

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**)

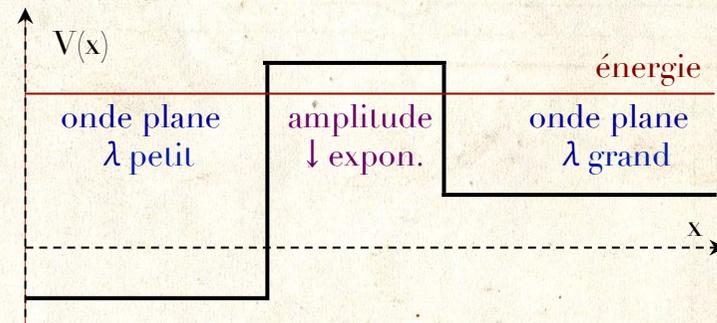
3. Équation donnant $|\psi\rangle$

○ **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**)

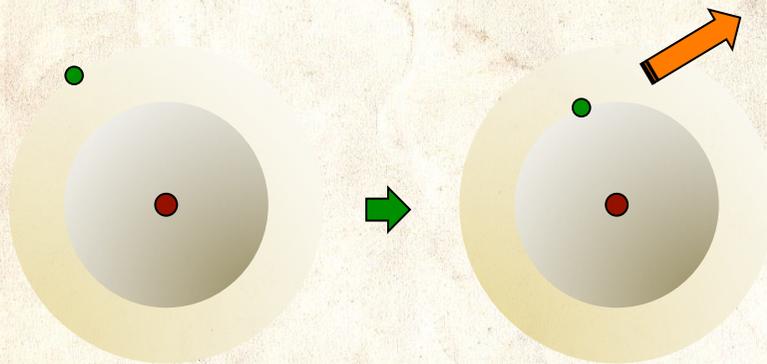
$$|\psi_{12}\rangle = + |\psi_{21}\rangle$$

○ 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



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

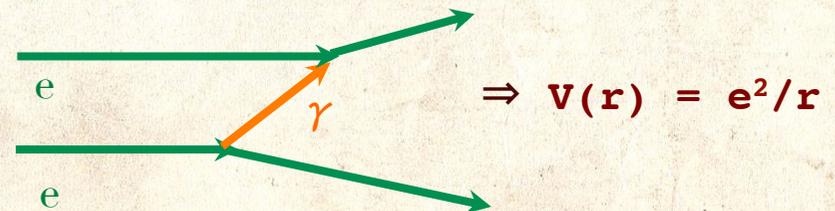
$$A|n\rangle = |n-1\rangle$$

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

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

- \Rightarrow **électrodynamique quantique**

- \Rightarrow interaction électromagnétique entre particules chargées



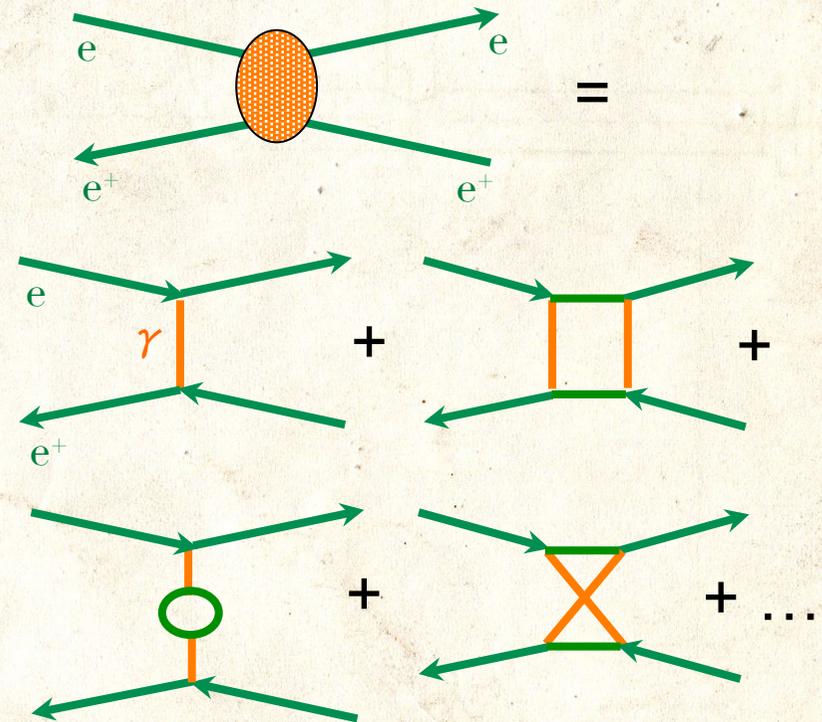
THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS

- 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

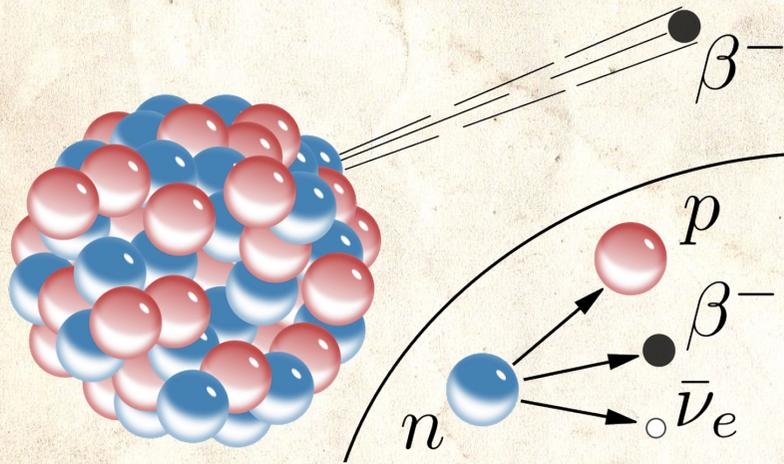
- **Électrodynamique quantique**



- \Rightarrow nombreux problèmes techniques (infinis et renormalisation)

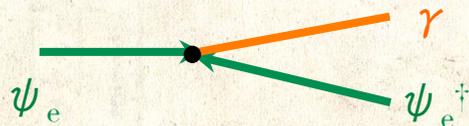
THÉORIE DE FERMÍ DE LA TRANSMUTATION β

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



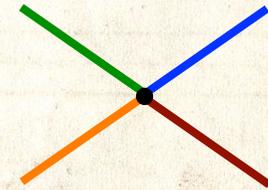
- Fermi s'est inspiré de l'électrodynamique quantique

- 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

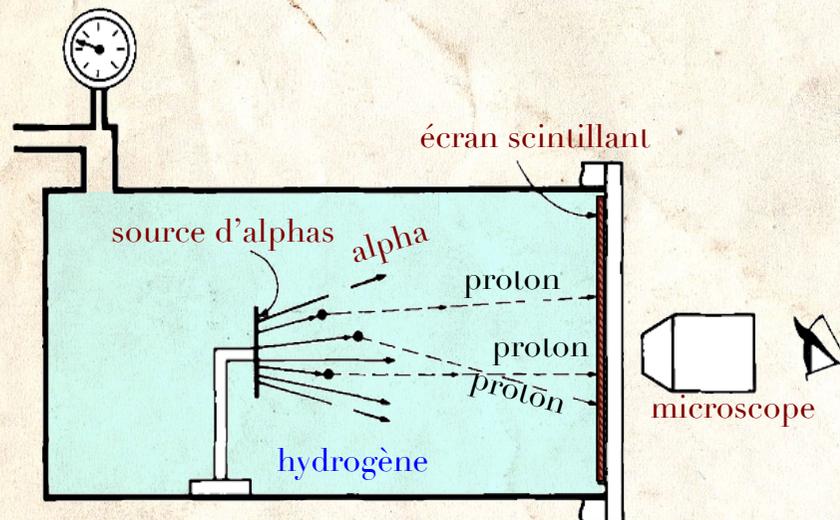
- Prévoit aussi les réactions $p \rightarrow n e^+ \nu$, $p e^- \rightarrow n \nu$, $p n \rightarrow e^+ \nu$

- 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

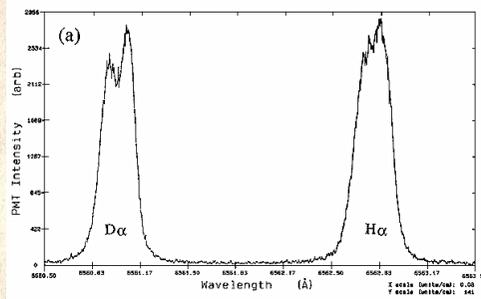
- Proton \Leftrightarrow répulsion électrostatique minimale
- \Rightarrow les α s'approchent plus près que pour les autres noyaux
- Déviation \Rightarrow
 - charges non ponctuelles
 - ou interaction non électrostatique

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

DEUTÉRIUM

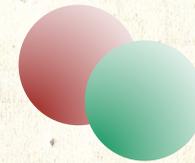
- Découvert en 1931 par Harold Urey par distillation répétée d'hydrogène liquide

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

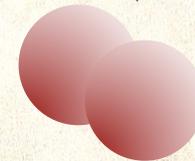
- Le deutéron est le seul état lié de deux nucléons



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



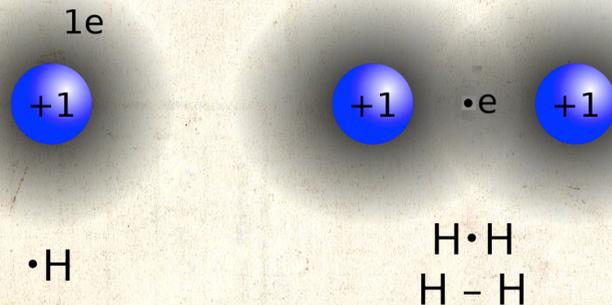
- Ni d'état lié de 2 neutrons



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

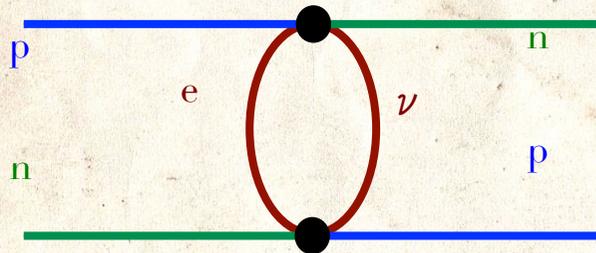
INTERACTION NEUTRON-PROTON

- 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 FERMI 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

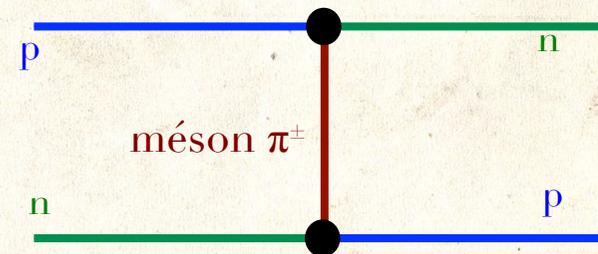
- Pas observée car
 1. instable : durée de vie calculée $0,2 \mu s$ (en fait $0,02 \mu s$)
 2. énergie (alors) insuffisante pour la produire \rightarrow **rayons cosmiques**

COLLISIONS PROTON-PROTON

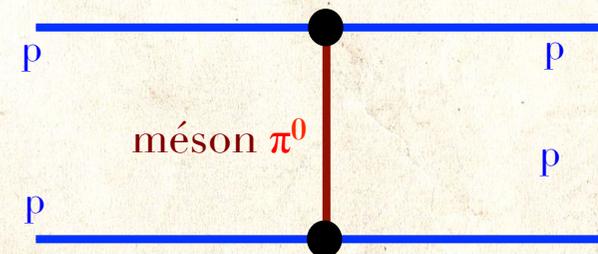
- Peu de progrès depuis 1920, faute de sources intenses de protons de haute énergie
- 1935 : protons de 600 keV du cyclotron de Berkeley et chambre de Wilson (Milton White) → possible anomalie à courte distance ($<5 \times 10^{-15}$ m)
- 1936 : protons de 1,2 MeV du van de Graaff de Carnegie et compteurs 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



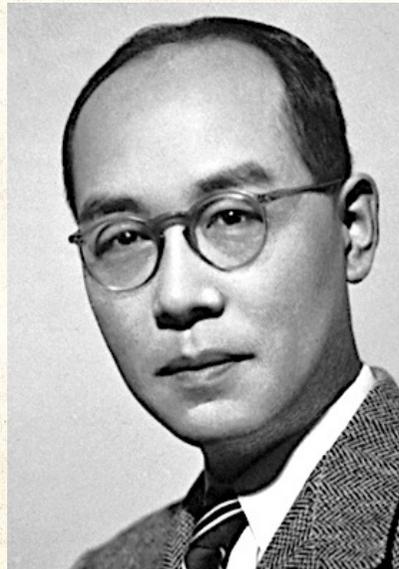
- → force neutron-neutron et force proton-proton identiques (hors électromagnétisme)



- → **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

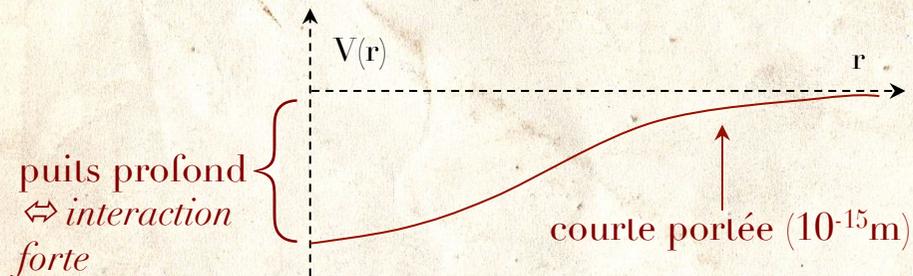


Hideki Yukawa (1907-1981)

- 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

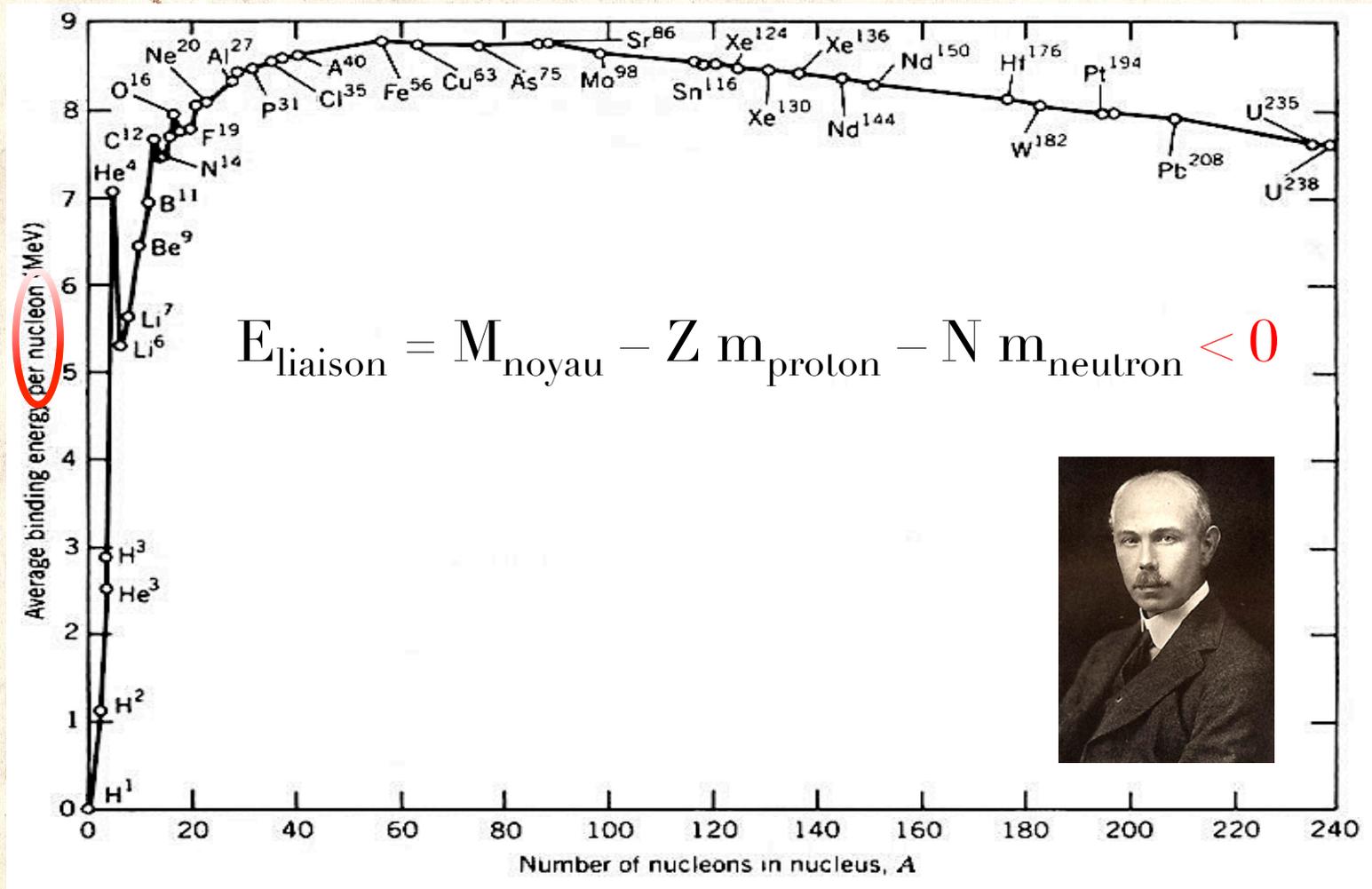
- 😞 nombreuses complications pratiques (interaction dépendant du spin des nucléons et de leur mouvement orbital...)
 - 😊 conduit naturellement à
 1. une densité nucléaire à peu près uniforme dans un noyau, et identique d'un noyau à l'autre
 2. une énergie de liaison à peu près identique d'un noyau à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

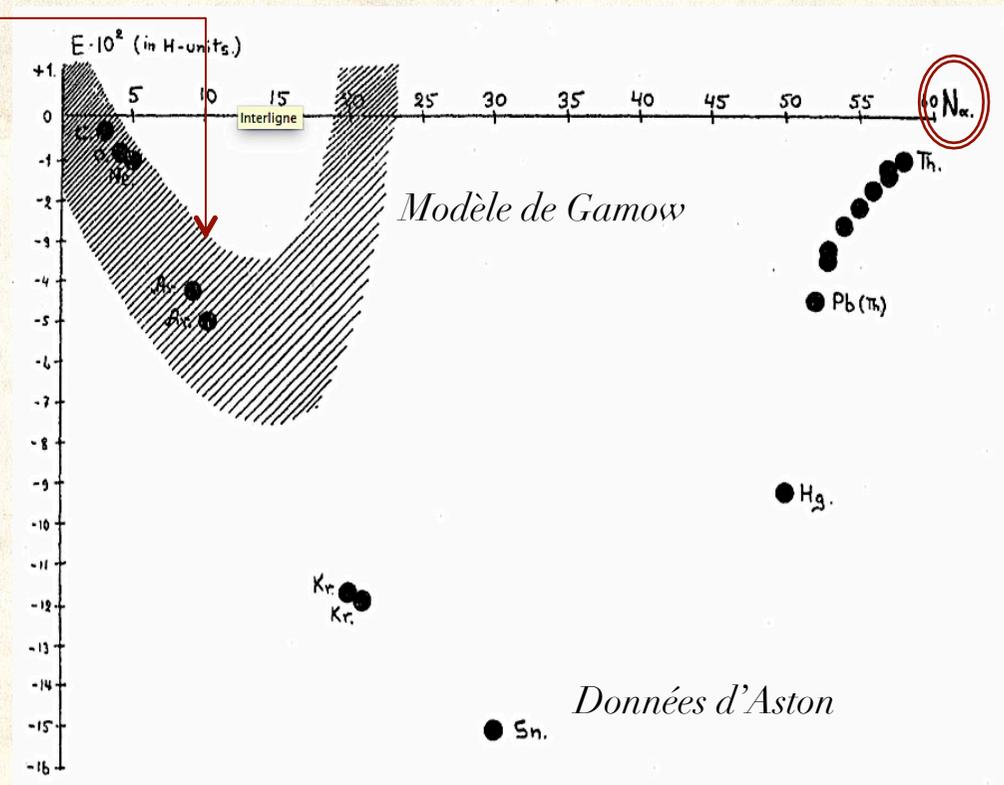


GEORGE GAMOW (1904-1968)

- 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)

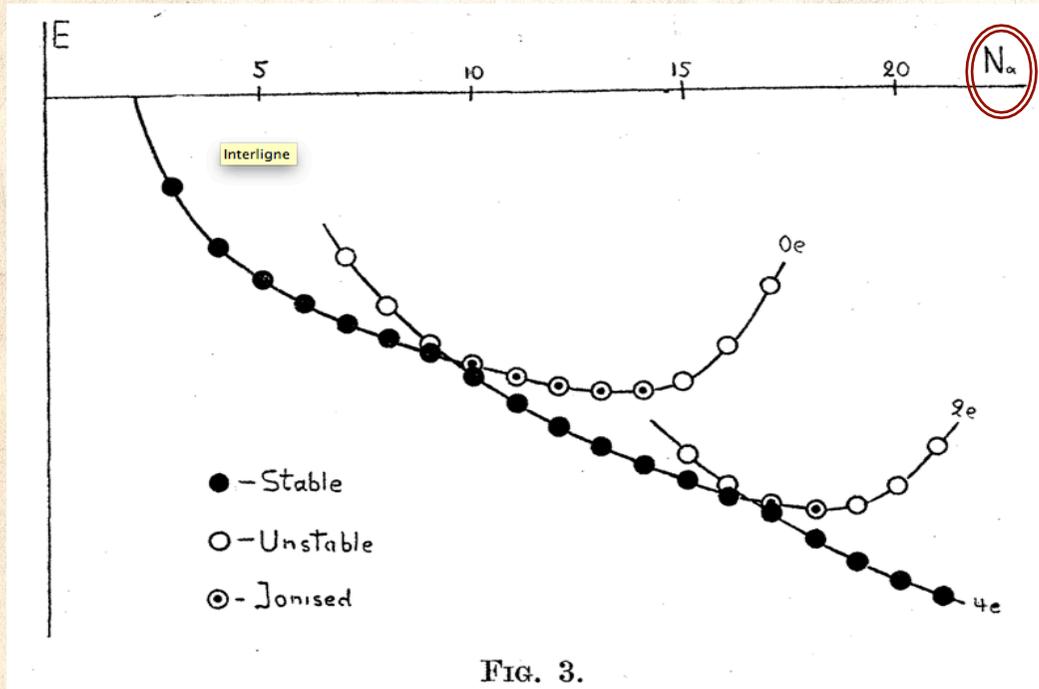


FIG. 3.
Modèle de Gamow (1930)

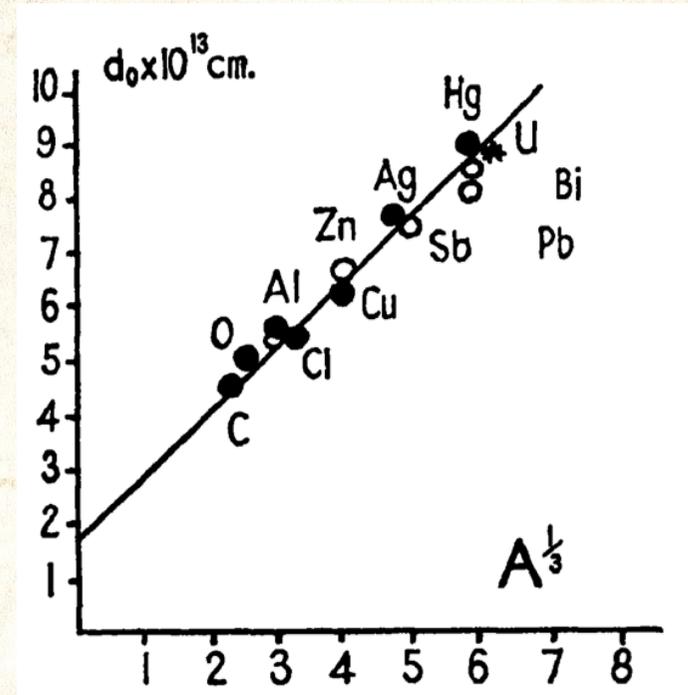


Cockroft et Gamow au Cavendish vers 1930

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 $\propto A^{1/3}$

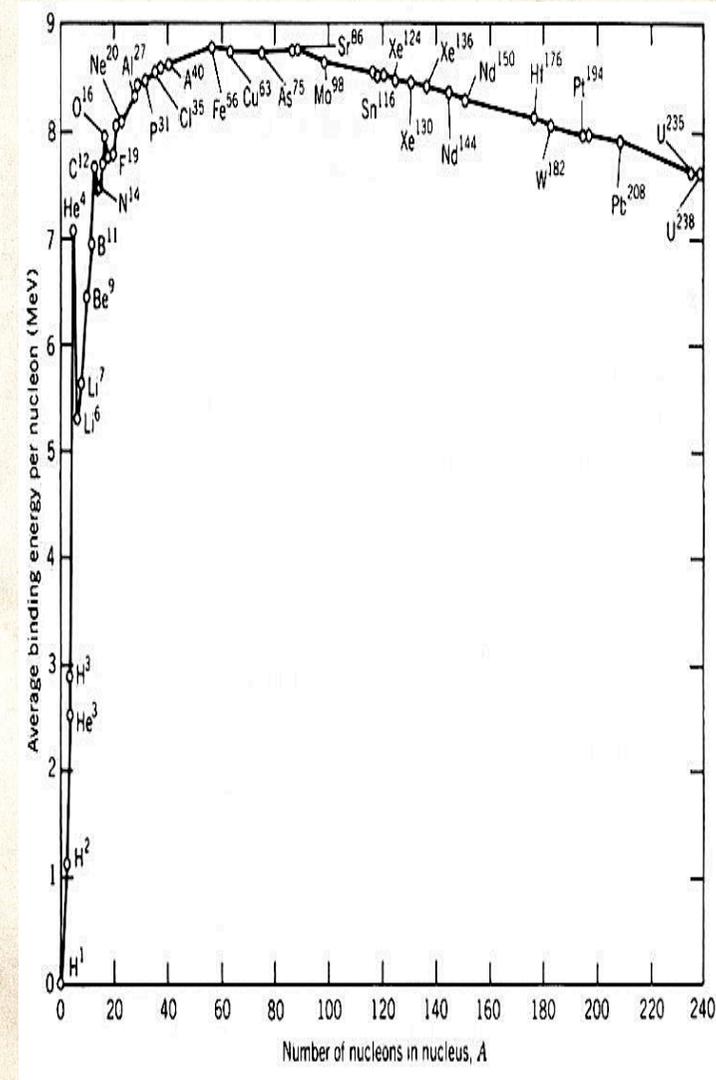


○ $\Rightarrow r = (1,7 + 1,22A^{1/3}) \times 10^{-15}$ m

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

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

- 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 ?

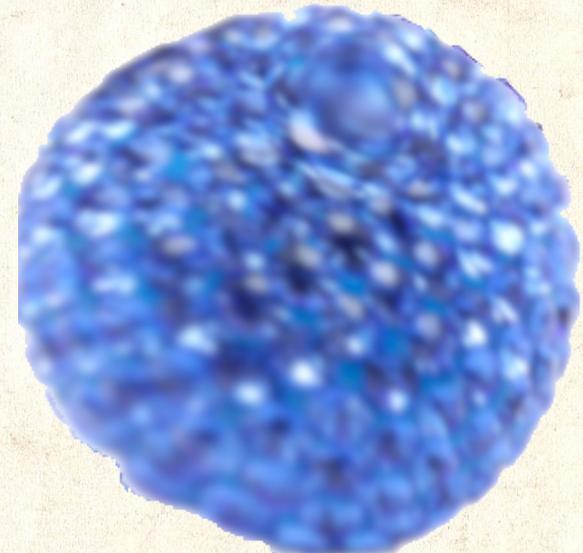
- L'ensemble des nucléons a une cohésion à très courte portée et (l'équivalent d')une tension de surface
- ☞ comportement analogue à celui d'une goutte d'eau ?



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

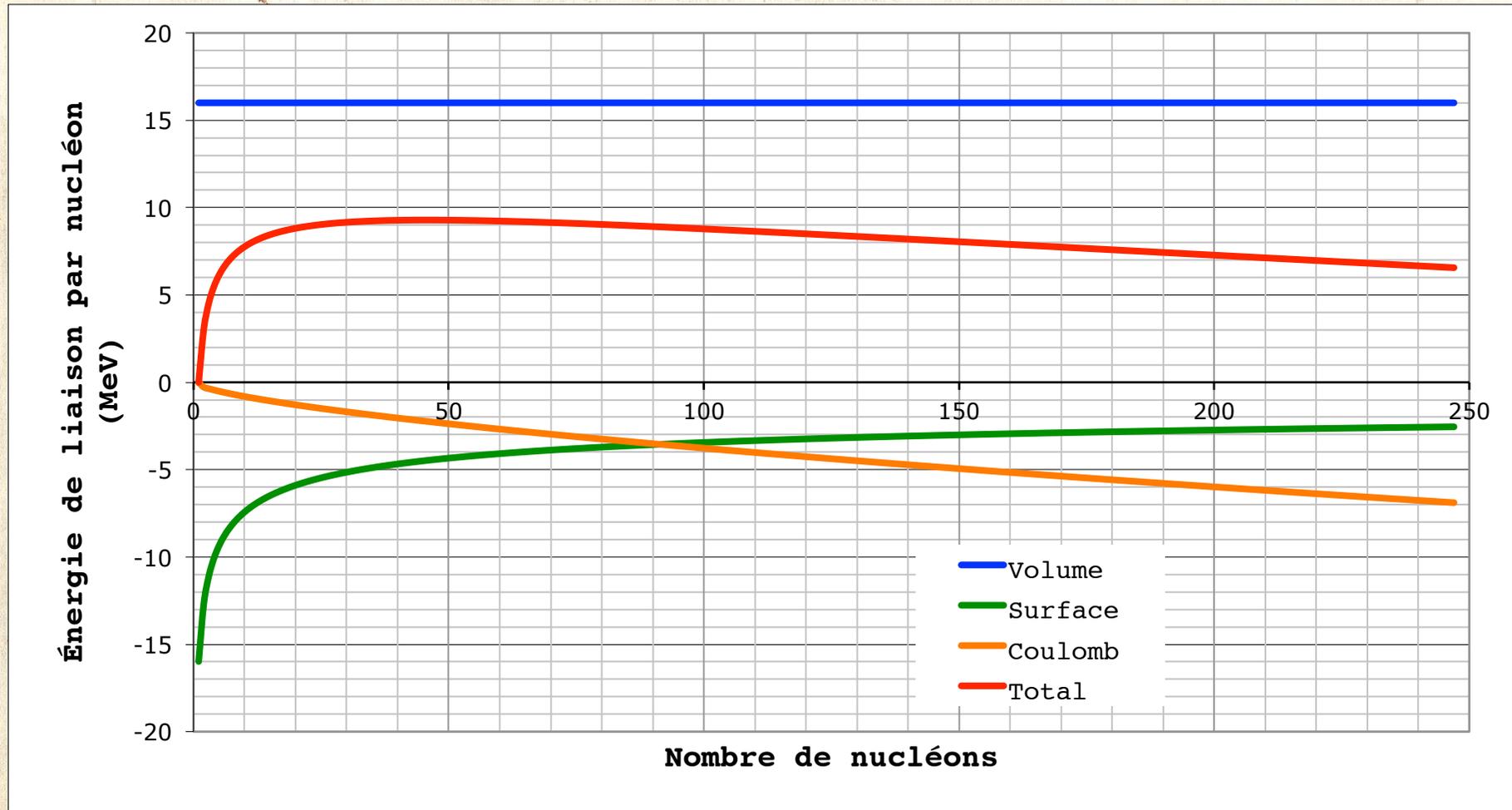
Terme favorisant $N=Z$ (Pauli)

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

HANS BETHE (1906-2005)



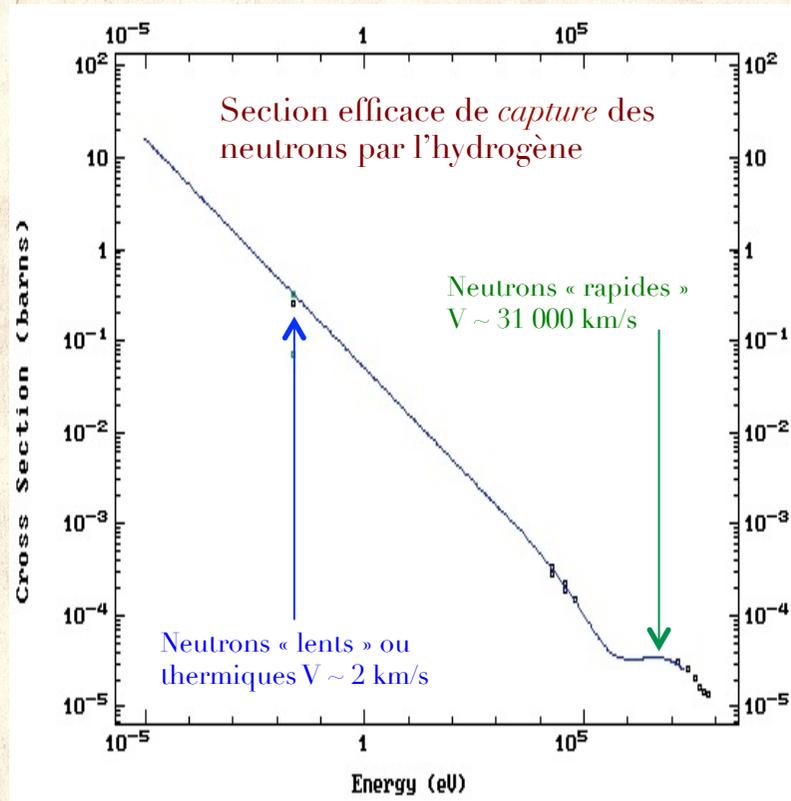
- 1937 : simplification de l'approche de Weizsäcker + améliorations



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

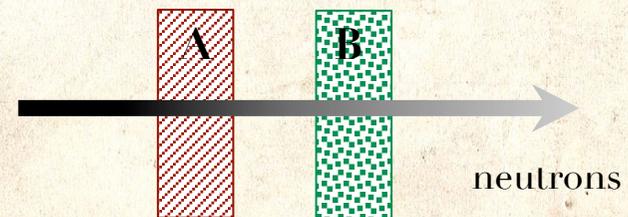
- Contredit par les observations

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

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

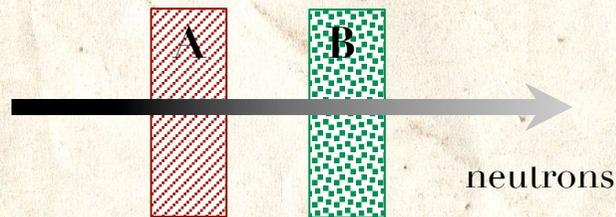
- Capture sélective

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



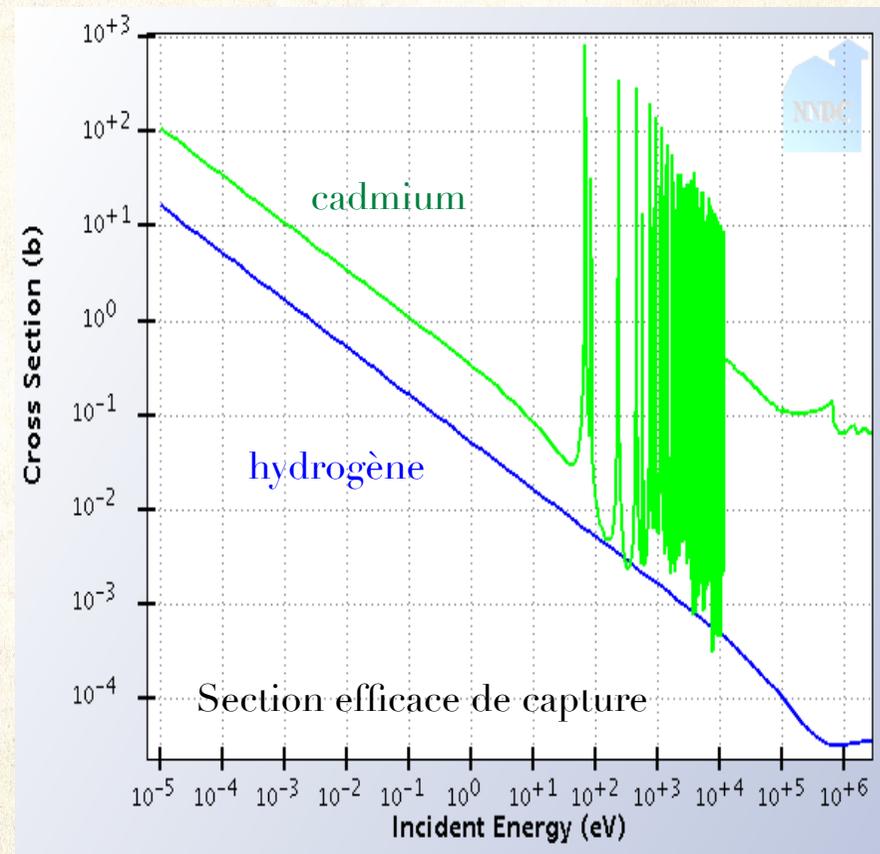
NEUTRONS ET RÉSONANCES

- 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

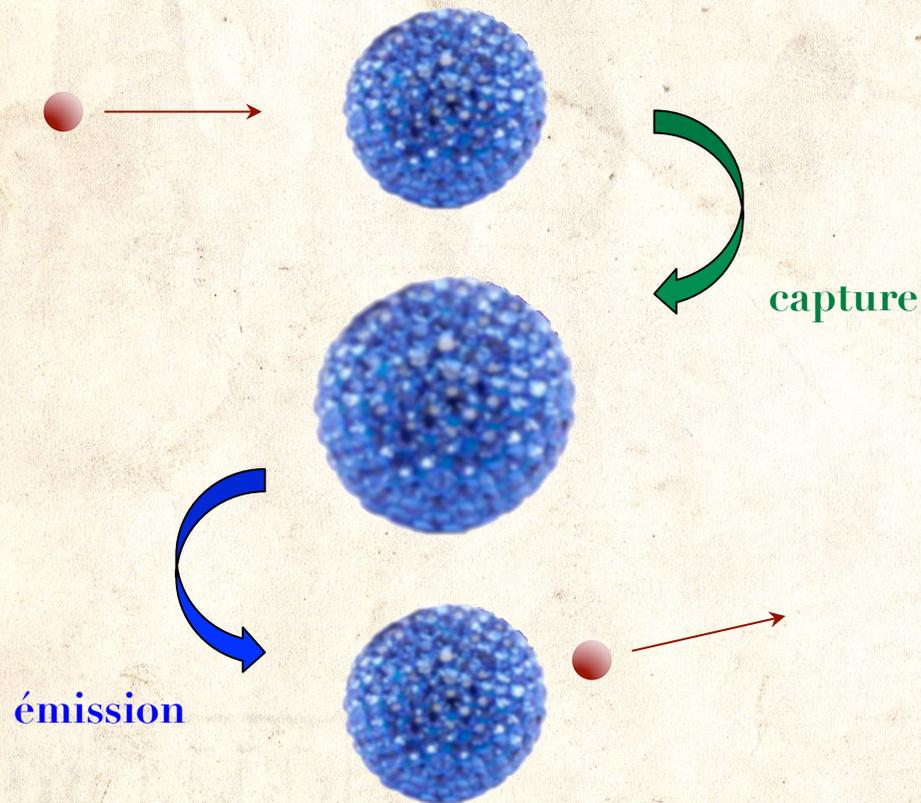
- \Rightarrow les neutrons ne sont capturés qu'à certaines énergies bien précises : les résonances



NIELS BOHR ET FRITZ KALCKAR



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

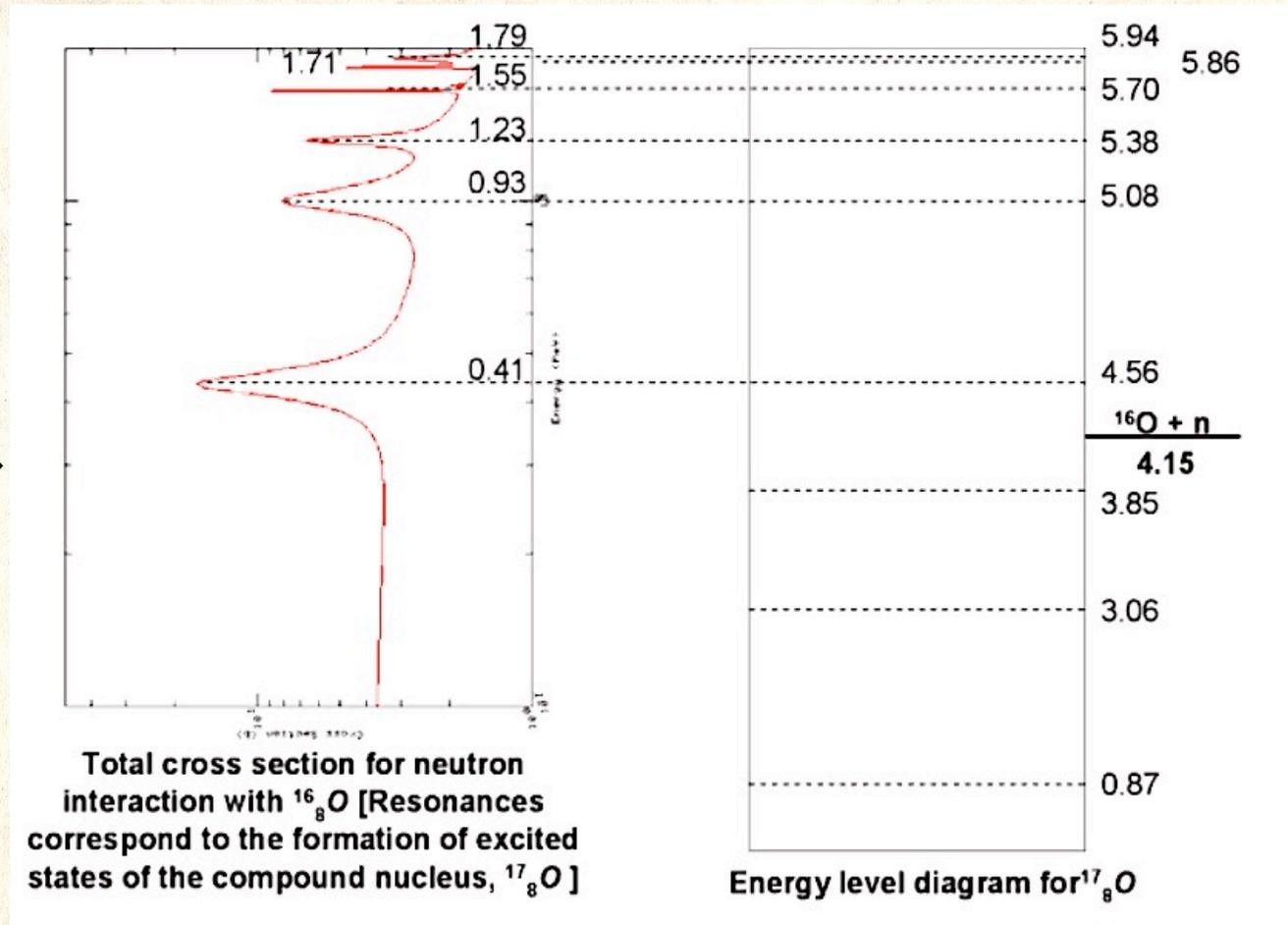
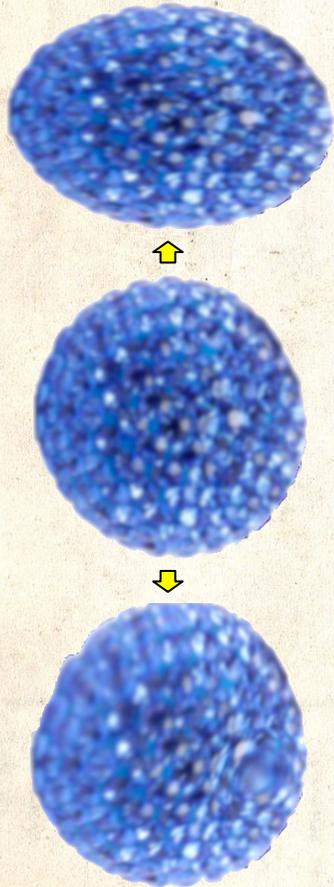


LE NOYAU COMPOSÉ (*compound nucleus*)

- 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
	§ 36. THE COUPLING SCHEME IN NUCLEI.....180
	§ 37. VAN VLECK'S POTENTIAL.....183
II. Qualitative Arguments about Nuclear Forces	VII. β-Disintegration and Nuclear Forces
§ 6. THE RATIO OF ATOMIC WEIGHT TO NUCLEAR CHARGE..... 92	§ 38. DISPROOF OF THE EXISTENCE OF ELECTRONS IN NUCLEI.....184
§ 7. SATURATION OF NUCLEAR FORCES..... 93	§ 39. THE NEUTRINO.....186
§ 8. THE ELECTROSTATIC REPUSSION OF THE PROTONS, STABILITY AGAINST α -DECAY. 96	§ 40. THEORY OF β -DISINTEGRATION.....189
§ 9. DEUTERON AND α -PARTICLE: THE FORM OF THE POTENTIAL FUNCTION..... 99	§ 41. LIFETIME vs. MAXIMUM ENERGY IN β -DISINTEGRATION.....193
§ 10. FORCES BETWEEN LIKE PARTICLES, ODD AND EVEN ISOTOPES.....100	§ 42. THE INVERSE β -PROCESSES: CAPTURE OF ORBITAL ELECTRONS BY NUCLEI, DISINTEGRATION OF NUCLEI BY ELECTRONS AND NEUTRINOS.....196
III. Theory of the Deuteron	§ 43. STABILITY OF ISOBARS AND FORBIDDEN β -PROCESSES.....198
§ 11. THE WAVE EQUATIONS OF HEISENBERG, WIGNER AND MAJORANA.....105	§ 44. NUCLEAR FORCES AND β -DISINTEGRATION. 201
§ 12. GROUND STATE OF THE DEUTERON.....108	§ 45. THE MAGNETIC MOMENTS OF PROTON AND NEUTRON.....205
§ 13. EXCITED STATES OF THE DEUTERON.....112	
§ 14. SCATTERING OF NEUTRONS BY PROTONS. I: CROSS SECTION.....114	VIII. Nuclear Moments
§ 15. SCATTERING OF NEUTRONS BY PROTONS. II: ANGULAR DISTRIBUTION.....119	§ 46. THE INTERACTION OF THE NUCLEAR MOMENT WITH THE ELECTRONS.....207
§ 16. PHOTOELECTRIC DISINTEGRATION OF THE DEUTERON.....122	§ 47. METHODS USED TO DETERMINE THE NUCLEAR ANGULAR MOMENTUM AND THE HYPERFINE STRUCTURE SEPARATIONS...211
§ 17. CAPTURE OF NEUTRONS BY PROTONS.....126	§ 48. VALUES OF NUCLEAR SPINS AND MAGNETIC MOMENTS.....215
§ 18. SCATTERING OF PROTONS BY PROTONS.....130	§ 49. ISOTOPE SHIFT IN ATOMIC SPECTRA.....223
IV. Theory of H^2, He^3 and He^4	§ 50. QUADRUPOLE MOMENTS.....225
§ 19. THOMAS' PROOF OF THE FINITE RANGE OF NUCLEAR FORCES.....134	
§ 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)

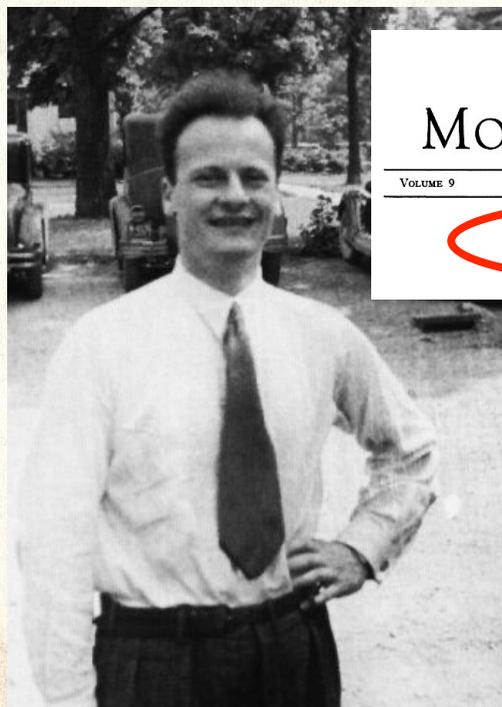
REVIEWS OF MODERN PHYSICS

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*

Livingston, H. A. & Bethe, H. A.
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!