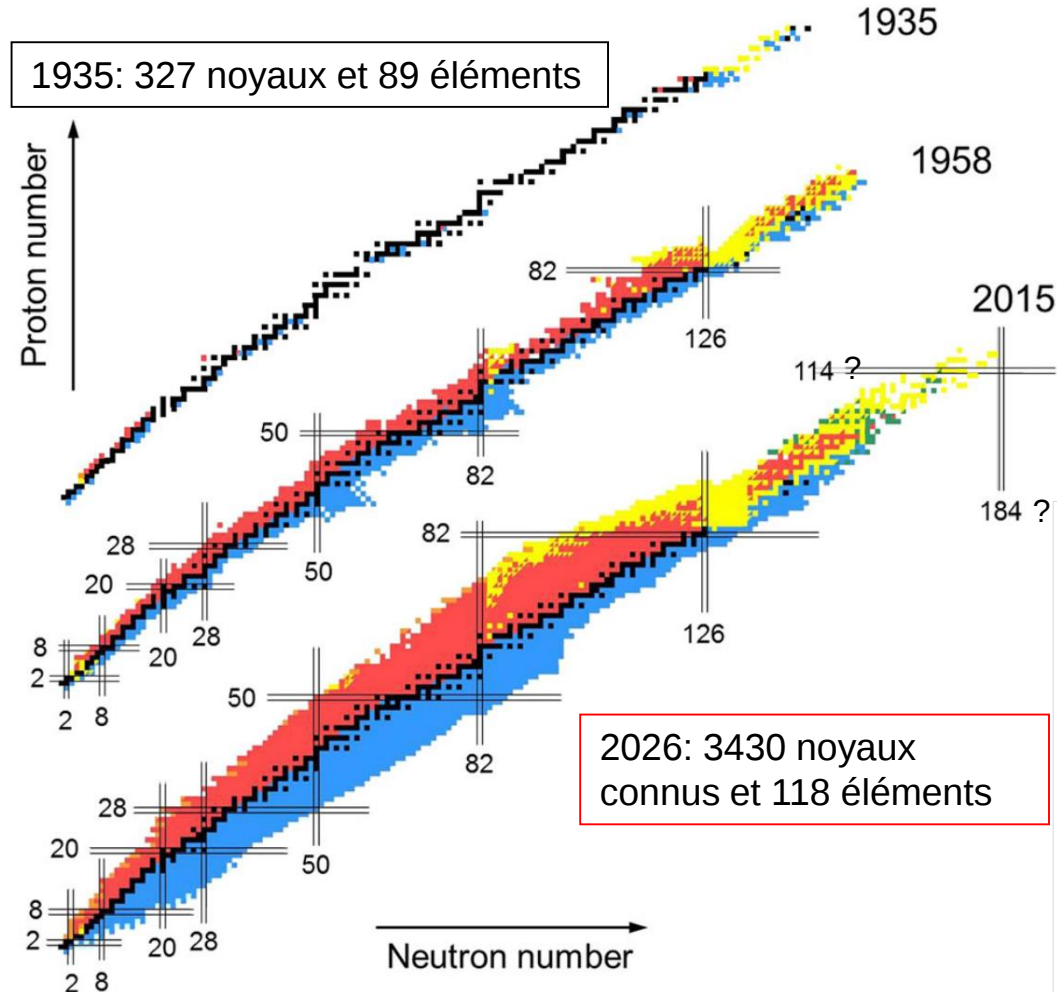


Accélérateurs d'ions lourds



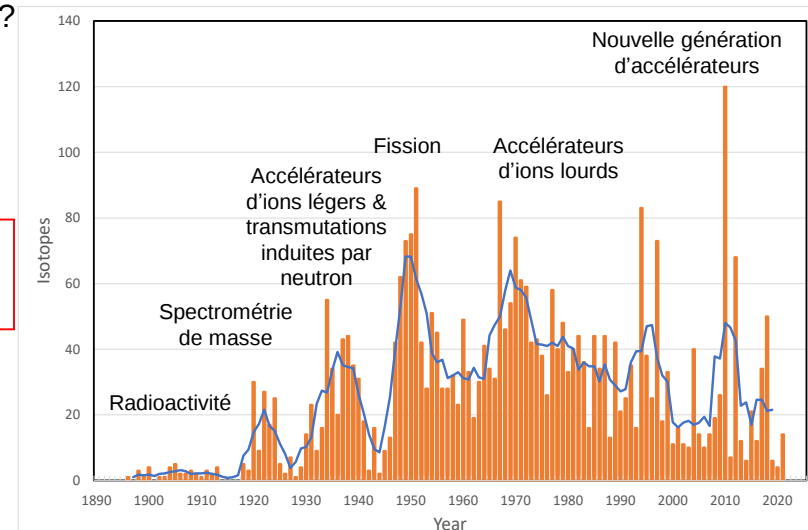
Evolution du paysage nucléaire

Adamian, G.G., Antonenko, N.V., Diaz-Torres, A. et al., Eur. Phys. J. A (2020) 56:47,
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



Rank	Country	# of Isotopes
1	USA	1345
2	Germany	569
3	United Kingdom	300
4	Japan	294
5	Russia	255
6	France	215
7	Switzerland	122
8	Canada	67
9	Sweden	60
10	Finland	49
11	China	42
12	Netherlands	36
13	Belgium	17
14	Argentina	13
15	Denmark	12

<https://frib.msu.edu/public/nuclides>

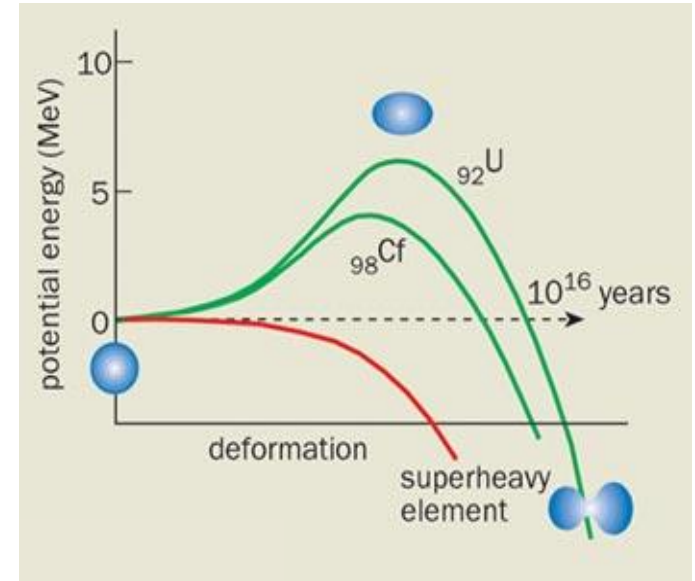
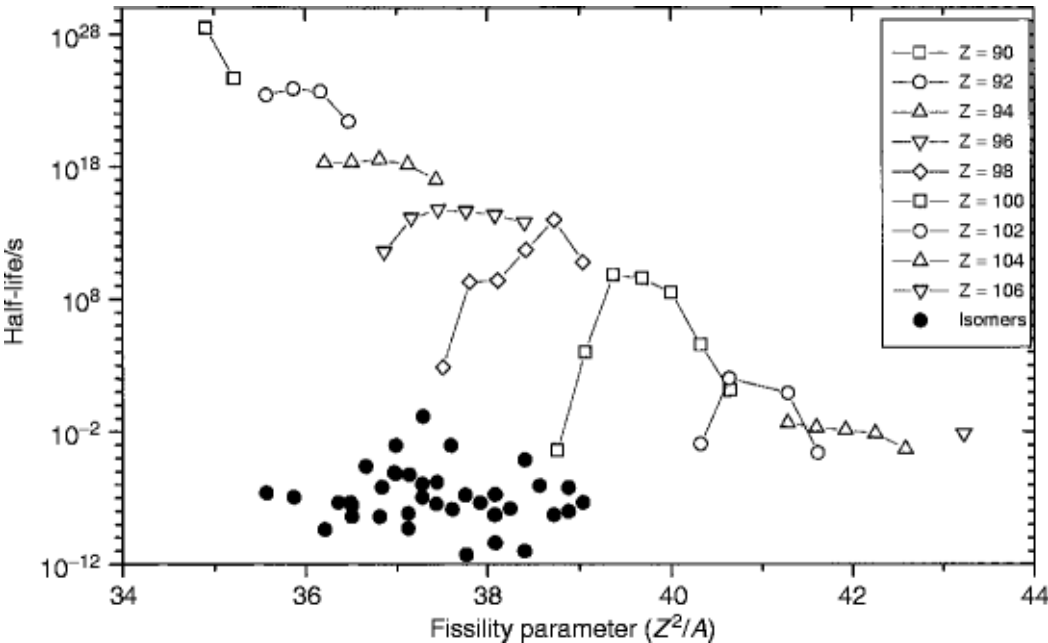


M. Thoennessen, private comm.

Découverte de la superdéformation

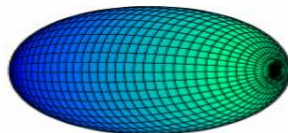
Première observation d'un isomère de fission: ^{242}Am

S. Polikanov *et al.* Sov.Phys.JETP **15** (1962)



Mesure de temps de vie des états du 2^{ème} puits de potentiel du ^{239}Pu

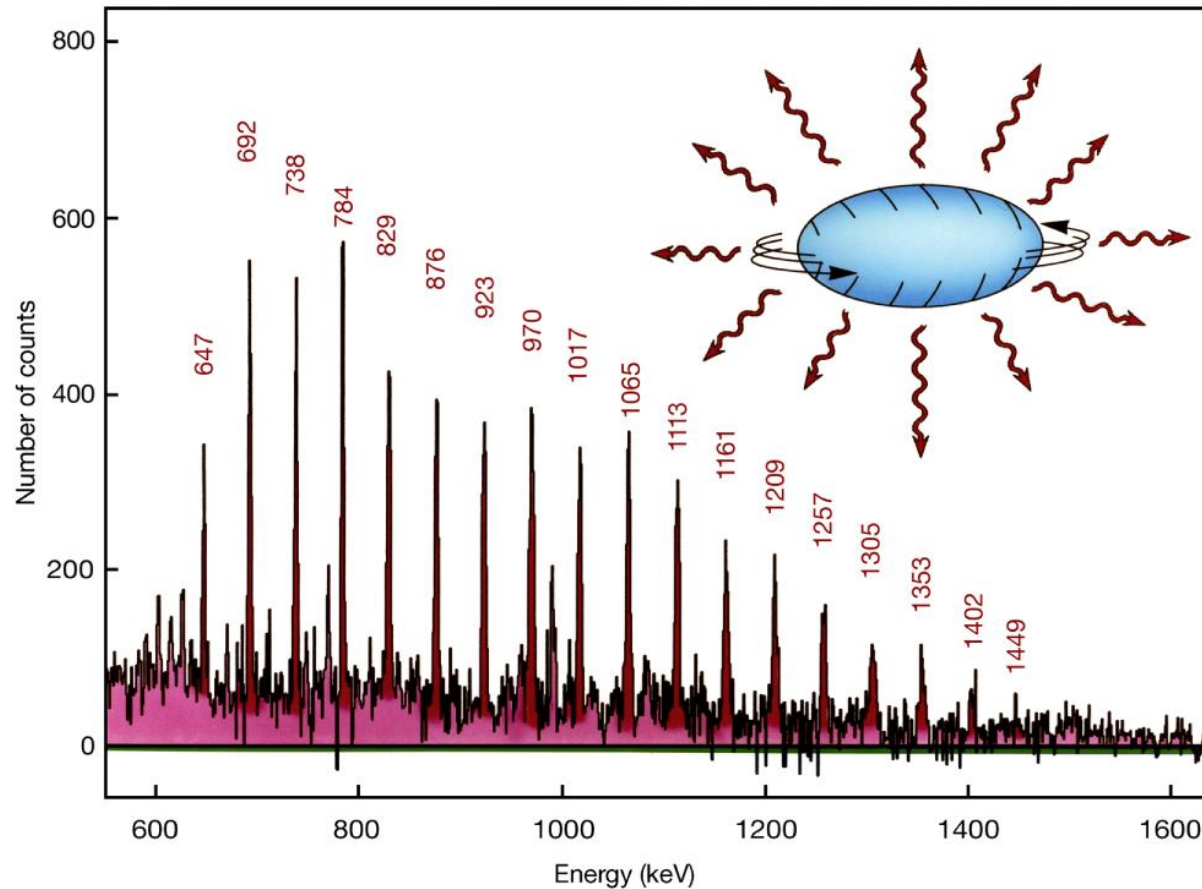
⇒ grand axe/petit axe ~ 2



Superdéformation à haut spin

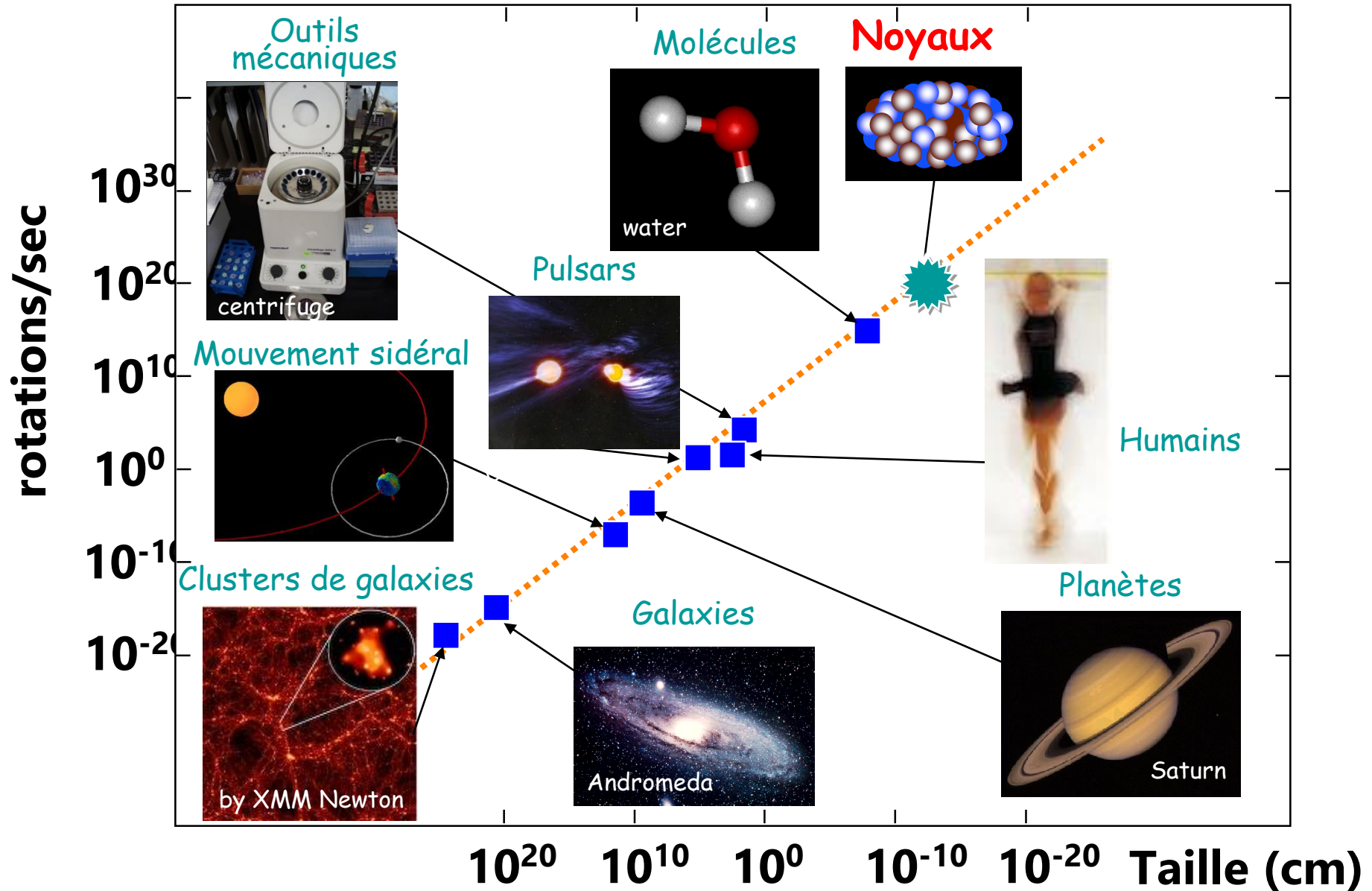
jusqu'à $68 \hbar$!!

P.J. Twin et al. Phys. Rev. Lett., 57:811, 1986



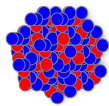
'Top unexpected physics discoveries of the last five years'
(D. Kleppner, Physics Today, 1991)

Rotations dans l'univers



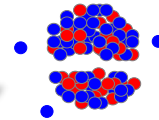
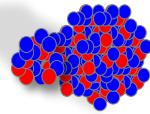
Synthèse de Nouveaux Elements

Ion lourd
accéléré

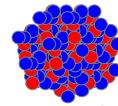


Atome
d'actinide

fusion



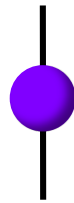
fission



fusion-
évaporation

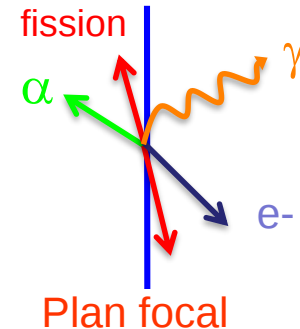
$\sigma \sim 1-10 \text{ pb} !$

Faisceau intense
d'ions lourds



Cible
rotative

Filtre



Eléments Super Lourds

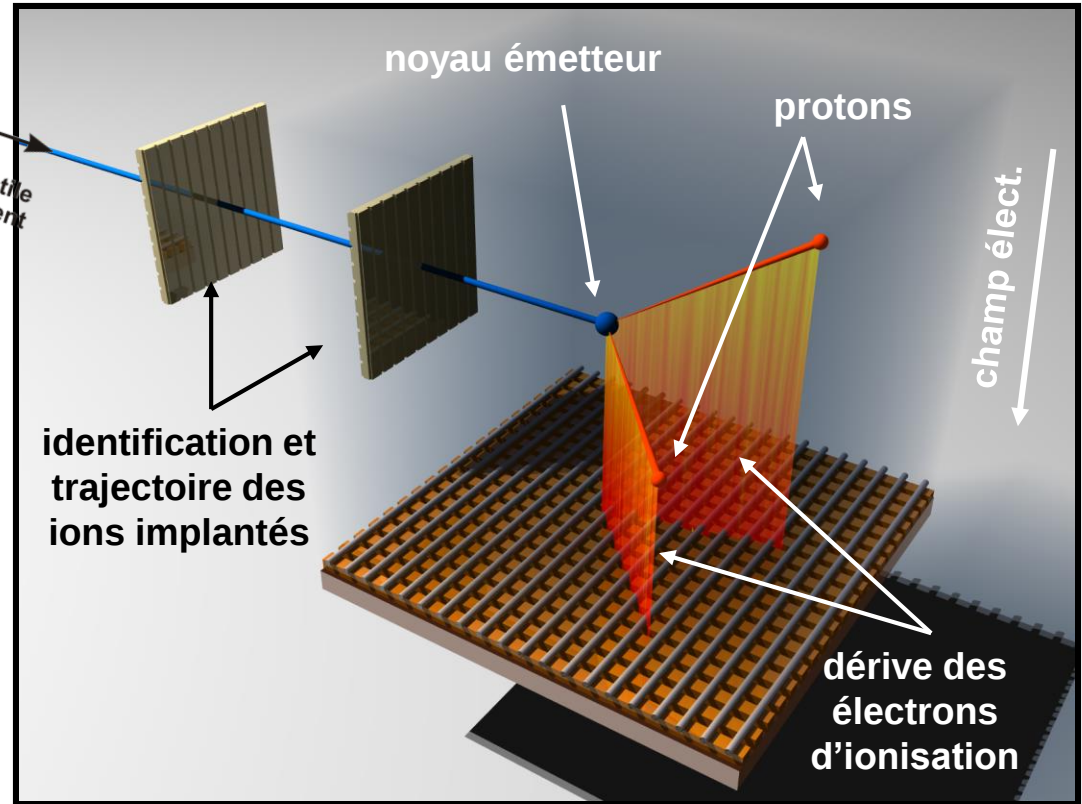
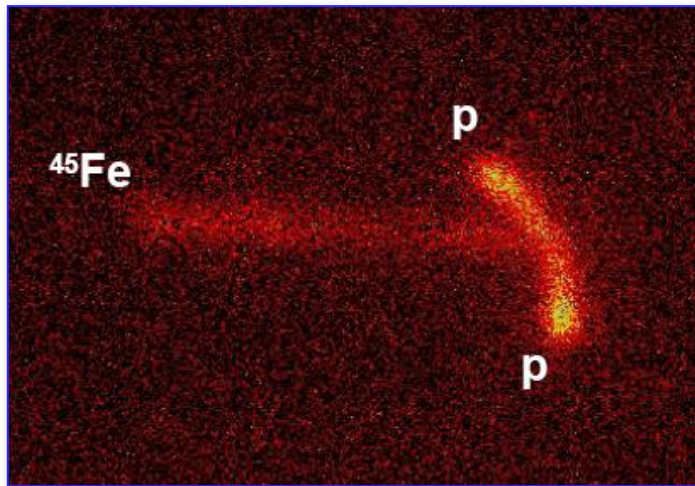
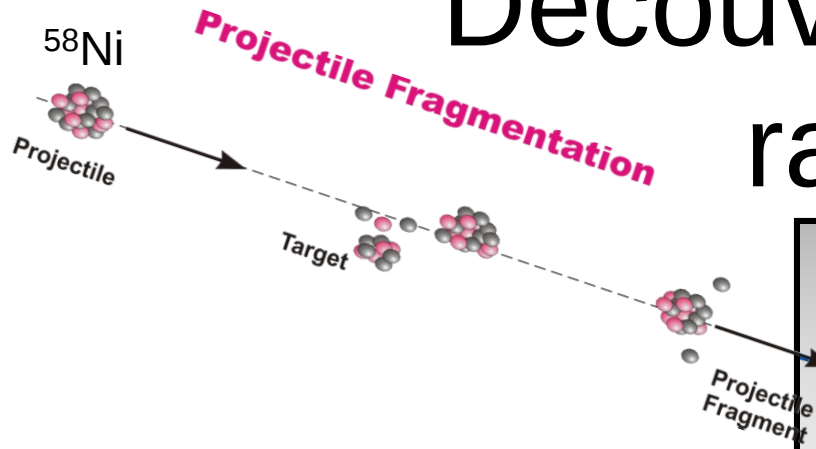


28/11/2016: IUPAC approuve les noms des 4 nouveaux éléments!

30/12/2015: IUPAC annonce que la 7^{ème} période du tableau périodique est complète!

37	Ru	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	Tl	51	Pb	52	Bi	53	Po	54	At	55	Rn
55	Cs	56	Ba	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				
87	Fr	88	Ra	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				
104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Nh	114	Fl	115	Mt	116	Lv	117	Ts	118	Og								

Découverte de nouvelles radioactivités



J. Giovinazzo et al., Phys. Rev. Lett. 89, 102501 (2002)
M. Pfützner et al., Eur. Phys. J. A14, 279 (2002)

4 autres cas observés depuis: ^{54}Zn , ^{48}Ni , ^{19}Mg , ^{67}Kr

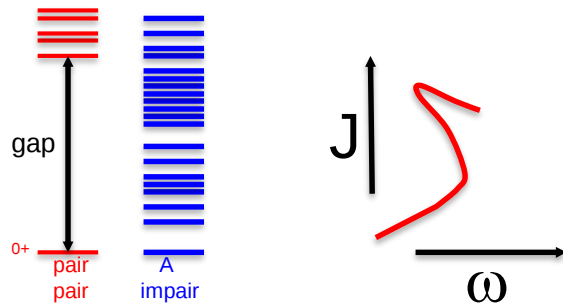
T. Goigoux et al., Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 162501

Grandes variétés de phénomènes

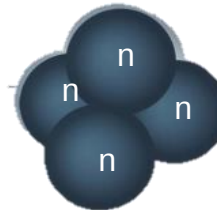
Superfluidité nucléaire

A. Bohr et al., Phys. Rev. 110 (1958) 936

A. Johnson et al., Nucl. Phys. A 179 (1972) 753



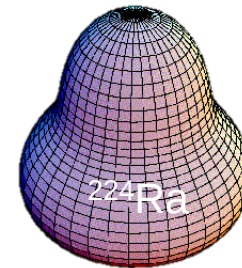
Nouvel état de la matière nucléaire ?



M. Duer et al.,
Nature 606 (2022) 678

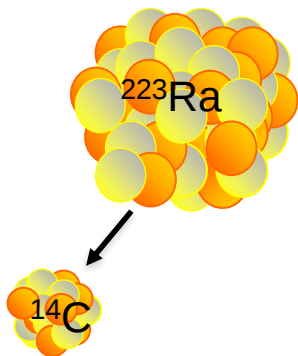
Déformations exotiques

P. Butler et al.,
Phys. Rev. Lett. 124
(2020) 042503

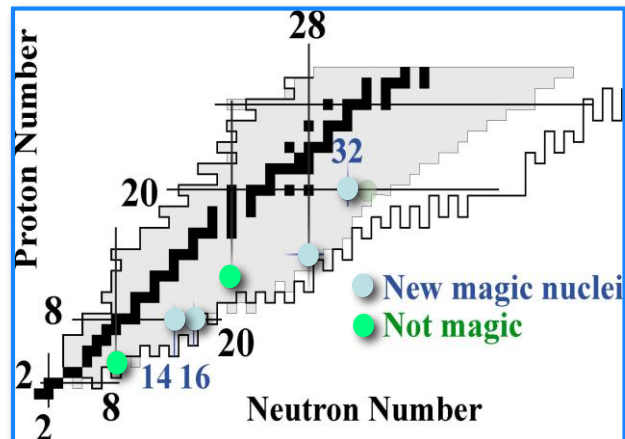


Nouvelles radioactivités

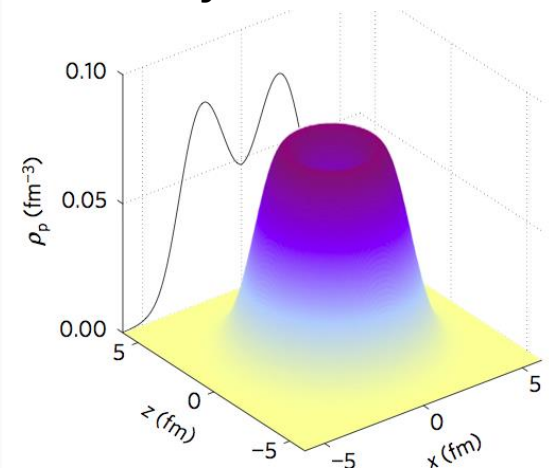
H.J. Rose et al., Nature 307 (1984) 245



Nouveaux nombres magiques



Noyaux bulles ?



A. Mutschler et al., Nature Physics 13 (2017) 152

En ce début du 21^{ème} siècle,
le noyau atomique n'a pas fini
de nous surprendre !