

La découverte du neutron

Alain Bouquet



ASTROPARTICULE ET COSMOLOGIE

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

La découverte du neutron

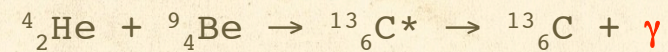
James Chadwick découvre le neutron en février 1932



La découverte du neutron: pièce en 3 actes

Octobre 1930

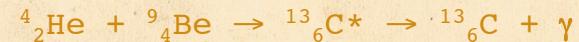
- **Walther Bothe** bombarde du béryllium avec des rayons α de 5 MeV
- Il découvre un rayonnement neutre très pénétrant, qu'il interprète comme des γ
- Il pense en effet observer la réaction



La découverte du neutron: pièce en 3 actes

Octobre 1930

- **Walther Bothe** bombarde du béryllium avec des rayons α de 5 MeV
- Il découvre un rayonnement neutre très pénétrant, qu'il interprète comme des γ
- Il pense en effet observer la réaction



Janvier 1932

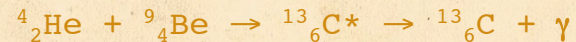
- **Irène Curie et Frédéric Joliot** montrent que le rayonnement de Bothe éjecte des protons d'un matériau hydrogéné comme la paraffine
- Effet Compton ? \Rightarrow énergie du $\gamma \sim 50$ MeV (ce qui viole la conservation de l'énergie)



La découverte du neutron: pièce en 3 actes

Octobre 1930

- **Walther Bothe** bombarde du béryllium avec des rayons α de 5 MeV
- Il découvre un rayonnement neutre très pénétrant, qu'il interprète comme des γ
- Il pense en effet observer la réaction



Janvier 1932

- **Irène Curie et Frédéric Joliot** montrent que le rayonnement de Bothe éjecte des protons d'un matériau hydrogéné comme la paraffine
- Effet Compton ? \Rightarrow énergie du $\gamma \sim 50$ MeV (ce qui viole la conservation de l'énergie)

Février 1932

- **James Chadwick** montre qu'en réalité ce rayonnement est formé de particules neutres de masse voisine de celle du proton.
- La réaction est en réalité





LE CONTEXTE

Alain Bouquet - La découverte du neutron



Ernest Rutherford (1871-1937)



Au Cavendish Lab de Cambridge (1895-1898)

- Ionisation des gaz sous l'effet des rayonnements
- Radioactivités alpha et bêta

À l'université MacGill de Montréal(1898-1907)

- Découverte du radon
- Découverte de la décroissance radioactive et de la demi-vie, avec Soddy puis Hahn
- Découverte des transmutations « atomiques »

À l'université de Manchester (1907-1919)

- Identification des alphas avec des ions hélium
- Découverte du noyau, avec Geiger et Marsden
- Collisions nucléaires et découverte du proton comme constituant nucléaire, avec Chadwick

Au Cavendish Lab de Cambridge (1919-1937)

- Théorie des noyaux
- Dirige les recherches de Chadwick, Blackett, Cockroft, Walton, Kapitza...

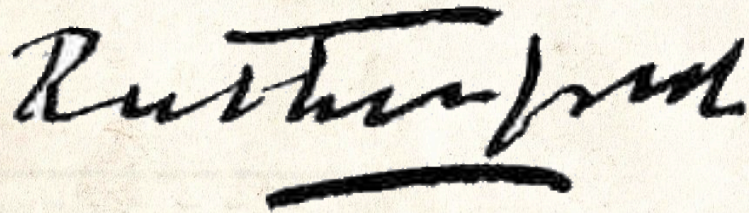
« All science is either physics or stamp collecting »

Ernest Rutherford

Prix Nobel *de chimie* 1908

Parmi ses élèves et collaborateurs

•Frederick Soddy	<i>Nobel 1921 chimie</i>
•Francis Aston	<i>Nobel 1922 chimie</i>
•Niels Bohr	<i>Nobel 1922 physique</i>
•Charles Wilson	<i>Nobel 1927 physique</i>
•James Chadwick	<i>Nobel 1935 physique</i>
•Otto Hahn	<i>Nobel 1944 chimie</i>
•Edward Appleton	<i>Nobel 1947 physique</i>
•Patrick Blackett	<i>Nobel 1948 physique</i>
•Cecil Powell	<i>Nobel 1950 physique</i>
•John Cockroft	<i>Nobel 1951 physique</i>
•Ernest Walton	<i>Nobel 1951 physique</i>
•Piotr Kapitza	<i>Nobel 1978 physique</i>



Bas-relief à l'entrée de l'ancien
Cavendish Laboratory de Cambridge
en l'honneur de Lord Rutherford



Techniques expérimentales: sources et cibles

○ Sources

○ Alphas

- Radium 226 [4.9 MeV]
- Radon 222 [5.6 MeV]
- **Polonium** 210 [RaF → 5.4 MeV]

○ Électrons β

○ Rayons X

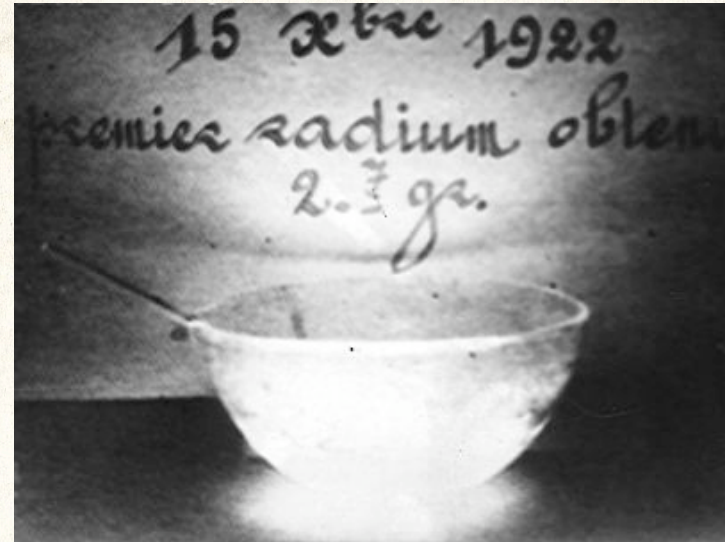
○ Rayons γ [Th C'' = Tl 208, γ de 2.6 MeV]

○ Inconvénients

- intensité faible (le plus souvent quelques mCi = 3.7×10^7 Bq)
- énergie limitée à quelques MeV

○ Cibles et absorbants

- Feuilles métalliques très minces (les alphas sont facilement absorbés) d'aluminium, ou d'or [~ 100 nm]
- Gaz raréfiés, ou sous pression : hydrogène, azote, fluor, argon, etc.
- Écrans de plomb ou de cuivre (absorbant), ou de paraffine (cible)



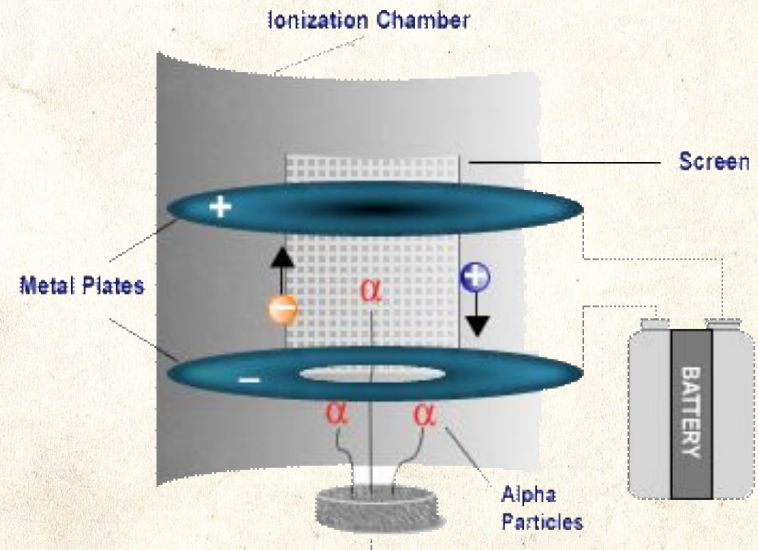
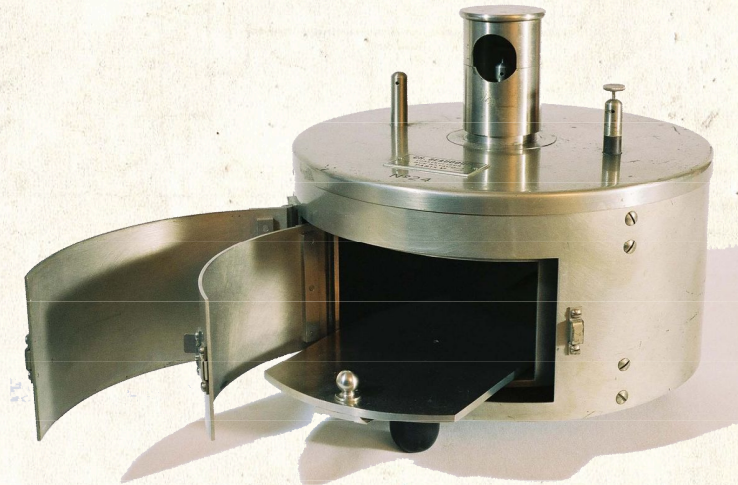
Techniques expérimentales: détection

Chambre d'ionisation

- Le passage d'une particule chargée (ou d'un rayonnement X ou γ) ionise le gaz
- les ions sont attirés par l'une des électrodes, les électrons par l'autre
- Ceci provoque un courant, mesuré par un électromètre
- Le courant est plus intense pour un α ou un proton que pour un β ou un γ

Perfectionnements

- Amplification du courant
- → compteurs d'impulsion (relais électro-mécaniques)
- → oscillographe
- → enregistrement (photographique)



Techniques expérimentales: détection

Scintillateur au sulfure de zinc

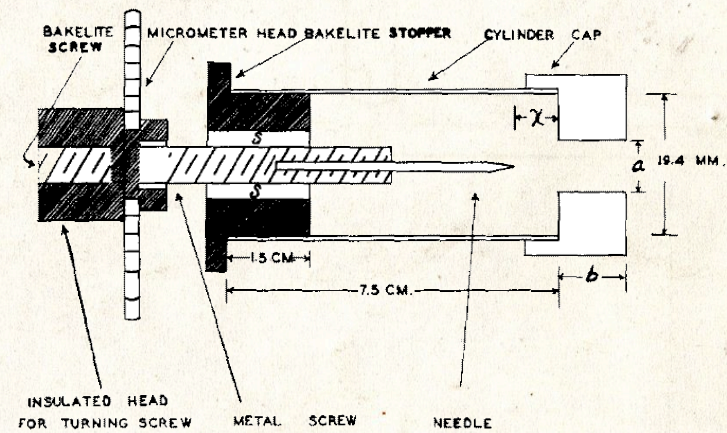
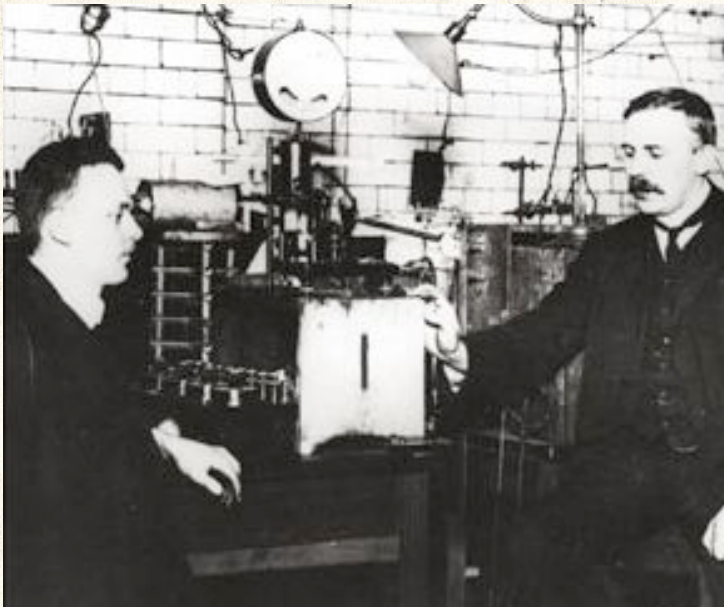


- Donne un bref éclair lumineux au passage d'un alpha
- Utilisation fastidieuse
 - dans l'obscurité, après 20 mn d'adaptation
 - à l'œil d'un microscope
 - difficile de ne pas perdre le compte des éclats dès que le flux est intense
- ⇒ **Forte motivation pour développer des compteurs, plus sensibles**

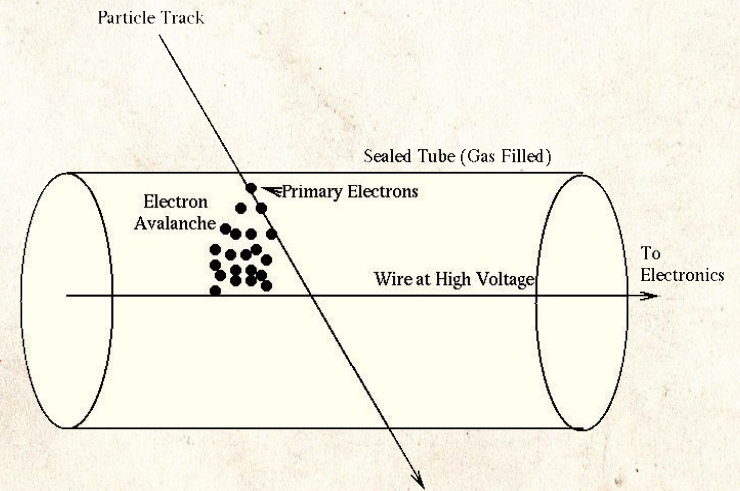
Techniques expérimentales: détection

Compteurs de Geiger & Rutherford

- 1908 Compteur d' α
- 1912 Compteur de β
- 1913 Compteur à pointe, très sensible aux α et aux γ



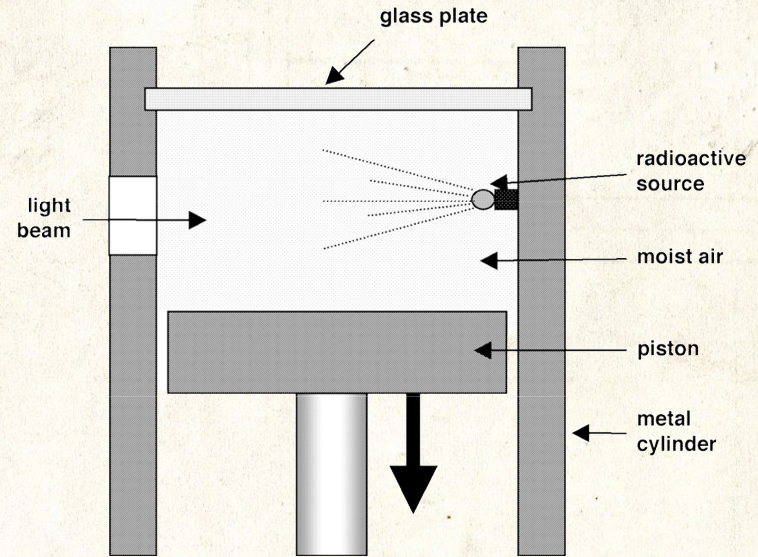
- 1928 Compteur Geiger-Müller à basse pression, plutôt utilisé pour β et γ



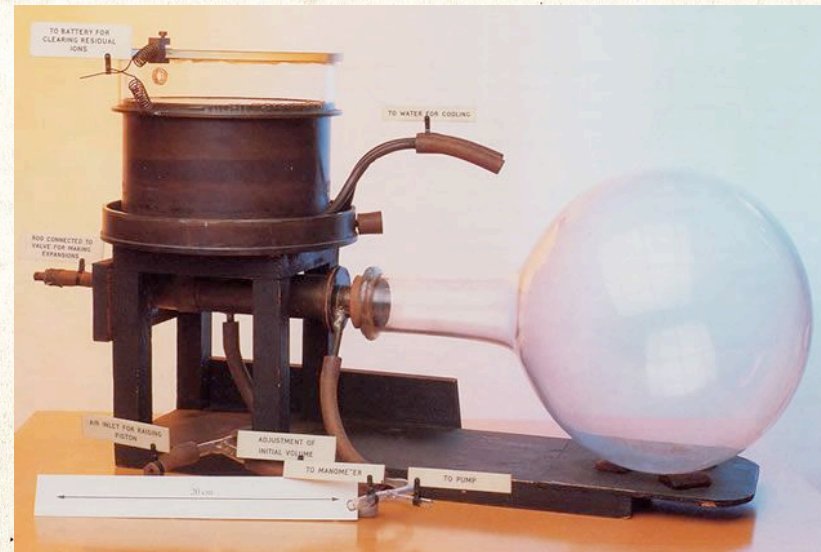
Techniques expérimentales: détecteurs

Chambre de Wilson

- Garde une trace photographique des événements (en stéréo)
- Permet d'identifier les particules (α , β ou proton) et d'estimer leur énergie
- Mais peu adaptée aux événements
 - trop rares
 - trop fréquents



C.T.R. Wilson (1869-1959)



Deux grands laboratoires

○ L'Institut du Radium de Paris

- Directrice: Marie Curie
- Une dizaine de chercheurs et de thésards, et autant de visiteurs
- Une vingtaine de techniciens, laborantins, souffleurs de verre...
- Thème de recherche principal: la radiochimie (et les applications médicales au Pavillon Pasteur)



○ Le Cavendish Laboratory de Cambridge

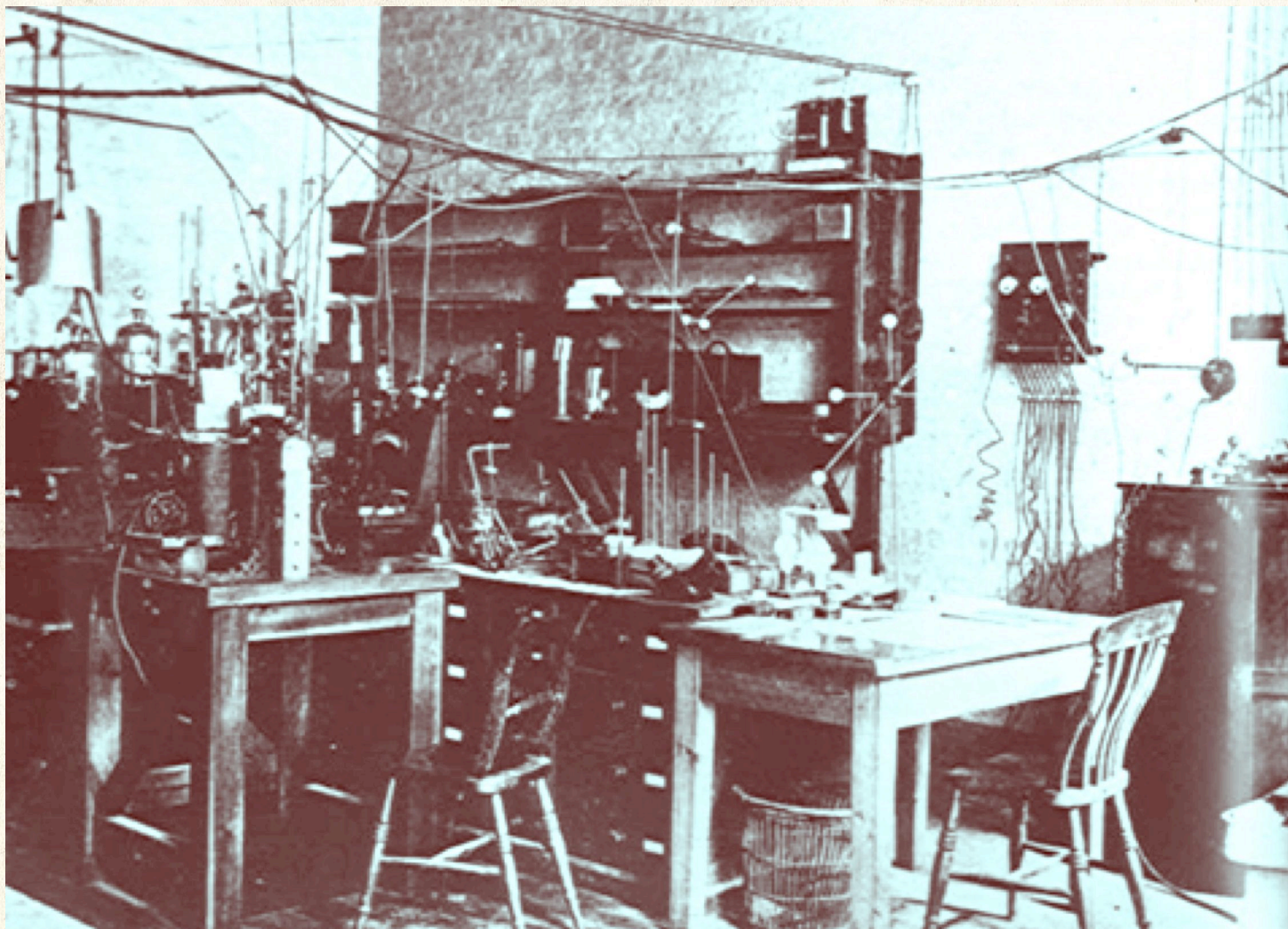
- Directeur: Ernest Rutherford
- Une quarantaine de chercheurs, thésards et visiteurs
- Thème de recherche principal: la physique du noyau atomique



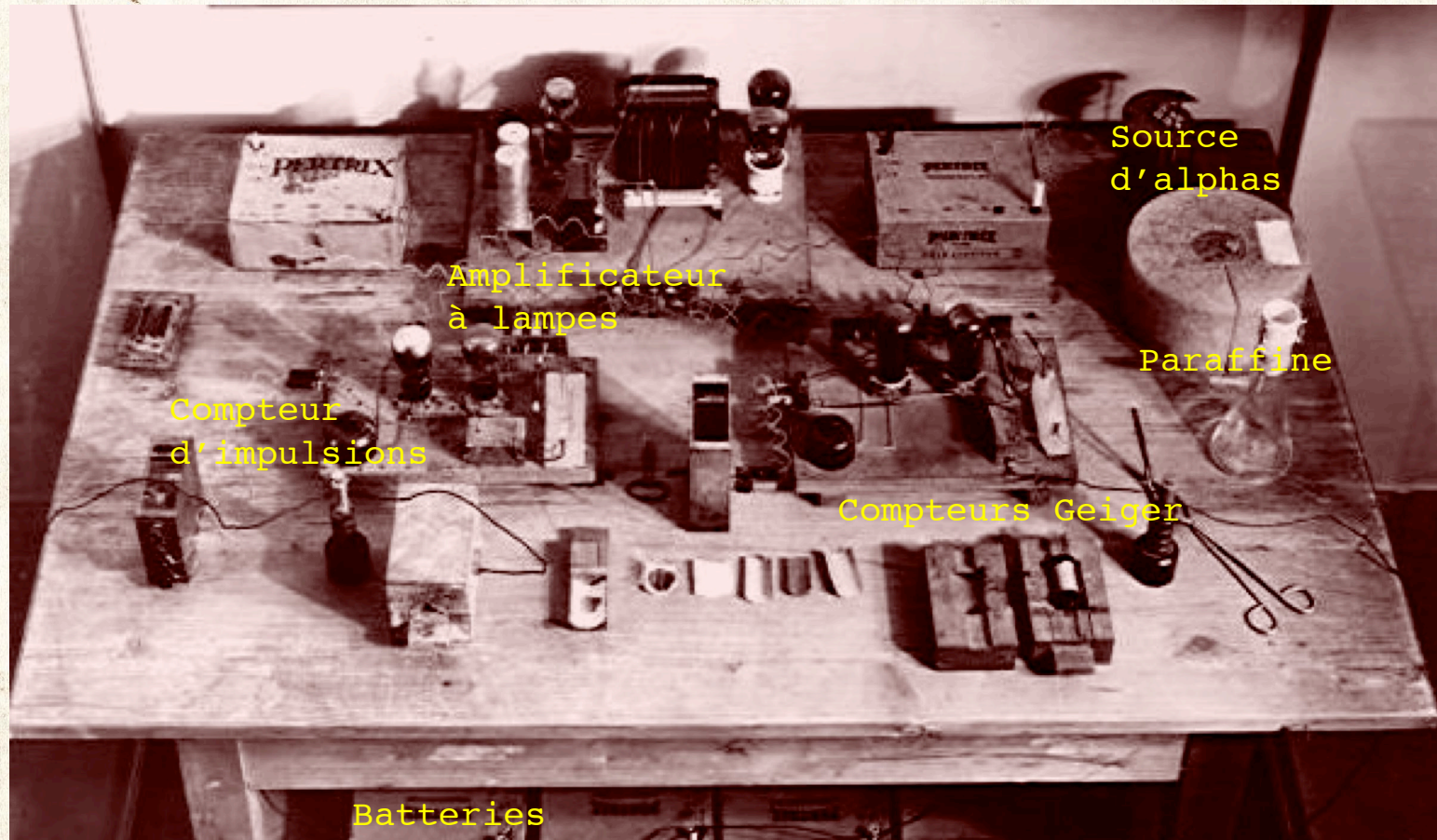
Institut du Radium, Paris



Au Cavendish Lab, vers 1925

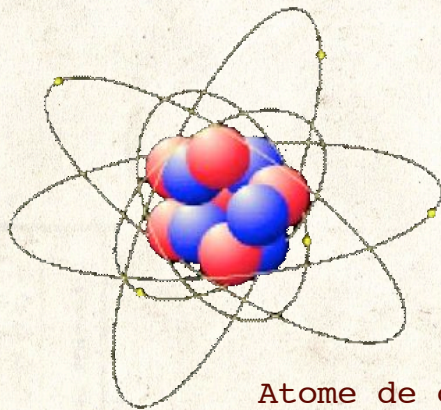


La table d'Otto Hahn à Berlin (en 1938)



Physique nucléaire élémentaire

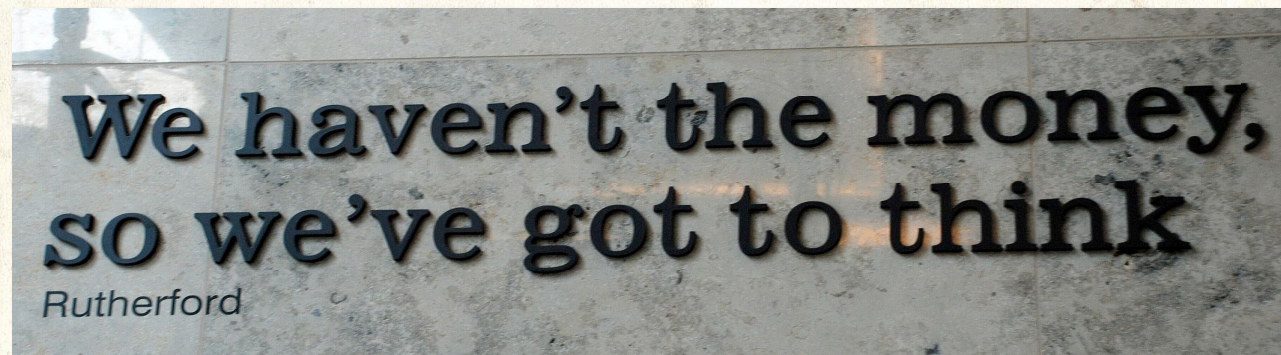
*Un atome est constitué de Z électrons
entourant un noyau
formé de Z protons et de $A-Z$ neutrons*



Atome de carbone ($Z=6$, $A=12$) très schématisé

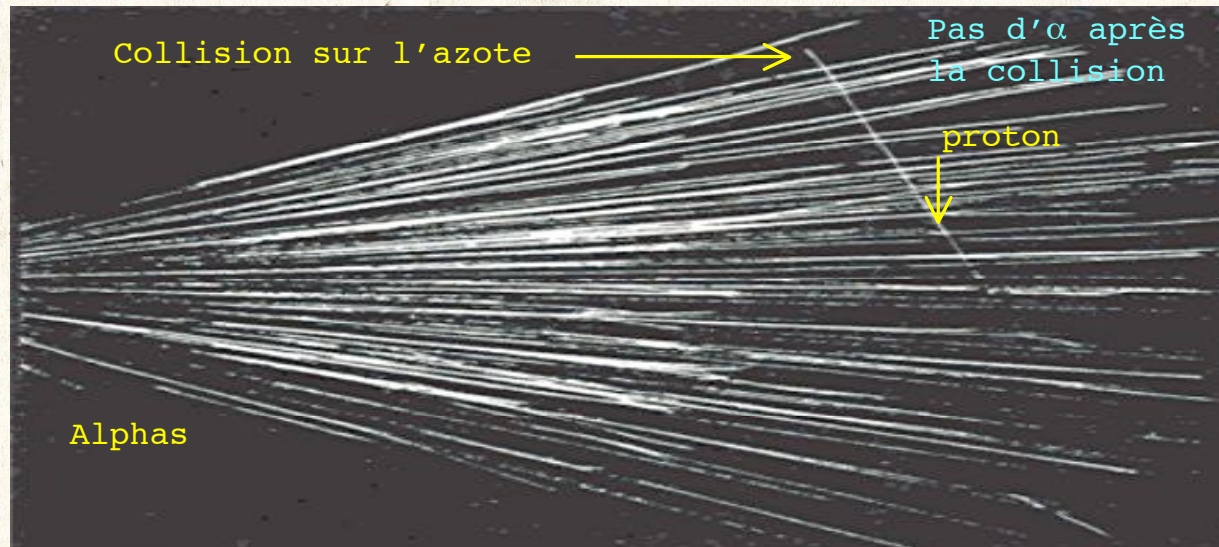
Que sait-on du noyau en 1930?

- La charge positive de l'atome est concentrée dans un très petit volume, le noyau, ainsi que l'essentiel de sa masse [*Rutherford 1911*]
- Un même élément chimique peut exister sous formes d'isotopes dont la masse atomique A diffère [*Soddy 1911*]
- Le numéro atomique Z n'est autre que la charge positive Z du noyau [*Moseley 1913*]
- On peut transmuter un élément en un autre en le bombardant avec des α [*Rutherford 1919*]
- *Mais quels sont les constituants du noyau et comment interagissent-ils?*



Rutherford et la structure du noyau (1)

- Les masses atomiques sont des multiples entiers de celle de l'hydrogène
- Collisions nucléaires
 - Rutherford et Marsden 1913, Rutherford 1917-1919, Rutherford et Chadwick 1921
 - $\alpha + \text{azote} \rightarrow \text{proton} + \text{carbone} + \alpha$ [en fait $\alpha + \text{azote} \rightarrow \text{proton} + \text{oxygène}$]



- \Rightarrow **il y a des protons dans le noyau**
 - « We must conclude that the nitrogen atom is disintegrated under the intense force developed in a close collision with a swift α particle, and that the hydrogen atom which is liberated formed a constituent part of the nitrogen nucleus. » E. Rutherford, *Philosophical Magazine* June 1919

Rutherford et la structure du noyau (2)

- ⇒ Première idée: **les noyaux sont des assemblages de Z protons**

$$\text{Mais } m_{\text{noyau}} \sim A m_p \text{ et } A > 2 Z$$

- ⇒ Deuxième idée: **les noyaux sont des assemblages de A protons**

- Charge électrique **Z** ⇒ ajouter **A-Z** charges négatives, *donc A-Z électrons*

- Cohérent avec radioactivité bêta = émission d'électrons β^- *par le noyau*

- Modèle en vogue jusqu'en ~1930

- Malgré l'absence d'un mécanisme expliquant comment Z électrons «atomiques» se trouvent à 10^{-10} m du noyau alors que A-Z électrons «nucléaires» ne sont qu'à 10^{-15} m

- Malgré des difficultés avec la mécanique quantique

- Théorème spin-statistique

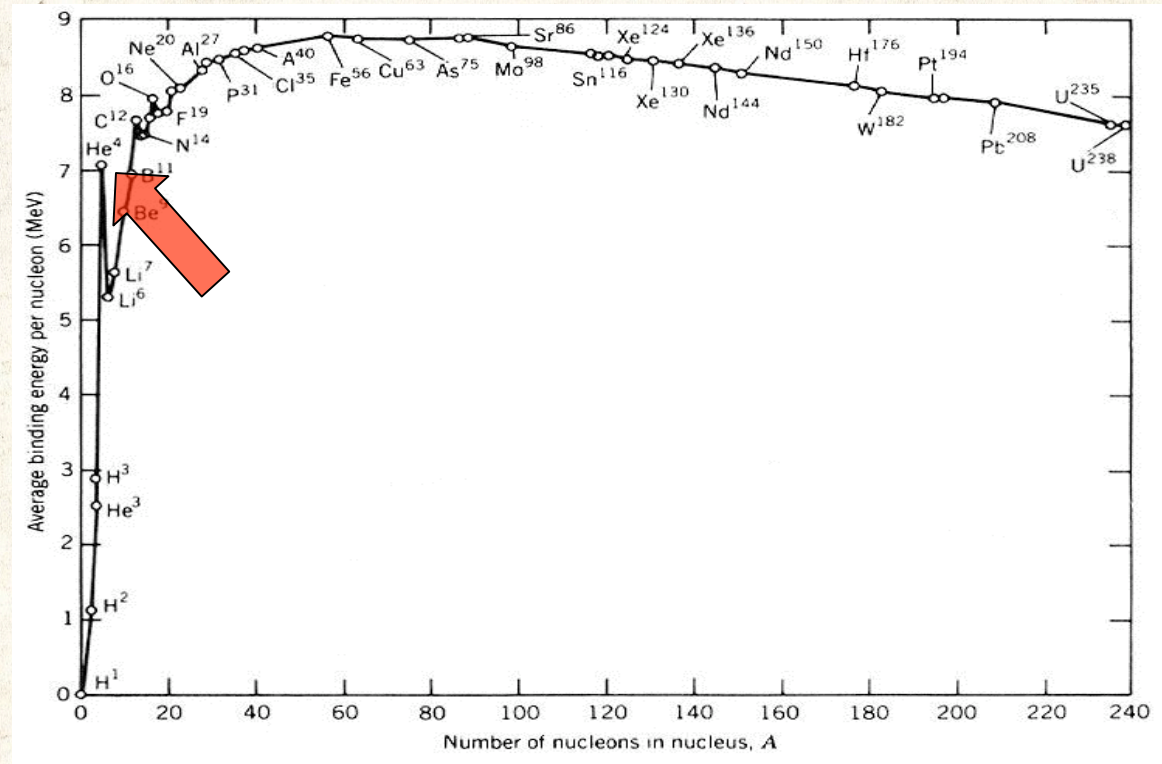
- Principe de Heisenberg

Rutherford et la structure du noyau (3)

- Troisième idée, complémentaire: **des sous-structures d'alphas**
 - Radioactivité alpha des noyaux lourds
 - Minimise l'énergie de liaison: $m_\alpha = 4m_p + 2m_e - 28 \text{ MeV}$
 - Aston au Cavendish Lab \rightarrow He 4, C 12, O 16, Ne 20 sont plus liés que leurs voisins de la classification périodique

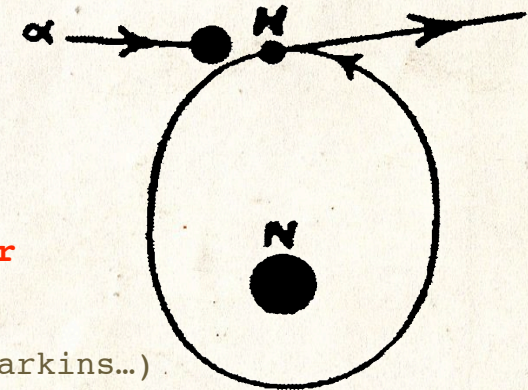


Francis Aston (1877-1945),
prix Nobel de chimie 1922



Rutherford et la structure du noyau (4)

- **Rutherford** (Conférence Bakérienne *Nuclear Constitution of Atoms*, 1920)
 - Bilan – et perspectives – des bombardements de noyaux par des α
 - Noyau d'azote ($Z = 7$) formé d'un cœur de 3 alphas, plus un proton isolé «satellite», éjecté dans une collision avec un alpha
 - Mais masse $A = 14 \Rightarrow$ un proton additionnel
 - *mais la charge électrique ?*
- \Rightarrow Possibilité d'un état $[p+e]$ très lié
 - **Expliquerait la formation de tous les noyaux à partir de l'hydrogène malgré la répulsion électrostatique**
 - Idée toujours dans l'air vers 1930 (G. Gamow, W.D. Harkins...)
 - Possibilité envisagée d'un «diplon» (${}^2\text{H}$) et d'un «triplon» (${}^3\text{H}$)
- Recherche de ce «neutron» par Chadwick, infructueuse pendant 12 ans
 - Scintillations sans déflexion par un champ électromagnétique
 - Étude du béryllium par bombardement alpha: il ne donne pas de protons, mais peut-être donne-t-il des «neutrons»?



LA DÉCOUVERTE

Walter Bothe (1891-1957)



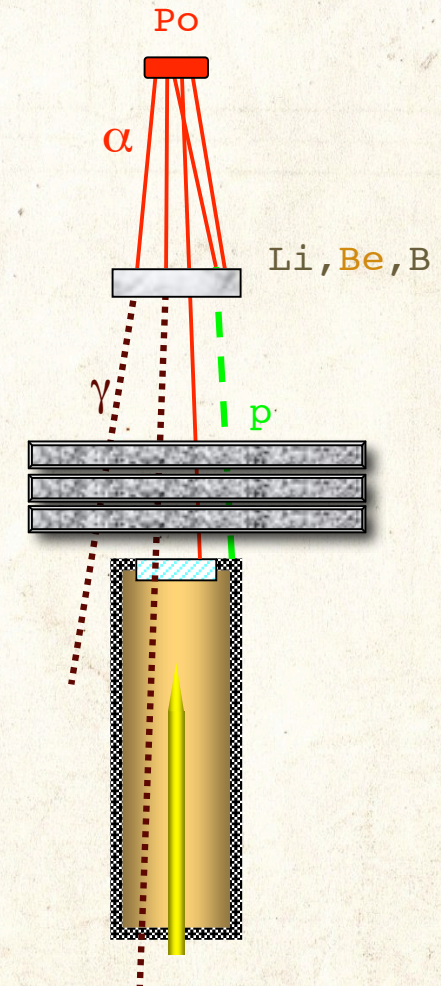
- Étudie à partir de 1927 les transmutations par bombardement d'alphas



- Idée de Bothe: le noyau final est probablement produit dans un état excité
- \Rightarrow Expérience pour détecter les γ de désexcitation
- Focalisation sur les éléments légers (barrière coulombienne plus basse)
- 1930 : observation (avec son étudiant Herbert Becker) d'un rayonnement neutre pénétrant, naturellement interprété comme les γ recherchés

L'expérience de Bothe et Becker (1)

- Une expérience très simple, sur un coin de table
- Montage expérimental
 - **Source:** alphas du polonium [intensité ~ 5 mCi]
(Po pour éviter la contamination γ des autres sources)
 - **Cible:** noyaux légers (lithium, béryllium, bore, fluor, magnésium, aluminium)
 - **Compteur:** compteur Geiger à pointe, pour compter les gammas
 - fenêtre épaisse (arrête α et «rayons H» = protons)
 - compteur d'impulsions (relais téléphoniques)
- Énergie des γ évaluée par interposition de plaques de plomb



L'expérience de Bothe et Becker (2)

- Observation d'un rayonnement ionisant résiduel

Comme prévu !

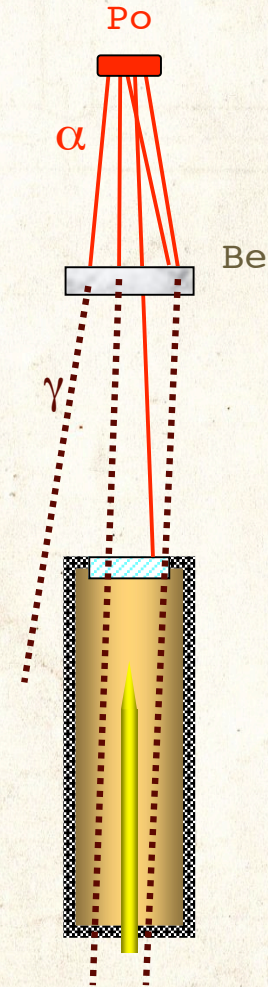
- Énergie $\Rightarrow \sim 5 \text{ MeV}$ [intensité $\downarrow 30\%$ 1 cm Pb]
- $\Rightarrow > \gamma$ habituels de la radioactivité

Les γ de désexcitation attendus ?

- Cas particulier du béryllium

- Pas de proton émis
- Rayonnement pénétrant beaucoup plus **intense**
- Normal

- $\sigma(\alpha, \text{Li}7) \sim 25 \text{ mb}$ $\text{Li} = \text{Li}6 \text{ à } 8\% \text{ et } \text{Li}7 \text{ à } 92\%$
- $\sigma(\alpha, \text{Be}9) \sim 250 \text{ mb}$ $\text{Be} = \text{Be}9 \text{ à } 100\%$
- $\sigma(\alpha, \text{B}11) \sim 5 \text{ mb}$ $\text{B} = \text{B}10 \text{ à } 20\% \text{ et } \text{B}11 \text{ à } 80\%$



L'expérience de Bothe et Becker (3)

Z. Phys. 66-289 (1930) «Excitation Artificielle de Rayons γ Nucléaires»

Künstliche Erregung von Kern- γ -Strahlen.

Von W. Bothe und H. Becker in Charlottenburg.

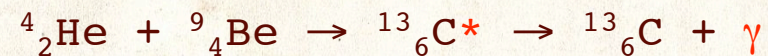
Mit 11 Abbildungen. (Eingegangen am 23. Oktober 1930.)

Eine Reihe von Elementen und Verbindungen wurden mit den α -Strahlen eines starken Poloniumpräparats bombardiert und auf sekundäre γ -Strahlen untersucht. Bei Li, Be, B, F, Mg und Al konnte eine γ -Strahlung nachgewiesen werden; die Ausbeuten sind ähnlich wie bei der Atomzertrümmerung (Ziffer 1 bis 5). Die Absorbierbarkeit der B- und Be-Strahlung wurde von der Größenordnung der härtesten radioaktiven γ -Strahlen befunden (Ziffer 6). Die von Slater angegebene harte Sekundärstrahlung des Bleis konnte nicht beobachtet werden (Ziffer 7). Der ungefähre Verlauf der Anregungsfunktion der Be-Strahlung wurde festgelegt (Ziffer 8). Eine deutliche Abhängigkeit der Härte der Be-Strahlung von der α -Energie konnte nicht gefunden werden (Ziffer 9). Die B-Strahlung erwies sich als nicht merklich anisotrop (Ziffer 10). Die Entstehungsmöglichkeiten und der Zusammenhang zwischen γ -Strahlung und Atomzertrümmerung werden an Hand des Gamowschen Kernmodells diskutiert (Ziffer 11).

Les rayons γ radioactifs les plus durs constatés

L'expérience de Bothe et Becker (4)

- Résultats présentés en mai 1931 à la conférence de Zürich
- Interprétation du cas du béryllium proposée en octobre 1931 à la Conférence de Rome : formation d'un noyau excité de carbone 13



- Accueil plutôt favorable de la part des autres physiciens
- Bothe professeur à Giessen puis Heidelberg
 - **désexcitations γ nucléaires**
 - rayons cosmiques
 - premier cyclotron d'Allemagne de 1938 à 1944
 - section efficace d'absorption des neutrons par le carbone en 1941
⇒ eau lourde au lieu du graphite pour le programme nucléaire allemand
 - Prix Nobel de physique 1954 pour la méthode des coïncidences (mise au point dans les années 1920)

Irène Curie et Frédéric Joliot



Irène Curie et Frédéric Joliot

- Irène Curie (1897-1956)
 - fille aînée de Pierre et de Marie Curie
 - principale collaboratrice de sa mère à partir de 1918
 - thèse en 1926 sur la portée des particules α dans la matière
- Frédéric Joliot (1900-1958)
 - ingénieur ESPCI, élève de Paul Langevin
 - préparateur de Marie Curie fin 1924
 - épouse Irène Curie en 1926
 - thèse en 1930 sur l'électrochimie du polonium
- Découverte de la radioactivité «artificielle» en 1934
 - \Rightarrow prix Nobel de chimie 1935.
 - premiers accélérateurs en France (F. Joliot)
 - capture des neutrons par l'uranium (I. Curie)
- Réaction en chaîne: brevets de F. Joliot en mai 1939, couvrant la réalisation d'un réacteur et d'une bombe nucléaires
- Création du CEA en 1945 puis de l'IPN d'Orsay

L'expérience des Joliot-Curie (1)

- Préparation de 1928 à 1931 de la source de polonium de très loin (10x) **la plus intense du monde**

Sous-produit du radium et du radon médical

- Équipement en chambres de Wilson, chambres d'ionisation, et électromètres sensibles (mais pas encore de compteurs Geiger)

- Intrigués par les résultats de Bothe et Becker,

- Zürich, mai 1931 (I. Curie et F. Joliot)

- Rome, octobre 1931 (Marie Curie)

ils décident d'en refaire l'expérience

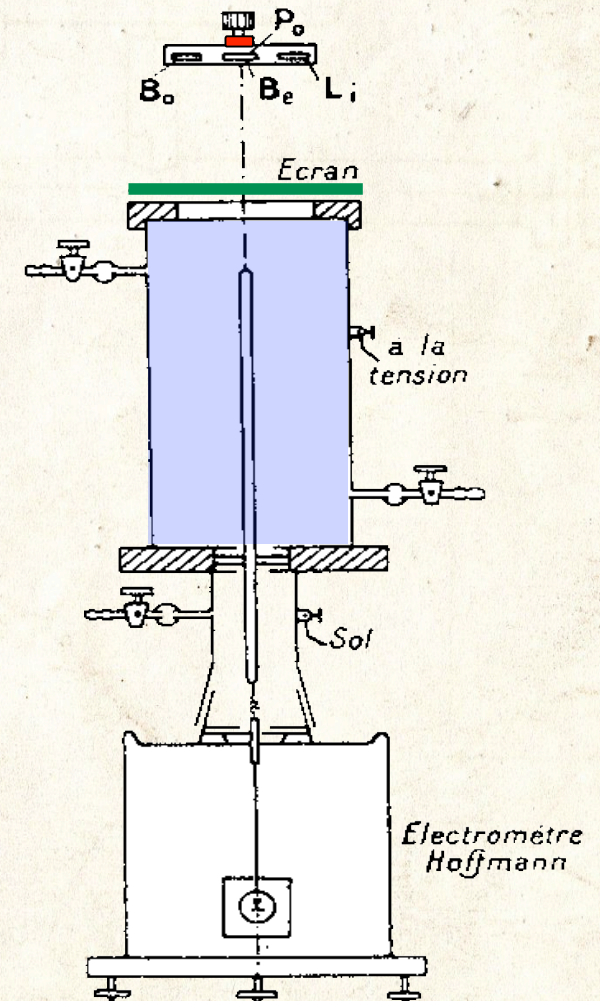
mais différemment



L'expérience des Joliot-Curie (2)

Montage expérimental en décembre 1931

- Source de polonium **très intense** [100 mCi]
- Cibles de lithium, de bore ou de béryllium
- Possibilité d'interposer des écrans variés
- **Chambre d'ionisation** au lieu du compteur Geiger
 - tradition vénérée de l'Institut du Radium de Paris
 - proportionnelle, au lieu de tout ou rien
 - fenêtre d'entrée très mince (5 μm d'aluminium) pour être très peu absorbante aux rayonnements secondaires éventuels



L'expérience des Joliot-Curie (3)

○ 28 décembre 1931 : **confirmations**

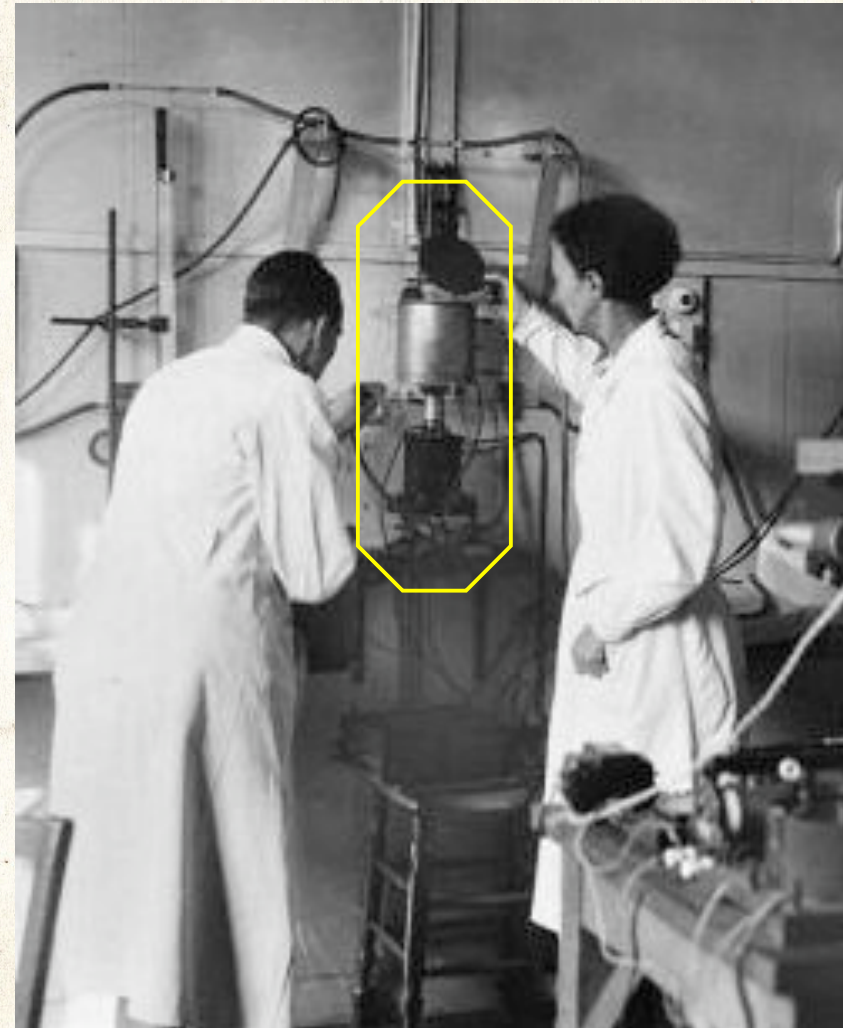
- Note d'Irène Curie *Sur le rayonnement γ nucléaire excité dans le glucinium [=béryllium] et le lithium par les rayons α du polonium* [C.R. Acad. Sc. Paris, 193-1412, 1931]
- Note de Frédéric Joliot *Sur l'excitation des rayons γ nucléaires du bore par les particules α* [C.R. Acad. Sc. Paris, 193-1415, 1931]

○ Énergie γ ~ 3 fois celle des α

⇒ décision d'étudier l'effet de γ de *très* haute énergie sur différentes substances

⇒ interposition d'**écrans** divers

⇒ RIEN sauf avec paraffine



L'expérience des Joliot-Curie (4)

- Janvier 1932: écran de paraffine
- Forte augmentation du courant d'ionisation dans le cas du béryllium ⇒
 1. des **protons** traversent la chambre d'ionisation
 2. le béryllium ne produit **pas** de proton par bombardement α
 3. ⇒ les protons ne viennent pas du béryllium, mais de l'écran
 4. seule la paraffine produit cet effet
 5. ⇒ pas une transmutation nucléaire des noyaux de l'écran
 6. ⇒ les protons sont des noyaux d'hydrogène éjectés de l'écran
- **Interprétation du phénomène: effet Compton $\gamma p \rightarrow \gamma p$**
- Énergie du proton (estimée par l'intensité du courant) → énergie du γ
⇒ $E_\gamma \sim 50 \text{ MeV}$

L'expérience des Joliot-Curie (5)

- 18 janvier: note *Émission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence de rayons γ très pénétrants* [C.R. Acad. Sc. Paris, 194-273, 1932]
- «Il paraît donc établi par ces expériences qu'un rayonnement électromagnétique de haute fréquence est capable de libérer, dans les corps hydrogénés, des protons animés d'une grande vitesse»
- 20 janvier 1932, nouveau montage: la chambre d'ionisation est remplacée par une chambre de Wilson, permettant de **voir** les protons
- Les Joliot-Curie sont confortés dans leur interprétation d'un effet Compton



L'expérience des Joliot-Curie (6)

○ Réactions négatives sur l'interprétation des Joliot-Curie

- à Rome, Majorana démontre que la cinématique impose que le projectile n'a pas une masse nulle mais une masse proche de celle du proton, mais il ne publie rien malgré la demande de Fermi
- à Cambridge, Rutherford trouve aussi l'explication invraisemblable ⇒ **Chadwick**

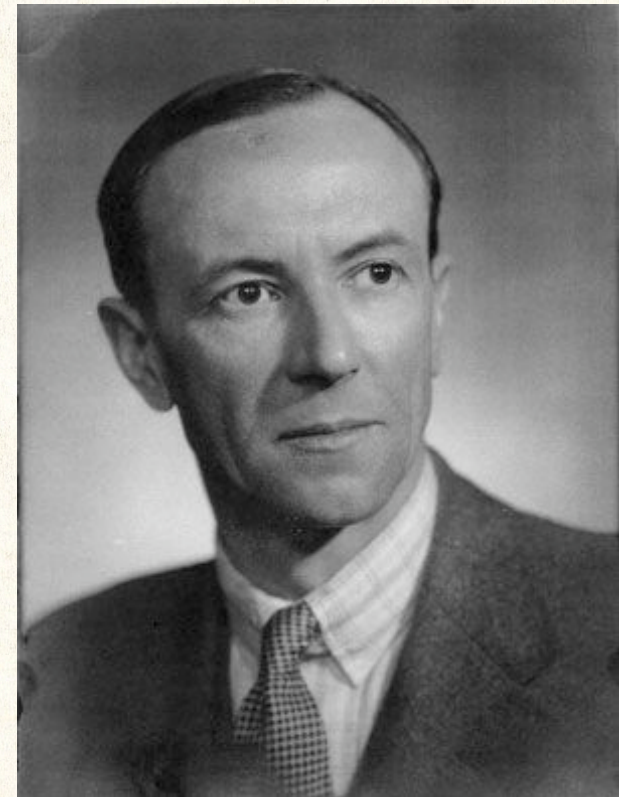
○ Deux difficultés

1. La probabilité d'un effet Compton est de *plusieurs ordres de grandeur* trop faible (les Joliot-Curie en sont parfaitement conscients et ils invoquent une nouvelle forme d'interaction)
2. Une énergie de 50 MeV pour un γ
 - soit viole la conservation de l'énergie (comme la transmutation bêta selon l'hypothèse de Bohr)
 - soit contredit l'existence de sous-structures α dans le noyau
 - $\text{Be } 9 = 2\alpha + p + e \Rightarrow E_\gamma < 14 \text{ MeV}$
 - $\text{Be } 9 = 9p + 5e \Rightarrow E_\gamma < 70 \text{ MeV}$



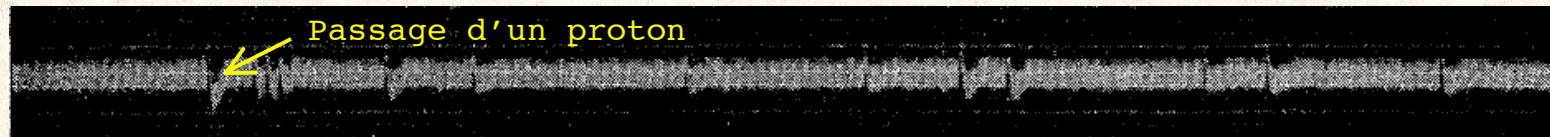
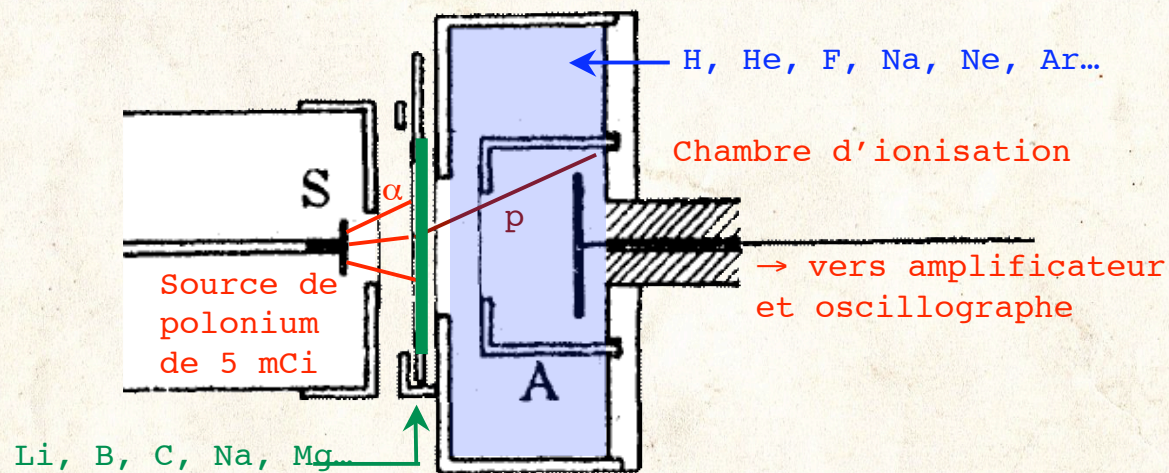
James Chadwick (1891-1972)

- Études à Manchester, où il se passionne pour la radioactivité dans le laboratoire de Rutherford, côtoie Geiger, Marsden, Moseley, Bohr et obtient son MSc en 1913.
- reçoit une bourse pour aller à Berlin au *Reichsanstalt*, dirigé par Geiger; il y découvre que **le spectre bêta est continu**
- interné en Allemagne pendant la durée de la guerre. Rejoint ensuite Rutherford à Manchester, puis à Cambridge.
- Directeur-adjoint du Cavendish, il y supervise toutes les recherches
- **1932: le neutron**
- 1935: prix Nobel de physique. Crée son propre laboratoire à Liverpool, où il construit un cyclotron (puis un synchro-cyclotron après la guerre)
- 1940: mémorandum de Frisch et Peierls, comité MAUD
- 1943-1945: dirige la mission britannique à Los Alamos (programme Manhattan)



L'expérience de Chadwick (1)

- Pour étudier la structure des noyaux, Chadwick menait depuis plusieurs années des expériences de bombardement de différents éléments par les particules alpha du polonium
- Pour cela, il avait mis au point au Cavendish une petite chambre d'ionisation reliée à un amplificateur (cascade de triodes), un oscillographe et un enregistreur photographique



L'expérience de Chadwick (2)

- En 1931, Chadwick reproduisit l'expérience de Bothe avec son étudiant Webster, mais ne disposait pas d'assez de polonium
- Après le départ de Webster pour Bristol, Chadwick récupéra des milliers de tubes de radon médicaux
- Il passa l'automne 1931 à isoler du polonium
- Fin janvier 1932, il apprit les résultats des Joliot-Curie avec la paraffine...

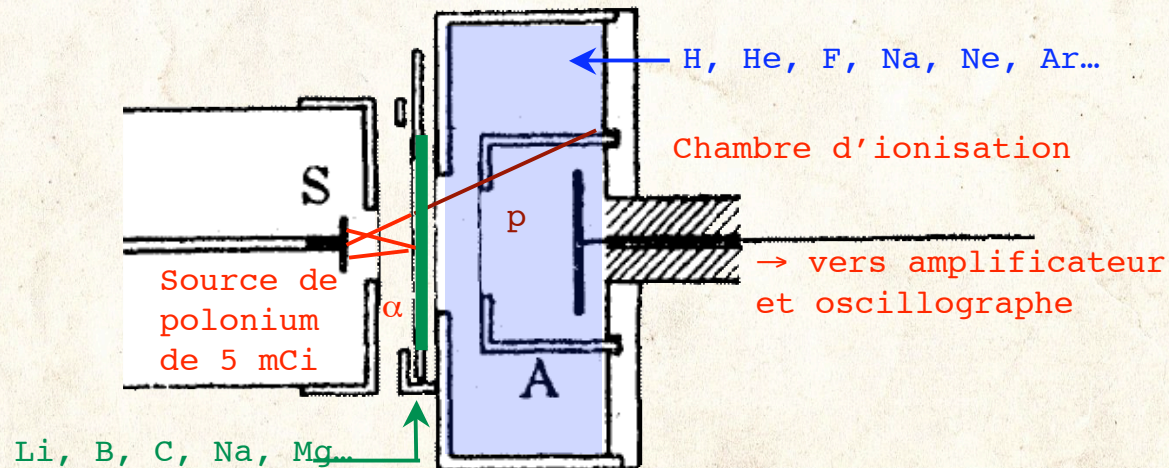
...sans croire une seconde qu'il s'agissait d'un effet Compton

- Le dimanche 7 février il reprit l'expérience des Joliot-Curie
- Mais avec son propre montage

⇒ 10 journées intenses

L'expérience de Chadwick (3)

- Écran de paraffine → nombre de déflexions augmente
- Insertion de feuilles d'aluminium → absorption compatible protons
- Écrans successifs: lithium, béryllium, bore, carbone, azote...
- Puis remplissage de la chambre: hydrogène, hélium, azote, oxygène, argon...

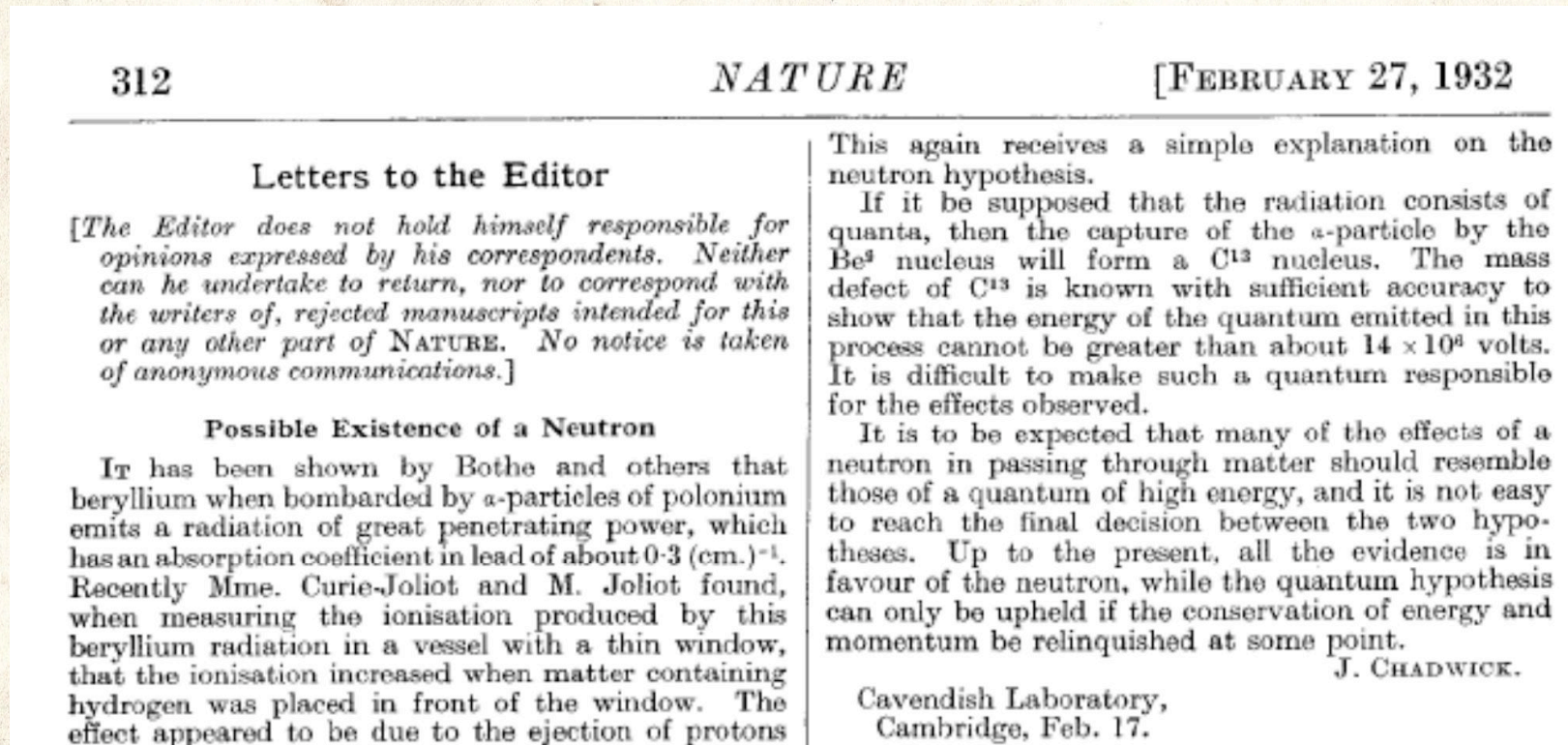


L'expérience de Chadwick (4)

- Quel que soit l'élément utilisé
⇒ éjection de protons → estimation énergie projectile
- Projectile = γ ⇒ énergie
 - 1 - extrêmement élevée [50 à 100 MeV]
 - 2 - *augmentant avec la masse de la cible*
- **Mais si masse projectile $\sim m_{\text{proton}}$ ⇒ énergie ~ 5 MeV pour toute cible**

Publications

- Premier article en février, très prudent: « Possible Existence of a Neutron »



- Deuxième article en mai, nettement plus affirmatif: « The Existence of a Neutron »

ÉPILOGUE

Le neutron est-il une particule élémentaire?

○ État lié (Rutherford 1920) ou non?

- Chadwick 1932 estimation $m_{\text{neutron}} \sim 1.006$ amu $p+e=1.007 \Rightarrow$ état lié
- Joliot 1933 $m_{\text{neutron}} \sim 1.012$ amu
- Lawrence 1933 $m_{\text{neutron}} \sim 1.001$ amu
- Chadwick 1934 $m_{\text{neutron}} \sim 1.008$ amu [photodissociation du deutérium]

$$M_{\text{neutron}} > M_{\text{proton}} + M_{\text{électron}} \Rightarrow \text{pas un état lié}$$

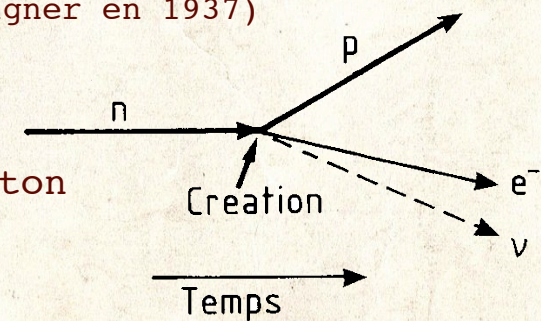
○ Difficultés avec la mécanique quantique

- état lié de 2 spins $1/2 \Rightarrow$ spin entier, mais spectroscopie \Rightarrow azote 14 : spin 1
- électron dans un noyau de taille 10^{-14} m \Rightarrow énergie > 100 MeV [via Heisenberg]

○ Heisenberg 1932: proton et neutron sont deux états de la même particule élémentaire, le **nucléon** (le terme d'isospin est de Wigner en 1937)

○ Fermi 1933

transmutation bêta = transmutation neutron \rightarrow proton
et *création* d'un électron et d'un neutrino
Article refusé par la revue *Nature*...



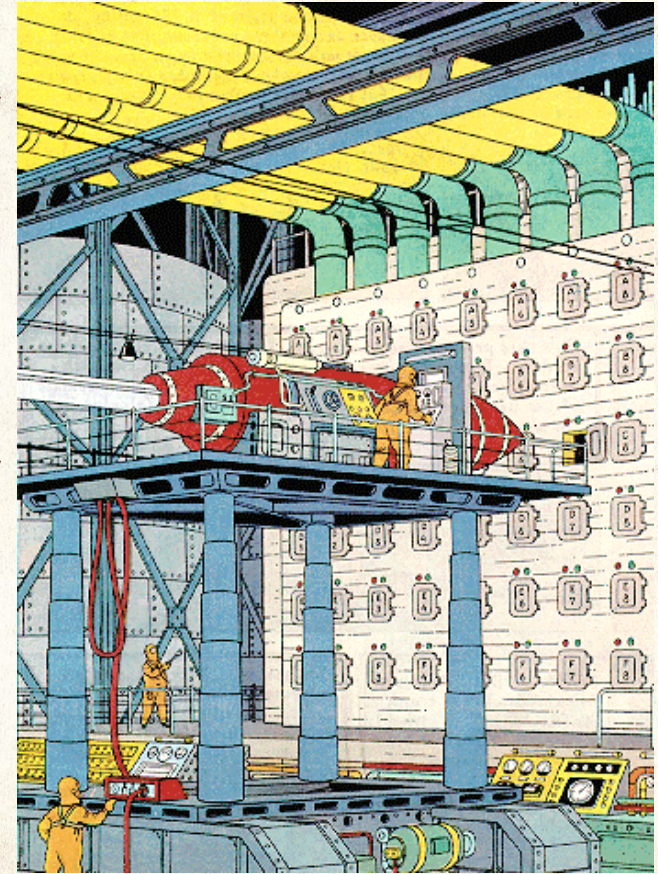
Pourquoi ni Bothe ni les Joliot-Curie n'ont trouvé le neutron?

- Tous travaillaient sur les réactions nucléaires induites par les α
- Mais différences d'instrumentation
 - compteur Geiger guère sensible aux neutrons
 - chambre d'ionisation plus sensible aux protons qu'aux gammas
 - amplification du courant cruciale pour Chadwick
- Et différences d'environnement scientifique
 - Bothe s'intéressait surtout aux gammas: il les a trouvés, **il y a réellement des gammas de désexcitation**
 - Les Joliot-Curie avaient – alors – peu de contacts avec d'autres physiciens
 - Vogue de la non-conservation de l'énergie dans les réactions nucléaires parmi les théoriciens (Bohr, Heisenberg...)
 - L'idée du neutron de Rutherford jamais perdue de vue au Cavendish
 - Les physiciens du Cavendish discutaient beaucoup entre eux (*tea seminars*)

Il faut admirer Chadwick d'avoir cherché le neutron pendant 12 ans sans aucune fausse alerte

Épilogue: « *La fin de la préhistoire* » (H. Bethe)

- 1933 : Heisenberg (théorie des forces nucléaires), Fermi (transmutation bêta), Szilard (principe de la réaction en chaîne)
- 1934 : Joliot-Curie (radioactivité « artificielle »), Fermi (activation neutronique)
- 1935-1936 : modèle de la goutte liquide (Gamow, Bohr, Bethe et Weizsäcker)
- 1938 : fission (Meitner, Hahn et Strassmann)
- 1939 : réaction en chaîne (Joliot, Bohr et Wheeler, Szilard et Fermi)
- 1942 : réaction en chaîne contrôlée (Fermi et Szilard)
- 1943 : premiers réacteurs nucléaires (Wigner)
- 1945 : Trinity, Hiroshima et Nagasaki

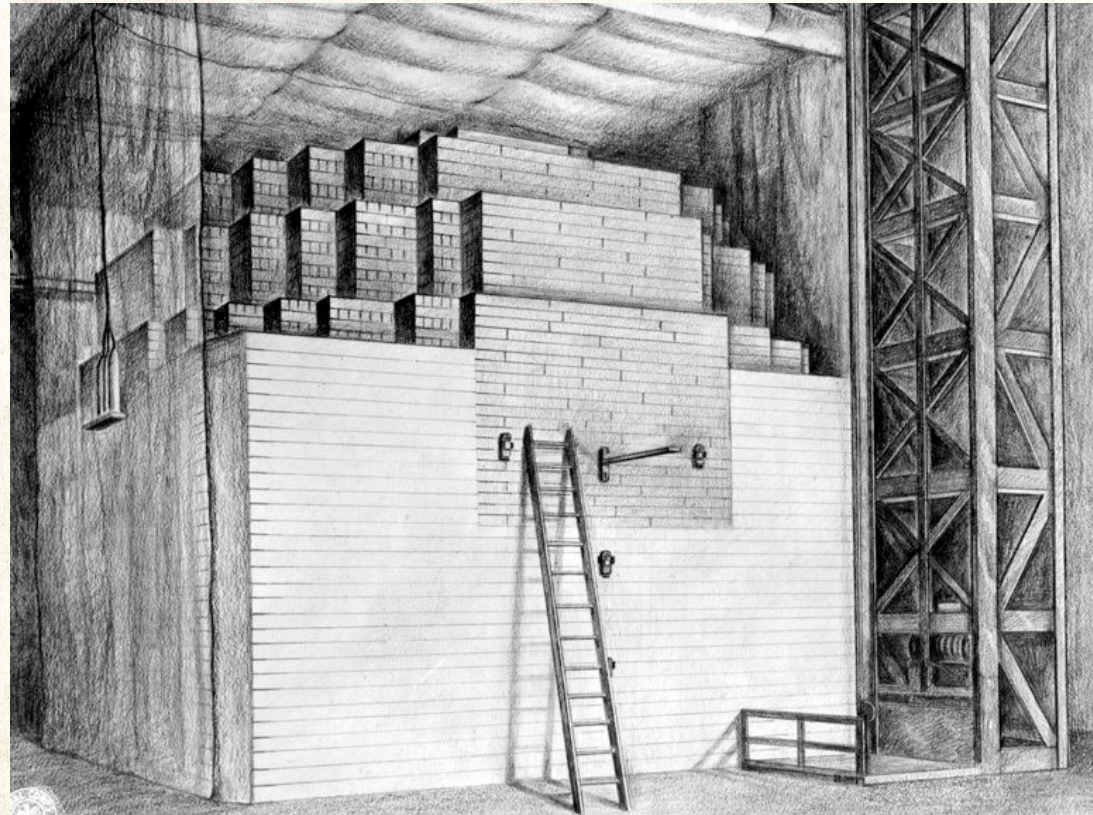


C'est fini !

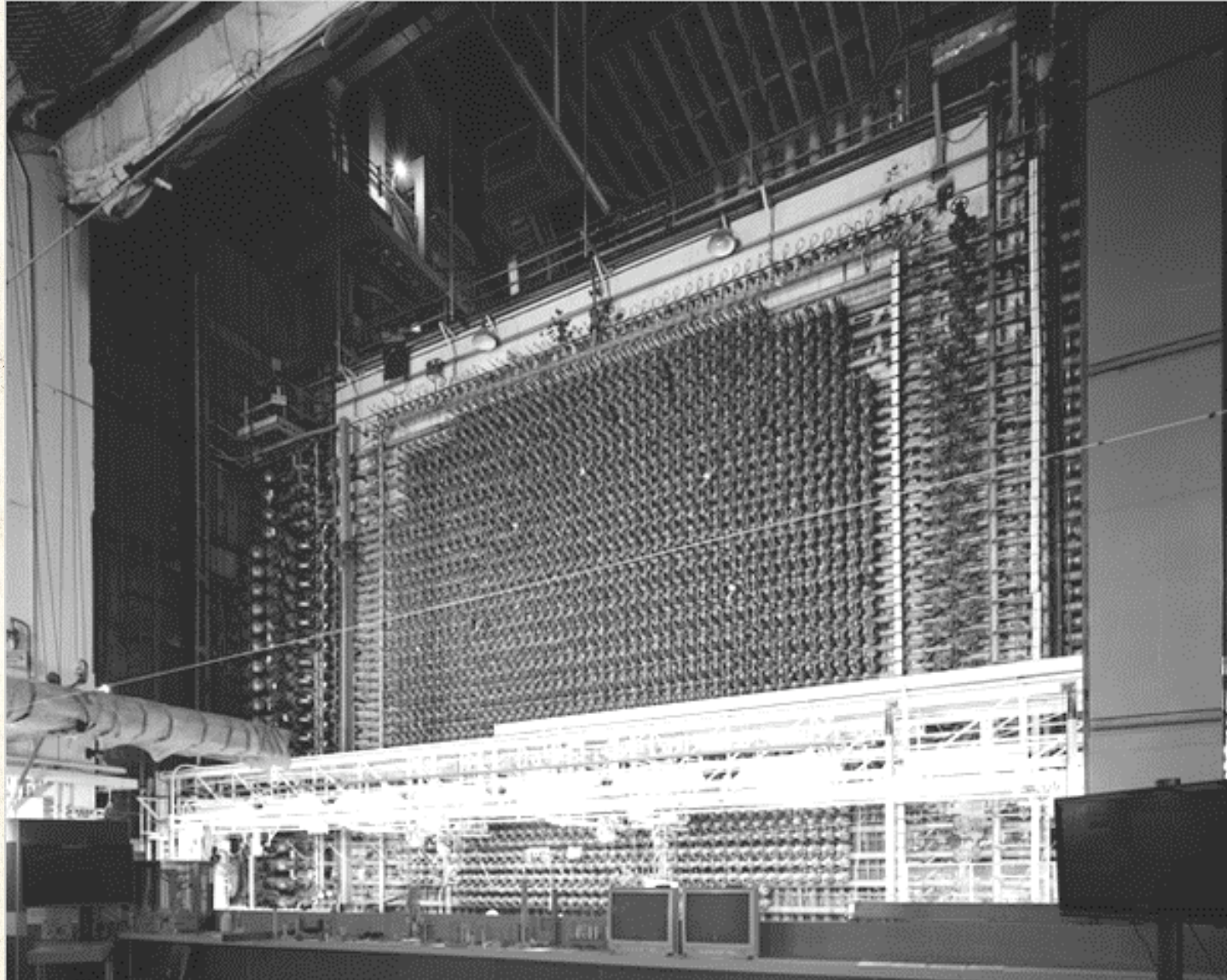


Merci pour votre patience...

2 décembre 1942: Chicago Pile One



26 septembre 1944: le réacteur B à Hanford



Alain Bouquet - La découverte du neutron

6 août 1945: Hiroshima



PRIX : 3 francs DERNIÈRE ÉDITION

Le Monde

Une révolution scientifique

LES AMERICAINS LANCENT LEUR PREMIÈRE BOMBE ATOMIQUE SUR LE JAPON

Washington, 6 août. — La première bombe atomique de cette guerre a été lancée aujourd'hui par un avion américain sur l'importante base navale d'Hiroshima, dans l'île de Honshu.

C'est le président Truman lui-même qui, par un communiqué, a annoncé à la Maison Blanche la mise en action de cette nouvelle bombe, dont la force d'explosion est 2.000 fois celle de la plus grande bombe connue jusqu'à présent dans l'armée américaine.

LA DÉCLARATION DU PRÉSIDENT TRUMAN

Oppenheimer, de l'université de Californie, a expérimenté la bombe atomique au champ d'aviation d'Alamo-Gordo (nouveau-Mexique). L'engin fut placé au sommet d'une tour d'acier, puis les techniciens se retirèrent à une vingtaine de

**Soixante villes japonaises
sont maintenant détruites**

Six cents superforteresses ont attaqué hier six nouvelles villes japonaises. Un seul appareil n'est pas rentré à sa base. Les quartiers industriels de Toyama, ville de 27.000 habitants, dans l'île de Honshu, notamment, ont été totalement rasés. On estime qu'un total soixante villes japonaises sont maintenant détruites. La population de quarante d'entre elles avait été prévenue avant les raids.

Le Q. G. du général Mac Arthur communique que plus de 400 bombardiers et chasseurs américains ont attaqué les objectifs militaires du port de Tsurumi, au sud de Hiroshima.

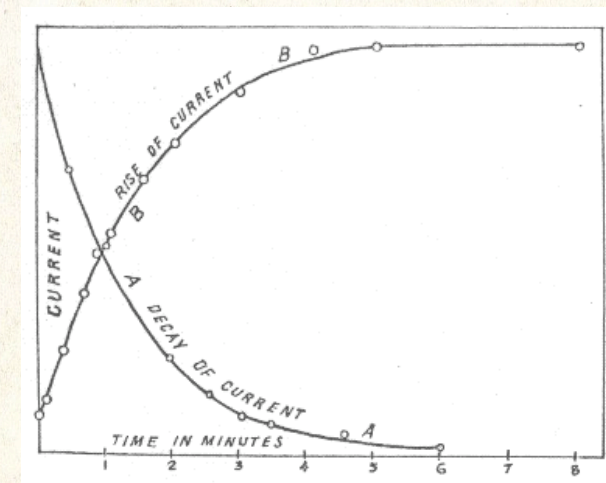
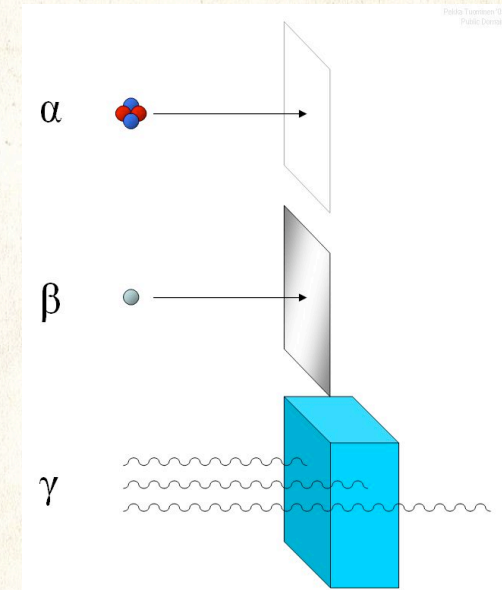
Mais aussi...



Analyse par activation neutronique: tablette cunéiforme, Ourouk

La radioactivité

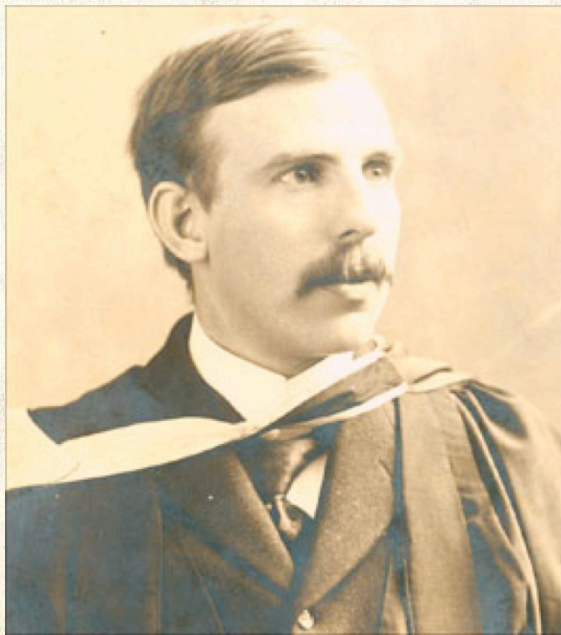
- Particularité des atomes les plus lourds, ceux situés au delà du plomb ($Z=82$)
- Rutherford 1898 : **alpha**, bêta, **gamma**
- P. et M. Curie 1898: polonium et radium, la «radioactivité» propriété atomique
- Rutherford et Soddy 1902: transmutations atomiques, en perdant un alpha ou un bêta un atome devient un autre
- Rutherford et Soddy 1902: période radioactive
- Rutherford 1902-1908: alpha = hélium
- Source de l'énergie inépuisable:
 - Atomes radioactifs = capteurs d'une énergie ambiante (les Curie)
 - Atomes radioactifs = perte de masse (Rutherford)



Rutherford, l'atome et le noyau

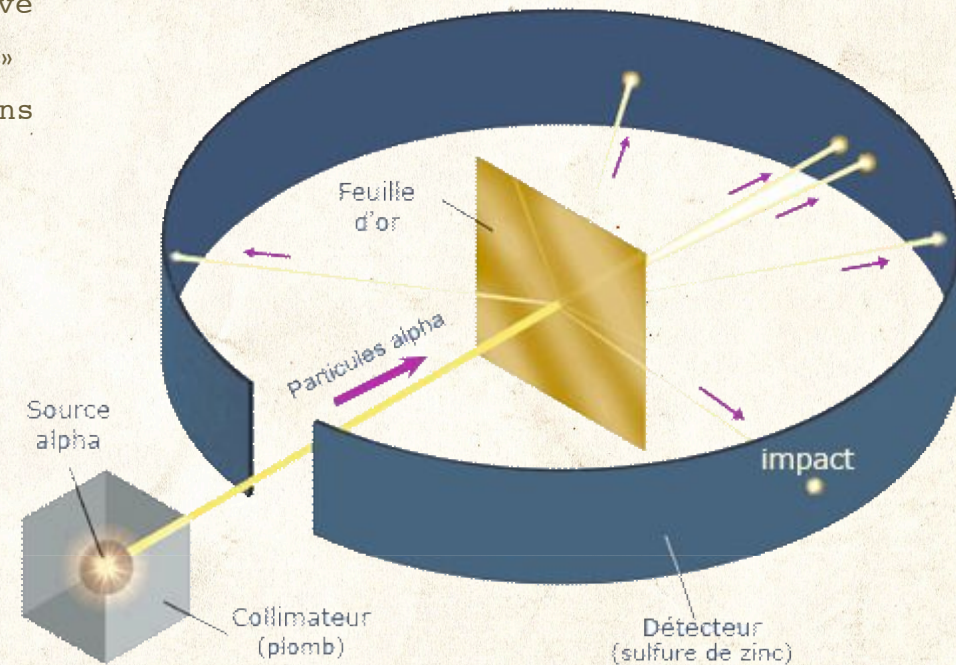
○ Chimistes et physiciens

- Thomson 1897: un atome formé d'électrons
- Thomson 1904: des milliers d'électrons dans une gelée positive
- Nagaoka 1904: modèle « saturnien »
- Thomson 1906: le nombre d'électrons est du même ordre de grandeur que la masse atomique



○ Le noyau

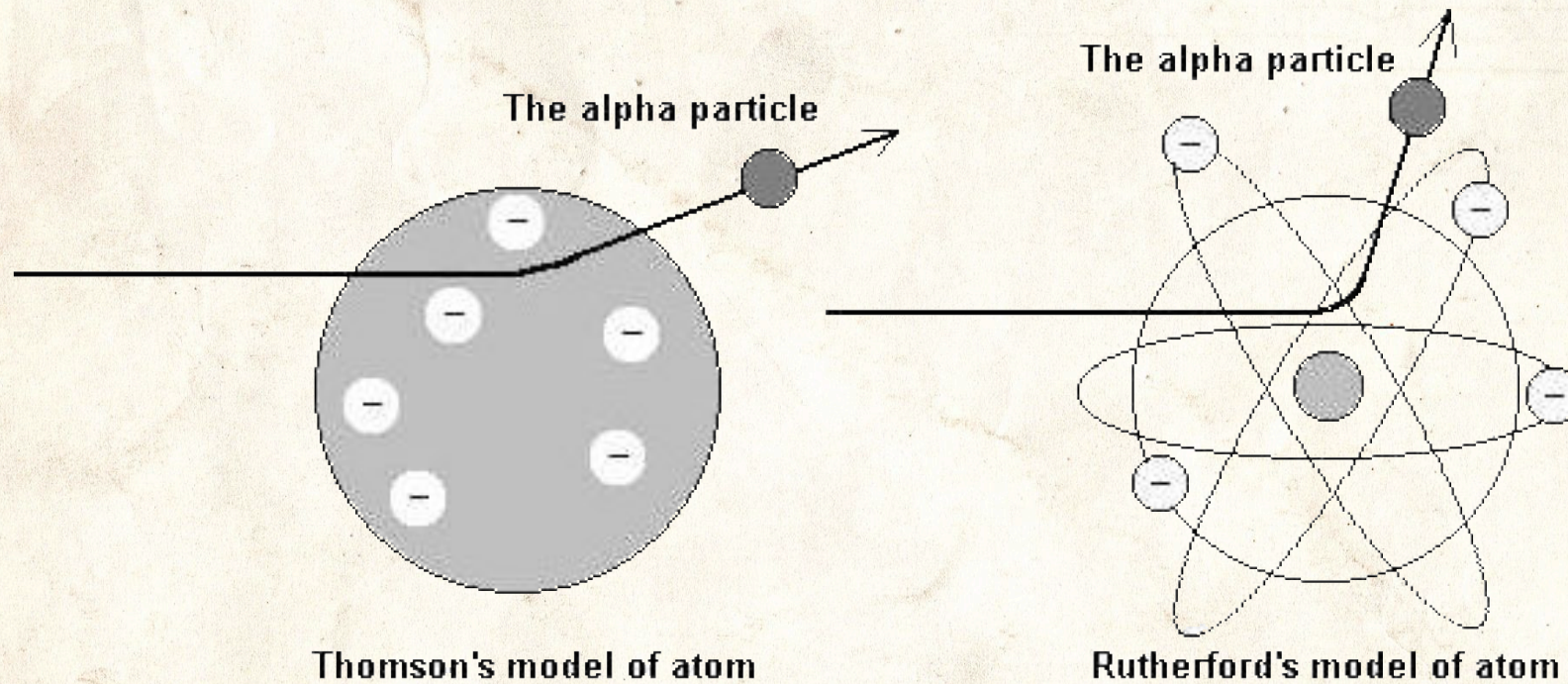
- 1907: Un bug expérimental
- 1908: Geiger et Marsden



[Lenard 1903: la matière semble transparente aux β]

Rutherford et le noyau

- L'interprétation de Rutherford en 1911: une mouche dans une cathédrale



- Puis modèle quantique de Bohr en 1913

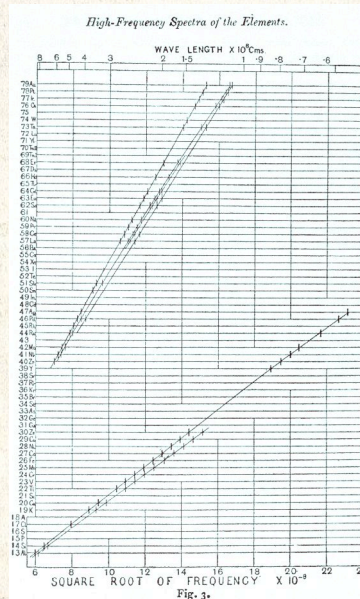
On y voit plus clair : Moseley et Soddy

○ **Henry Moseley** (1887-1915)

○ L'étude de l'émission X des atomes montre que c'est le numéro atomique Z qui identifie un élément chimique et non sa masse atomique A

○ ⇒ on sait quels éléments manquent

○ ⇒ la charge de tous les noyaux est un multiple de celle de l'hydrogène



○ **Frederick Soddy** (1877-1956)

○ Les isotopes: plusieurs éléments chimiquement identiques (même Z) peuvent avoir des masses A différentes

○ «Lois de déplacement» dans les transmutations

○ Alpha ⇒ $Z \rightarrow Z - 2$ (1911)

○ Bêta ⇒ $Z \rightarrow Z + 1$ (1913)

