

PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

13 – LA FISSION

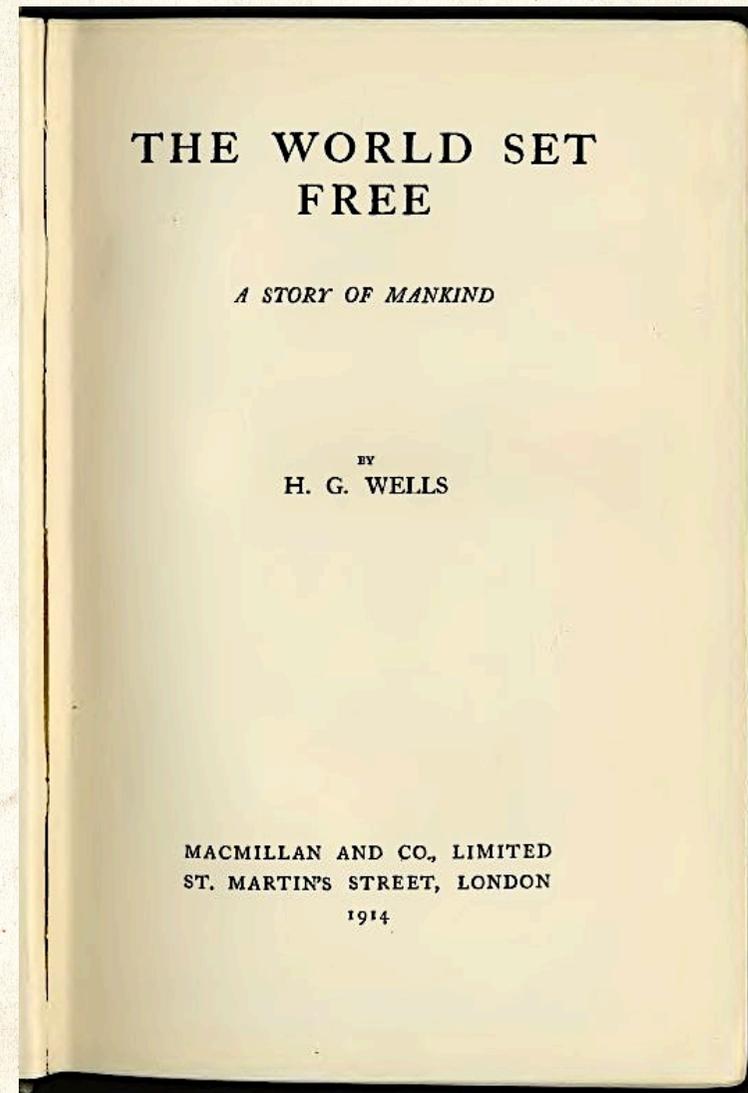
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

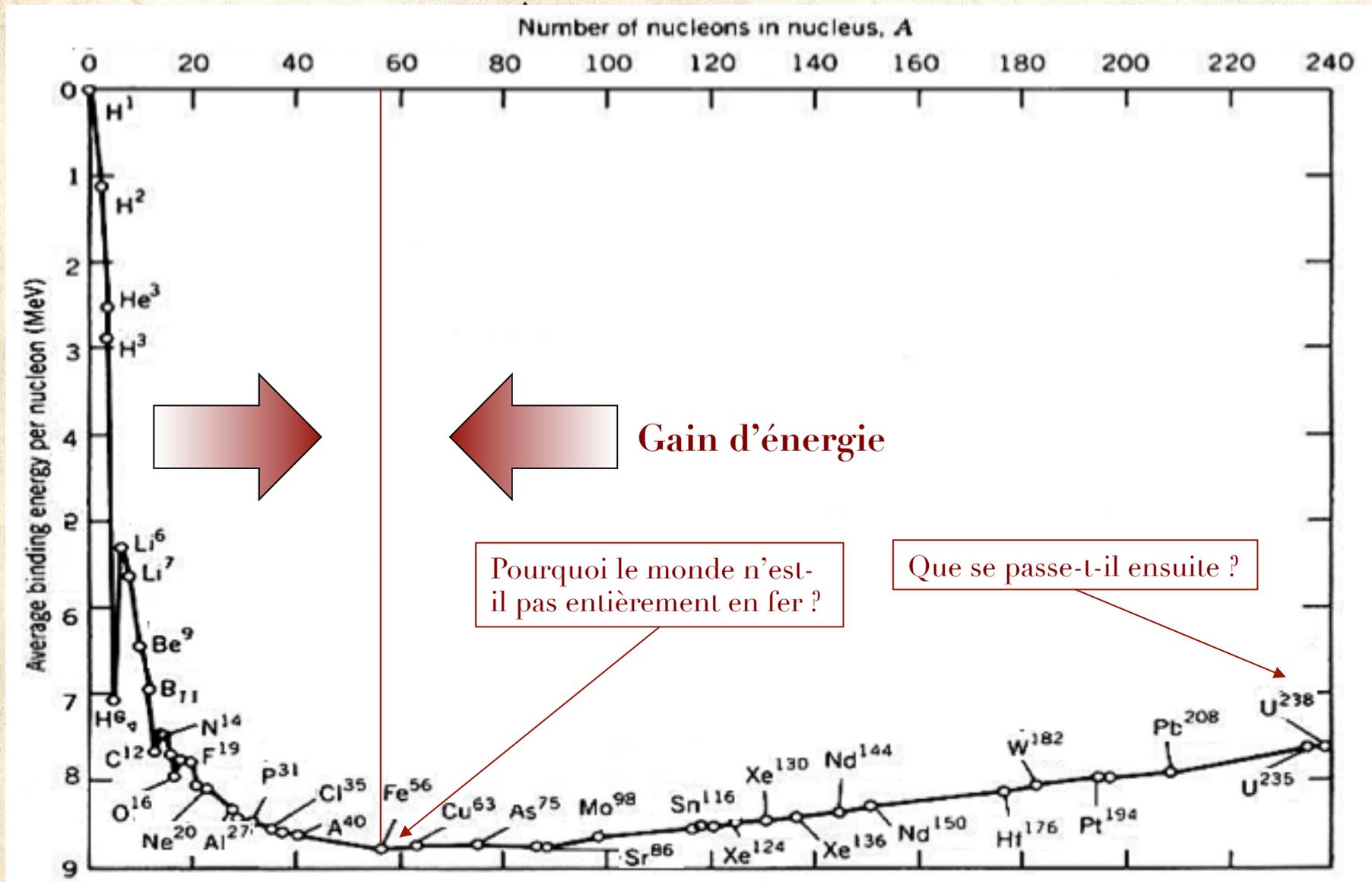
Et ces bombes atomiques que la science faisait exploser sur le monde cette nuit-là paraissaient étranges aux hommes même qui les employaient.

H. G. Wells, *The World Set Free*, 1914



ÉNERGIE NUCLÉAIRE

COMMENT EXTRAIRE L'ÉNERGIE DES NOYAUX ?



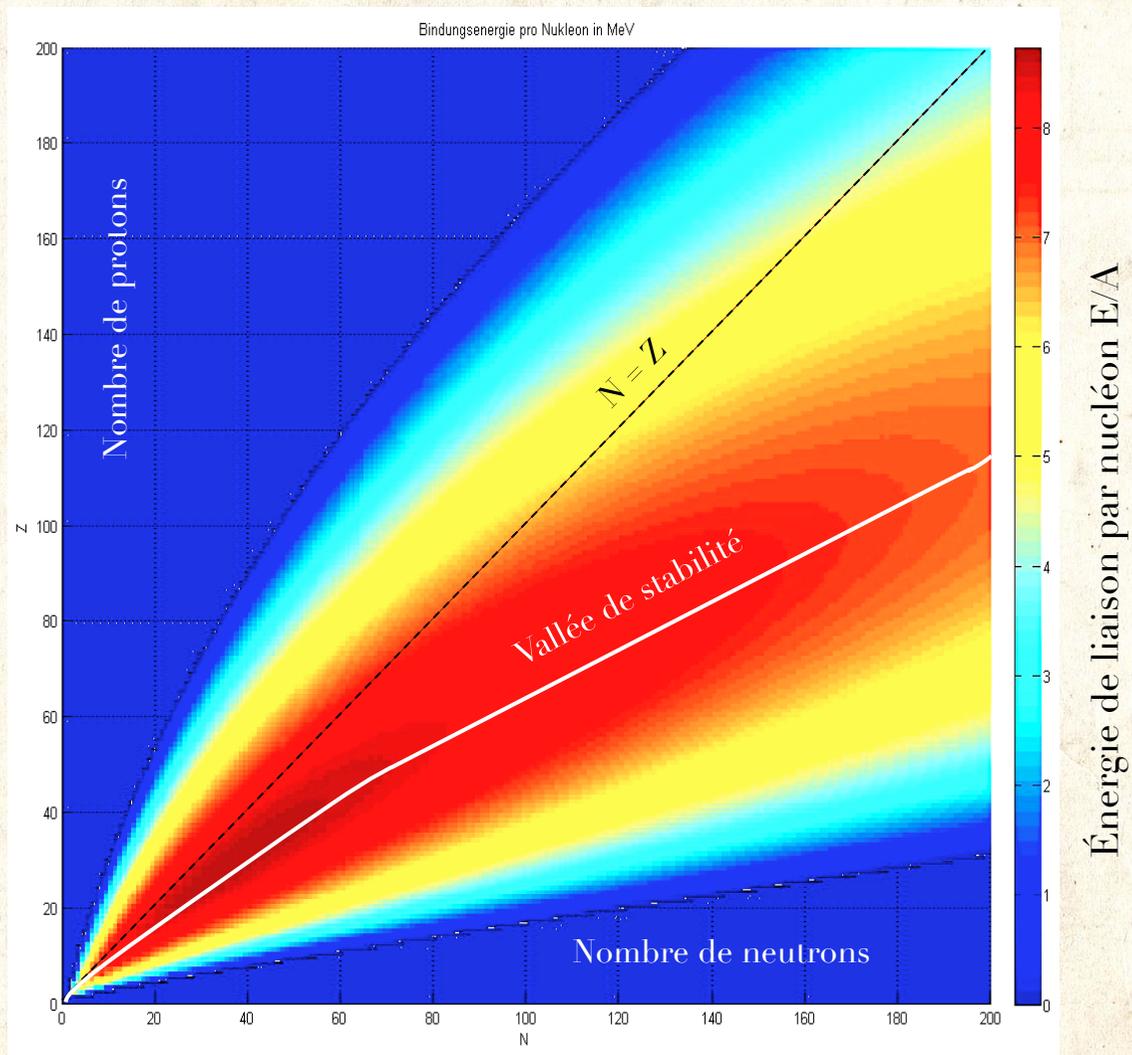
$$E/A = a + bA^{-1/3} + c[(N-Z)/A]^2 + 3/5 e^2 Z(Z-1)/(r_0 A^{4/3})$$

Volume

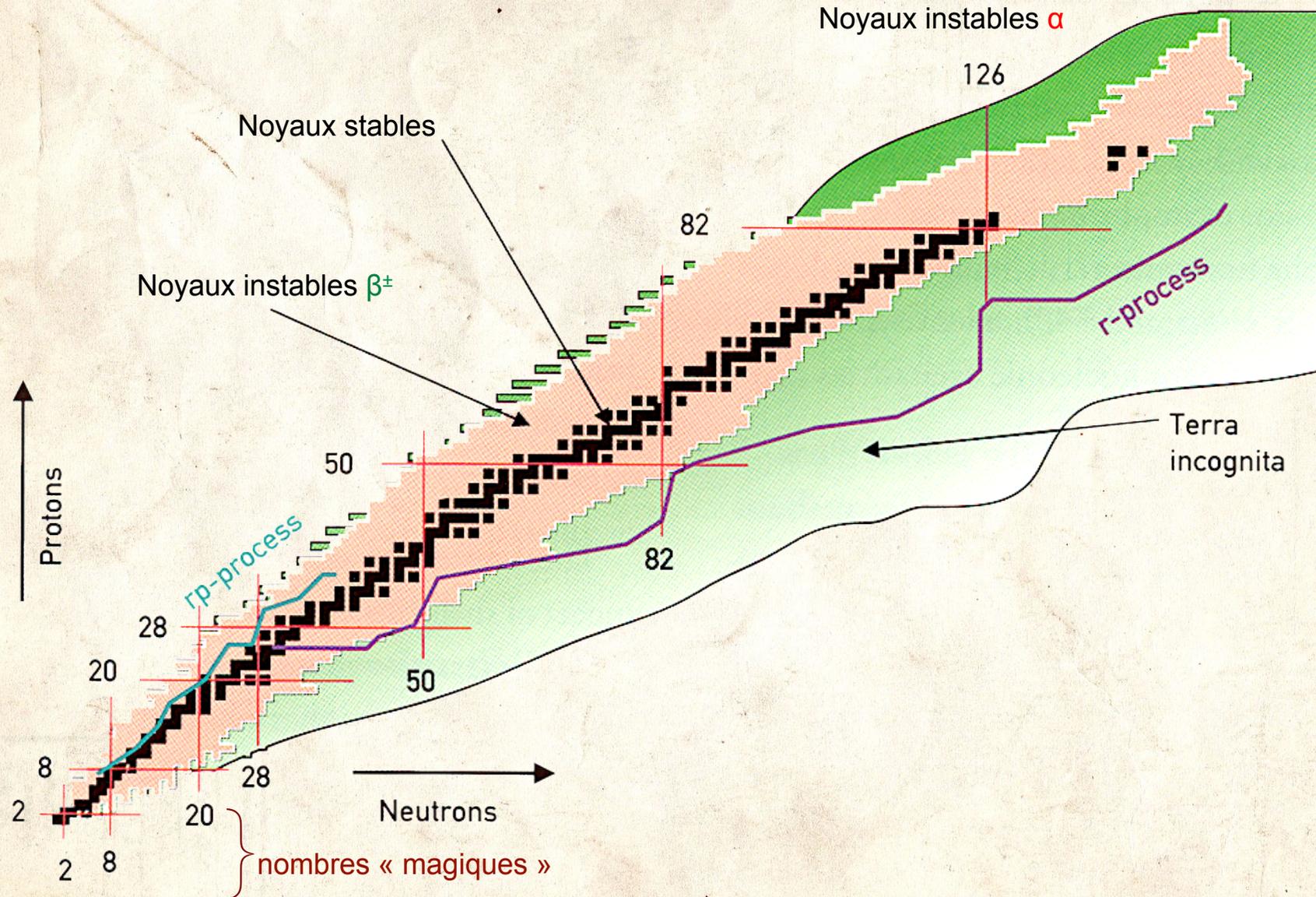
Surface

Pauli \Rightarrow N \rightarrow Z

Répulsion coulombienne

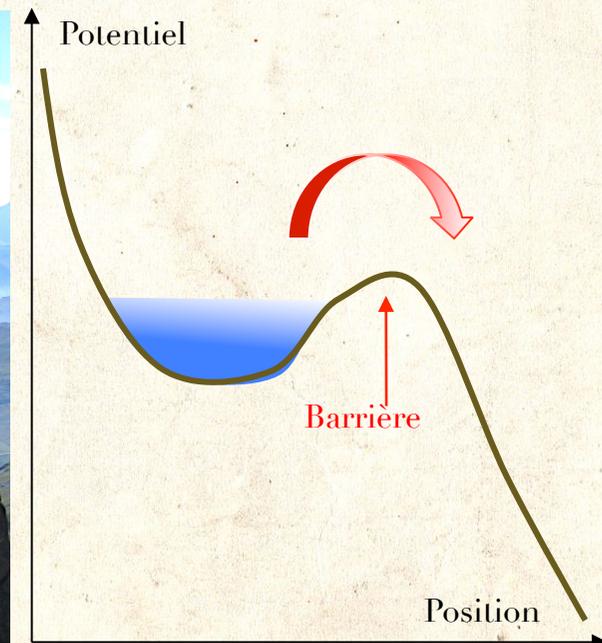


VALLÉE DE STABILITÉ

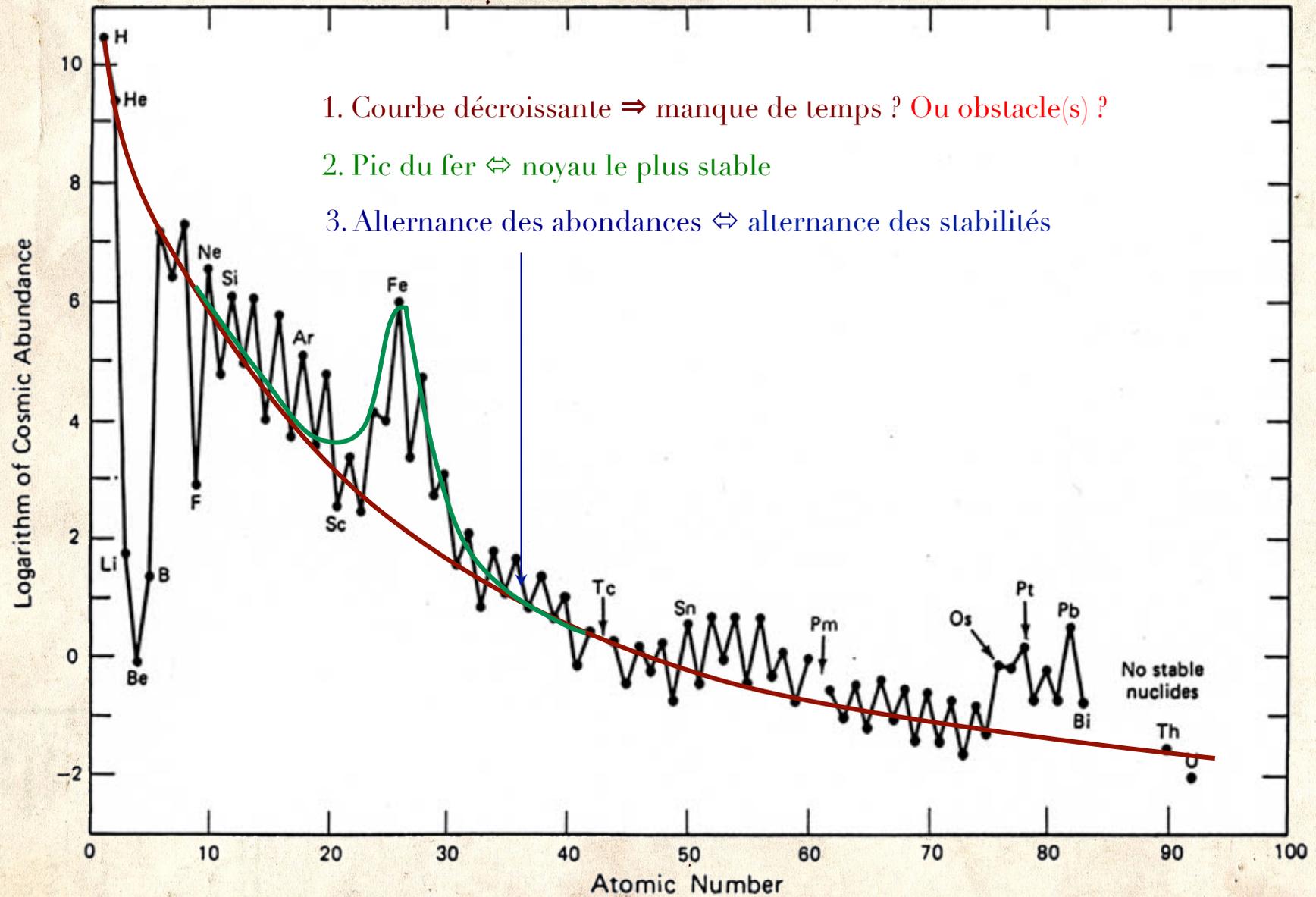


POURQUOI LES NOYAUX STABLES SONT-ILS STABLES ?

- État 1 d'énergie $E_1 >$ énergie E_2 d'un état 2
- \Rightarrow transition spontanée de l'état 1 vers l'état 2
- Sauf s'il existe un obstacle
 - Lois de conservation \rightarrow stabilité du proton % instabilité du neutron
 - Barrière de potentiel



ABONDANCES DES ÉLÉMENTS DANS L'UNIVERS



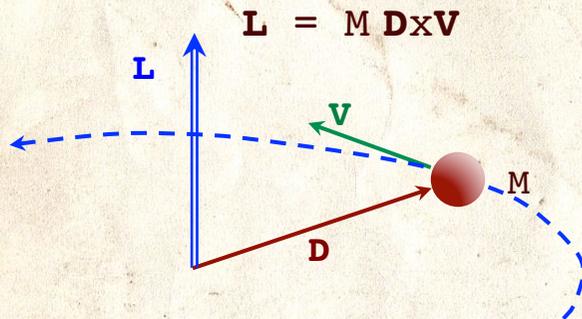
1. Courbe décroissante \Rightarrow manque de temps ? Ou obstacle(s) ?

2. Pic du fer \Leftrightarrow noyau le plus stable

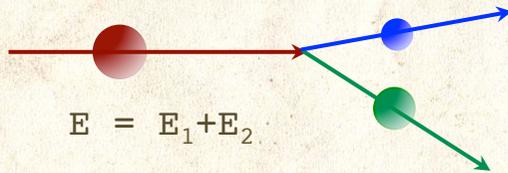
3. Alternance des abondances \Leftrightarrow alternance des stabilités

SPIN

- Moment angulaire (ou cinétique)



- Le moment angulaire est conservé



- $E = E_1 + E_2$
- $P = P_1 + P_2$
- $L = L_1 + L_2$

- **Quantification**

$$L = n \hbar \rightarrow L = 0, 1, 2 \dots$$

- Expériences \Rightarrow atomes, électrons et noyaux ont une propriété additionnelle qui se comporte *presque* comme un moment angulaire : le **spin** (= tourner sur soi-même)

$$S = n \hbar / 2 \rightarrow S = 0, \frac{1}{2}, 1 \dots$$

- méson π , noyau ^{12}C : spin 0
- électron, proton, neutron, neutrino : spin $\frac{1}{2}$
- photon : spin 1 (\rightarrow 2 polarisations)

- \Rightarrow principe de Pauli + minimisation de l'énergie \Leftrightarrow spins antiparallèles $\uparrow \downarrow$

- \Rightarrow stabilité plus grande des noyaux avec un nombre **pair** de protons et un nombre **pair** de neutrons

FUSION ?

○ En théorie, tout élément $A < 56$ peut fusionner avec un autre élément léger et libérer de l'énergie

○ En pratique, il existe une **barrière** coulombienne $Z_1 Z_2 e^2 / r$

○ \Rightarrow grande vitesse des noyaux

○ \Rightarrow température $> Z_1 Z_2 * 10$ MK

○ \Rightarrow réactions thermonucléaires

○ **Ordres de grandeur**

○ Potentiel Coulomb $V = e^2 / r \sim 10$ eV pour $r \sim 10^{-10}$ m (atome)

○ $\Rightarrow V \sim 1$ MeV pour 2 protons séparés de $r \sim 10^{-15}$ m

○ \Rightarrow accélérer des protons > 1 MeV

○ Accélérateur ?

○ 1 MeV est à la portée des Van de Graaf, cyclotrons...

○ 😊 chaque fusion libère ~ 10 MeV

○ 😞 seule une fraction est récupérable sous forme d'énergie thermique, mécanique ou électrique

○ 😞 accélérer un proton à 1 MeV exige $\gg 10$ MeV

○ Chauffer ?

○ 1 eV $\Leftrightarrow 10^4$ K $\Rightarrow 1$ MeV $\Leftrightarrow 10^{10}$ K

○ effet tunnel $\Rightarrow 10^7$ K

○ mais lent ($\varepsilon \propto T^4$) et problèmes de confinement

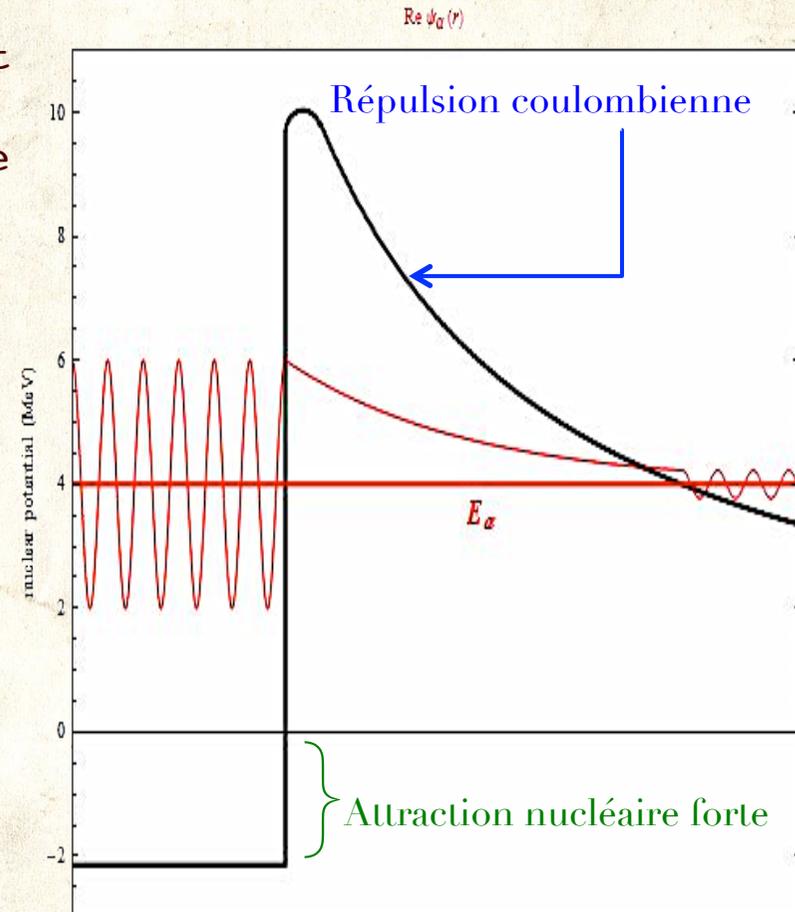
○ 😞 noyaux plus lourds

○ \rightarrow barrière plus haute

○ \rightarrow énergie libérée plus faible

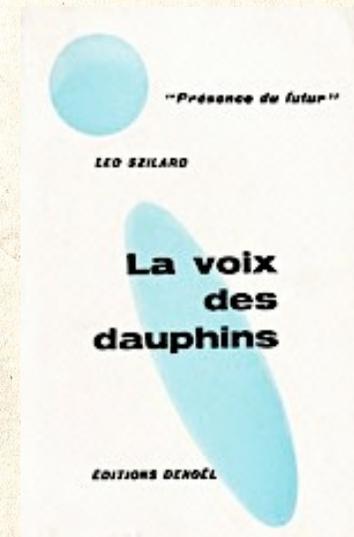
FRAGMENTATION ?

- En théorie, tout élément $A > 56$ peut se fragmenter en 2 éléments plus légers et libérer ainsi de l'énergie
- En pratique ce n'est manifestement pas le cas
- L'attraction nucléaire forte domine la répulsion coulombienne pour $r < r_{\text{noyau}}$
- **Émission alpha**
 - émission d'un noyau d'hélium ($2p+2n$) d'énergie > 0
 - **barrière nucléaire**
 - \Rightarrow effet tunnel
 - \Rightarrow exponentiellement lent
 - \Rightarrow émettre un noyau plus lourd qu'un α est **encore moins probable**



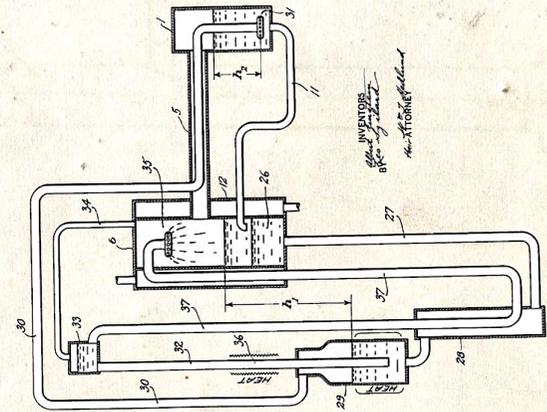


LEO SZILARD



LEÓ SZILÁRD (1898-1964)

- Assistant de Max von Laue à l'université de Berlin en 1924
- Spécialiste de thermodynamique → déposa nombreux brevets (dont certains avec Einstein)
- S'intéressa à la physique nucléaire en 1932 et rejoint Lise Meitner
- Fuit l'Allemagne en 1933 pour la Grande-Bretagne et s'occupe des réfugiés
- Déposa en 1934 des brevets (secrets) couvrant la réaction en chaîne, le réacteur et la bombe nucléaires
- Émigra en 1938 au Etats-Unis, rédigea en 1939 la lettre «d'Einstein» à Roosevelt
- Réalisa en 1942 avec Fermi CP-1, le premier réacteur nucléaire
- S'opposa à l'usage militaire du nucléaire (*Union of concerned scientists, Pugwash*)
- Se tourna en 1947 vers la biologie moléculaire



Brevet de réfrigérateur Szilard-Einstein sans aucune pièce mobile

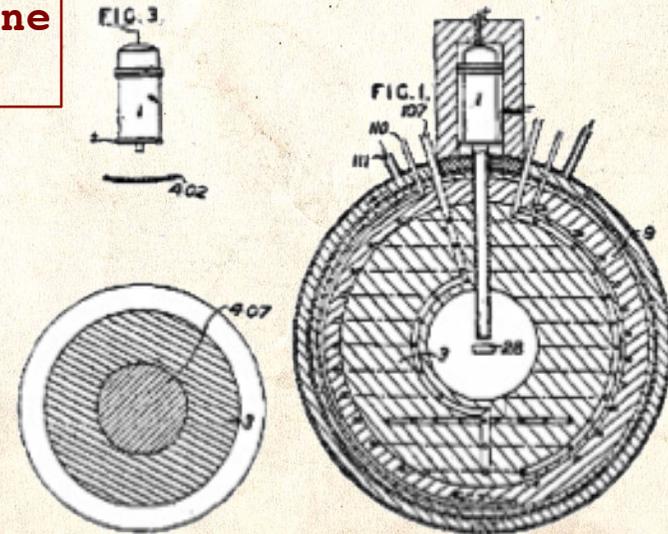


RÉACTION EN CHAÎNE

- 1933 : conférence de Rutherford évoquant la «chimère» de l'énergie nucléaire → Szilárd ne fut pas convaincu
- Il eut l'idée de prendre un noyau riche en neutrons → susceptible d'en perdre un → noyau final plus stable → libération d'énergie
- Moins d'énergie libérée que dans une fusion mais réaction à froid → techniquement bien plus réaliste
- Szilárd pensa ensuite que la réaction pouvait être déclenchée par collision d'un neutron avec ce noyau
- Il réalisa alors que si le noyau cible perdait 2 neutrons, une **réaction en chaîne** était possible sans apport extérieur



- En fait, il n'existe pas de noyau où le bilan d'énergie soit positif, mais on ne le savait pas en 1933!



MASSE CRITIQUE

○ Réaction divergente

- si chaque réaction libère 2 neutrons, et que chacun déclenche une nouvelle réaction, le nombre de réactions augmente exponentiellement (*divergence*) ⇒ **l'énergie libérée augmente exponentiellement**

○ Masse critique

- un neutron parcourt en moyenne une distance λ avant d'interagir
 1. volume de diamètre $\ll \lambda$ ⇒ la plupart des neutrons sortent sans interagir ⇒ **la réaction en chaîne s'arrête**
 2. volume de diamètre $\gg \lambda$ ⇒ la plupart des neutrons provoquent une nouvelle réaction ⇒ **la réaction en chaîne diverge exponentiellement**
- ⇒ **il existe une taille critique** $\sim \lambda$ et donc une masse critique $\sim \rho \lambda^3$

○ Calcul élémentaire

- densité $n \sim 10^{29} \text{ m}^{-3}$
- section efficace de réaction $\sigma \sim 10^{-28} \text{ m}^2$ (1 barn)
- ⇒ libre parcours moyen entre réactions $\lambda = 1/n\sigma = 10^{-1} \text{ m} = 10 \text{ cm}$
- ⇒ **masse critique $\sim 1 \text{ kg}$**

Dépend de manière sensible de la section efficace *et de la géométrie*



DES NEUTRONS DANS L'URANIUM

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	O
----	-----	------	-----	----	-----	-------	------	----	-----	------	-----	----	-----	------	---

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43)	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Ln	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	(85)	86 Rn
(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)					

Technétium (1937)

Astate (1940)

Francium (1939)

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61)	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Prométhium (1945)

Tableau périodique dans les années 1920-1930, suite aux travaux d'Henry Moseley

L'ÉQUIPE DE FERMI ET LES TRANSURANIENS

○ Mai 1934 : irradiation de l'uranium par des neutrons

○ → 4 éléments radioactifs β^- de $\frac{1}{2}$ vies

○ 10 s

○ 40 s

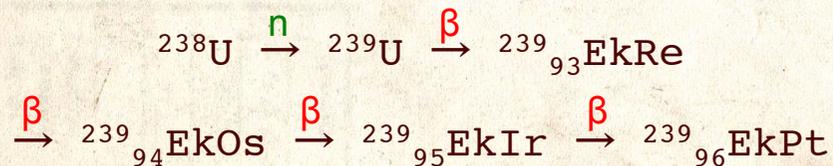
○ 13 mn

○ 90 mn

○ Transition β^-

neutron → proton $\Leftrightarrow {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y$

○ Fermi et son groupe pensaient donc observer la succession :



○ → annonce de la découverte de l'ausonium (Z=93) et de l'hespérium (Z=94)

1. Dispersion de l'équipe Fermi

2. Focalisation sur la diffusion et l'absorption des neutrons lents

○ → le sujet n'est plus étudié à Rome



LA MAIN PASSE À BERLIN

- Il existe alors (1934) *deux* grands laboratoires de radiochimie dans le monde :
 - l'Institut du Radium à Paris
 - le KWI für Chemie à Berlin-Dahlem

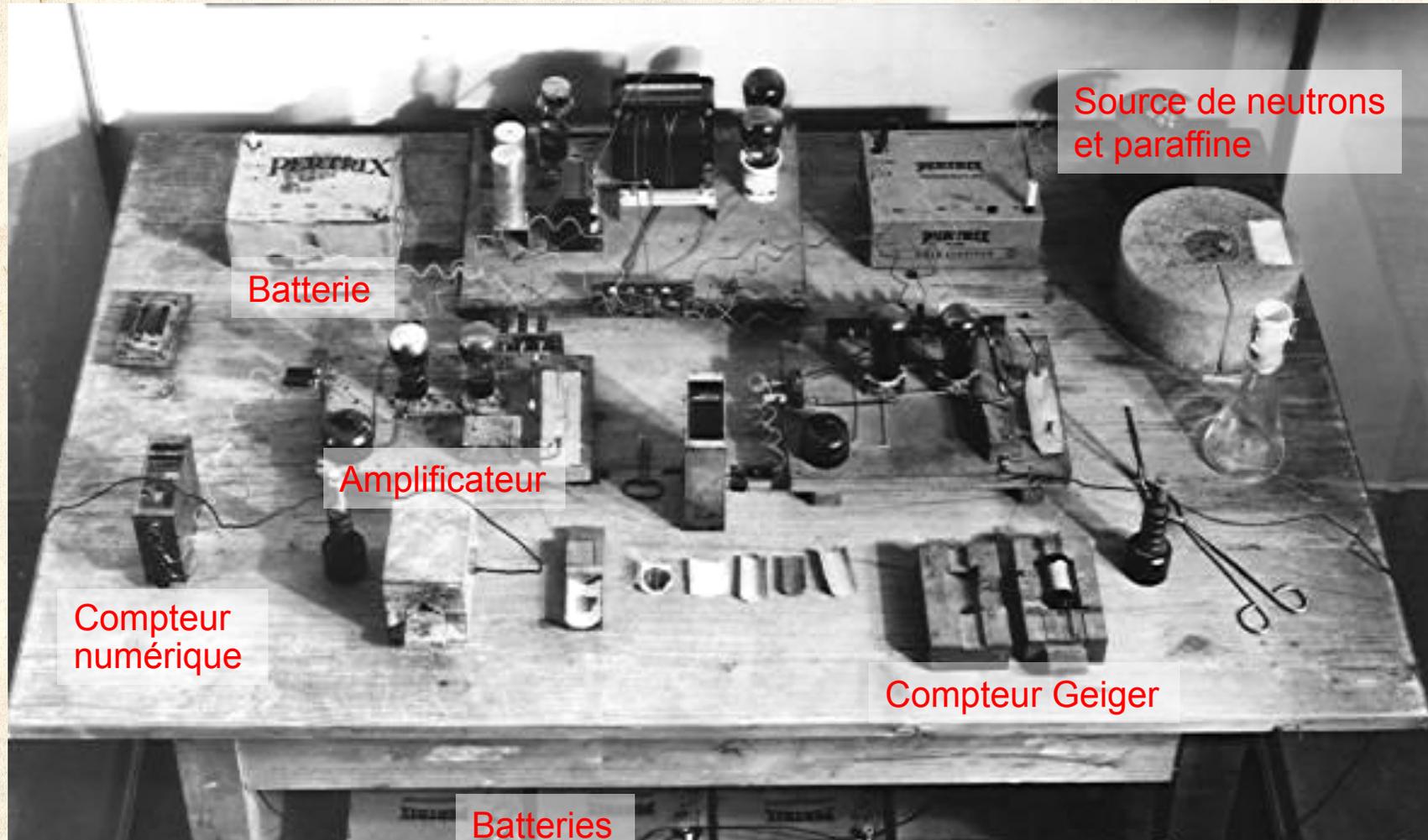


- Les acteurs à Berlin
 - *Lise Meitner* (1878-1968), directrice du département de physique du KWI-C



- *Otto Hahn* (1879-1968), directeur du département de radiochimie du KWI-C
- *Fritz Strassmann* (1902-1980), assistant-professeur de chimie analytique

LA TABLE DE TRAVAIL D'OTTO HAHN



UN ÉCHEVEAU COMPLEXE

- Irradiation neutronique de l'uranium (et du thorium)
- ☞ une dizaine d'émetteurs β
- Il se révéla très difficile de placer tous ces radioéléments dans le tableau périodique
- Meitner, Hahn et Strassmann finirent par conclure que les neutrons produisaient **trois** isotopes différents de l'uranium
 - $^{92}\text{U} + n \rightarrow ^{92}\text{U}(23 \text{ mn}) \rightarrow ^{93}\text{EkRe} (?)$
 - $^{92}\text{U} + n \rightarrow ^{92}\text{U}(10 \text{ s}) \rightarrow ^{93}\text{EkRe}(2.2 \text{ mn}) \rightarrow ^{94}\text{EkOs}(59 \text{ mn}) \rightarrow ^{95}\text{EkIr}(66 \text{ h}) \rightarrow ^{96}\text{EkPt}(3.5 \text{ h}) \rightarrow ^{97}\text{EkAu} (?)$
 - $^{92}\text{U} + n \rightarrow ^{92}\text{U}(40 \text{ s}) \rightarrow ^{93}\text{EkRe}(16 \text{ mn}) \rightarrow ^{94}\text{EkOs}(5.7 \text{ h}) \rightarrow ^{95}\text{EkIr}(?)$
- L'élément de période 23 mn fut identifié chimiquement comme de l'uranium : $^{239}_{92}\text{U}$
- Transmutation $\beta \Rightarrow ^{239}_{93}\text{EkRe}$ mais celui-ci était en trop faible quantité pour être identifié chimiquement

UNE ISOMÉRIE TERNAIRE ?

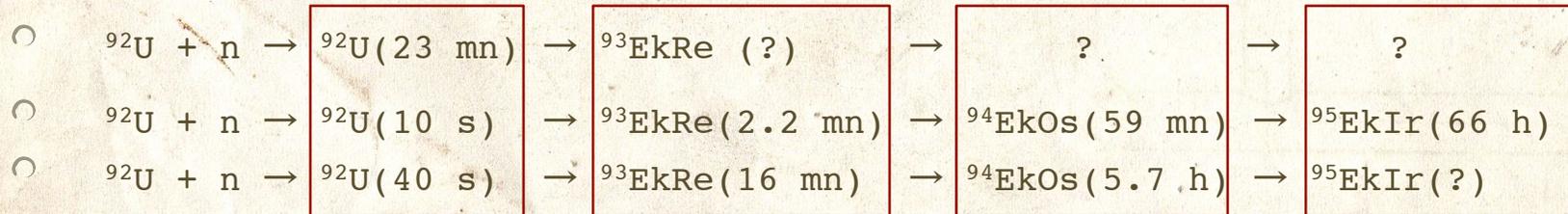
- Les éléments de période 10 s et 40 s disparaissaient trop vite pour être chimiquement identifiés à l'uranium
- Mais les propriétés chimiques de leurs descendants β étaient analogues à Re, Os, Ir et Pt \rightarrow élément transuraniens, validant l'identification des parents comme de l'uranium

56 Ba	57-71 Ln	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt
88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)

- \Rightarrow 3 isotopes du même uranium 239 \Leftrightarrow isomères (noyaux de même composition mais d'énergie différente)
- Mais pourquoi les isomères de l'uranium 239 ne cascadaient-ils pas vers le plus stable par émission de gammas, comme les autres isomères connus ?

BIEN DES QUESTIONS RESTAIENT SANS RÉPONSE

- L'isomérisie ternaire persistait dans les produits de transmutation.



- Pourquoi l'uranium 238 quasi-stable (période 4.5 milliards d'années) devenait-il tellement instable par l'addition d'un seul neutron qu'il fallait jusqu'à cinq transmutations β successives pour arriver à une quasi stabilité
- Présence d'éléments chimiquement proches du baryum ou du lanthane, se mêlant aux «transuraniens» et rendant l'ensemble très complexe
- \Rightarrow deux transmutations α successives ($\text{U} \rightarrow \text{Ra} \sim \text{Ba}$) suivies de transmutations β ($\text{Ra} \rightarrow \text{Ac} \sim \text{La}$) ??
- *L'Institut du Radium de Paris ne partageait pas le même point de vue*

PENDANT CE TEMPS, À L'INSTITUT DU RADIUM DE PARIS

○ Les acteurs

- Irène Joliot-Curie (1897-1956)
- Pavel Savitch, post-doc yougoslave



- Après son bref passage en politique, Irène Joliot-Curie devint professeur à la Sorbonne en 1937 tout en dirigeant (en pratique) l'Institut du Radium
- Elle aborda le problème des transuraniens avec Paul Savitch au cours de l'été 1937
- Bombardement de l'uranium ^{92}U par des neutrons (avec une technique de mesure un peu différente de celle de l'équipe de Berlin)
- → ils retrouvèrent en grande partie leurs résultats
- mais ils observèrent une *intense* radioactivité β de période 3h30 qui n'avait pas été observée à Berlin

LE R3,5 H

- Focalisation sur cet élément R3,5h
- D'abord identifié comme un isotope du thorium ^{90}Th
- Puis comme un isotope de l'actinium ^{89}Ac
- Car ses propriétés chimiques étaient proches de celles du lanthane ^{57}La (juste au-dessus de l'actinium dans le tableau de Mendéléiev)
- \Rightarrow Échanges acerbes entre Paris et Berlin où Meitner baptisa par dérision le R3,5h «*curiosum*»
- Mars 1938 : I. Curie démontra par cristallisation fractionnée que ce n'était pas de l'actinium, et qu'il se comportait comme du lanthane

39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo
57-71 Ln	72 Hf	73 Ta	74 W
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd
----------	----------	----------	----------



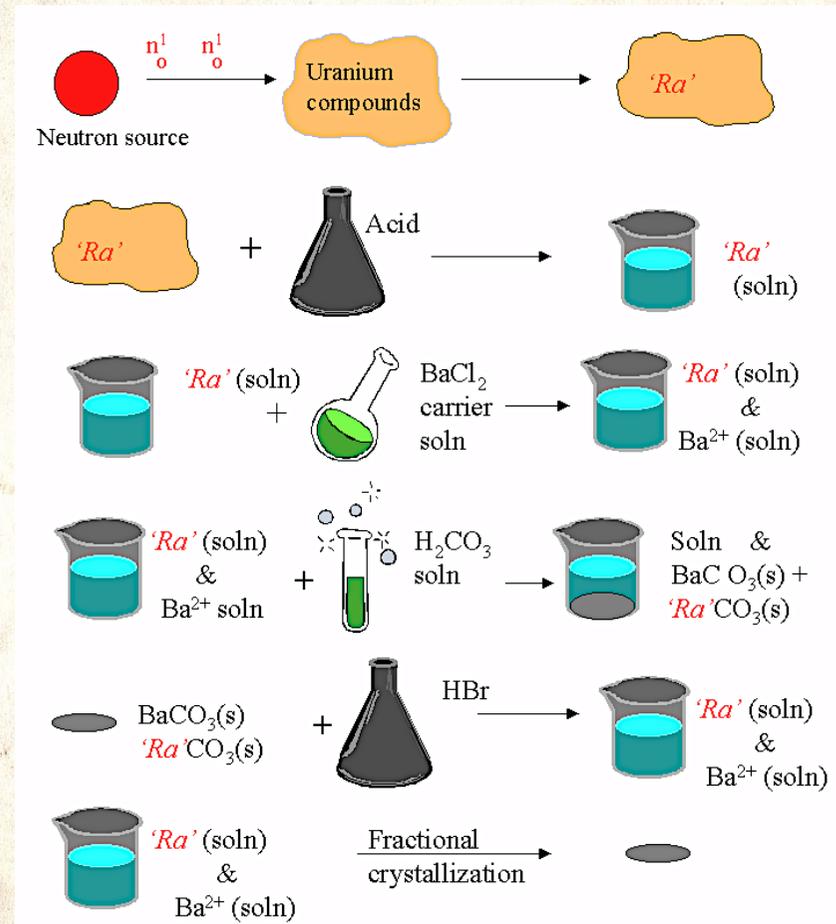
EXIL

- En mars 1938, l'Allemagne annexa l'Autriche (*Anschluss*) et les lois antijuives s'appliquèrent à Lise Meitner
- Grâce à l'aide de Bohr, elle parvint en juillet à se réfugier en Suède, d'où elle correspondit très fréquemment avec Hahn
- En juillet, Curie et Savitch conclurent que le R3,5h était inséparable du lanthane, mais ne parvinrent pas à admettre qu'il s'agissait bien de lanthane (en fait c'est du lanthane 141)
- Strassmann fut convaincu de la réalité des résultats de Paris, tout en pensant qu'il s'agissait d'un isotope du radium ($Z=88$) donnant de l'actinium ($Z=89$) par transmutation β
- Hahn et Strassmann décidèrent alors de refaire *toutes* les expériences d'irradiation neutronique de l'uranium



IMPOSSIBLE DE SÉPARER LE «RADIUM» DU BARYUM

- En novembre 1938, Hahn et Strassmann refirent donc avec un soin extrême l'irradiation de l'uranium par des neutrons
- Ils repérèrent 16 demi-vies différentes, a priori
 - des transuraniens
 - des isotopes inconnus du thorium (Z=90)
 - de l'actinium (Z=89)
 - et du radium (Z=88)
- Ils identifiaient 4 «isotopes du radium»
- mais furent totalement incapables de les séparer du baryum par cristallisation fractionnée (alors qu'ils en séparaient sans mal du radium 228 ajouté)



UNE DOULOUREUSE CONCLUSION

- Ils se résolurent en décembre 1938 à admettre qu'il s'agissait bien d'isotopes du baryum ($Z=56$)

↓

RaI	Ba143 ?	15 s
RaII	Ba 141	18 mn
RaIII	Ba139	83 mn
RaIV	Ba140	12.7 j

AcI	La 143 ?	14 mn
AcII	La141	3.92 h
AcIII	La139	stable
AcIV	La140	40 h

56	57-71	72	73	74
Ba	Ln	Hf	Ta	W
88	89	90	91	92
Ra	Ac	Th	Pa	U

- et que leurs «isotopes de l'actinium» étaient des isotopes du lanthane ($Z=57$) dont celui de Curie et Savitch
- Le 19 décembre, Hahn fit part à Meitner de ces résultats en lui demandant son aide

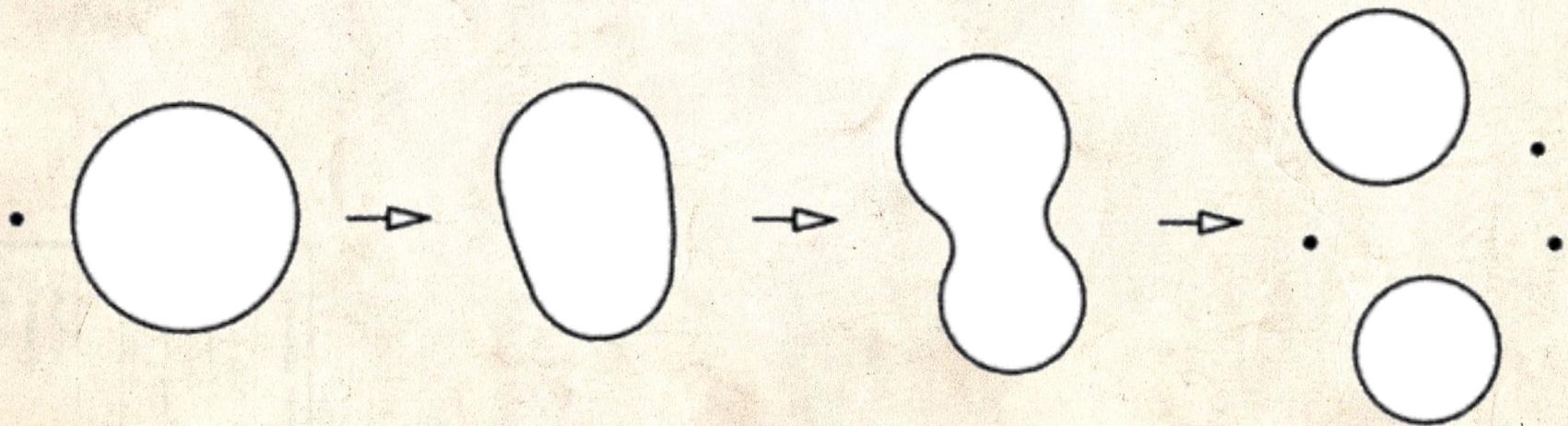
«Peut-être pourriez-vous proposer quelque fantastique explication?»

- Article adressé le 22 décembre 1938 à la revue *Naturwissenschaften*

**LISE METTNER
& OTTO FRISCH**

FISSION

- Le neveu de Lise Meitner, Otto Frisch, était venu de Copenhague pour Noël et ils discutèrent de la lettre de Hahn
- Ils eurent l'idée que le choc d'un neutron pouvait déformer suffisamment un noyau d'uranium pour que le rendre instable et qu'il se brise en deux
- Personne n'avait pensé que la *goutte d'eau* puisse se «pincer» et se fragmenter en morceaux de grande taille
- Effet semi-classique \neq effet tunnel
- Frisch emprunta le terme de ***fission*** (division d'une cellule) à un collègue biologiste



UNE ÉNERGIE COLOSSALE

- Si l'uranium (masse atomique 238) se brisait en donnant un élément de masse atomique ~ 140 (baryum ou lanthane), le second fragment devait avoir une masse atomique ~ 90-100



- Énergies de liaison des noyaux

- $E(\text{U}) = 238 \times 7,6 = 1800 \text{ MeV}$

- $E(\text{Ba}) = 141 \times 8,5 = 1200 \text{ MeV}$

- $E(\text{Kr}) = 92 \times 8,7 = 800 \text{ MeV}$

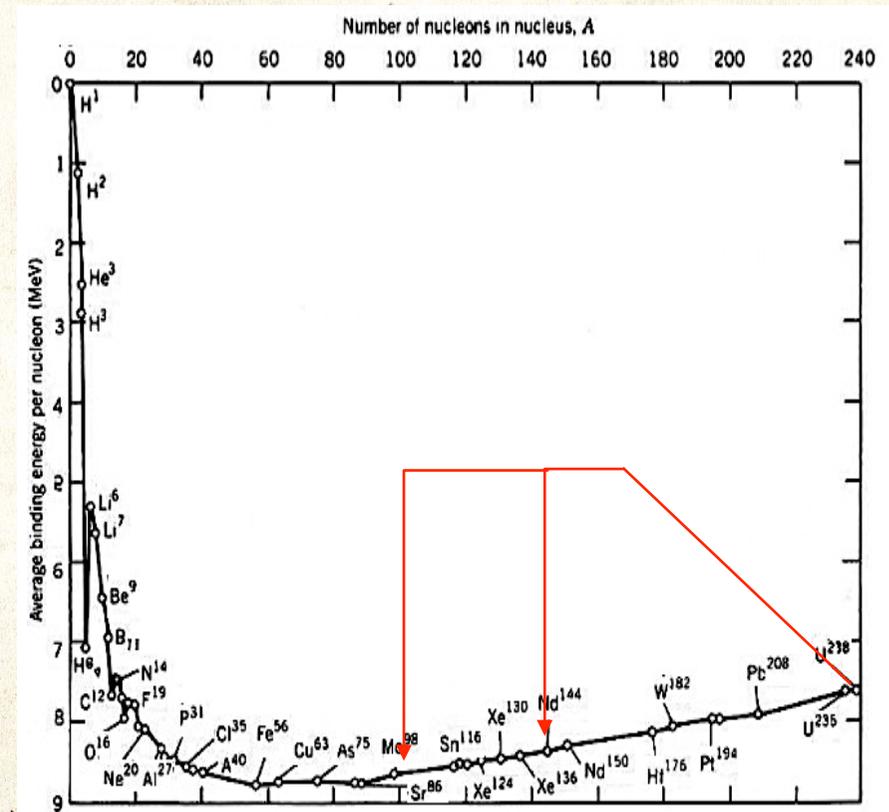
- \Rightarrow **200 MeV** d'énergie libérée

- Ou, de façon équivalente, répulsion électrostatique des deux fragments

- $E = e^2 Z_1 Z_2 / r$

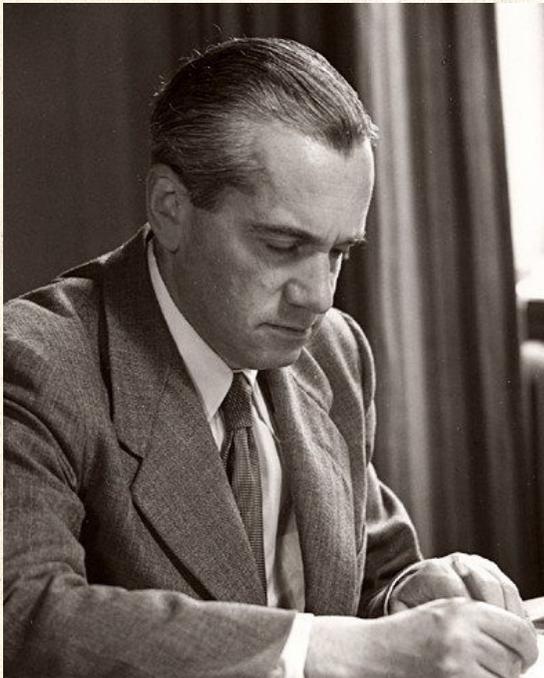
- $r = 10^{-14} \text{ m}, Z_1 = 56, Z_2 = 36$

- $\Rightarrow E = 10 \times 10^4 \times 2016 \text{ eV} = \mathbf{200 \text{ MeV}}$



CONFIRMATION

- Meitner et Frisch rédigèrent une brève note *Disintegration of uranium by neutrons* envoyée le 16 janvier à la revue *Nature* qui la publia le 11 février (Nature 143-239)



- L'énergie libérée dans la fission devait propulser les fragments à grande vitesse
- Fortes charges + grande vitesse \Rightarrow très forte ionisation
- Frisch détecta cet effet dès son retour à Copenhague: *Physical evidence for the division of heavy nuclei under neutron bombardment* (Nature 143-276)
- Il en parla à Niels Bohr juste avant le départ de celui-ci pour 6 mois aux Etats-Unis
- « *Quels idiots nous avons été! Comment n'y avons-nous pas pensé?* »

À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!