



CHAMPS & PARTICULES

NOYAUX ET FISSION NUCLÉAIRE

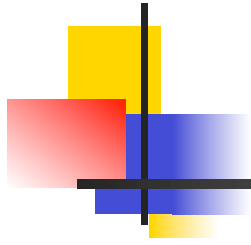


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

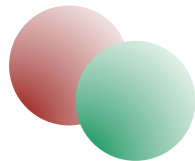




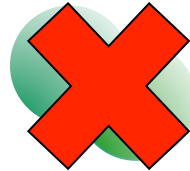
INTERACTION NEUTRON-PROTON

Interaction neutron-proton

- 1931 : découverte du deutérium ${}^2_1\text{H}$ par Harold Urey (☞ eau lourde)
- 1932 : découverte du neutron ☞ noyaux formés de Z protons et A-Z neutrons
- Comment interagissent-ils ?



deutérium n+p

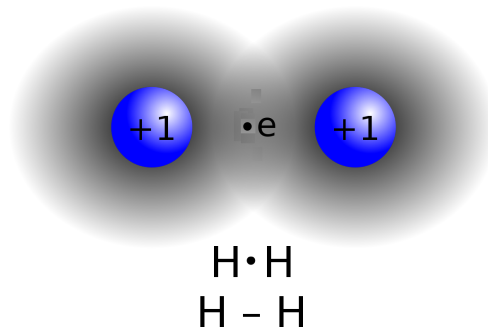
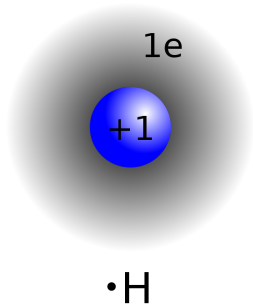


p+p ?



n+n ?

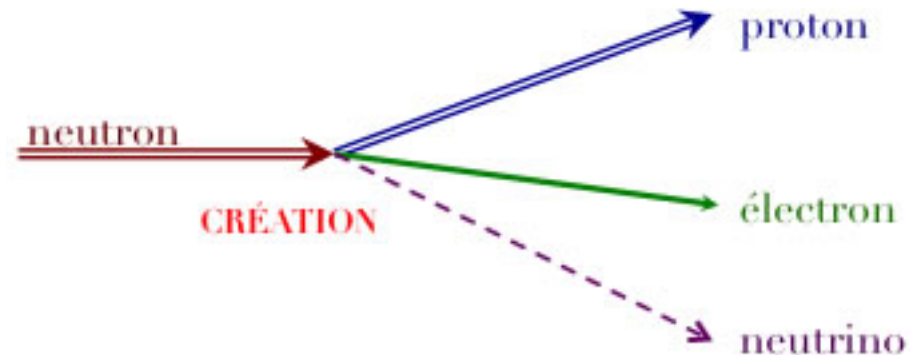
- ➔ pas d'interaction entre neutrons ? et purement répulsive entre protons ?
- Heisenberg (1932) : **interaction neutron-proton par analogie avec l'ion H_2^+**



- Idée encore admise que $n = p + e^-$
- ➔ modèle avec un électron oscillant d'un proton à l'autre
- ➔ états propres de position $|gauche\rangle$ et $|droite\rangle$ différant des états propres d'énergie ➔ position de l'électron oscillant entre $|gauche\rangle$ et $|droite\rangle$ ➔ **cohésion ??**

Théorie de Fermi de la transmutation bêta (1933)

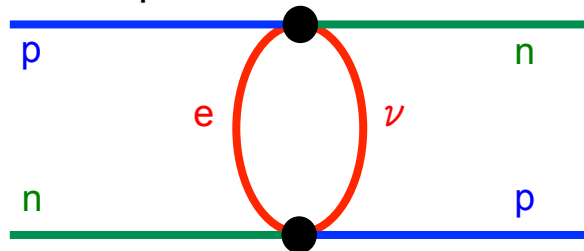
- Fermi partit des considérations suivantes
 - continuité du spectre en énergie des électrons dans la transmutation bêta → existence d'une particule légère et neutre, le **neutrino**
 - impossibilité de confiner un électron, ou un neutrino, dans un volume aussi petit qu'un noyau → ni l'électron ni le neutrino ne sont présents avant la transmutation ⇔ ils sont **créés** en même temps lors de la transmutation
 - → par conséquent **le noyau ne contient que des protons et des neutrons**
 - → **annihilation** d'un neutron
 - → et **création** d'un proton
 - → et **création** d'un électron
 - → et **création** d'un neutrino



- → terme $a_{\text{neutron}} \cdot a_{\text{proton}}^\dagger \cdot a_{\text{électron}} \cdot a_{\text{neutrino}}^\dagger$
- → lagrangien $\mathcal{L}_{\text{int}} \in \psi_{\text{neutron}} \psi_{\text{proton}} \psi_{\text{électron}} \psi_{\text{antineutrino}}$
- → **aussi** termes $a_{\text{neutron}} \cdot a_{\text{proton}} \cdot a_{\text{électron}}^\dagger \cdot a_{\text{neutrino}}^\dagger$ et $a_{\text{neutron}}^\dagger \cdot a_{\text{proton}}^\dagger \cdot a_{\text{électron}} \cdot a_{\text{neutrino}}$ et...

De Fermi à Yukawa

- Défauts du modèle de Heisenberg
 - neutron = particule fondamentale
 - ☞ Majorana, Wigner, Bartlett
 - ☞ potentiel effectif $V(r)$
 - → calcul approximatif de l'énergie de liaison (deutéron et hélium)
- Le modèle β de Fermi (1933) induit *automatiquement* un terme d'échange neutron-proton

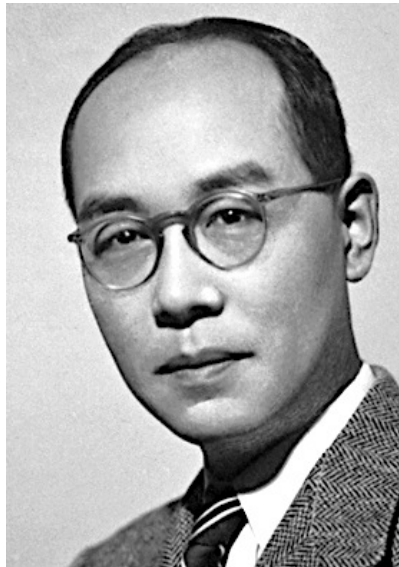


- Deux difficultés
 - couplage de Fermi $\sim 10^6$ fois trop faible
 - potentiel en $1/r^5 \rightarrow$ portée trop grande
 - ☞ efforts pour modifier le potentiel en $1/r^7$ ou $1/r^9$ (Bethe et Peierls 1934)

- Yukawa inverse le problème (1935)
- Propriétés requises de la (ou les) particule(s) échangée(s) entre proton et neutron
 - spin entier \rightarrow spin zéro par simplicité
 - portée $\lambda \Leftrightarrow$ masse $Mc^2 = \hbar c / \lambda$
 - portée $\lambda = 10^{-15}$ m \Leftrightarrow $M \sim 100$ à 200 MeV
- \Rightarrow nouvelle particule, le **méson**
- \Rightarrow potentiel $V(r) = G_Y e^{-Mr} / r$
- et couplage $G_Y \gg$ couplage électromagnétique e^2
- Pas observée car
 - instable : durée de vie calculée $0,2 \mu\text{s}$ (en fait $0,02 \mu\text{s}$)
 - énergie (alors) insuffisante pour la produire \rightarrow rayons cosmiques

Pions et muons

- 1936 : observation [par Carl Anderson et Seth Neddermeyer] dans les rayons cosmiques d'une particule
 - de masse $M \sim 100 \text{ MeV}$
 - de $\frac{1}{2}$ vie $\tau \sim 2 \mu\text{s}$
- \rightarrow identification \pm immédiate avec la particule prédite par Yukawa



Hideki Yukawa (1907-1981)

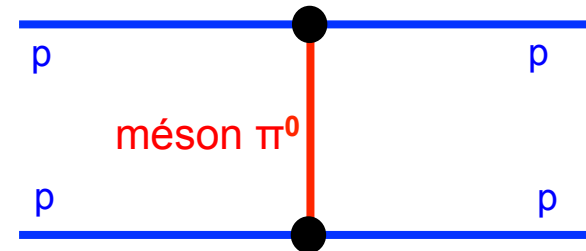
- Mais incohérences
 - durée de vie trop longue
 - interaction très faible avec les nucléons
- 1946 : découverte par Powell, Occhialini et Lattes dans les rayons cosmiques d'une *autre* particule
 - de masse $M \sim 140 \text{ MeV}$
 - de $\frac{1}{2}$ vie $\tau \sim 0,02 \mu\text{s}$
 - interagissant fortement avec les nucléons
- \rightarrow le vrai méson de Yukawa (méson π ou pion)
 - \rightarrow l'autre est un méson μ^\pm ou muon semblable à un électron lourd et sans aucun rapport avec la particule de Yukawa !

Collisions proton-proton

- Peu de progrès depuis 1920, faute de sources intenses de protons de haute énergie
- 1935 : protons de 600 keV du cyclotron de Berkeley et chambre de Wilson (Milton White) → *possible* anomalie à courte distance ($<5 \times 10^{-15}$ m)
- 1936 : protons de 1,2 MeV du van de Graff du Carnegie et compteurs Geiger-Müller (Merle Tuve) → anomalie nette
- ⇒ **force non coulombienne**
 - attractive
 - à courte portée
 - de même intensité que la force neutron-proton

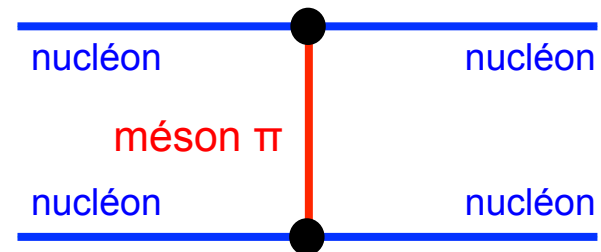
- → extension du modèle de Yukawa...

- **Force proton-neutron**



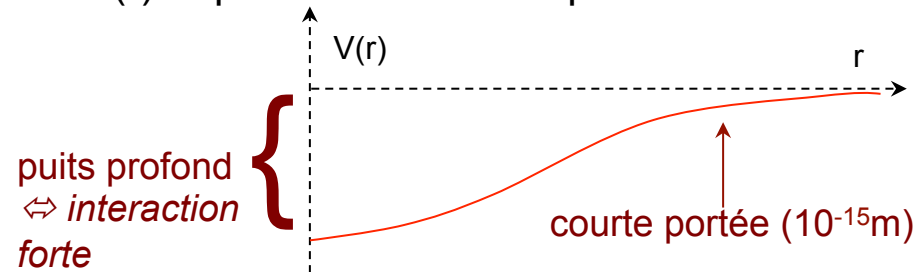
- → force neutron-neutron et force proton-proton identiques (hors électromagnétisme)

- → interaction forte *nucléon-nucléon*



Potentiel nucléon-nucléon

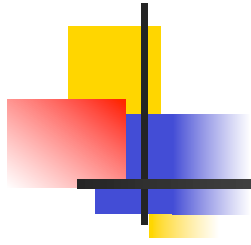
- Interaction entre deux nucléons (protons ou neutrons) modélisable par un potentiel $V(r)$ dépendant de leur séparation r



Formes du potentiel ± empiriques

Calcul difficile → approximations et calcul numérique

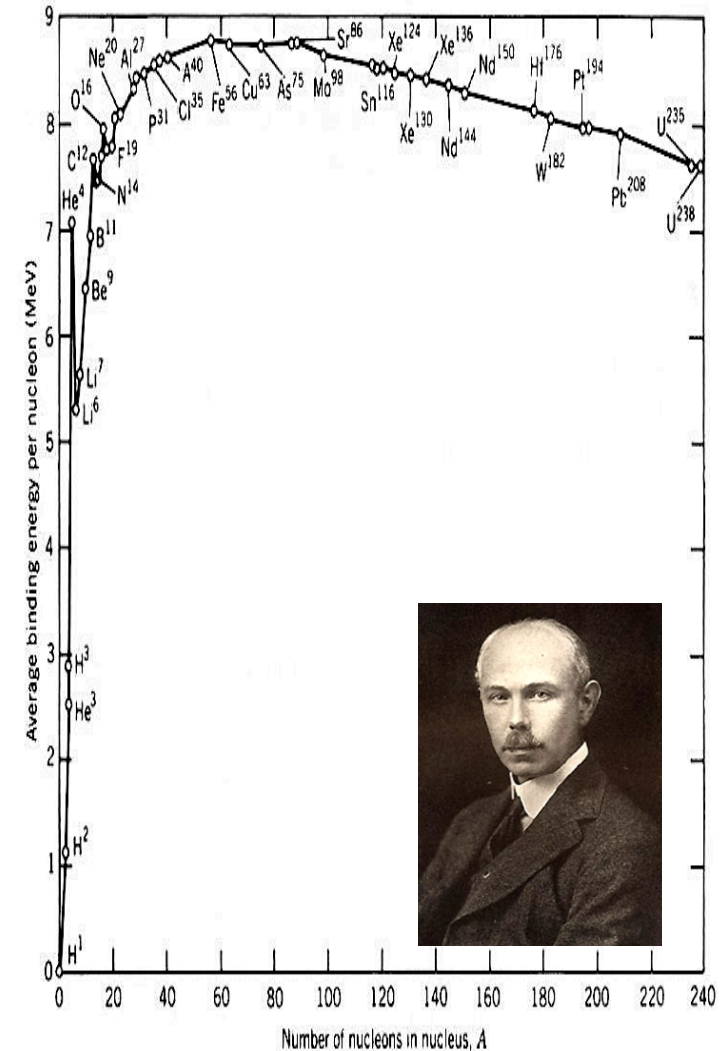
- 😞 nombreuses complications pratiques (interaction dépendant du spin des nucléons et de leur mouvement orbital...)
- 😊 conduit naturellement à
 - une **densité nucléaire à peu près uniforme** dans un noyau, et identique d'un noyau à l'autre
 - une **énergie de liaison à peu près identique** d'un noyau à l'autre
- 📖 nombreuses formes de potentiel explorées (jusqu'à aujourd'hui)
- *Mais il s'est révélé illusoire d'en déduire la structure des noyaux lourds*



LE MODÈLE DE LA GOUTTE D'EAU

$$E_{\text{liaison}} \equiv Z m_{\text{proton}} + N m_{\text{neutron}} - M_{\text{noyau}}$$

- Énergie de liaison *par nucléon* constante ~ 8 MeV/nucléon, en 1^o approximation
- \Leftrightarrow chaque nucléon n'est sensible qu'à ses voisins immédiats
- \Leftrightarrow force de portée \sim taille d'un nucléon $\sim 10^{-15}$ m
- 😊 augmentation de l'énergie de liaison du lithium au fer \Leftrightarrow de moins en moins de neutrons sont près de la surface
- 😊 diminution de l'énergie de liaison du fer à l'uranium \Leftrightarrow répulsion électrostatique $\propto Z^2$ grandissante
- 😡 stabilité particulièrement grande pour ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$

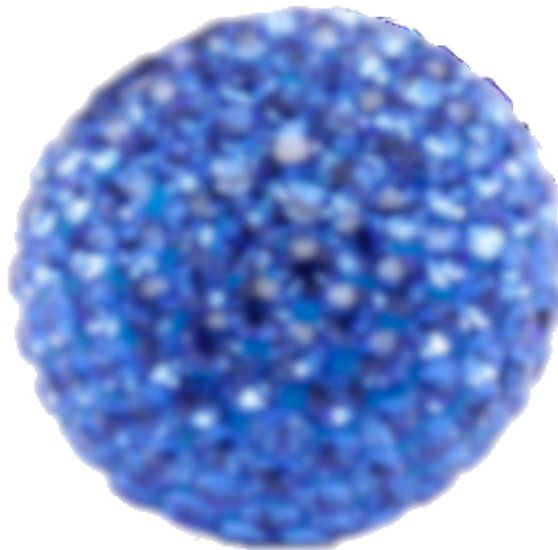


Comme une goutte d'eau ?

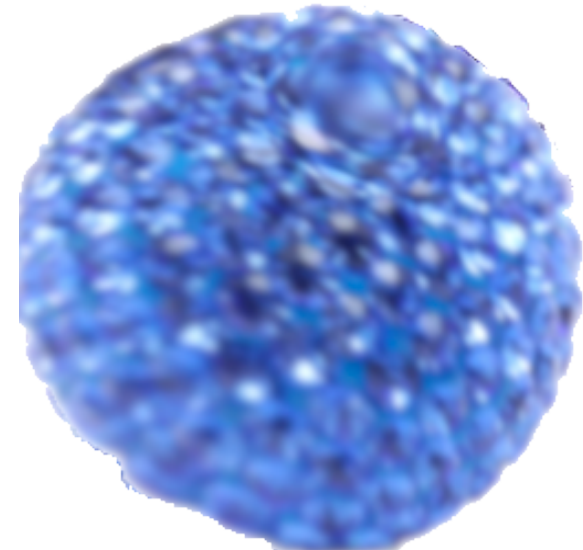
- L'ensemble des nucléons a une cohésion à très courte portée et (l'équivalent d')une tension de surface
- ☞ comportement analogue à celui d'une goutte d'eau (Gamow) ?



Modes de vibration en volume
(compression, dilatation, déformation)



Noyau « au repos »



Modes de vibration de surface

Weizsäcker et Bethe

- Théorie de l'interaction nucléon-nucléon trop rudimentaire → contraintes à partir de l'énergie de liaison
- 1935 : estimation semi-empirique de l'énergie de liaison par Carl von Weizsäcker (1912-2007), améliorée et simplifiée par Hans Bethe (1906-2005)
 - noyaux formés de Z protons et N = A – Z neutrons
 - nucléons non-relativistes (masse des nucléons >> énergie de liaison)
 - densité de nucléons constante d'un noyau à l'autre
 - énergie de liaison par nucléon constante sauf effets de surface
 - nombre N de neutrons proche du nombre Z de protons (← principe de Pauli)
 - répulsion coulombienne $\propto Z^2$

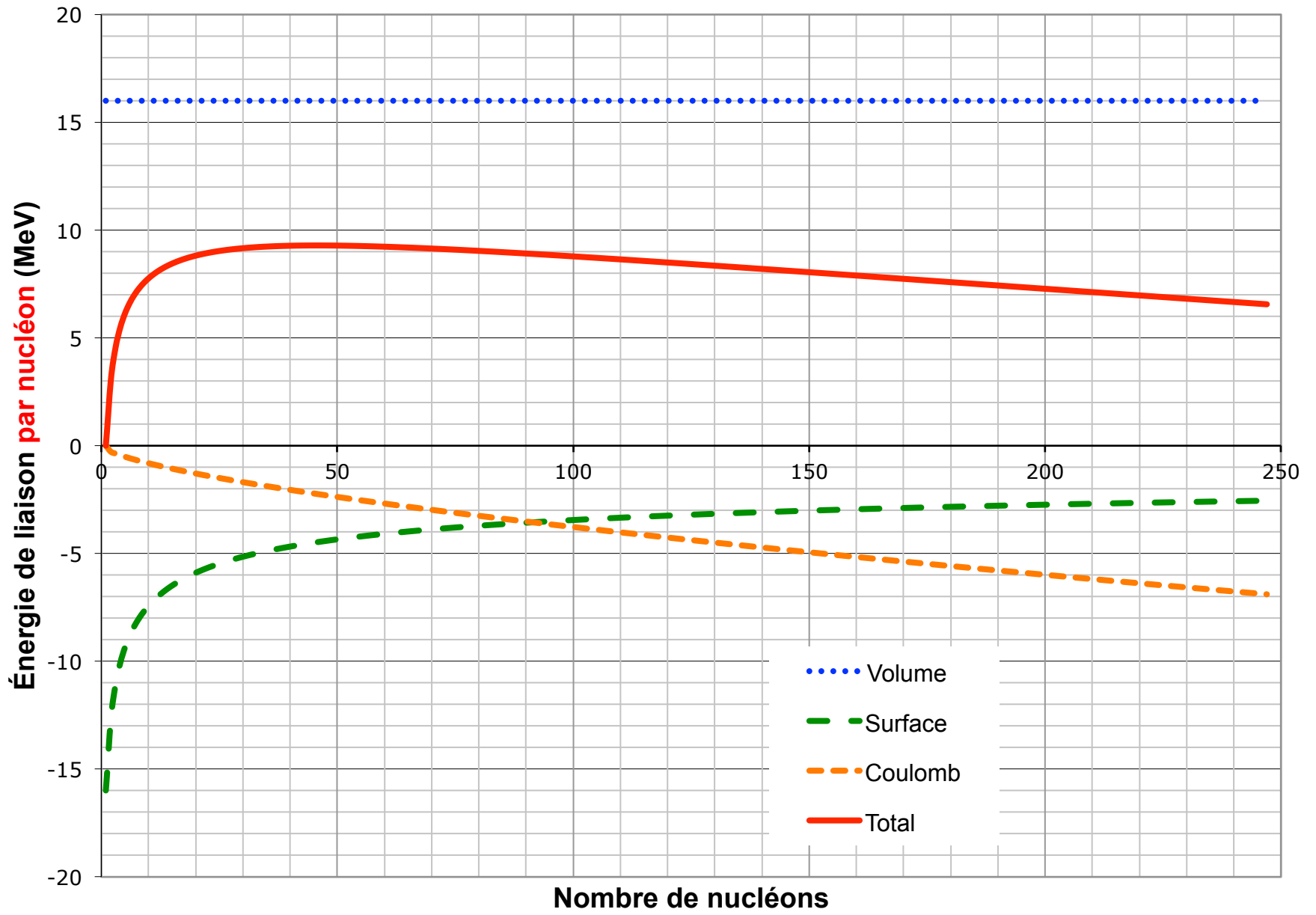
$$E_{\text{liaison}} = aA + bA^{2/3} + c(N-Z)^2/A + 3/5 e^2 Z(Z-1)/(r_0 A^{1/3})$$

Terme de volume
[$\propto A$ et non A^2]

Terme de surface

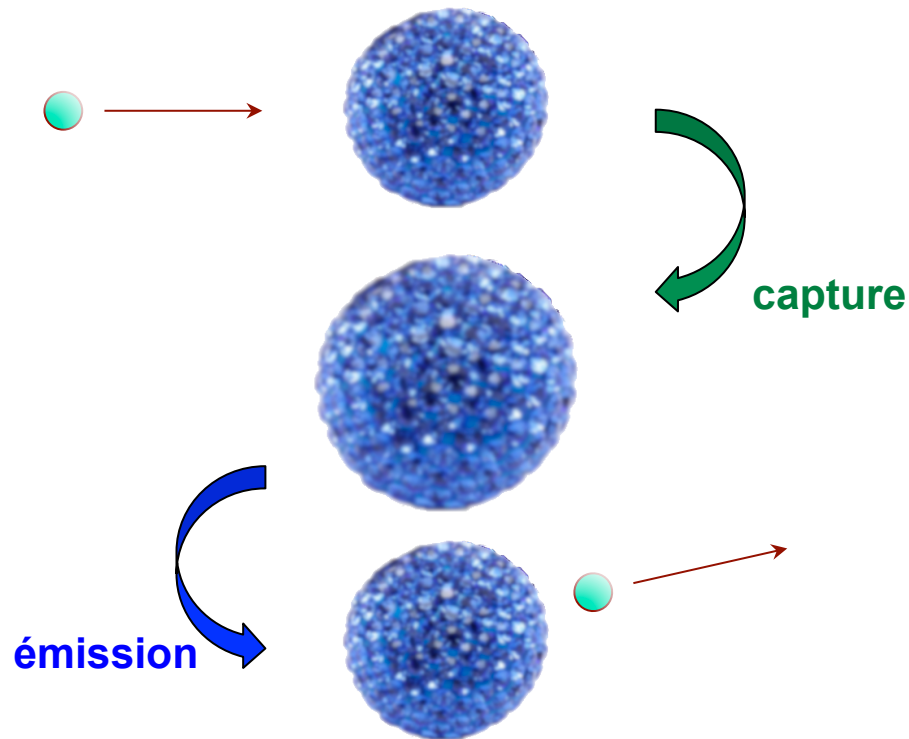
Terme favorisant N = Z (Pauli)

Répulsion coulombienne
(rayon du noyau $r_0 A^{1/3}$)





- Idée du « noyau composé » : la capture — comme la diffusion — d'un proton ou d'un neutron sur un noyau se fait en deux étapes **nettement séparées** (Bohr 1936)



- *A priori*, ce serait la même chose pour une collision entre deux noyaux (mais pas d'expérience alors possible)



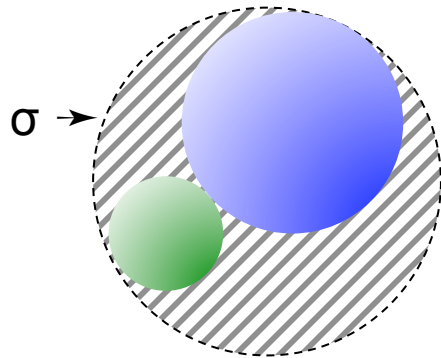
Le noyau composé (*compound nucleus*)

- Bohr pense que l'énergie d'une particule incidente (par exemple un neutron) se répartit entre tous les nucléons du noyau cible [*en fait ce n'est pas exact*]
- \Rightarrow aucun de ceux-ci n'a assez d'énergie pour ressortir (sinon par effet tunnel \Rightarrow lent)
- \Rightarrow le noyau composé est métastable (durée de vie \gg temps nécessaire à un neutron pour parcourir son diamètre)
- \Rightarrow le noyau composé a alors « perdu la mémoire » du processus qui l'a formé
- \Rightarrow il peut alors ensuite soit
 - conserver le neutron \Leftrightarrow synthèse d'un isotope du noyau initial (avec émission en général d'un γ)
 - émettre un neutron et redonner le noyau initial \Leftrightarrow diffusion élastique ou inélastique
 - émettre un proton ou un α en donnant un noyau différent \Leftrightarrow réaction nucléaire
- et *mutatis mutandis* pour une collision de proton ou d'alpha

Section efficace et libre parcours moyen

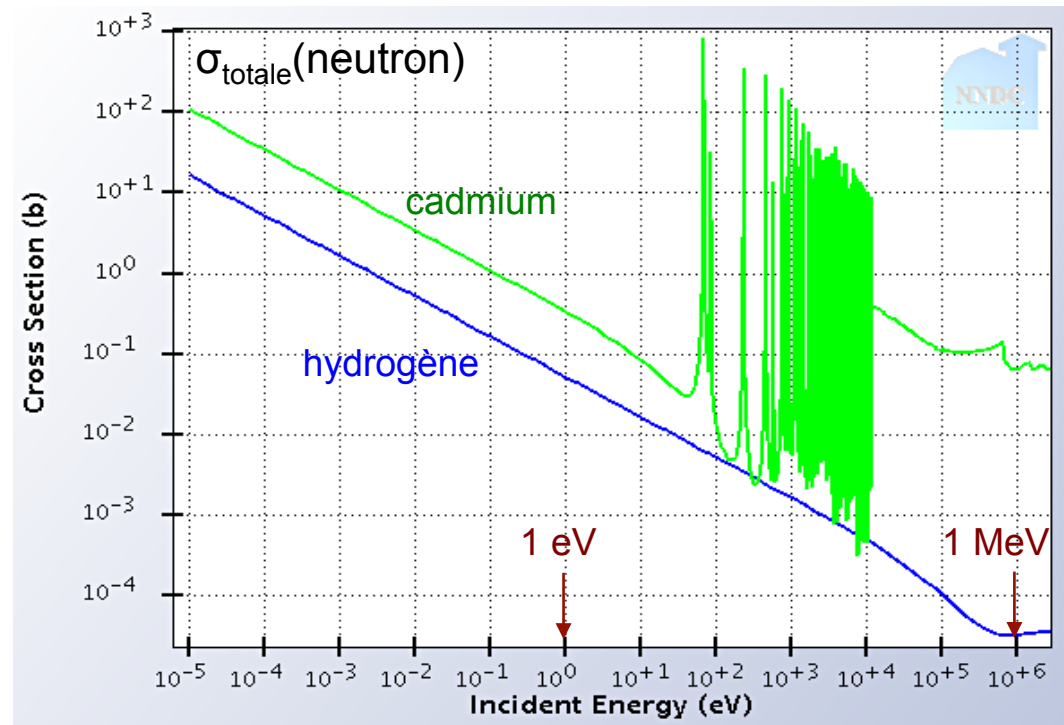
- La probabilité d'une réaction dépend
 - du flux de projectiles
 - de la densité n de cibles
 - de la section efficace σ de la réaction :
 - $\sigma = [\text{terme cinématique}] |\langle \text{out} | \mathbf{H} | \text{in} \rangle|^2$
 - (règle d'or de Fermi)

- Intuitivement



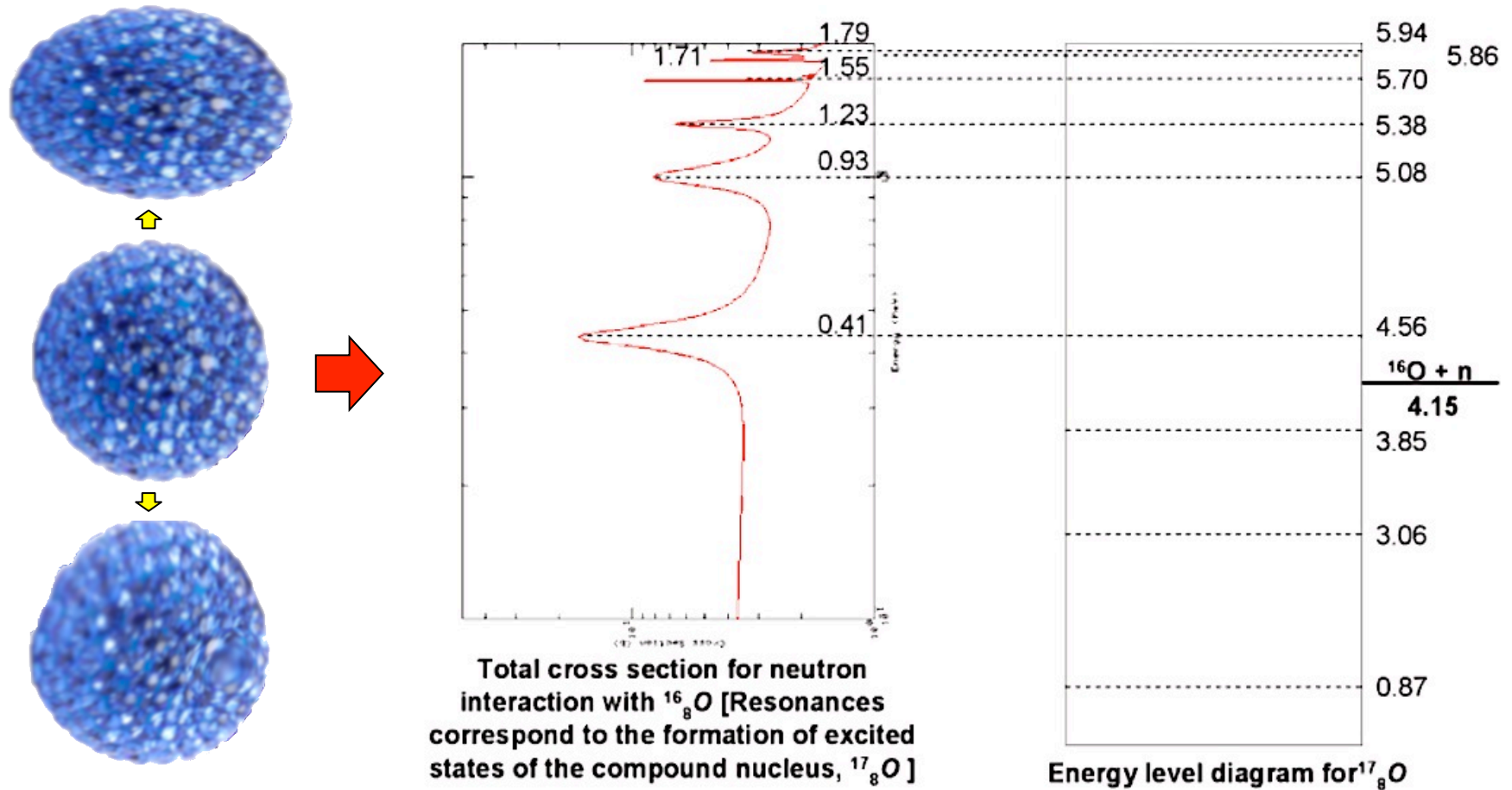
- Unité : le barn = 10^{-28} m^2 →

- Libre parcours moyen $\lambda = 1/n\sigma$
 - densité de noyaux $n = 10^{30} \text{ m}^{-3}$
 - section efficace $\sigma = 1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$
 - → $\lambda = 1/n\sigma = 10^{-2} \text{ m} = 1 \text{ cm}$
- Un flux de projectiles diminue en $e^{-x/\lambda}$



Niveaux d'énergie du noyau

- Bohr et Kalckar (1937) : calcul des modes de vibration (en volume et en surface) d'une goutte liquide ➔ explication des résonances et de leurs positions





La « bible » de Bethe : 500 pages denses

- Bethe & Bacher (1936)

APRIL, 1936 REVIEWS OF MODERN PHYSICS VOLUME 8

Nuclear Physics
A. Stationary States of Nuclei*
 H. A. BETHE AND R. E. BACHER, Cornell University

TABLE-OF-CONTENTS

I. Fundamental Properties of Nuclei	§26. QUANTITATIVE RESULTS AND LIMITATIONS OF THE STATISTICAL MODEL.....157
§ 1. CHARGE, WEIGHT..... 83	§27. DISPROOF OF ORDINARY FORCES.....160
§ 2. ENERGY..... 85	§28. FORCES BETWEEN LIKE PARTICLES.....161
§ 3. SIZE..... 88	§29. THE SURFACE EFFECT.....163
§ 4. STATISTICS..... 89	§30. WEIZÄCKER'S SEMIEMPIRICAL FORMULAE.....165
§ 5. SPIN AND MAGNETIC MOMENT..... 90	
II. Qualitative Arguments about Nuclear Forces	VI. More Detailed Theory of Heavy Nuclei
§ 6. THE RATIO OF ATOMIC WEIGHT TO NUCLEAR CHARGE..... 92	§31. α-PARTICLES AS SUBUNITS OF HEAVIER NUCLEI.....168
§ 7. SATURATION OF NUCLEAR FORCES..... 93	§32. QUANTUM STATES OF INDIVIDUAL PARTICLES (NEUTRON AND PROTON "SHELLS").....171
§ 8. THE ELECTROSTATIC REPUSSION OF THE PROTONS, STABILITY AGAINST α -DECAY..... 96	§33. EVIDENCE FOR PERIODICITIES FROM THE ENERGY OF NUCLEI.....174
§ 9. DEUTERON AND α -PARTICLE: THE FORM OF THE POTENTIAL FUNCTION..... 99	§34. PERIODICITIES IN THE EXISTING ISOTOPES.....176
§10. FORCES BETWEEN LIKE PARTICLES, ODD AND EVEN ISOTOPES.....100	§35. ENERGY OF O^{16} AND Ca^{40} IN THE HARTREE APPROXIMATION.....179
III. Theory of the Deuteron	§36. THE COUPLING SCHEME IN NUCLEI.....180
§11. THE WAVE EQUATIONS OF HEISENBERG, WIGNER AND MAJORANA.....105	§37. VAN VLECK'S POTENTIAL.....183
§12. GROUND STATE OF THE DEUTERON.....108	
§13. EXCITED STATES OF THE DEUTERON.....112	VII. β-Disintegration and Nuclear Forces
§14. SCATTERING OF NEUTRONS BY PROTONS, I: CROSS SECTION.....114	§38. DISPROOF OF THE EXISTENCE OF ELECTRONS IN NUCLEI.....184
§15. SCATTERING OF NEUTRONS BY PROTONS, II: ANGULAR DISTRIBUTION.....119	§39. THE NEUTRINO.....186
§16. PHOTOELECTRIC DISINTEGRATION OF THE DEUTERON.....122	§40. THEORY OF β-DISINTEGRATION.....189
§17. CAPTURE OF NEUTRONS BY PROTONS.....126	§41. LIFETIME vs. MAXIMUM ENERGY IN β-DISINTEGRATION.....193
§18. SCATTERING OF PROTONS BY PROTONS.....130	§42. THE INVERSE β-PROCESSES: CAPTURE OF ORBITAL ELECTRONS BY NUCLEI, DISINTEGRATION OF NUCLEI BY ELECTRONS AND NEUTRINOS.....196
IV. Theory of H^3, He^3 and He^4	§43. STABILITY OF ISOBARS AND FORBIDDEN β-PROCESSES.....198
§19. THOMAS' PROOF OF THE FINITE RANGE OF NUCLEAR FORCES.....134	§44. NUCLEAR FORCES AND β-DISINTEGRATION.....201
§20. CALCULATION OF THE ENERGY OF H^3 , He^3 AND He^4 FROM THE VARIATION PRINCIPLE.....137	§45. THE MAGNETIC MOMENTS OF PROTON AND NEUTRON.....205
§21. FEENBERG'S "EQUIVALENT TWO-BODY PROBLEM".....143	
§22. COMPARISON OF H^3 AND He^3146	VIII. Nuclear Moments
§23. EXCITED STATES OF THE α -PARTICLE.....147	§46. THE INTERACTION OF THE NUCLEAR MOMENT WITH THE ELECTRONS.....207
V. Statistical Theory of Nuclei	§47. METHODS USED TO DETERMINE THE NUCLEAR ANGULAR MOMENTUM AND THE HYPERFINE STRUCTURE SEPARATIONS.....211
§24. THE HARTREE METHOD.....149	§48. VALUES OF NUCLEAR SPINS AND MAGNETIC MOMENTS.....215
§25. THE STATISTICAL MODEL, QUALITATIVE CONCLUSIONS.....153	§49. ISOTOPE SHIFT IN ATOMIC SPECTRA.....223
	§50. QUADRUPOLE MOMENTS.....225

- Bethe (1937)

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 9 APRIL, 1937 NUMBER 2

Nuclear Physics
B. Nuclear Dynamics, Theoretical*
 H. A. BETHE, Cornell University

- Bethe & Livingston (1937)

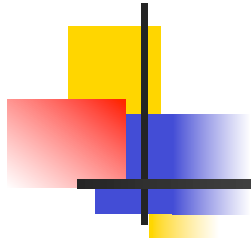


REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 9 JULY, 1937 NUMBER 3

Nuclear Physics
C. Nuclear Dynamics, Experimental*
 H. A. BETHE AND H. L. LIVINGSTON, Cornell University, Ithaca, New York

Intègrent les progrès récents sur la diffusion des protons et des neutrons sur les noyaux



DES NEUTRONS ET DE L'URANIUM

Une idée de génie : bombarder avec des neutrons



■ Avantages

- PAS de barrière coulombienne
- \Rightarrow nul besoin d'accélérateur (très) coûteux
- \Rightarrow tous les noyaux peuvent servir de cible, même les plus lourds
- \Rightarrow synthèse possible de la plupart (?) des isotopes

■ Inconvénients

- impossibilité de choisir l'énergie du neutron (de l'accélérer en particulier)
- impossibilité de diriger le neutron vers la cible
- production de neutrons par bombardement du béryllium par les α du radon \Rightarrow flux faibles

■ Destin des neutrons

- la plupart n'interagissent pas avec une cible mince
- ceux qui interagissent rebondissent (collision élastique ou inélastique)
- ou arrachent des nucléons (spallation) $\Rightarrow A \downarrow$
- ou sont absorbés, au moins brièvement $\Rightarrow A \uparrow$

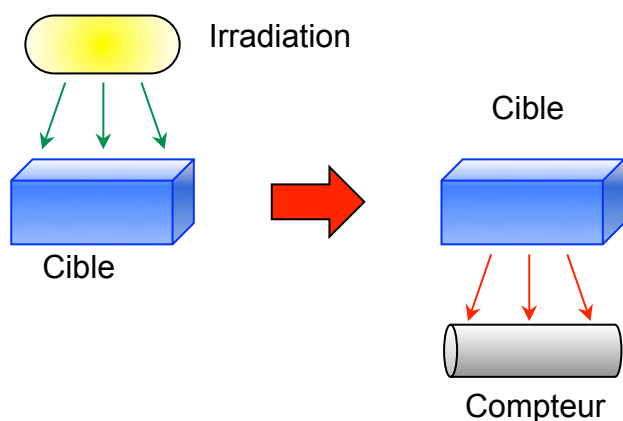
■ Programme à partir de février 1934

- bombarder systématiquement tous les éléments du tableau périodique, de l'hydrogène à l'uranium
- détecter la présence de corps radioactifs
- les identifier chimiquement

Radioactivité induite par bombardement de neutrons

■ Succès rapide

- fluor (Z=9) $^{19}\text{F} \rightarrow ^{20}\text{F} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$
- aluminium (Z=13) $^{27}\text{Al} \rightarrow ^{28}\text{Al} \rightarrow ^{28}\text{Si}$
- \Rightarrow 1^o article dès le 25 mars dans *La Ricerca Scientifica*
- avril et mai : parcours du tableau périodique
- \rightarrow 60 éléments irradiés
- \rightarrow 40 nouveaux radio-isotopes



■ Régularités empiriques

- Élément léger ($Z \leq 30$)
 - $\Rightarrow Z \rightarrow Z - 1$ ou $Z - 2$
- Élément lourd ($Z \geq 30$)
 - $\Rightarrow Z \rightarrow Z$ ou $Z + 1$
- Mai 1934 : irradiation de l'uranium par des neutrons
- \rightarrow 4 éléments radioactifs β^- de $\frac{1}{2}$ vies

10 s	40 s	13 mn	90 mn
------	------	-------	-------
- Transition $\beta^- \Leftrightarrow {}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y}$
- Donc $^{238}\text{U} \xrightarrow{n} ^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}\text{Ek.Re} \rightarrow$
 $\xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}\text{Ek.Os} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{95}\text{Ek.Ir} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{96}\text{Ek.Pt}$
- **Production de transuraniens ?**

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)

Neptunium (1940) Plutonium (1940)

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

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



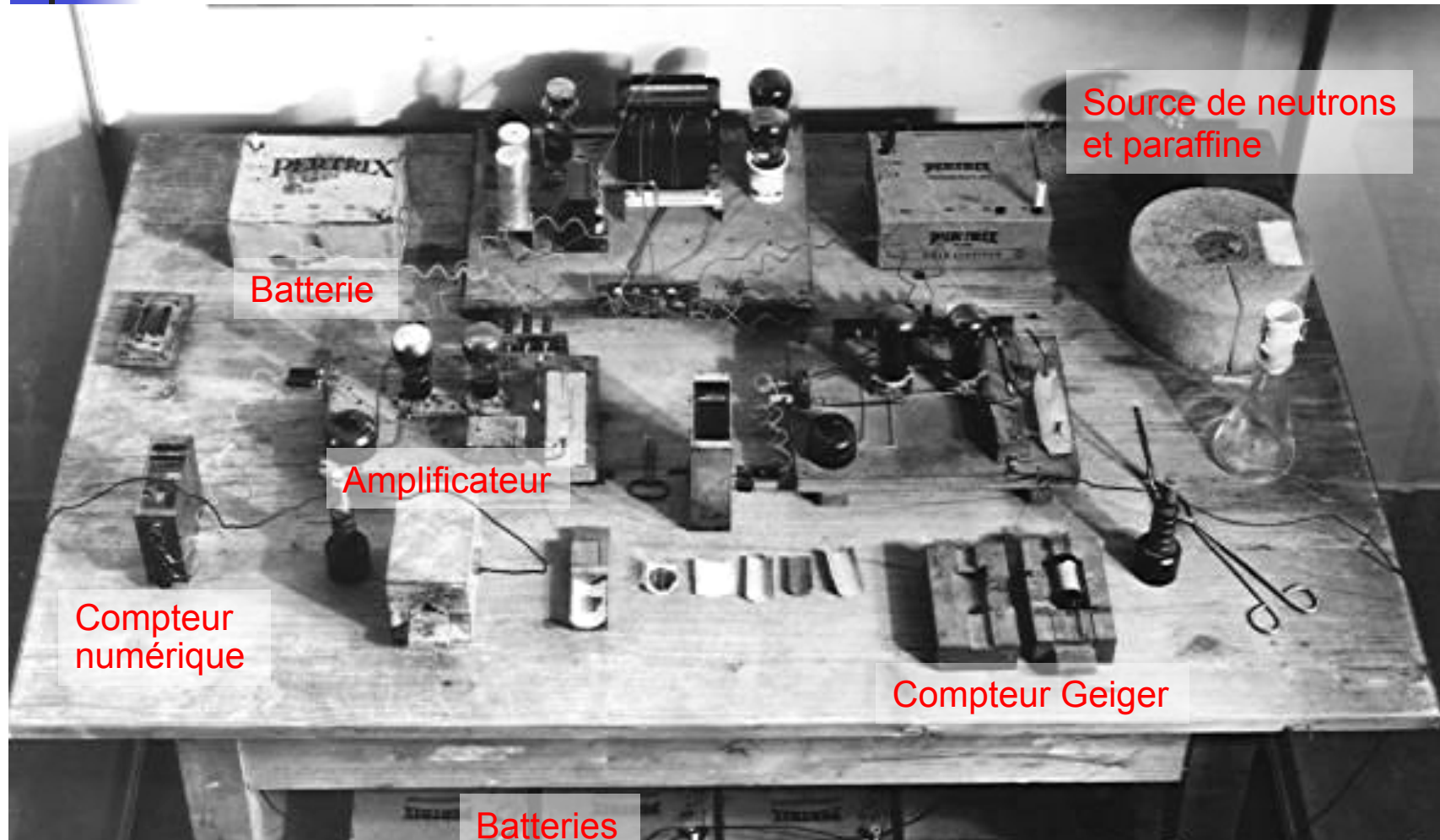
- Les acteurs à Berlin

- **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) \Rightarrow 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** isomères différents de l'uranium 239 [isométrie ternaire]
 - $^{92}\text{U} + n \rightarrow ^{92}\text{U}(23 \text{ mn}) \rightarrow ^{93}\text{EkRe} (?)$
 - $^{92}\text{U} + n \rightarrow ^{92}\text{U}(10 \text{ s}) \rightarrow ^{93}\text{EkRe}(2.2 \text{ mn}) \rightarrow ^{94}\text{EkOs}(59 \text{ mn}) \rightarrow ^{95}\text{EkIr}(66 \text{ h}) \rightarrow ^{96}\text{EkPt}(3.5 \text{ h}) \rightarrow ^{97}\text{EkAu} (?)$
 - $^{92}\text{U} + n \rightarrow ^{92}\text{U}(40 \text{ s}) \rightarrow ^{93}\text{EkRe}(16 \text{ mn}) \rightarrow ^{94}\text{EkOs}(5.7 \text{ h}) \rightarrow ^{95}\text{EkIr}(?)$
- L'élément de période 23 mn fut identifié **chimiquement** comme de l'uranium : $^{239}_{92}\text{U}$
- Sa transmutation $\beta \Rightarrow ^{239}_{93}\text{EkRe}$ mais celui-ci était en trop faible quantité pour être identifié chimiquement
- Mais pourquoi l'uranium 238 quasi-stable (période 4.5 milliards d'années) devenait-il si instable par l'addition d'**un seul** neutron qu'il fallait jusqu'à **cinq** transmutations β successives pour arriver à une quasi stabilité

Pendant ce temps, à l'Institut du Radium de Paris

- Les acteurs

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



- Après un (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 Pavel 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 aussi une **intense radioactivité β de période 3h30** qui n'avait pas été observée à Berlin

Le R3,5 h

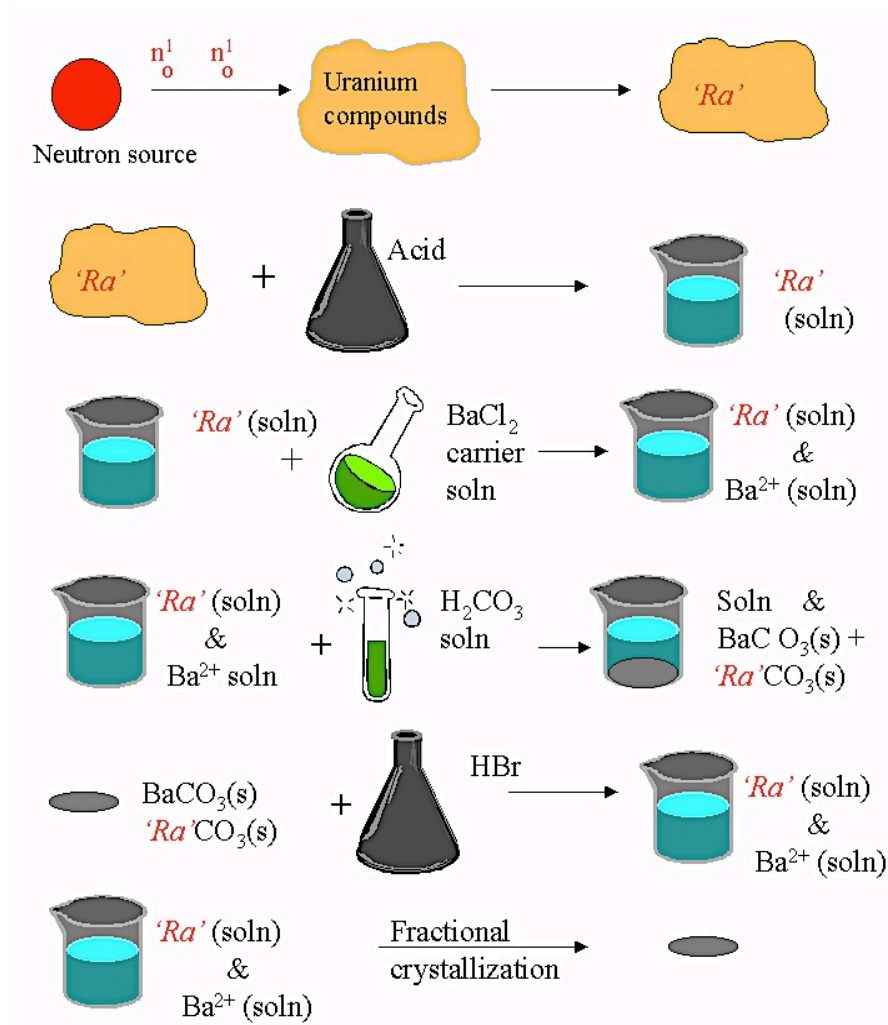
- Focalisation sur cet élément R3,5h
- D'abord identifié comme un isotope du thorium ^{90}Th
- Puis comme un isotope de l'actinium ^{89}Ac
- car ses propriétés chimiques étaient proches de celles du lanthane ^{57}La (juste au-dessus de l'actinium dans le tableau de Mendéléiev)
- \Rightarrow Échanges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



Impossible de séparer le «radium» du baryum

- Après l'exil de Meitner en juillet 1938, Hahn et Strassmann refirent en novembre l'irradiation de l'uranium par des neutrons
 - Ils repèrent 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 identifièrent 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

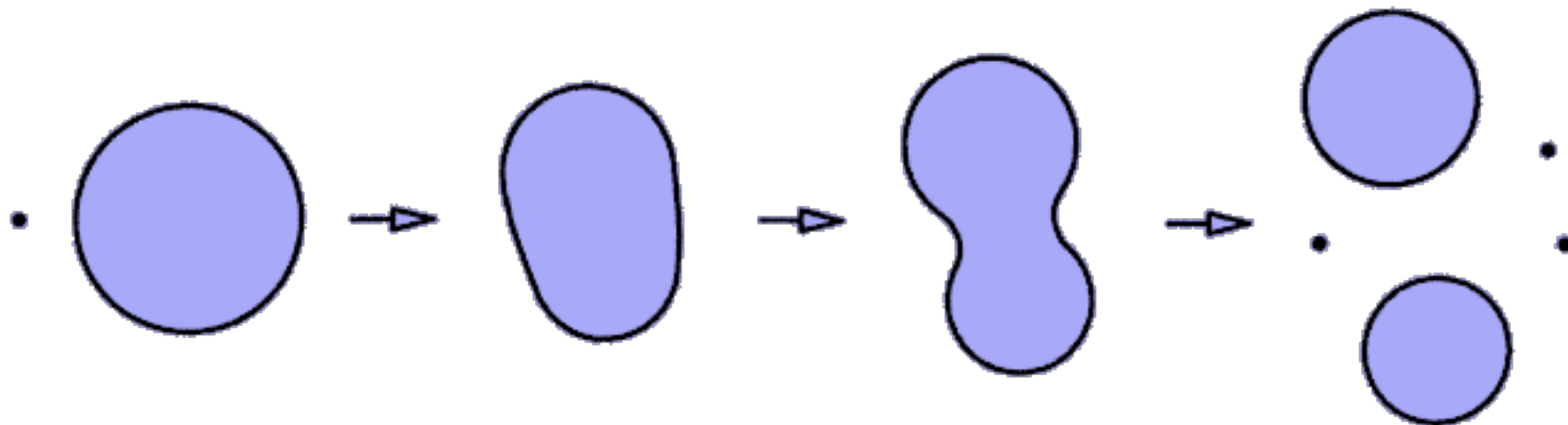
- et que leurs «isotopes de l'actinium», dont celui de Curie et Savitch, étaient en fin de compte des isotopes du **lanthane** ($Z=57$)
- Le 19 décembre, Hahn fit part à Meitner de ces résultats en lui demandant son aide

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

- tout en envoyant le 22 décembre un article à la revue *Naturwissenschaften*

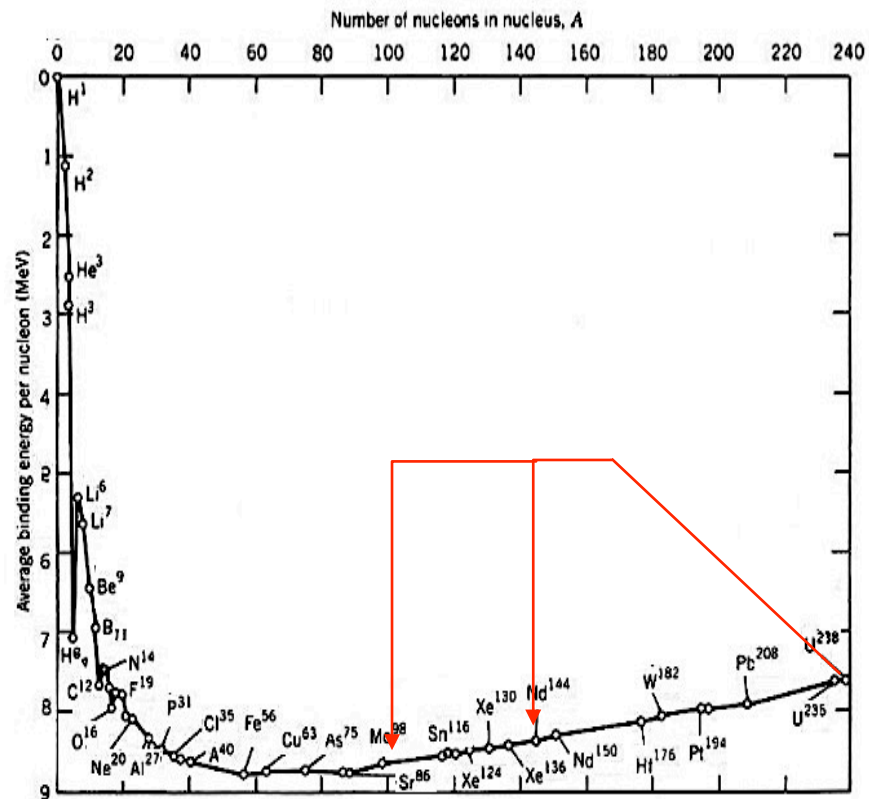
Fission

- 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 qu'il devienne instable et 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 ≠ effet tunnel**
- Frisch emprunta à un collègue biologiste le terme de *fission* (division cellulaire)



Une énergie colossale

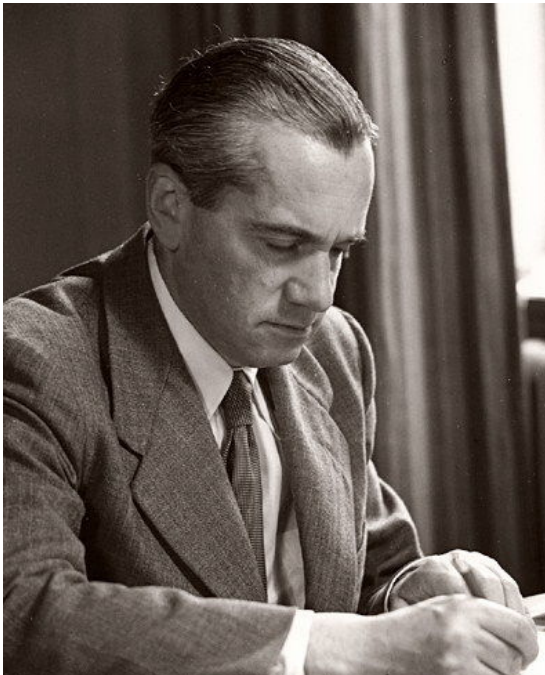
- Si l'uranium (masse atomique 238) se brisait en donnant un élément de masse atomique ~ 140 (baryum ou lanthane), le second fragment devait avoir une masse atomique ~ 100
- $n + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{141}_{56}\text{Ba} + {}^{92}_{36}\text{Kr} + 6n$



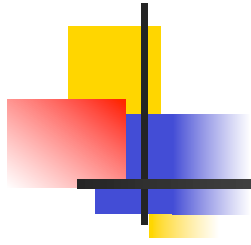
- Énergies de liaison des noyaux
 - $E(\text{U}) = 238 \cdot 7,6 = 1\,800 \text{ MeV}$
 - $E(\text{Ba}) = 141 \cdot 8,5 = 1\,200 \text{ MeV}$
 - $E(\text{Kr}) = 92 \cdot 8,7 = 800 \text{ MeV}$
 - $\Rightarrow 200 \text{ MeV d'énergie libérée}$
- On peut également, de façon équivalente, calculer la répulsion électrostatique des deux fragments

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? »



BOHR ET LA THÉORIE DE LA FISSION

Une question simple de Placzek à Bohr

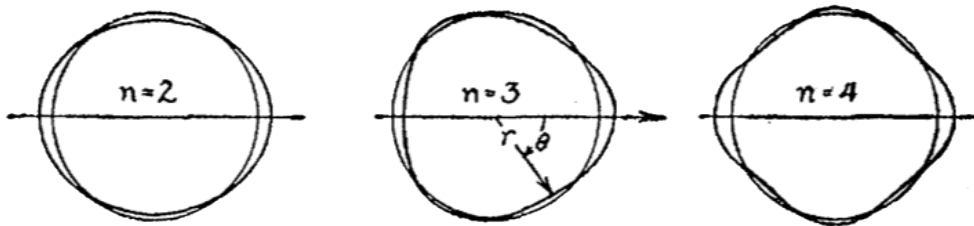
- 😊 Certes, plus de soucis avec les « transuraniens » et les « isoméries ternaires »
- 😡 Mais comment le modèle de noyau composé expliquait-il que
 - thorium et uranium ont en général des comportements très semblables, mais
 - le thorium n'est brisé que par les neutrons rapides
 - alors que l'uranium est brisé par les neutrons rapides *ET* lents (thermiques)
- Bohr suggéra que
 - thorium 232 et uranium 238 devaient se comporter en réalité de la même façon : fission exclusivement par neutrons rapides
 - et que le comportement de l'uranium vis à vis des neutrons lents était dû à un contaminant
- Il pensa à l'uranium 235
 - thorium naturel : 100% thorium 232
 - uranium naturel : 99.3% uranium 238
 - et 0.7% d'uranium 235 (Dempsey 1935, Nier 1938)
- Bohr : *seul* ^{235}U est brisé par les neutrons lents, et *seul* ^{238}U par les rapides
- En 1940, Nier montra que ^{235}U était bien *fissile*



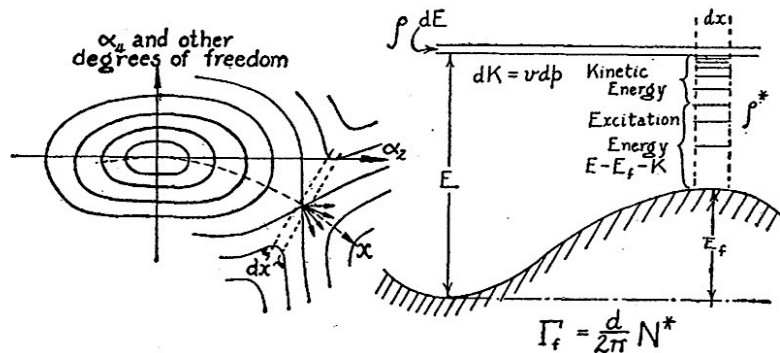
George Placzek (1905-1955)

Bohr et Wheeler : vibrations et rupture d'une goutte

- Décomposition de la forme d'une goutte en une superposition de modes de déformation (\sim décomposition de Fourier)

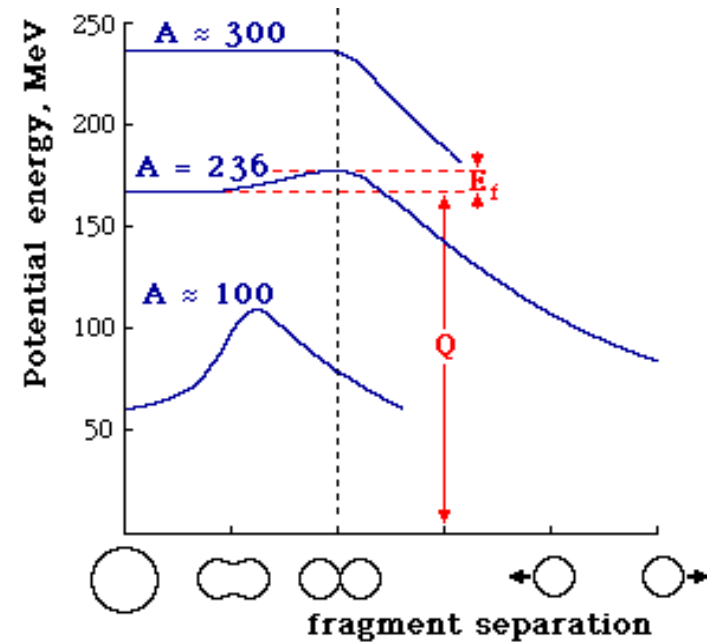


- \rightarrow calcul du **potentiel nucléaire et électrostatique** en fonction des paramètres de déformation



- \rightarrow existence d'une **barrière de potentiel**

- disparaissant pour $A > 250$
- franchissable pour $A > 230$ soit par effet tunnel soit par **apport d'énergie** (collision de neutron)





Noyaux fissi(b)les

Noyau	Barrière de potentiel	Énergie de liaison libérée par un neutron additionnel	Différence à fournir (sous forme d'énergie cinétique du neutron)
Thorium 232	7.5 MeV	5.4 MeV	2.1 MeV
Uranium 238	7.0 MeV	5.5 MeV	1.5 MeV
Uranium 235	6.5 MeV	6.8 MeV	- 0.3 MeV
Plutonium 239	5.0 MeV	6.6 MeV	- 1.6 MeV

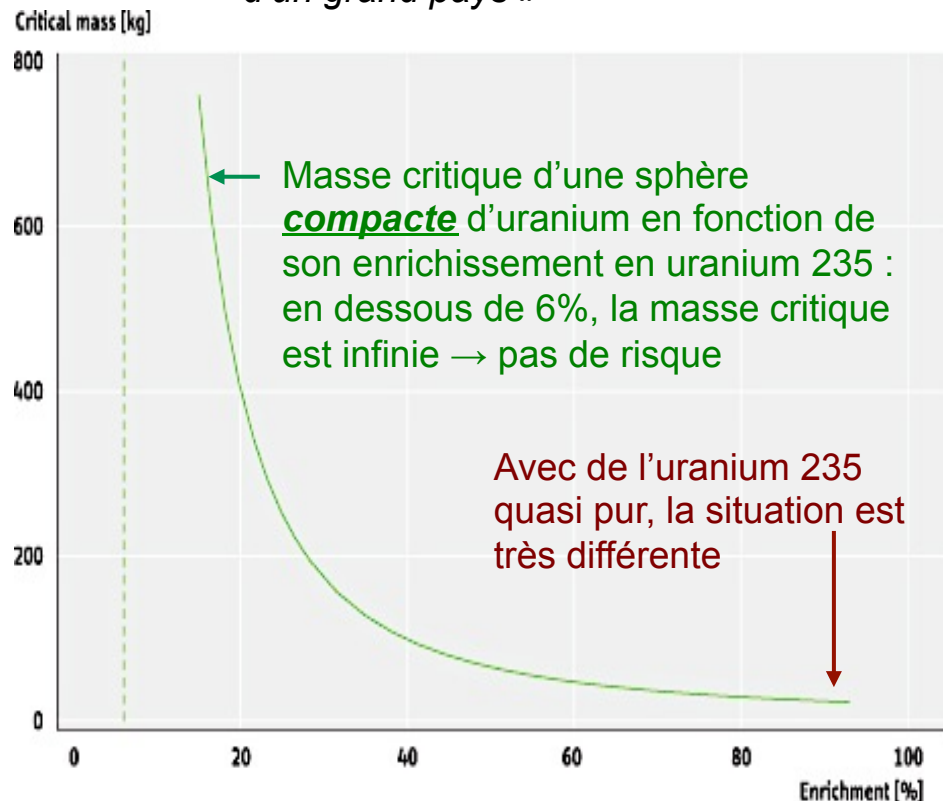
■ Vocabulaire

- **fissible** (ou fissionnable) : noyau brisé par des **neutrons rapides** mais pas de réaction en chaîne possible (^{238}U , ^{232}Th)
- **explosif** : noyau brisé par des neutrons rapides *et* réaction en chaîne possible (^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu)
- **fissile** (sans «b») : noyau brisé par *n'importe quel neutron* (**lent ou rapide**) \Rightarrow réaction en chaîne possible (^{233}U , ^{235}U et ^{239}Pu)
- **fertile** : non-fissile mais donnant un noyau fissile par capture de neutron ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$, $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$)

Soulagement... provisoire

■ Uranium 235 ?

- Utilisable (peut-être) pour un réacteur, pas pour une bombe
- « Il y faudrait toutes les ressources d'un grand pays »

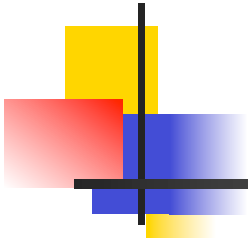


■ Mémorisation erronée de la suggestion de Bohr

- fission rapide due au *seul* ^{238}U (**inexact**) et captures → réaction convergente
- fission lente due au *seul* ^{235}U (**exact**) → réaction divergente mais sans explosion
- ⇒ réacteur plutôt que bombe
- ⇒ Bohr, Heisenberg, Fermi (<1942) n'imaginèrent une bombe que sous la forme d'un réacteur qui s'emballerait

Élément 94-239

Note discrète en fin d'article d'où on pouvait déduire que 94-239 serait fissile lui aussi



Merci de votre attention !

