

# PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

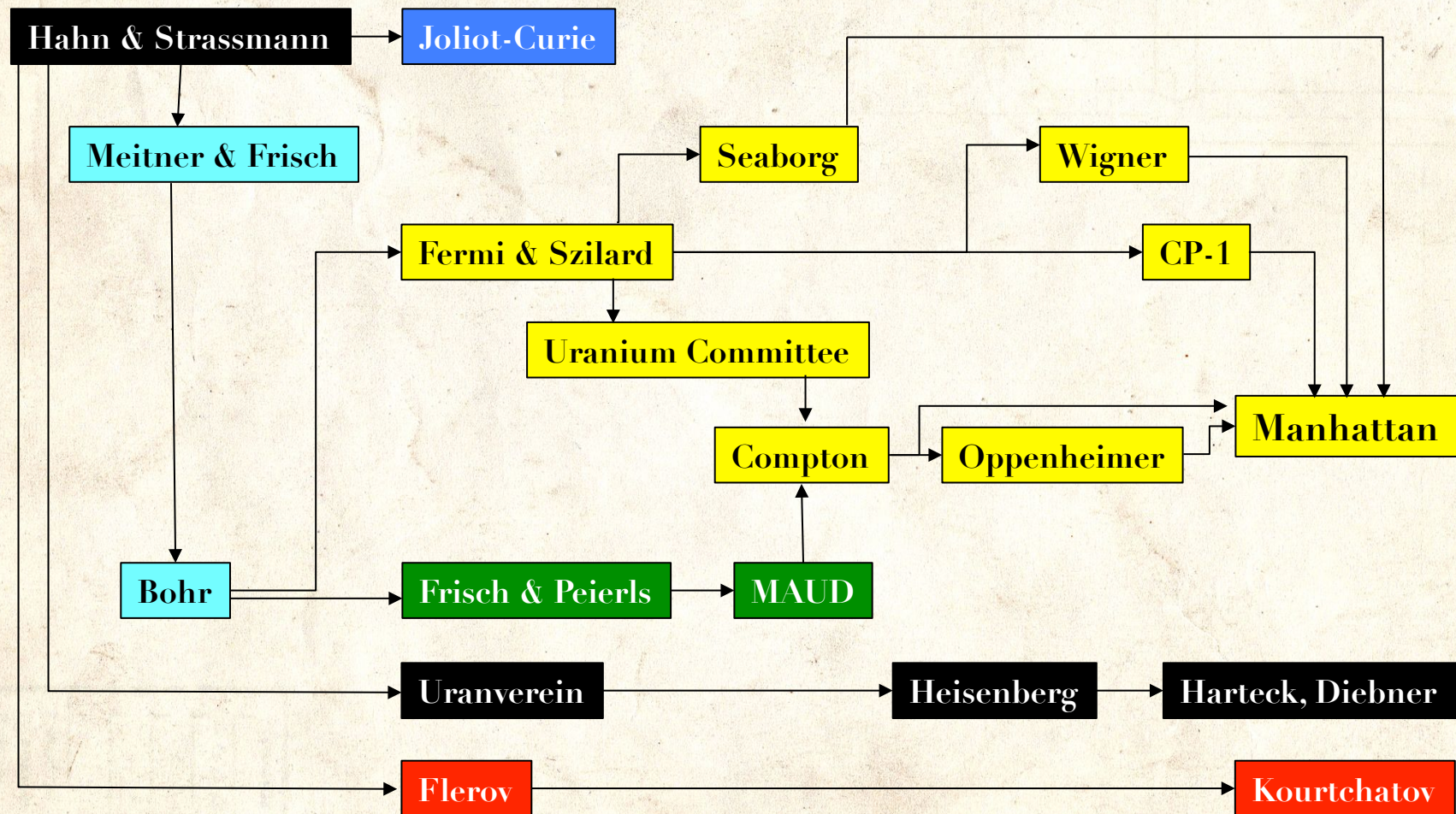
## 15 – PARALLÈLES

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

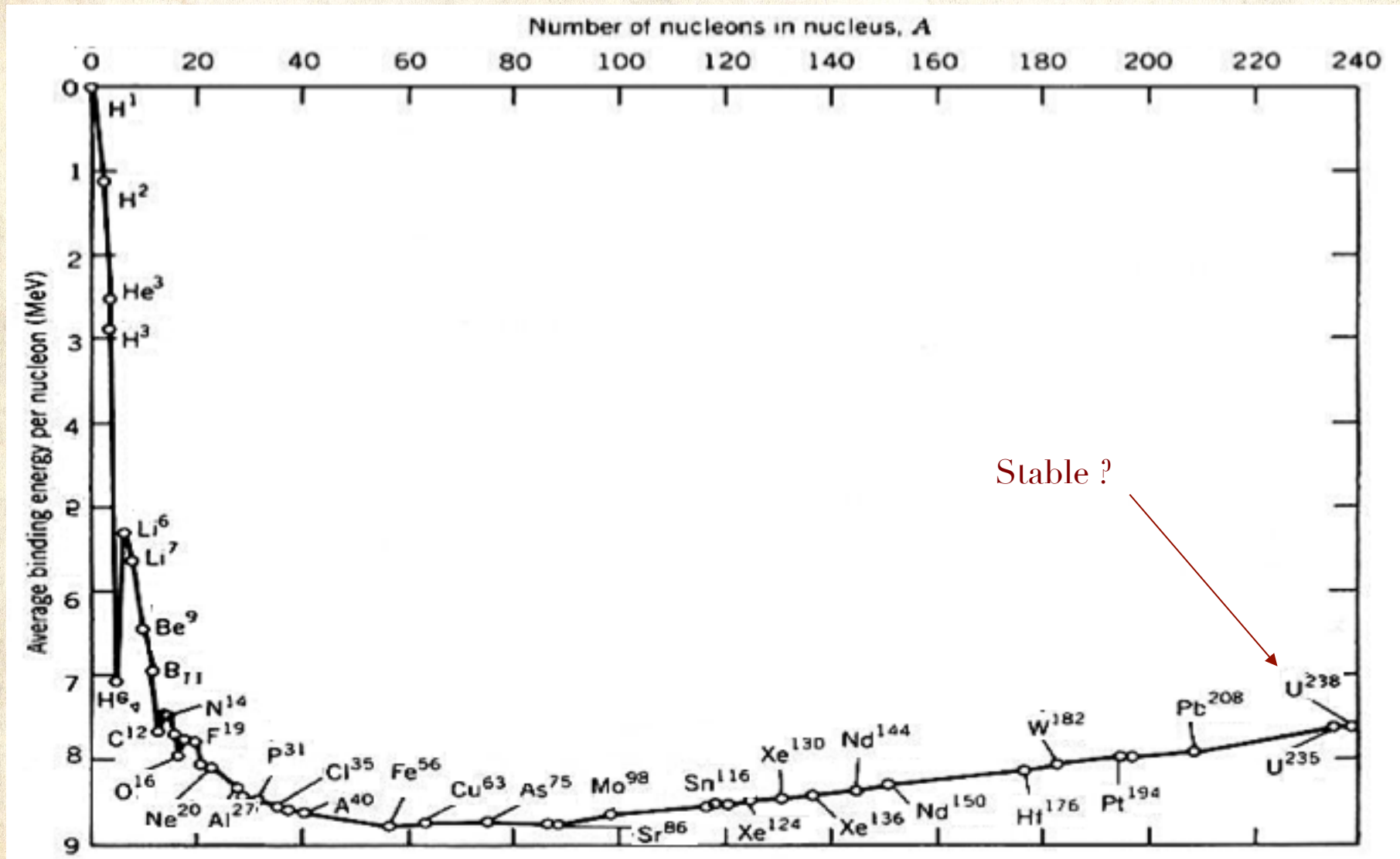
CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

# PARALLÈLES



# NIELS BOHR

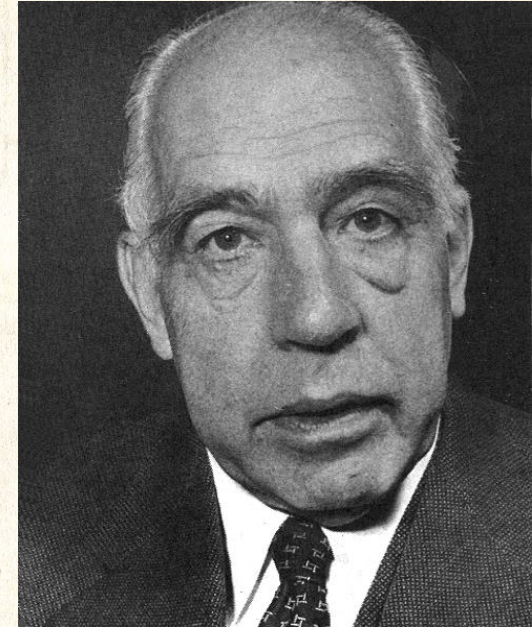
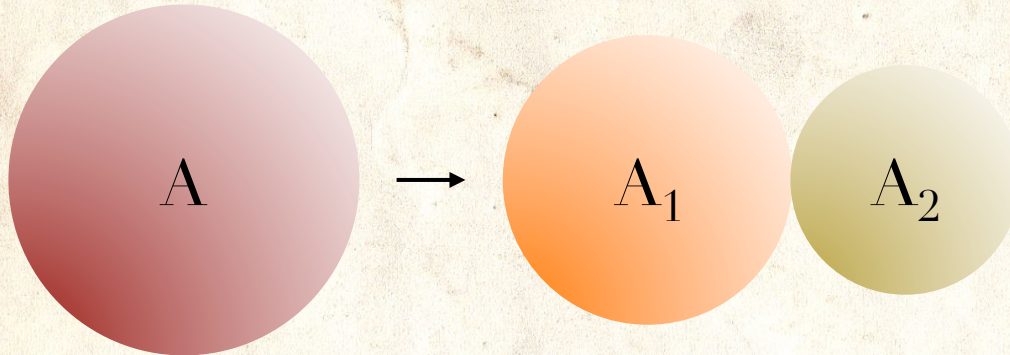
# ÉNERGIE DE LIAISON ET STABILITÉ



# PREMIERS CALCULS

- Formule de Bethe-Weizsäcker

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



- Limite de stabilité

- Avant :  $E = aZ(Z-1)/A^{1/3} + bA^{2/3} + c(N-Z)^2/A$

→ relation  $E(Z,A)$  non-linéaire

- Après :  $A \rightarrow A = A_1 + A_2$

- $Z \rightarrow Z = Z_1 + Z_2$

- $E \rightarrow E_1(Z_1, A_1) + E_2(Z_2, A_2)$

- Instabilité si  $E > E_1 + E_2$

- $\Rightarrow Z^2/A > 40$  et  $A \sim 2.5 Z \Rightarrow Z > 100$  ,  $A > 250 \rightarrow$  encourageant mais à améliorer

# UNE QUESTION SIMPLE DE PLACZEK À BOHR

## ○ George Placzek (1905-1955)

- Travaux sur l'interaction de la lumière avec les gaz et liquides
- Physique des neutrons avec Bethe puis Bohr et Frisch (1935-1939)
- Directeur du groupe de théorie du laboratoire de Montréal, puis adjoint de Bethe à Los Alamos
- Membre de l'IAS de Princeton après la guerre



○ 😊 Certes, plus de soucis avec les «transuraniens» et les «mésoméries ternaires»

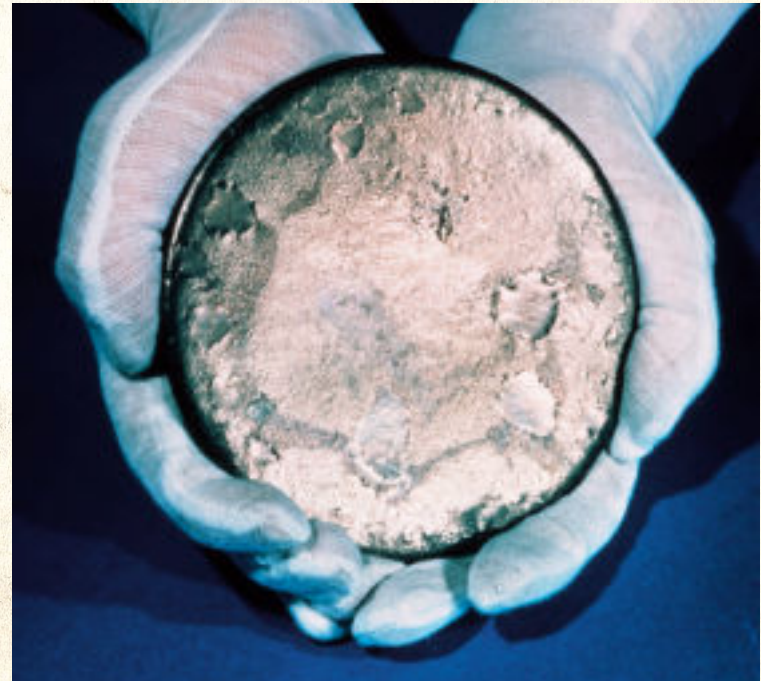
○ 😡 Mais comment le modèle de noyau composé expliquait-il que

- Thorium (90-232) et uranium (92-238) sont très semblables
- Les neutrons sont absorbés par des résonances aussi bien dans le thorium que dans l'uranium
- Le thorium n'est brisé que par les noyaux rapides
- Alors que l'uranium est brisé par les neutrons rapides ET lents
- Et la section efficace de fission ne suit pas la loi en  $1/v$

?

# URANIUM 235

- Bohr suggéra que
  - Thorium 232 et uranium 238 se comportaient en réalité de la même façon : fission exclusivement par neutrons rapides
  - Et que le comportement différent de l'uranium vis à vis des neutrons lents était dû à un *contaminant*
- **Il pensa à l'uranium 235**
- Le thorium naturel est à 100% du thorium 232
- Mais en 1935, Dempsey avait découvert un isotope inconnu de l'uranium,  $^{235}\text{U}$
- En 1938, Nier avait montré que cet isotope ne représentait qu'un noyau sur 140 dans l'uranium naturel (0,7%)
- Et en 1940, Nier montra que c'était bien  $^{235}\text{U}$  qui était fissile



# BOHR & WHEELER

SEPTEMBER 1, 1939

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 56

## The Mechanism of Nuclear Fission

NIELS BOHR

*University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, and The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

AND

JOHN ARCHIBALD WHEELER

*Princeton University, Princeton, New Jersey*

(Received June 28, 1939)

On the basis of the liquid drop model of atomic nuclei, an account is given of the mechanism of nuclear fission. In particular, conclusions are drawn regarding the variation from nucleus to nucleus of the critical energy required for fission, and regarding the dependence of fission cross section for a given nucleus on energy of the exciting agency. A detailed discussion of the observations is presented on the basis of the theoretical considerations. Theory and experiment fit together in a reasonable way to give a satisfactory picture of nuclear fission.

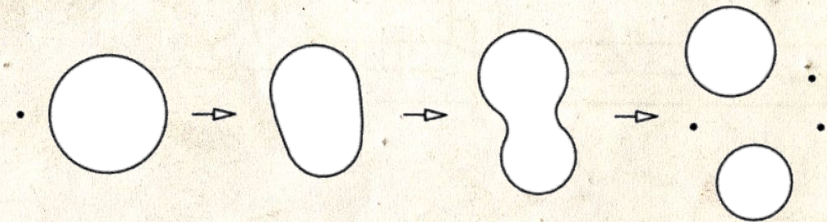


# WHEELER

- John A. Wheeler (1911-2008)
  - Théorie de la matrice S (1937)
  - Théorie de la fission avec Bohr (1939)
  - Programme Manhattan (résolut à Hanford le problème de l'empoisonnement dû au xénon 135)
  - Programme Matterhorn (bombe à hydrogène) dans les années 1950
  - Géométrodynamique (identification de l'espace et de la matière), trous noirs et trous de ver...
  - Gravitation quantique (équation de Wheeler-DeWitt)
  - Théorie de l'information

*Tout est particule → tout est champ → tout est information*

- Calcul des modes de déformation d'une goutte

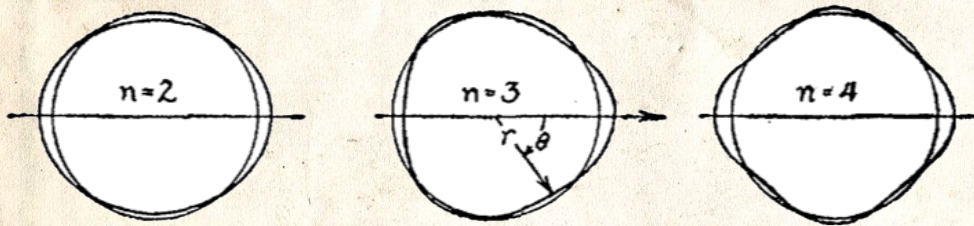


- ⇒ notion de « barrière de fission »

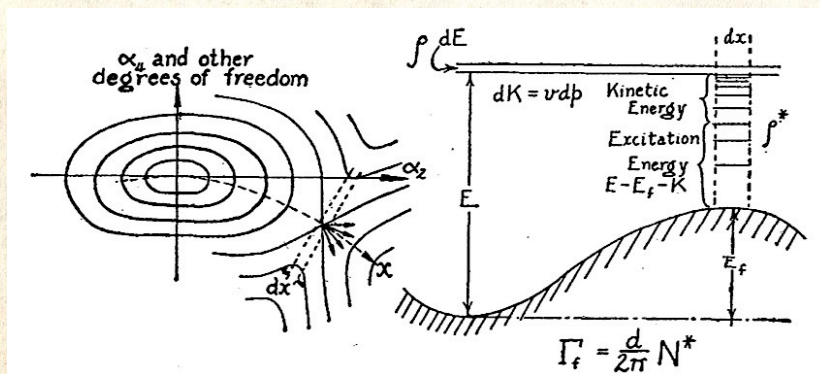


# VIBRATIONS ET RUPTURE

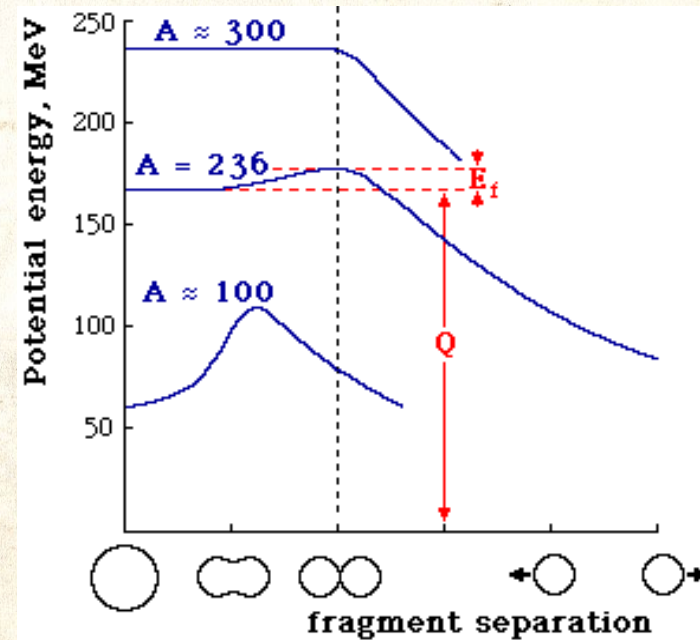
- Décomposition de la forme d'une goutte comme superposition de modes de déformation (~décomposition de Fourier)



- → calcul du potentiel nucléaire et électrostatique en fonction des paramètres de déformation



- existence d'une barrière de potentiel
  - disparaissant pour  $A > 250$
  - franchissable pour  $A > 230$  soit par effet tunnel soit par apport d'énergie (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 ( $^{238}\text{U}$ )
- **explosif** : noyau brisé par des neutrons rapides et réaction en chaîne possible ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ )
- **fissile** (sans «b») : noyau brisé par n'importe quel neutron (lent ou rapide)  $\Rightarrow$  réaction en chaîne possible ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{239}\text{Pu}$ )



# COMMENT FAIRE UNE BOMBE ?

- Sphère d'uranium de masse  $M = n_0 R_0^3 = k M_{\text{critique}}$
- $\Leftrightarrow$  rayon  $R_0 = k^{1/3} R_{c0} \sim k^{1/3} \lambda_0 = k^{1/3} / n_0 \sigma$
- Libération d'énergie  $\rightarrow$  élévation de température  $\rightarrow$  dilatation
- $\Rightarrow$  densité  $n_0 \searrow n \Rightarrow \lambda = 1/n\sigma \nearrow \Rightarrow R_c \sim \lambda \sim R^3/\sigma \nearrow$
- Le rayon critique augmente plus vite que le rayon de la sphère en expansion
- La réaction s'arrête quand ils sont égaux  $\Rightarrow R = k^{1/6} R_0$
- $k = 2 \Rightarrow k^{1/6} = 1,12$  et  $R_{c0} \sim 20$  cm  $\Rightarrow$  dilatation de 2 centimètres seulement
- Les noyaux se déplacent à  $10^6$  m/s  $\Rightarrow$  arrêt en  $10^{-8}$  s
- $\Rightarrow$  **FISSION RAPIDE EXIGÉE**

# FISSIONS ET RÉACTIONS EN CHAÎNE

- Pas de fission rapide possible avec  $^{238}\text{U}$ 
  - chaque fission libère bien entre 2 et 3 neutrons
  - **mais** seuls 20% ont une énergie > seuil (1,5 MeV) qui permet une nouvelle fission
  - $\Rightarrow \nu_{\text{effectif}} < 1 \Rightarrow$  pas de réaction en chaîne avec  $^{238}\text{U}$  **pur**
- Avec un peu de  $^{235}\text{U}$  (0,7% à 3%) la situation s'améliore
  - pas de seuil de fission pour  $^{235}\text{U} \Rightarrow$  réaction en chaîne possible
  - noyaux  $^{235}\text{U}$  rares  $\Rightarrow$  éviter capture par  $^{238}\text{U} \Rightarrow$  ralentir les neutrons en dessous de la zone de résonances (eV  $\rightarrow$  keV)  $\Rightarrow$  modérateur
  - $\Rightarrow$  intervalle de  $10^{-4}$  s entre fissions
  - $\Rightarrow$  réaction en chaîne LENTE possible («neutrons lents»)
  - (si pertes de neutrons acceptables dans le modérateur et dans  $^{238}\text{U} \Rightarrow$  choix judicieux du modérateur et de la géométrie)
- Fission rapide de  $^{235}\text{U} \Rightarrow$  uranium 235 pur ?
  - pas de seuil, peu d'absorption
  - $\Rightarrow$  divergence exponentielle et explosion
  - **mais nécessité apparente d'isoler des tonnes d'un isotope rare**

# SOULAGEMENT... PROVISOIRE

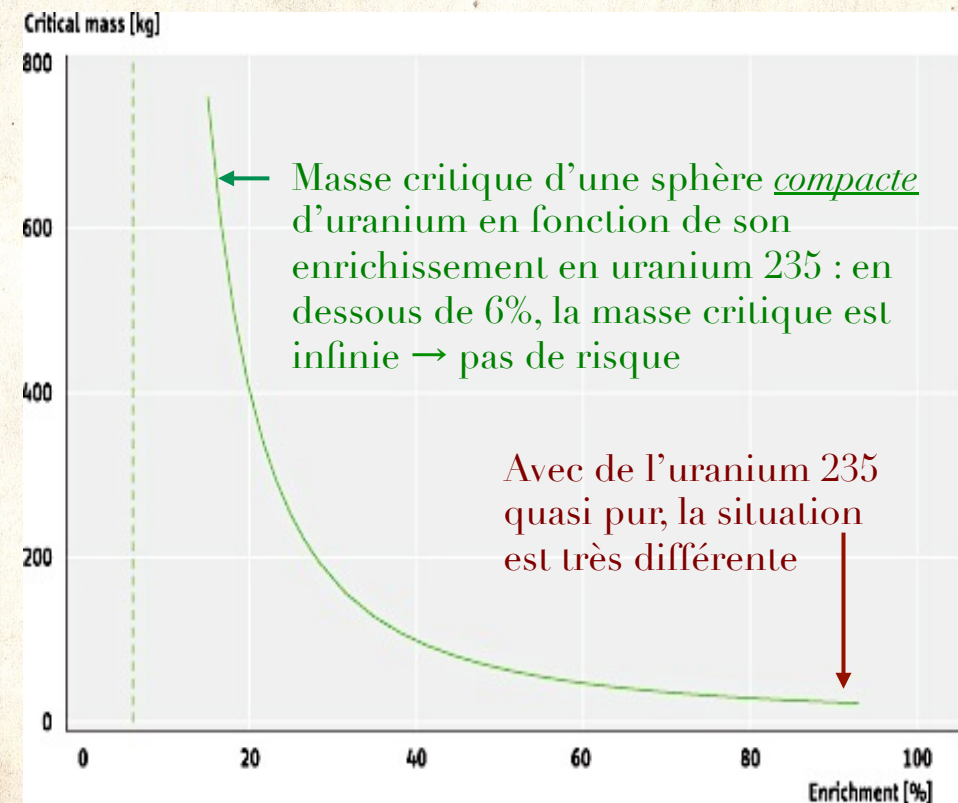
- Version erronée de la suggestion de Bohr
- fission rapide due au seul  $^{238}\text{U}$  (**inexact**) et captures → réaction convergente
- fission lente due au seul  $^{235}\text{U}$  (**exact**) → réaction divergente mais sans explosion
- ⇒ réacteur plutôt que bombe
- ⇒ Bohr, Heisenberg, Fermi (<1942) n'imaginèrent pas une bombe autrement que comme un réacteur qui s'emballerait

## Élément 94-239

De l'article de Bohr & Wheeler, on pouvait *déduire* que 94-239 serait probablement ~ stable mais fissile comme 92-235


## ○ Uranium 235 ?

- Utilisable (peut-être) pour un réacteur, **pas pour une bombe**
- « Il faudrait y consacrer toutes les ressources d'un grand pays » N. Bohr 1939



# UNE CONFUSION FRÉQUENTE

- On lisait par exemple, sur 5 colonnes à la une, dans le New York Times du 5 mai 1940 :
- « un kilo d'uranium 235 aurait la force explosive de 15 000 tonnes de TNT »
- « 5 kilos de cette substance permettraient à un cuirassé ou un sous-marin de faire le tour du monde sans ravitaillement »

- Une chose est de calculer que la fission d'un kilo d'uranium libérerait l'énergie de 15 000 tonnes de TNT
- Une autre est de parvenir à fissionner ce kilo, et une autre encore de le faire en moins d'une microseconde
-  accent sur le réacteur plutôt que sur la bombe

## VAST POWER SOURCE IN ATOMIC ENERGY OPENED BY SCIENCE

Relative of Uranium Found to  
Yield Force 5 Million Times  
as Potent as Coal

U 235

GERMANY IS SEEKING IT

Scientists Ordered to Devote  
All Time to Research—Tests  
Made at Columbia

By WILLIAM L. LAURENCE  
A natural substance found abundantly in many parts of the earth, now separated for the first time in





**UNION SOVIÉTIQUE**

# LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE EN UNION SOVIÉTIQUE

## ○ Léningrad

- → 12 mars 1939 : théorie de la fission par Yakov Frenkel (1894-1952) au *Fiztekh* d'Abraham Ioffe, partant du modèle de la goutte liquide
- → 10 avril 1939 : estimation à  $3 \pm 1$  du nombre de neutrons secondaires par Georgy Flerov (1913-1990) et Lev Rusinov à l'*Institut du Radium* de Klopine et Vernadsky
- → été 1939 : Igor Kourtchatov lança au *Fiztekh* une série d'expériences sur la fission
- → début 1940 : découverte de la fission spontanée de l'uranium par Flerov

## ○ Moscou

- → études sur la possibilité de réactions en chaîne par Yakov Zeldovitch (1914-1987) et Iouli Khariton (1904-1996) à l'*Institut de chimie-physique*



- ⇒ suggèrent en octobre 1939 l'utilisation d'eau lourde ou l'enrichissement en  $^{235}\text{U}$

# IGOR VASSILIEVITCH KOURTCHATOV (1903-1960)

- 1925 : travaux sur la radioactivité au *Fiztekh* sous la direction de Ioffe
- 1932 : cyclotron (achevé en 1939)
- 1939 : fission et réaction en chaîne
- Août 1940: projet
  - Réacteur avec 2,5 t d'oxyde d'uranium et 15 t d'eau lourde (Kourtchatov, Khariton, Flerov et Rusinov)
- Novembre 1940 : possibilité d'une arme nucléaire présentée par Kourtchatov à Moscou lors d'une conférence



- *Des calculs théoriques montrent que [...] une bombe atomique, même de petite taille, pourrait détruire une grande capitale de plusieurs millions de personnes. (Kapitsa Pravda du 13 octobre 1941)*
- Avril 1942 : Flerov nota l'absence soudaine d'articles sur la physique nucléaire dans les revues américaines et il alerta Staline
- Mai 1942 : le NKVD rassembla des informations sur les travaux britanniques et américains
- 11 février 1943 : Kourtchatov reçut la mission de réaliser une arme nucléaire

# KOURTCHATOV ET LE PROGRAMME SOVIÉTIQUE



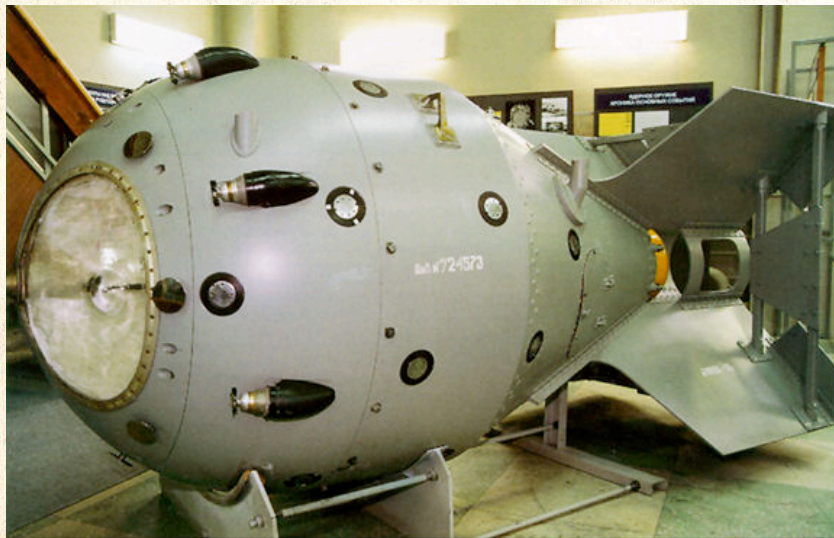
○ Kourtchatov prit la direction du *Laboratoire n°2* à Moscou (Institut Kourtchatov aujourd'hui)

« La barbe »

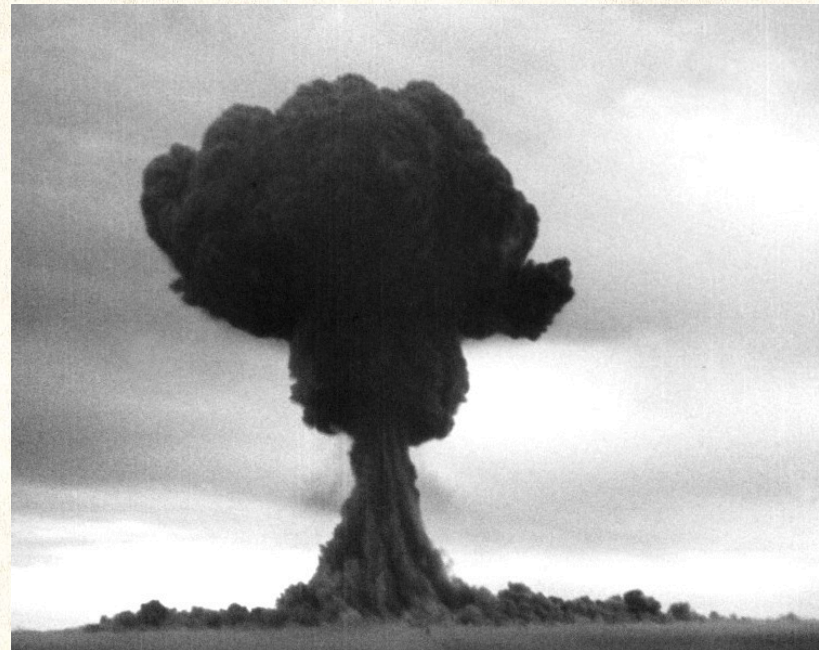
- Il monta un programme tous azimuts
  - réacteur uranium-graphite
  - réacteur à eau lourde
  - séparation isotopique  $^{235}\text{U}$
  - bombe à  $^{235}\text{U}$  (Khariton)
  - bombe à  $^{239}\text{Pu}$
- Informations régulières sur l'avancement du programme Manhattan, ce qui permit de gagner du temps
- Manque de moyens (et manque d'uranium) → progrès lents jusqu'en 1945, puis accélération brutale
- ⇒ moyens illimités (sous l'autorité de Beria)
- Construction en 1946 d'une ville secrète près de Sarov, Arzamas-16, pour Khariton
- Et de 2 autres près de Sverdlovsk pour l'uranium 235
- 1° réacteur à Moscou le 25 décembre 1945 (graphite-U naturel)
- 1° réacteur de production à Mayak (copie du réacteur B de Hanford) en juillet 1948

# ПЕРВАЯ МОЛНИЯ *Premier éclair*

- Extraction du plutonium
- (→ irradiation de nombreux ouvriers et grave pollution, sur des dizaines de kilomètres, de la rivière qui refroidissait le réacteur)
- → RDS-1 (copie de *Fat Man*)



- 29 août 1949 : première explosion nucléaire à Semipalatinsk (Kazakhstan)



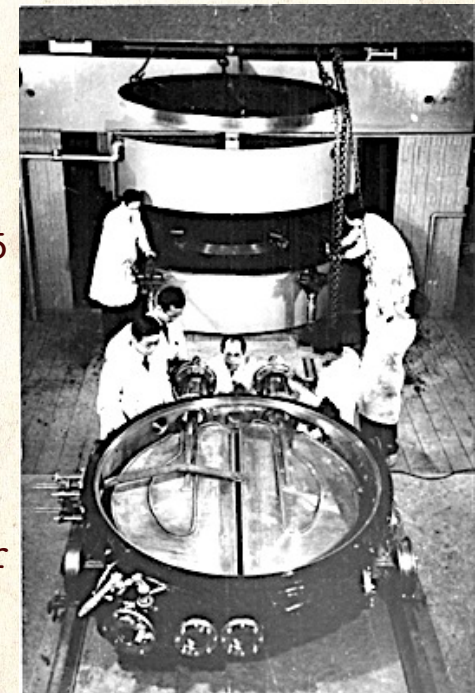
- → armement thermonucléaire (Zeldovitch, Tamm, Sakharov et Ginzburg)

# AU JAPON



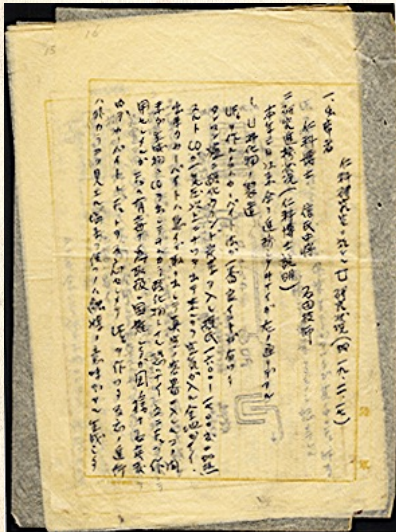
# YOSHIO NISHINA (1890-1951)

- Travailla de 1921 à 1929 à Cambridge au Cavendish, à Göttingen (→ formule de Klein-Nishina pour l'effet Compton) et à Copenhague (avec Bohr)
- De retour à Tokyo, il dirigea son propre laboratoire au Riken (理化学研究所 *Rikagaku Kenkyusho*, Institut de recherche en physique et en chimie)
- Construction d'un cyclotron de 70 cm de diamètre en 1936 (sur le modèle du 27 pouces de Lawrence)
- 1937 : début de la construction d'un cyclotron de 150 cm avec un aimant de 220 t
- Il eut Yukawa et Tomonaga parmi ses étudiants
- Après la découverte de la fission, il prit contact avec l'armée, qui lança un programme de recherches en avril 1941
- 1943 : bombe réalisable avec ~ 10 kg d'uranium 235
- Nishina modifia le cyclotron en spectromètre de masse pour séparer  $^{235}\text{U}$

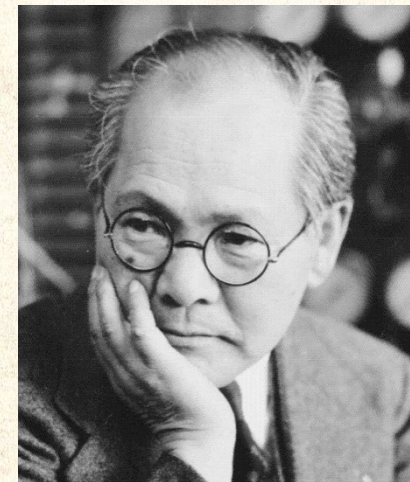


# PROGRAMMES RIVAUX

- La Marine lança un autre programme en juillet 1942 à Kyoto sous la direction de Bunsaku Arakatsu
  - objectif : un moteur naval
  - essais de séparation isotopique par centrifugation
- Mars 1943 : bilan très mitigé ⇒ décision de porter les efforts plutôt sur le radar
- Février 1944 : Nishina indiqua les difficultés du programme de séparation
  - inefficacité de la séparation électromagnétique
  - corrosion avec la séparation thermique
- 13 avril 1945 : destruction du Riken par un bombardement américain



- Août 1945 : allant à Hiroshima, Nishina et Arakatsu confirmèrent au gouvernement japonais qu'il s'agissait bien d'une arme nucléaire





# FRISCH & PEIERLS

# PRÉLIMINAIRES

- Les Britanniques avaient suivi de très près les travaux du groupe de Joliot → plusieurs équipes s'étaient lancées
  - Mark Oliphant (Birmingham)
  - George Paget Thomson (Londres)
  - Joseph Rotblat (Liverpool)
  - James Chadwick (Manchester)



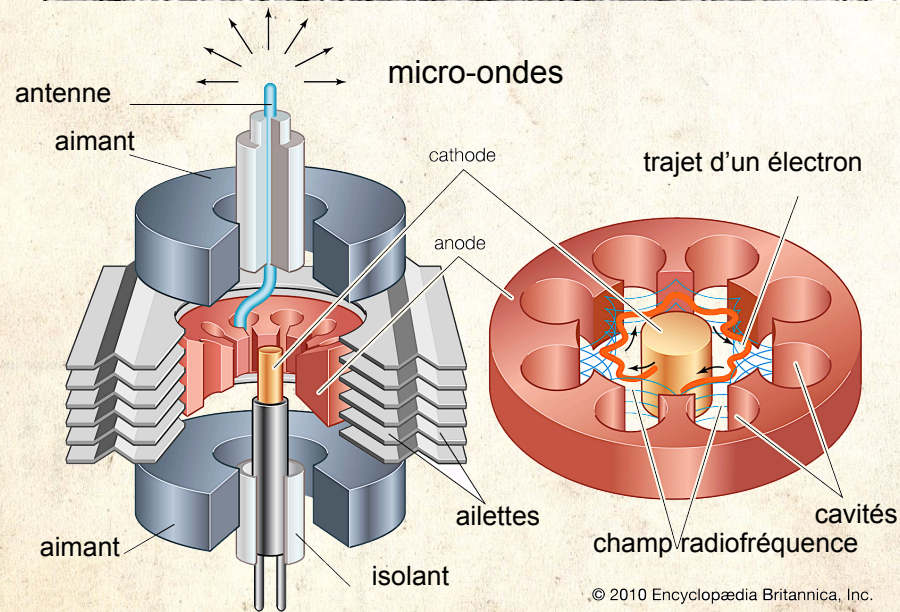
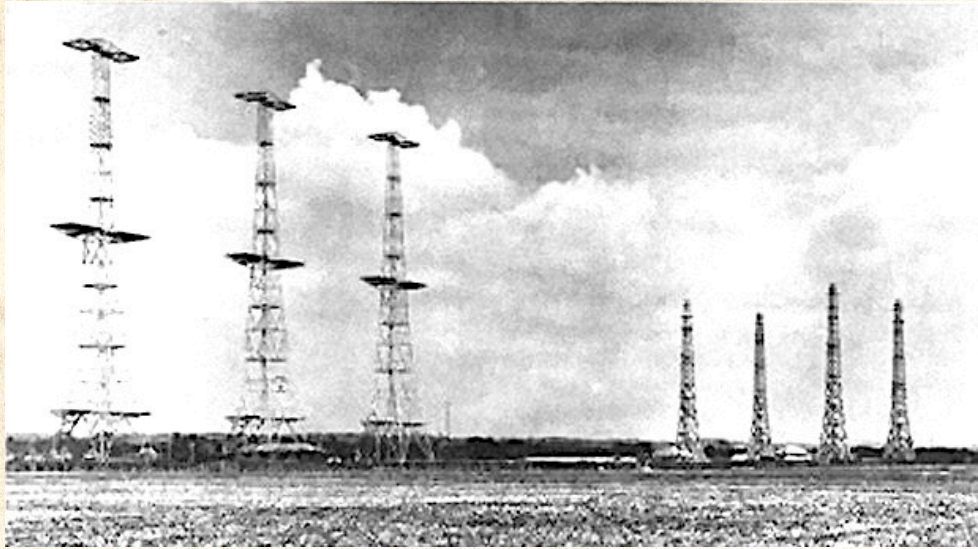
- Pacte germano-soviétique et déclaration de guerre → réorientation de l'effort scientifique vers les nécessités immédiates de défense

- → le radar, le radar, le radar



La lie de la Terre, je suppose ?  
Le bourreau sanglant des travailleurs, je présume ?

# LE RADAR ET LE MAGNÉTRON



- **Magnétron** : électrons spiralant dans un champ magnétique axial de la cathode vers l'anode, creusée de cavités résonantes
- → émission d'ondes centimétriques (GHz) avec des puissances de plusieurs kW

© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

# SIR RUDOLF PEIERLS (1907-1995)



- Pionnier de l'étude des semi-conducteurs et des électrons dans les métaux
  - S'installa en Grande-Bretagne en 1933, à Manchester (Chadwick), Cambridge, puis Birmingham (1937)
  - Travaux sur la supraconductivité puis la physique nucléaire avec Chadwick puis Frisch
  - 1939 : ressortissant étranger, n'eut pas le droit de travailler sur le radar → étude de la fission
  - Rejoignit le projet Manhattan en 1944 (Mission britannique)
  - Après la guerre, recherches en physique nucléaire (diffusion, effets collectifs), consultant du programme nucléaire civil britannique
  - Membre important du mouvement Pugwash
- ☞ **Mémoire de Frisch & Peierls**

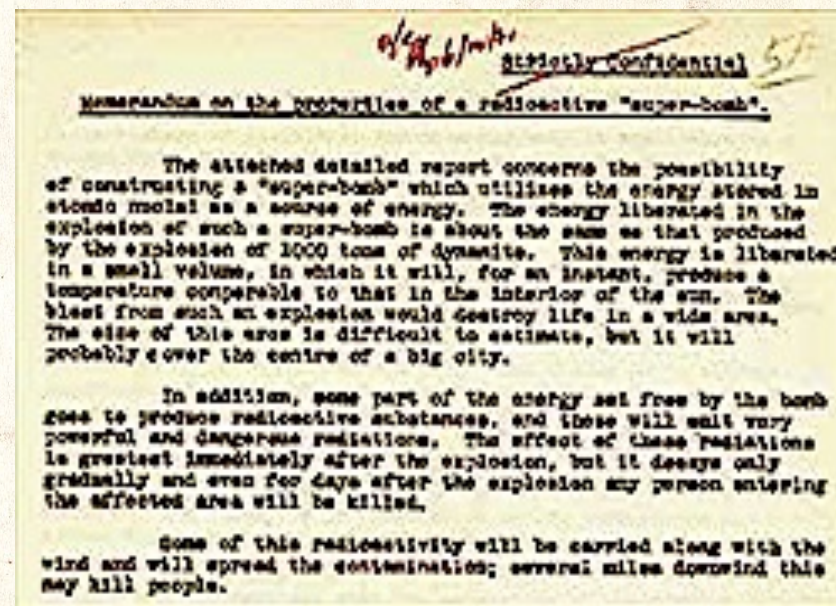
# MÉMORANDUM DE FRISCH & PEIERLS (FÉVRIER 1940)

- Trois points essentiels
  - fission rapide de l'uranium 235 pur → masse critique 600 grammes
  - méthode de diffusion thermique pour séparer  $^{235}\text{U}$  de  $^{238}\text{U}$
  - → possibilité pratique d'une arme nucléaire et conséquences politiques

- Comment arrivèrent-ils à 600 g ?

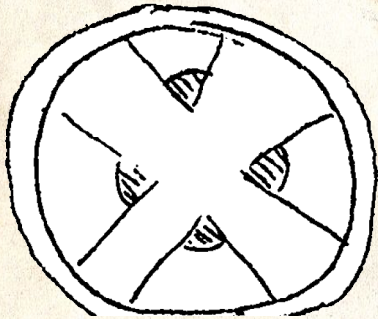
- Incertitude sur la section efficace de fission

- →  $\sigma \sim 10$  barns [en fait 1,24]
- →  $\lambda \sim 2,6$  cm [en fait 16,5 cm]
- →  $\nu = 2,3$  neutrons/fission
- ⇒  $R_c = 0.8 \lambda$  [en fait 1,5  $\lambda$ ]
- → la taille d'une balle de golf !
- →  $M_{\text{critique}} = 600$  g [en fait 50 kg]



# ASPECTS PRATIQUES

- **Assemblage** [par des ressorts] de **2 à 8** masses critiques (5 kg) d'uranium 235

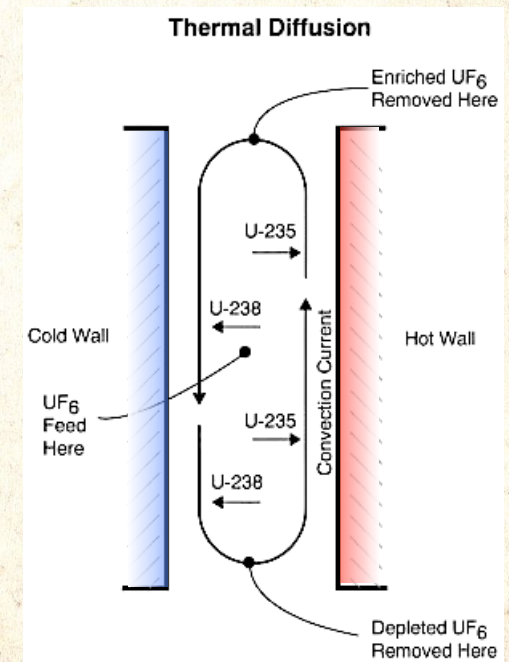


- ⇒ le volume se dilate et la réaction s'arrête quand la densité devient sous-critique
- ⇒ dilatation de 10% à 40%
- ⇒ rendement estimé de 2% à 10%
- ⇒  $8 \times 600 \times 0,1 = 480$  g de  $^{235}\text{U}$  fissionnent
- ⇒ énergie libérée  $4 \times 10^{13}$  J
- **équivalent à 10 000 t TNT**



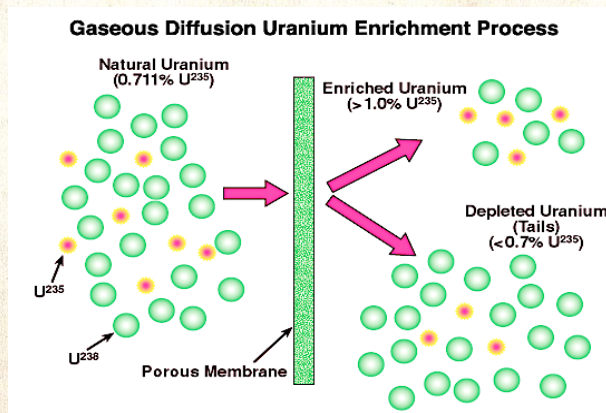
- **Séparation isotopique par diffusion thermique**

- Clusius et Dickel venaient de séparer ainsi  $^{35}\text{Cl}$  et  $^{37}\text{Cl}$
- estimation : 100 tubes de 150 cm de long et 3 cm de diamètre **en cascade** → 100 mg de  $^{235}\text{U}$  par jour
- objectif 1 bombe par mois → 100 g/jour → 1000x100 tubes → une très grande usine



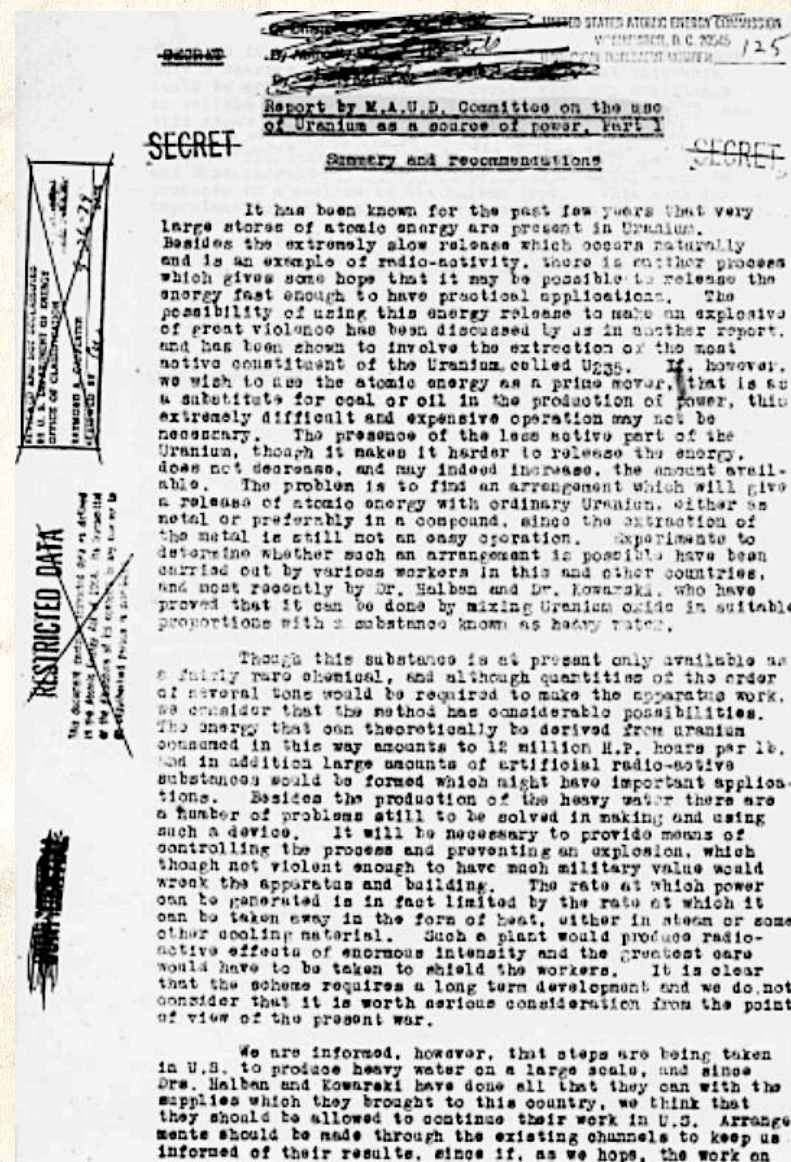
# LE COMITÉ MAUD

- Mémoire remis à Mark Oliphant en mars 1940 → sir Henry Tizard → comité MAUD
  - Thomson, Chadwick, Blackett, Cockroft, Oliphant, ~~Frisch & Peierls~~
  - → suivi des efforts allemands vis à vis de l'eau lourde
  - → suivi des déplacements des physiciens allemands (Clusius et Heisenberg en particulier)
- Réunion le 10 avril 1940
  - ↗ programme de recherche sur la fission rapide (Chadwick, Bretscher)
  - ↗ programme de recherche sur la diffusion gazeuse (Franz Simon)
- Décembre 1940 : rapport d'étape favorable
- Mars 1941 : nouvelle estimation de  $\sigma_{\text{fission}}$  → masse critique ~ 9 kg (Peierls)
- Juillet 1941 : rapports finals sur
  - **Bombe-canon à uranium 235** → délai de 3 à 4 ans
  - Réacteur à uranium naturel et eau lourde → délai de 4 à 5 ans



# TUBE ALLOYS

- Transmis aux USA, le rapport MAUD fut enterré au fond d'un coffre...
- Churchill lança le programme *Tube Alloys* le 3 septembre 1941 pour réaliser une bombe
  - nombreuses difficultés techniques
  - manque de moyens
  - ⇒ progression très lente
- Échanges Peierls-Oppenheimer en septembre 1942, puis black-out américain
- Août 1943 (conférence de Québec) → mission britannique à Los Alamos [Chadwick, Frisch, Peierls, Penney, Fuchs, Taylor...]
- 1946 : refus américain de partager leurs connaissances (loi McMahon) → programme britannique indépendant





À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!