

PETITE HISTOIRE
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

12 – THÉORIES DU NOYAU

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS

PREMIÈRE QUANTIFICATION = MÉCANIQUE QUANTIQUE

○ Description d'une particule (électron par ex.)

1. État quantique (fonction d'onde) $|\psi\rangle$

2. Observables A (position, impulsion, énergie, spin...)

○ $A|\psi\rangle = a|\psi\rangle$

○ valeurs propres a

○ continues

○ discrètes (**quantifiées**)

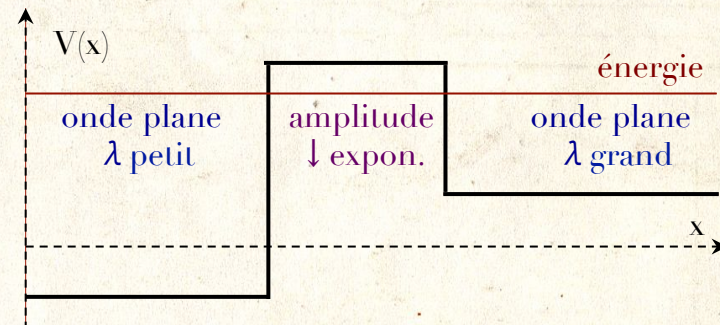
3. Équation donnant $|\psi\rangle$

○ **équation de Schrödinger** \Leftrightarrow particule non-relativiste de spin 0

○ **équation de Dirac** \Leftrightarrow particule relativiste de spin $\frac{1}{2}$

○ équations relativistes pour le spin 0 et pour le spin 1

○ Solutions simples : par ex. Schrödinger dans un potentiel constant



○ Plusieurs particules

$$\Rightarrow |\psi(x_1, x_2, x_3 \dots)\rangle$$

○ Particules identiques \Rightarrow

○ état pair (**boson**)

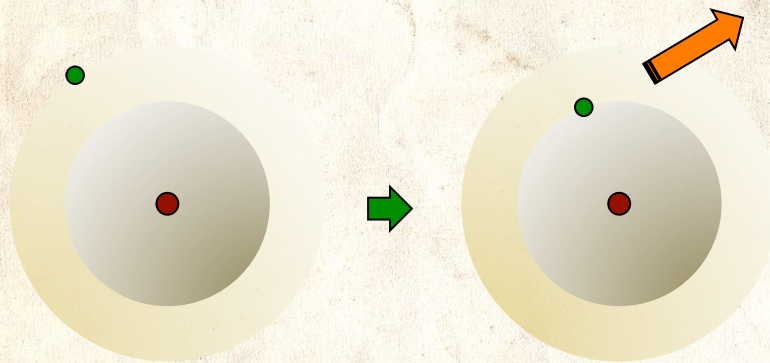
$$|\psi_{12}\rangle = + |\psi_{21}\rangle$$

○ état impair (**fermion**)

$$|\psi_{12}\rangle = - |\psi_{21}\rangle$$

SECONDE QUANTIFICATION : LE PHOTON

- Indispensable pour traiter l'émission et l'absorption de lumière par les atomes



- Le photon n'existe pas avant d'être émis (et n'existe plus après avoir été absorbé)

- Schématiquement



- ⇒ le nombre de particules varie
- ⇒ opérateurs «créant» et «annihilant» une particule

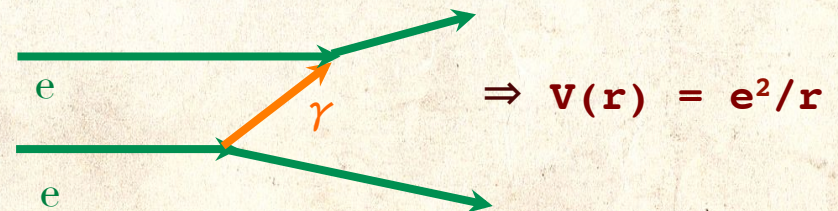
$$A|n\rangle = |n-1\rangle$$

$$A^+|n\rangle = |n+1\rangle$$

- «Vide» $\equiv |0\rangle$ (état à **zéro** particule, mais néanmoins état quantique respectable...)

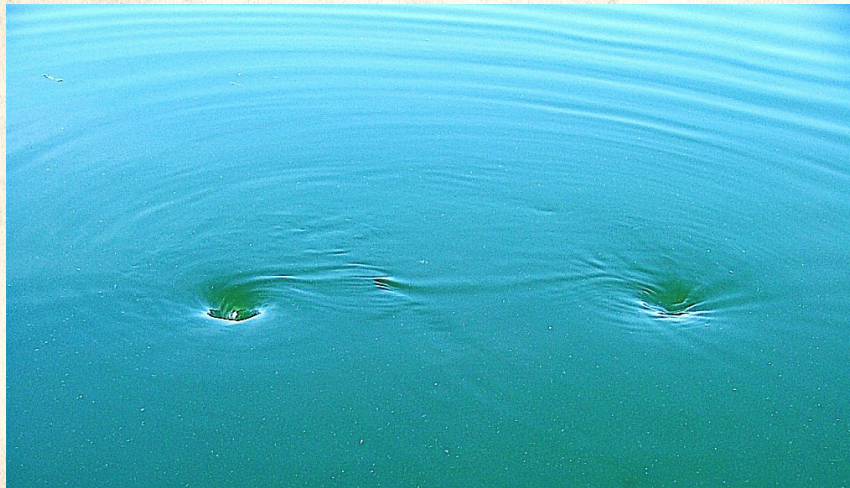
- ⇨ **électrodynamique quantique**

- ⇒ interaction électromagnétique entre particules chargées



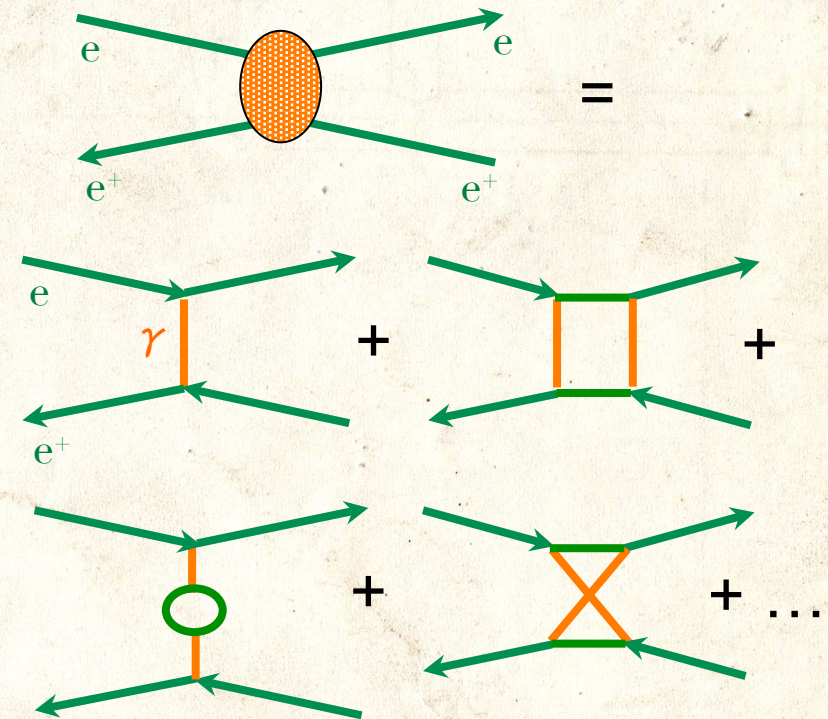
THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS

- Champ \equiv quantité définie en tout point de l'espace et du temps
- Champ électromagnétique quantifié \Leftrightarrow photons



- Champ électronique quantifié \Leftrightarrow électrons et positrons

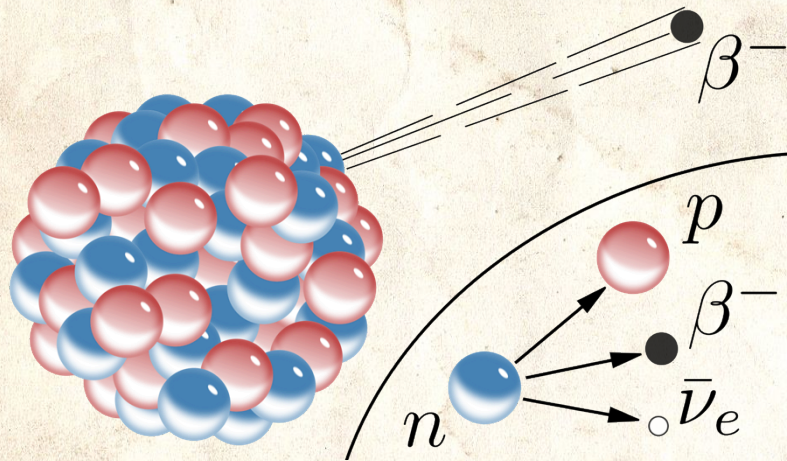
- **Électrodynamique quantique**



- \Rightarrow nombreux problèmes techniques (infinis et renormalisation)

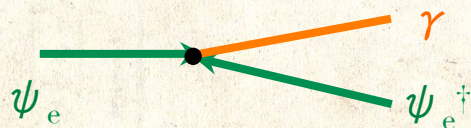
THÉORIE DE FERMÍ DE LA TRANSMUTATION β

- Transmutation d'un noyau due à la transformation en proton de l'un des neutrons du noyau



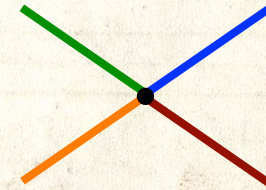
- Fermi s'est inspiré de l'électrodynamique quantique

- hamiltonien $e \psi_e^\dagger \psi_e A$



- Mais en impliquant quatre champs quantiques de fermions

- neutron
- proton
- électron
- neutrino



- hamiltonien $G_F \psi_p^\dagger \psi_n \psi_e^\dagger \psi_\nu$
- annihilation du neutron
- création du proton, de l'électron et de l'(anti)neutrino

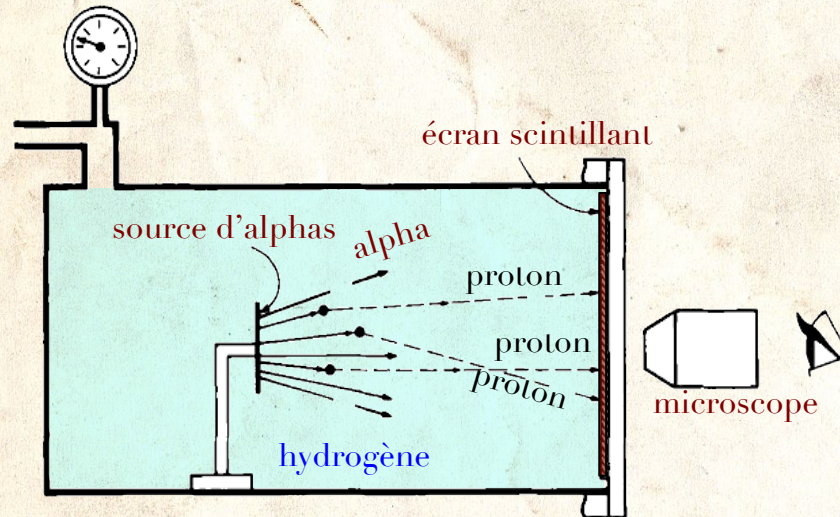
- Prévoit aussi les réactions $p \rightarrow n e^+ \nu$, $p e^- \rightarrow n \nu$, $p n \rightarrow e^+ \nu$

- Transmutation rare \Leftrightarrow constante de couplage G_F très petite ($\sim 10^{-10} \text{ MeV}^{-2}$)

INTERACTION NEUTRON-PROTON

TOUT COMMENCE AVEC RUTHERFORD (ENCORE!)

- Diffusion des alphas sur les **protons** de l'hydrogène



- La probabilité de diffusion à un angle θ ne suit pas la loi de Rutherford à grand angle (\Leftrightarrow petit paramètre d'impact)
- *Loi établie sur des noyaux lourds (l'or par ex.)*

- Rutherford (& Darwin)
 - répulsion électrostatique
 - cible (Ze) et projectile ($2e$) ponctuels

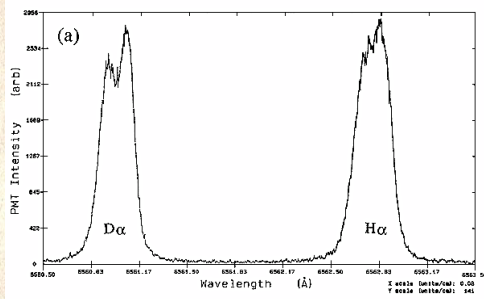
- Proton \Leftrightarrow répulsion électrostatique minimale
- \Rightarrow les α s'approchent plus près que pour les autres noyaux
- Déviation \Rightarrow
 - charges non ponctuelles
 - ou interaction non électrostatique

- Rutherford (1919) : structure complexe du noyau (A protons + $A-Z$ électrons)
- Chadwick (1921) : une **nouvelle interaction** entre protons

DEUTÉRIUM

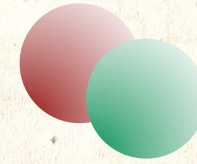
- Découvert en 1931 par Harold Urey par distillation répétée d'hydrogène liquide

Identification spectroscopique :
la raie H_{α} à 656,3 nm est
accompagnée d'une raie
légèrement décalée à 656,1 nm

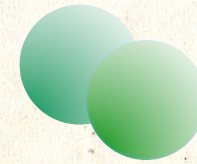


- Isotope ${}^2\text{H} \equiv \text{D}$ de l'hydrogène (masse atomique 2) → forme de l'eau lourde D_2O (Urey 1931)
- Découverte du neutron (1932) → noyau de deutérium formé d'un seul proton et un seul neutron

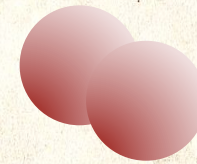
- Le deutéron est le seul état lié de deux nucléons



- Pas d'état lié de 2 protons (isotope ${}^2\text{He}$ de l'hélium)



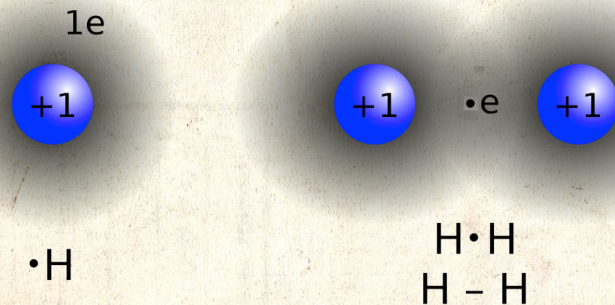
- Ni d'état lié de 2 neutrons



- Pourquoi ?
 - instabilité?
 - pas d'interaction p-p ni n-n?

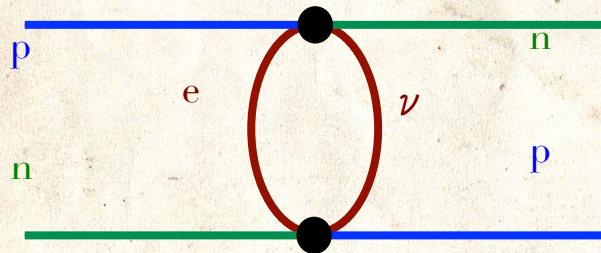
INTERACTION NEUTRON-PROTON

- 1932 : découverte du neutron
 - ☞ noyaux formés de Z protons et $A-Z$ neutrons
- **Comment interagissent-ils ?**
- Cas le plus simple : le deutéron (un seul proton et un seul neutron)
- Analogie : la molécule d'hydrogène H_2 (ou plus exactement l'ion H_2^+)
- Deux protons et un électron partagé → liaison assurée par l'électron malgré la répulsion des protons
- Quantiquement : interaction effective par recouvrement des orbitales des protons
- ☞ Heisenberg (1932) interaction proton-neutron modélisée dans le hamiltonien par un terme d'échange proton↔neutron
- ☞ Majorana, Wigner, Bartlett ... modèles un peu différents
- ☞ potentiel(s) effectif(s) $V(r)$ fonction de la distance r entre proton et neutron → calcul *approximatif* de l'énergie de liaison (deutéron et hélium)



DE FERMÍ À YUKAWA

- 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
 - \rightarrow efforts pour modifier le potentiel en $1/r^7$ ou $1/r^9$ (Bethe et Peierls 1934)

- Yukawa inverse le problème (1935)
- Quelles sont les propriétés requises de la (ou les) particule(s) échangée(s) entre le proton et le neutron?

- Spin zéro
- Portée $\lambda \Leftrightarrow$ masse $Mc^2 = \hbar c / \lambda$
- Portée $\lambda = 10^{-15}$ m \Leftrightarrow $M \sim 100$ MeV
- \Rightarrow **nouvelle particule, le méson**

- \Rightarrow potentiel $V(r) = G_Y e^{-Mr}/r$
- et couplage $G_Y \gg$ couplage électromagnétique e^2

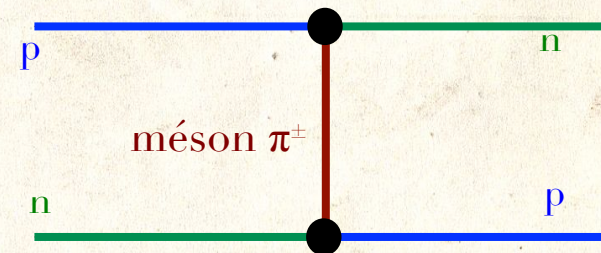
- Pas observée car
 1. instable : durée de vie calculée $0,2 \mu s$ (en fait $0,02 \mu s$)
 2. énergie (alors) insuffisante pour la produire \rightarrow **rayons cosmiques**

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 Graaff de Carnegie et compteurs Geiger-Müller (Merle Tuve) → anomalie nette
- ⇒ force non coulombienne
 1. attractive
 2. à courte portée
 3. **de même intensité que la force neutron-proton**

- → extension des modèles de Heisenberg-Fermi-Yukawa...

- Force proton-neutron



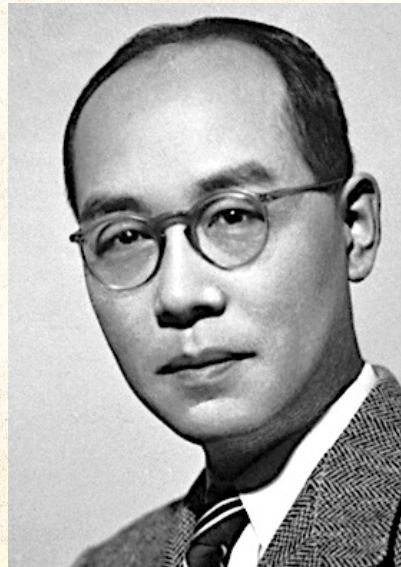
- → force neutron-neutron et force proton-proton identiques (hors électromagnétisme)



- → **interaction forte nucléon-nucléon**

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

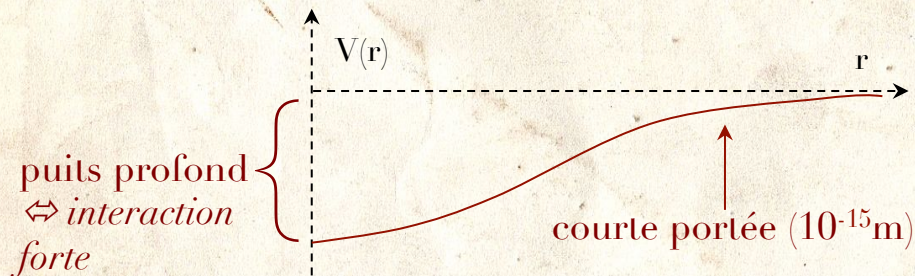


Hideki Yukawa (1907-1981)

- 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 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^\pm ou *pion*)
 - \rightarrow l'autre est un méson μ^\pm ou *muon* semblable à un électron lourd et sans aucun rapport!

POTENTIEL NUCLÉON-NUCLÉON

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



Formes du potentiel \pm empiriques
Calcul difficile \rightarrow approximations
et calcul numérique

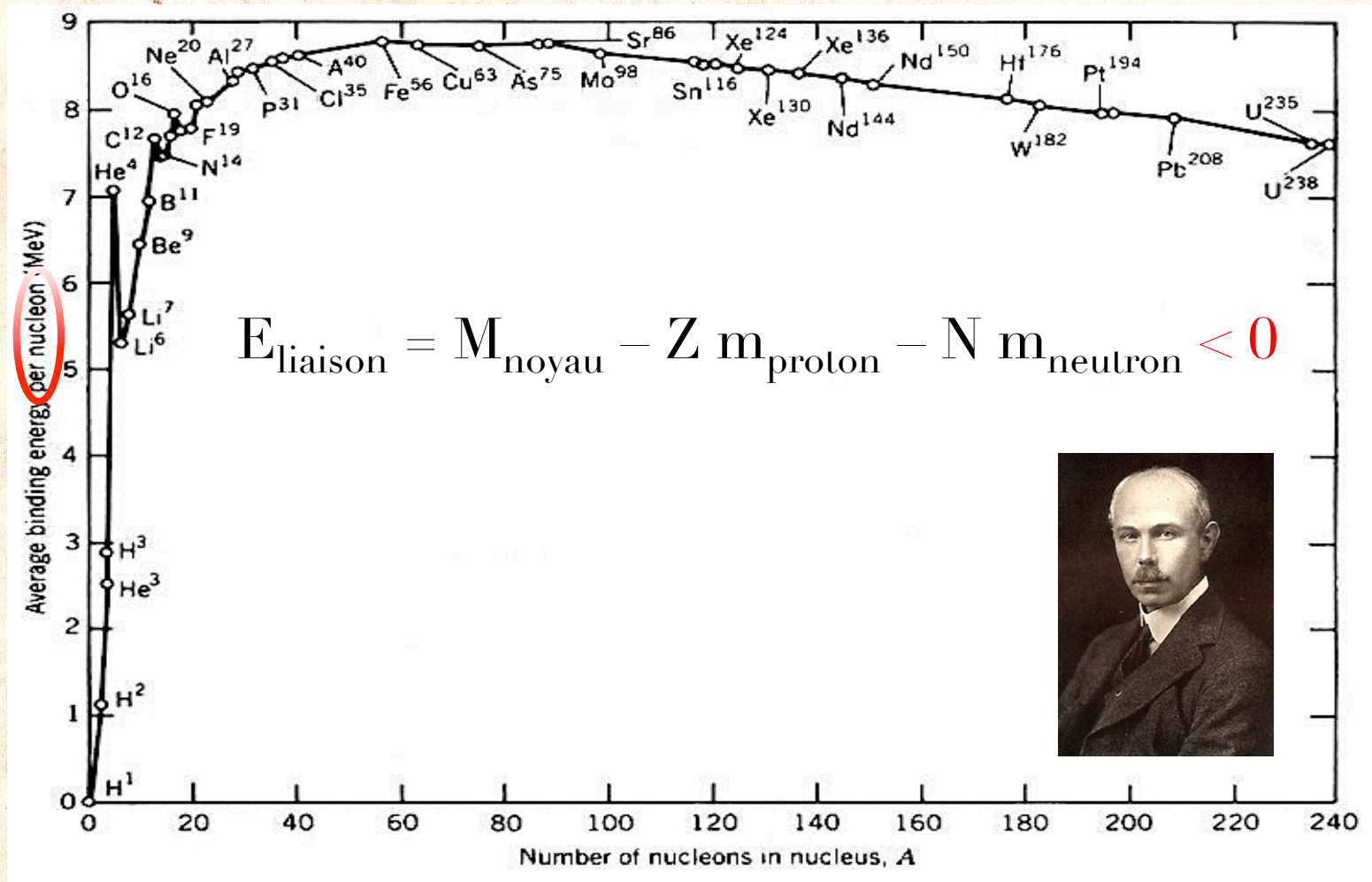
- 😞 nombreuses complications pratiques (interaction dépendant du spin des nucléons et de leur mouvement orbital...)
 - 😊 conduit naturellement à
 1. une densité nucléaire à peu près uniforme dans un noyau, et identique d'un noyau à l'autre
 2. une énergie de liaison à peu près identique d'un noyau à l'autre
- ☞ nombreuses formes de potentiel explorées (jusqu'à aujourd'hui)

Mais il s'est révélé illusoire d'en déduire la structure des noyaux

UNE GOUTTE D'EAU ?

ÉNERGIE DE LIAISON DES NOYAUX

- Francis Aston → masse précise des noyaux → énergie de liaison



GEORGE GAMOW (1904-1968)

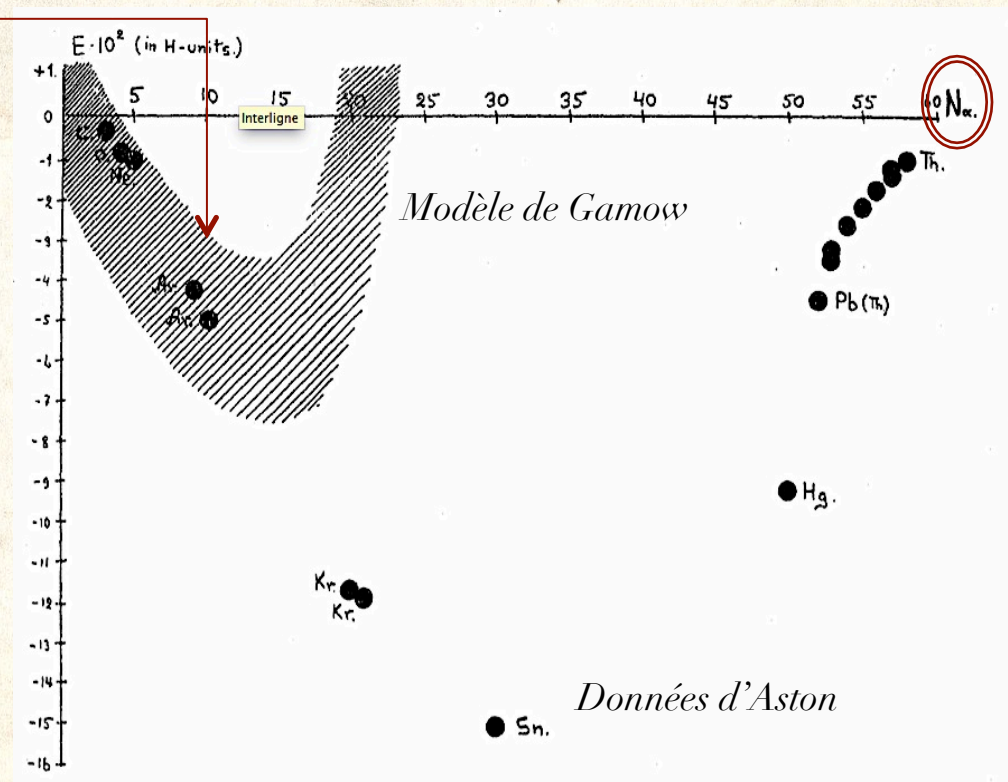
- 1928 : théorie de l'émission α par effet tunnel
- 1929 : modèle du noyau comme collection de particules α associées via un potentiel semi empirique $V(r) = 4e^2/r - a e^{-br}$

- Résultat correct pour $A < 40$ [$N_\alpha = 10$]

- Très médiocre au-delà

- La *forme* est correcte mais ni la *profondeur* ni la *largeur*

- \rightarrow Gamow supposa alors en 1930 que les noyaux plus lourds avaient des «*électrons nucléaires*» additionnels



LE MODÈLE DE GAMOW

- Avec un nombre croissant d'électrons nucléaires l'accord devint «correct»
- Mais
 - l'énergie des électrons était bien trop grande
 - les noyaux $N_\alpha > 30$ étaient prédits instables (données alors incertaines)

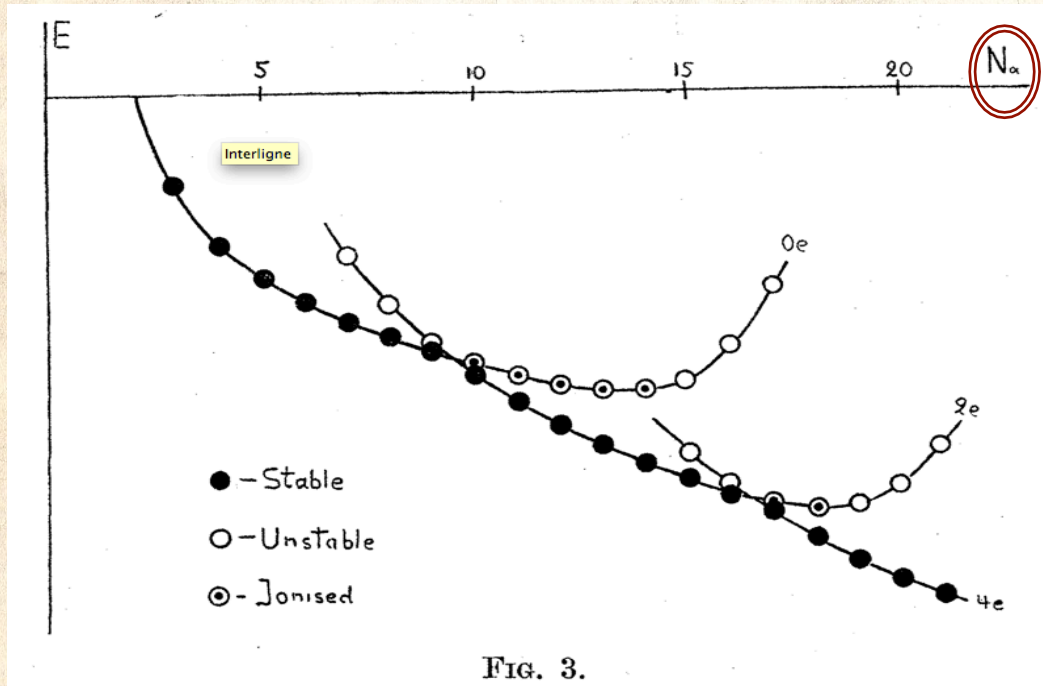


FIG. 3.
Modèle de Gamow (1930)

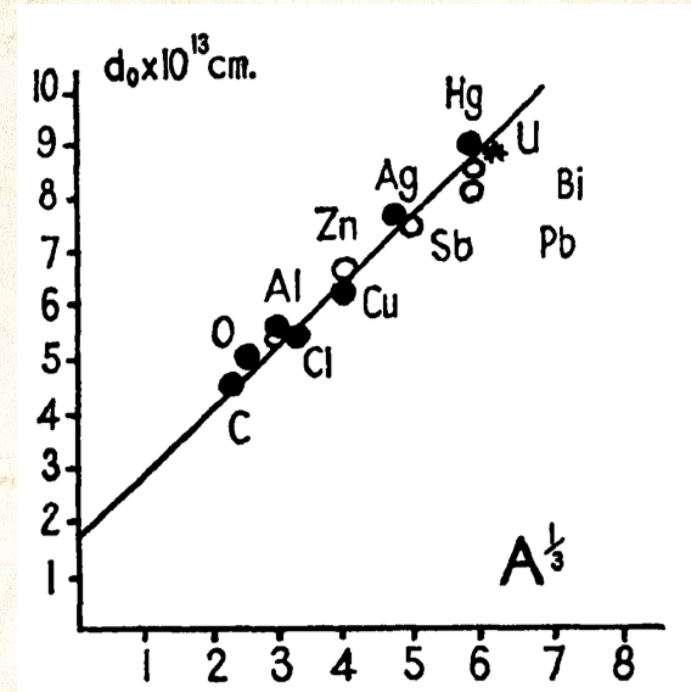


Cockroft et Gamow au Cavendish vers 1930

LA TAILLE DES NOYAUX

- Mesure de la taille des noyaux
 - Noyaux légers : écart à la loi de Rutherford (Coulomb)
 - \Rightarrow hydrogène 0.8×10^{-15} m
 - Noyaux lourds : transmutation α par effet tunnel \rightarrow position et largeur de la barrière
 - \Rightarrow polonium 7×10^{-15} m
 - \Rightarrow uranium 9×10^{-15} m
 - Et les autres ?
- Diffusion de protons (mais répulsion coulombienne à prendre en compte)
- Diffusion de neutrons : mesure de la diminution du flux de neutrons rapides en fonction de l'épaisseur traversée

○ \Rightarrow rayon $\propto A^{1/3}$

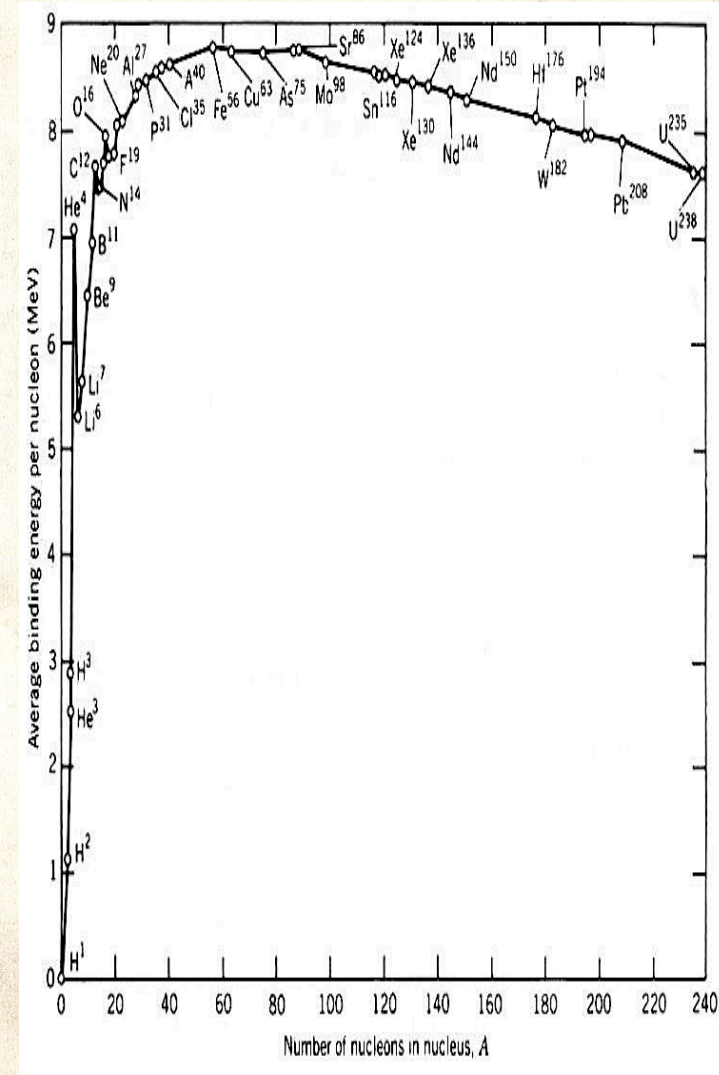


○ $\Rightarrow r = (1,7 + 1,22A^{1/3}) \times 10^{-15}$ m

○ \Rightarrow densité nucléaire constante (densité = A/volume)

$$E_{\text{LIAISON}} = \left| M_{\text{NOYAU}} - Z M_{\text{PROTON}} - N M_{\text{NEUTRON}} \right|$$

- 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 ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$

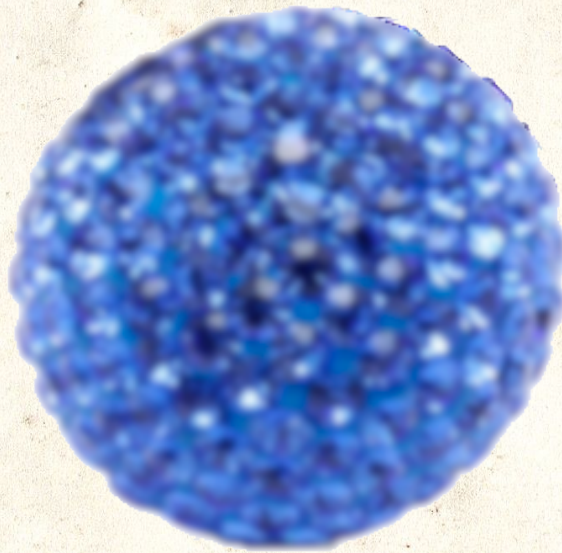


COMME UNE GOUTTE D'EAU ?

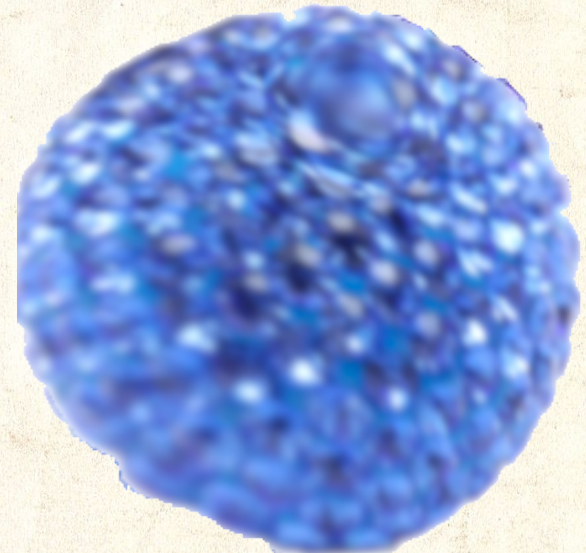
- L'ensemble des nucléons a une cohésion à très courte portée et (l'équivalent d')une tension de surface
- ☞ comportement analogue à celui d'une goutte d'eau ?



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



Noyau « au repos »



Modes de vibration de surface

CARL VON WEIZSÄCKER (1912-2007)



- 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 Weizsäcker, en partant de :
 - noyaux formés de Z protons et $N = A - Z$ neutrons
 - nucléons non-relativistes (masse des nucléons \gg 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 (\leftarrow **principe de Pauli**)
 - répulsion coulombienne $\propto Z^2$

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

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

Terme de surface

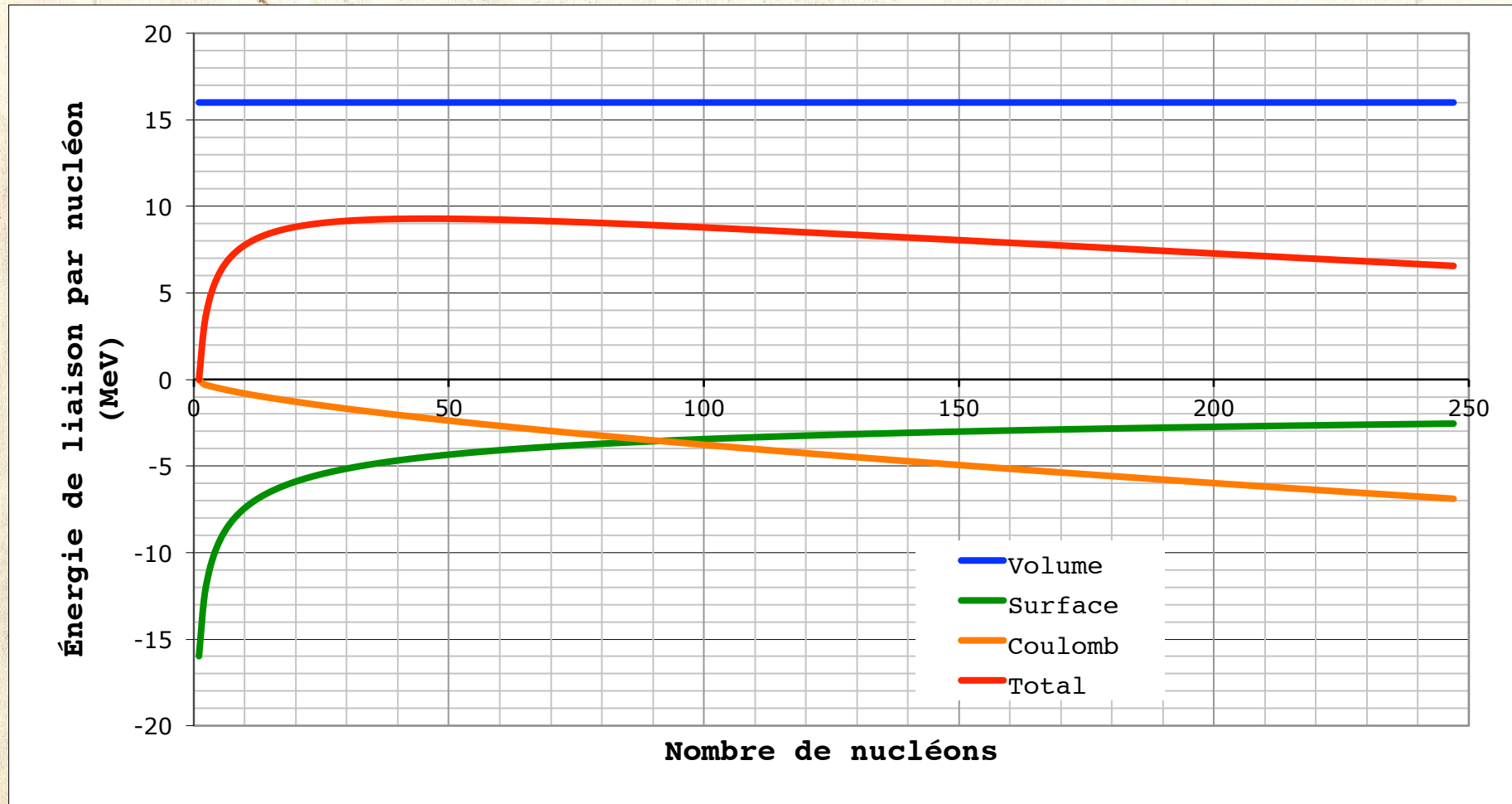
Terme favorisant $N=Z$ (Pauli)

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

HANS BETHE (1906-2005)



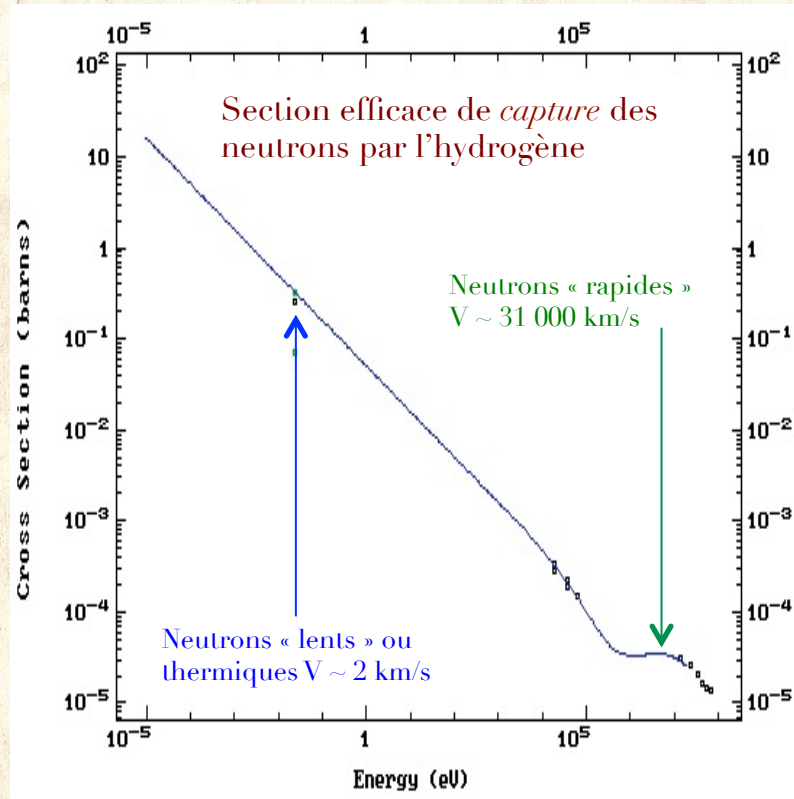
- 1937 : simplification de l'approche de Weizsäcker + améliorations



DIFFUSION ET CAPTURE DES NEUTRONS

DIFFUSION DES NEUTRONS

- Efficacité des neutrons lents



- Explication par Fermi et par Bethe en terme de longueur d'onde de de Broglie $\rightarrow \sigma \propto 1/V$

- Suppose implicitement que le neutron voit tous les noyaux comme des blocs compacts à peu près identiques (à la taille près)

- $\Rightarrow \sigma_{\text{capture}} \ll \sigma_{\text{diffusion}}$ comme pour les collisions électron-atome

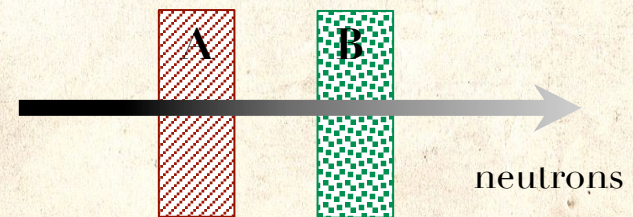
- Contredit par les observations

- $\sigma_{\text{capture}} \gg \sigma_{\text{diffusion}}$

- Cadmium: $\sigma_{\text{capture}} \sim 100 \sigma_{\text{diffusion}}$

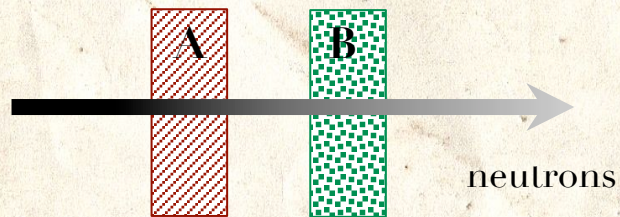
- Capture sélective

- $\sigma_{\text{capture}}(B \neq A) \gg \sigma_{\text{capture}}(B = A)$



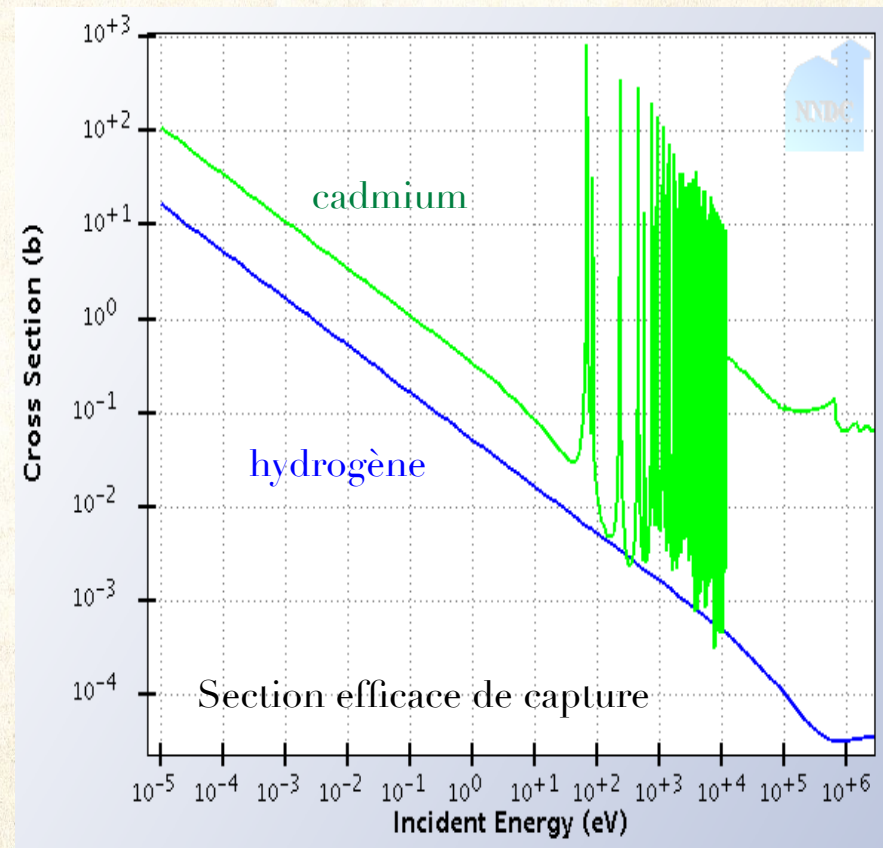
NEUTRONS ET RÉSONANCES

- Interprétation de la capture sélective par Leó Szilárd



- Les neutrons ne sont capturés par les noyaux qu'à certaines énergies, dépendant du noyau
- \Rightarrow si $B=A$, le flux de neutrons arrivant en B est appauvri en neutrons capturables
- $\Rightarrow \sigma_{\text{capture}}(B \neq A) \gg \sigma_{\text{capture}}(B=A)$
- \Rightarrow études fines systématiques

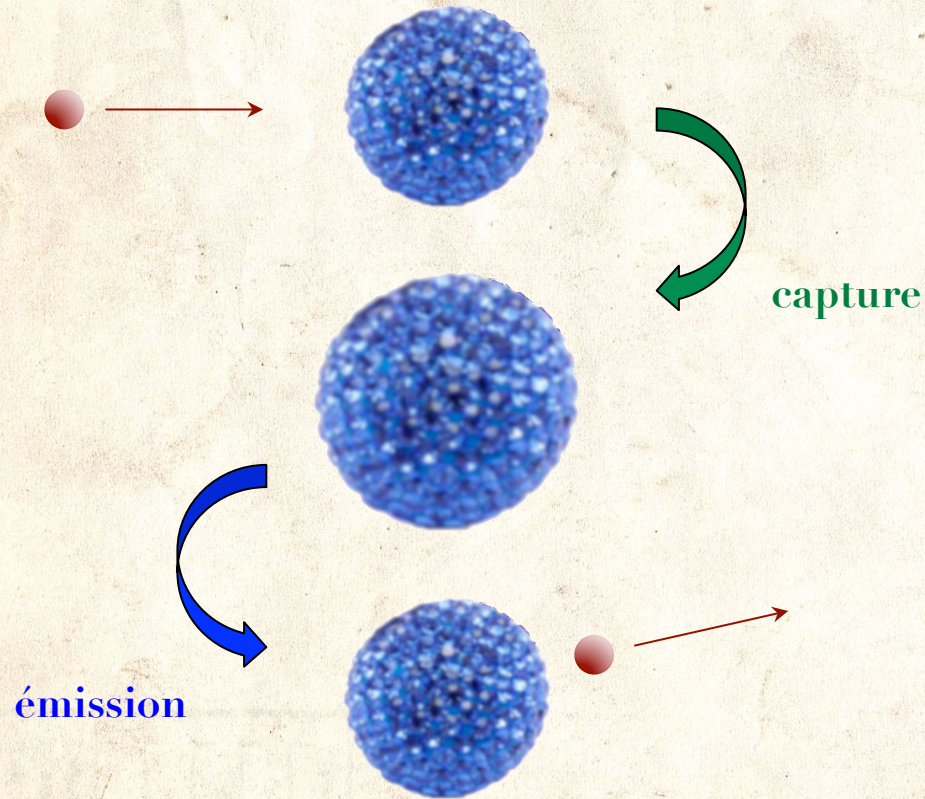
- \Rightarrow les neutrons ne sont capturés qu'à certaines énergies bien précises : les résonances



NIELS BOHR ET FRITZ KALCKAR



- Idée du « noyau composé » : la capture – comme la diffusion – des neutrons se fait en deux étapes bien séparées

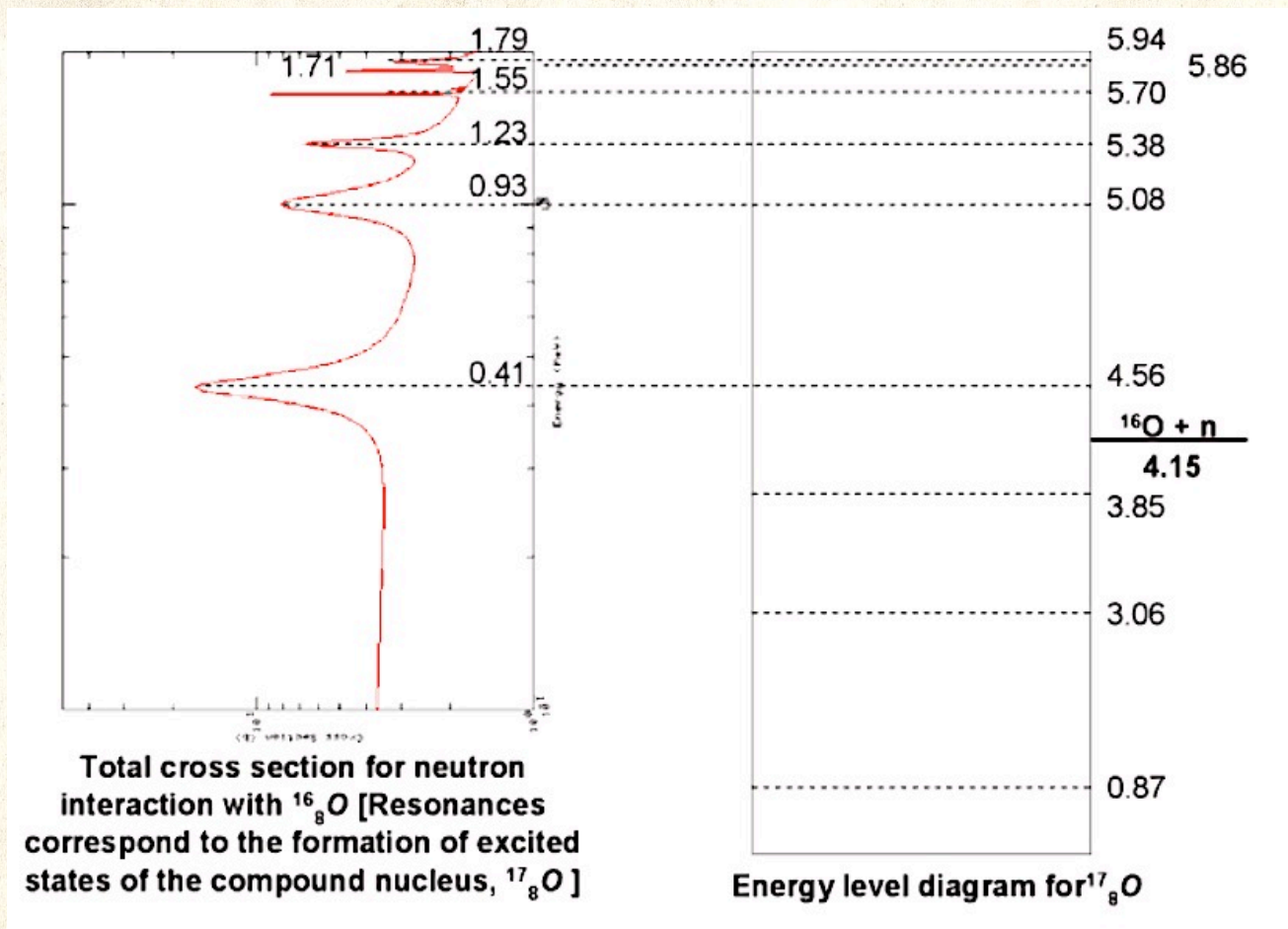
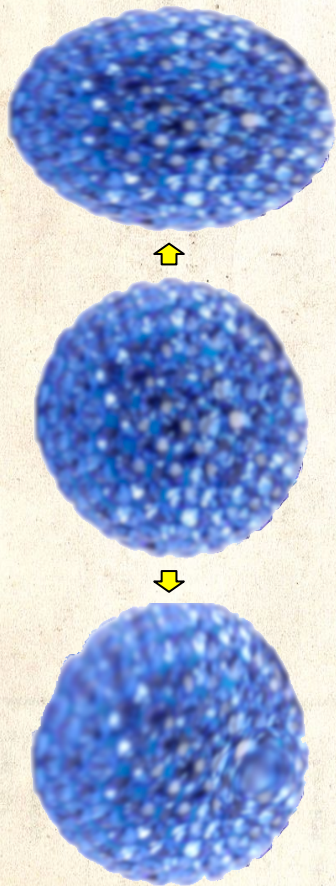


LE NOYAU COMPOSÉ (*compound nucleus*)

- Bohr pense que l'énergie du neutron incident est répartie entre tous les nucléons du noyau cible [*en fait ce n'est pas exact*]
- ⇒ aucun de ceux-ci n'a assez d'énergie pour ressortir (par effet tunnel)
- ⇒ le noyau composé est métastable (durée de vie \gg temps nécessaire à un neutron pour parcourir son diamètre)
- ⇒ le noyau composé a « perdu la mémoire » du processus qui l'a formé
- ⇒ il peut alors ensuite
 - 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

NIVEAUX D'ÉNERGIE DU NOYAU

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



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. F. BACHER, Cornell University

TABLE-OF-CONTENTS

I. Fundamental Properties of Nuclei	VI. More Detailed Theory of Heavy Nuclei
§ 1. CHARGE, WEIGHT..... 83	§ 31. α -PARTICLES AS SUBUNITS OF HEAVIER NUCLEI.....168
§ 2. ENERGY..... 85	§ 32. QUANTUM STATES OF INDIVIDUAL PARTICLES (NEUTRON AND PHOTON "SHELLS")171
§ 3. SIZE..... 88	§ 33. EVIDENCE FOR PERIODICITIES FROM THE ENERGY OF NUCLEI.....174
§ 4. STATISTICS..... 89	§ 34. PERIODICITIES IN THE EXISTING ISOTOPES 176
§ 5. SPIN AND MAGNETIC MOMENT..... 90	§ 35. ENERGY OF O^{16} AND Ca^{40} IN THE HARTREE APPROXIMATION.....179
II. Qualitative Arguments about Nuclear Forces	§ 36. THE COUPLING SCHEME IN NUCLEI.....180
§ 6. THE RATIO OF ATOMIC WEIGHT TO NUCLEAR CHARGE..... 92	§ 37. VAN VLECK'S POTENTIAL.....183
§ 7. SATURATION OF NUCLEAR FORCES..... 93	VII. β-Disintegration and Nuclear Forces
§ 8. THE ELECTROSTATIC REPULSION OF THE PROTONS, STABILITY AGAINST α -DECAY. 96	§ 38. DISPROOF OF THE EXISTENCE OF ELECTRONS IN NUCLEI.....184
§ 9. DEUTERON AND α -PARTICLE: THE FORM OF THE POTENTIAL FUNCTION..... 99	§ 39. THE NEUTRINO.....186
§ 10. FORCES BETWEEN LIKE PARTICLES, ODD AND EVEN ISOTOPES.....100	§ 40. THEORY OF β -DISINTEGRATION.....189
III. Theory of the Deuteron	§ 41. LIFETIME vs. MAXIMUM ENERGY IN β -DISINTEGRATION.....193
§ 11. THE WAVE EQUATIONS OF HEISENBERG, WIGNER AND MAJORANA.....105	§ 42. THE INVERSE β -PROCESSES: CAPTURE OF ORBITAL ELECTRONS BY NUCLEI, DISINTEGRATION OF NUCLEI BY ELECTRONS AND NEUTRINOS.....196
§ 12. GROUND STATE OF THE DEUTERON.....108	§ 43. STABILITY OF ISOBARS AND FORBIDDEN β -PROCESSES.....198
§ 13. EXCITED STATES OF THE DEUTERON.....112	§ 44. NUCLEAR FORCES AND β -DISINTEGRATION.201
§ 14. SCATTERING OF NEUTRONS BY PROTONS. I: CROSS SECTION.....114	§ 45. THE MAGNETIC MOMENTS OF PROTON AND NEUTRON.....205
§ 15. SCATTERING OF NEUTRONS BY PROTONS. II: ANGULAR DISTRIBUTION.....119	VIII. Nuclear Moments
§ 16. PHOTOELECTRIC DISINTEGRATION OF THE DEUTERON.....122	§ 46. THE INTERACTION OF THE NUCLEAR MOMENT WITH THE ELECTRONS.....207
§ 17. CAPTURE OF NEUTRONS BY PROTONS.....126	§ 47. METHODS USED TO DETERMINE THE NUCLEAR ANGULAR MOMENTUM AND THE HYPERFINE STRUCTURE SEPARATIONS...211
§ 18. SCATTERING OF PROTONS BY PROTONS.....130	§ 48. VALUES OF NUCLEAR SPINS AND MAGNETIC MOMENTS.....215
IV. Theory of H^2, He^3 and He^4	§ 49. ISOTOPE SHIFT IN ATOMIC SPECTRA.....223
§ 19. THOMAS' PROOF OF THE FINITE RANGE OF NUCLEAR FORCES.....134	§ 50. QUADRUPOLE MOMENTS.....225
§ 20. CALCULATION OF THE ENERGY OF H^2 , He^3 AND He^4 FROM THE VARIATION PRINCIPLE137	
§ 21. FEENBERG'S "EQUIVALENT TWO-BODY PROBLEM".....143	
§ 22. COMPARISON OF H^2 AND He^3146	
§ 23. EXCITED STATES OF THE α -PARTICLE.....147	
V. Statistical Theory of Nuclei	
§ 24. THE HARTREE METHOD.....149	
§ 25. THE STATISTICAL MODEL. QUALITATIVE CONCLUSIONS.....153	

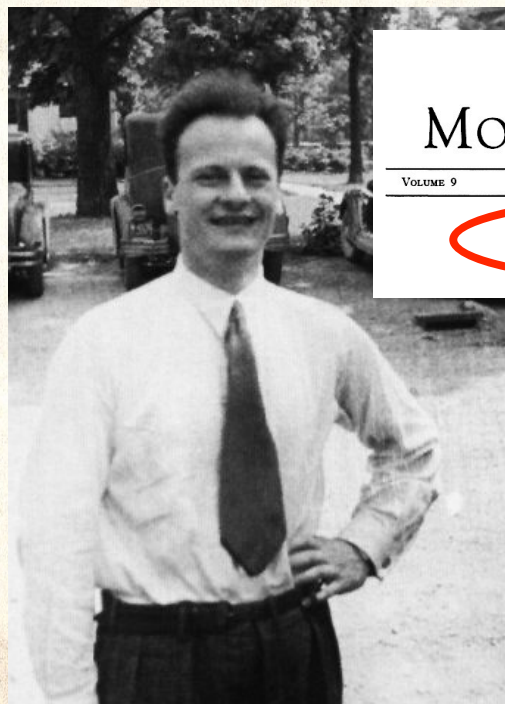
○ Bethe (1937)

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
 Cornell University, Ithaca, New York

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

LORD RUTHERFORD OF NELSON (1871-1937)

- **Prix Nobel de chimie 1908**
- Parmi ses élèves et collaborateurs
 - Frederick Soddy Nobel 1921 chimie
 - Francis Aston Nobel 1922 chimie
 - Niels Bohr Nobel 1922 physique
 - Charles Wilson Nobel 1927 physique
 - James Chadwick Nobel 1935 physique
 - Otto Hahn Nobel 1944 chimie
 - Edward Appleton Nobel 1947 physique
 - Patrick Blackett Nobel 1948 physique
 - Cecil Powell Nobel 1950 physique
 - John Cockroft Nobel 1951 physique
 - Ernest Walton Nobel 1951 physique
 - Piotr Kapitza Nobel 1978 physique



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!