

PETITE HISTOIRE  
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

7 – VERS UNE THÉORIE  
QUANTIQUE DU NOYAU

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

**QUANTIQUE !**

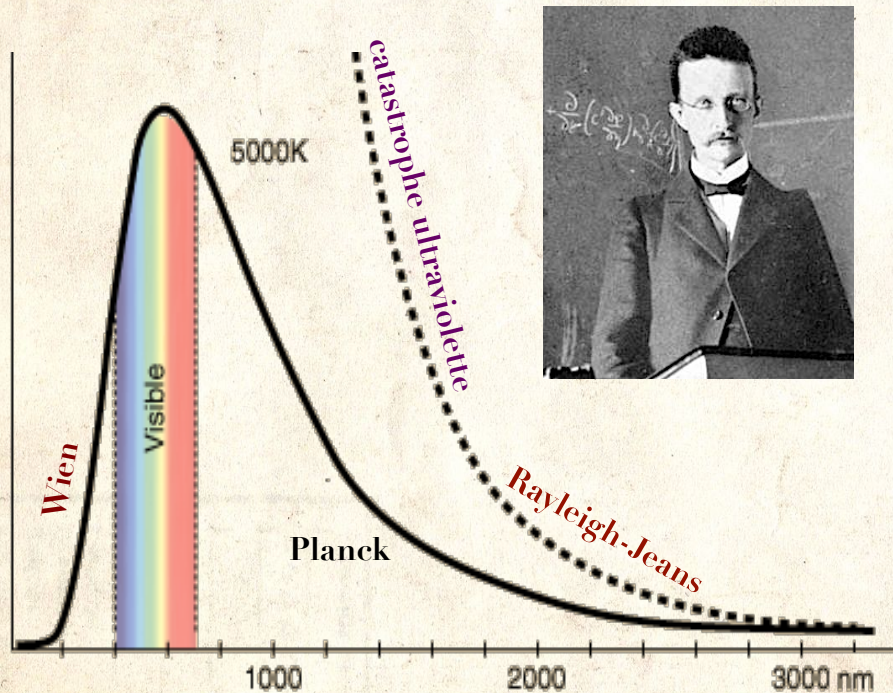


# QUANTUM DE LUMIÈRE

○ **Max Planck (1858-1947)**

○ Spectre du corps « noir »

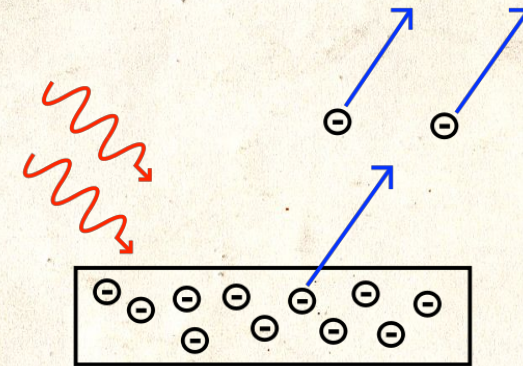
1. interpolation entre Wien et Rayleigh-Jeans
2. quantification des **échanges** d'énergie



○ **Albert Einstein (1879-1955)**

○ Effet photoélectrique (1905)

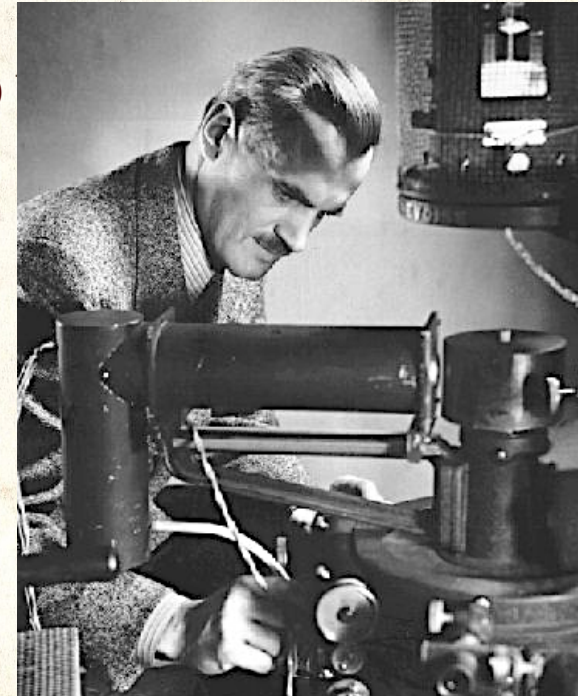
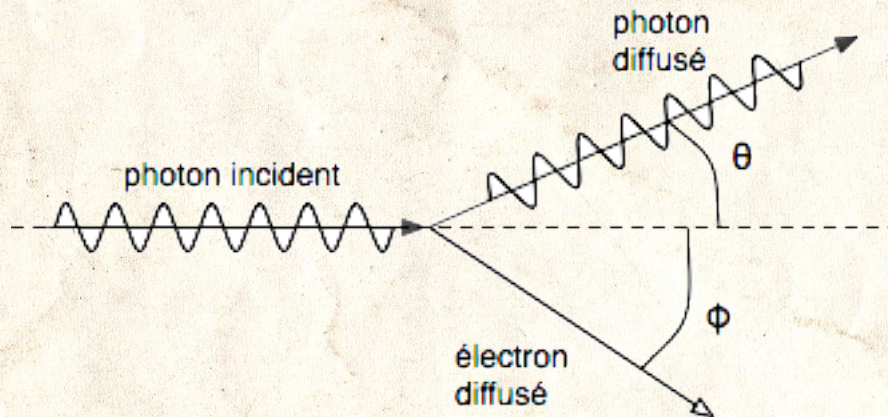
- la lumière arrache des électrons à certains matériaux



- si elle a une **fréquence**  $\nu$  minimale (indépendamment de son intensité)
- Einstein : existence **réelle** de **photons** d'énergie  $E = h \nu$  et d'impulsion  $p = h \nu / c = h / \lambda$
- → prix Nobel 1921

# LE PHOTON EST BIEN UNE PARTICULE !

- **Arthur H. Compton (1892-1962)**
- Diffusion de rayons X sur du graphite (1923)



- conservation de l'énergie et l'impulsion
- photon d'impulsion  $p = h/\lambda$
- → décalage de la longueur d'onde  $\Delta \lambda = h(1 - \cos \theta) / mc$
- → prix Nobel de physique 1927 (avec C.T.R. Wilson)

# L'ATOME DE BOHR

- **Niels Bohr (1885-1962)**
- Atome « de Bohr » (1913)
  - **Rutherford** → charge positive  
Z concentrée = noyau
  - → électrons en orbite autour  
de ce noyau
  - → énergie  $E = \frac{1}{2} E_{\text{pot}} = -Ze^2/2r$

## Quantification

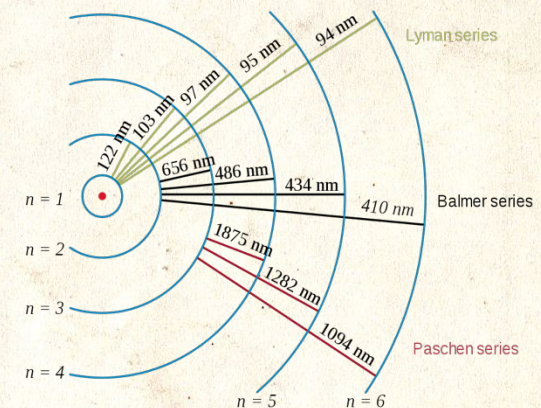
- orbites stables  $\Leftrightarrow$  moment  
angulaire quantifié

$$L \equiv mVr = n\hbar/2\pi \equiv n\hbar$$

- n = nombre quantique  
principal = 1, 2, 3...
- →  $r = n^2 \hbar^2 / Ze^2 m$
- →  $E = Z^2 e^4 m / n^2 \hbar^2$

## Atome d'hydrogène Z = 1

- →  $r_{\text{min}} = 0,0529 \text{ nm} \sim 0,5 \text{ \AA}$
- →  $E = e^4 m / n^2 \hbar^2 = [13,6 \text{ eV}] / n^2$
- $E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{électron}}$



## Spectres X de Moseley (1913)

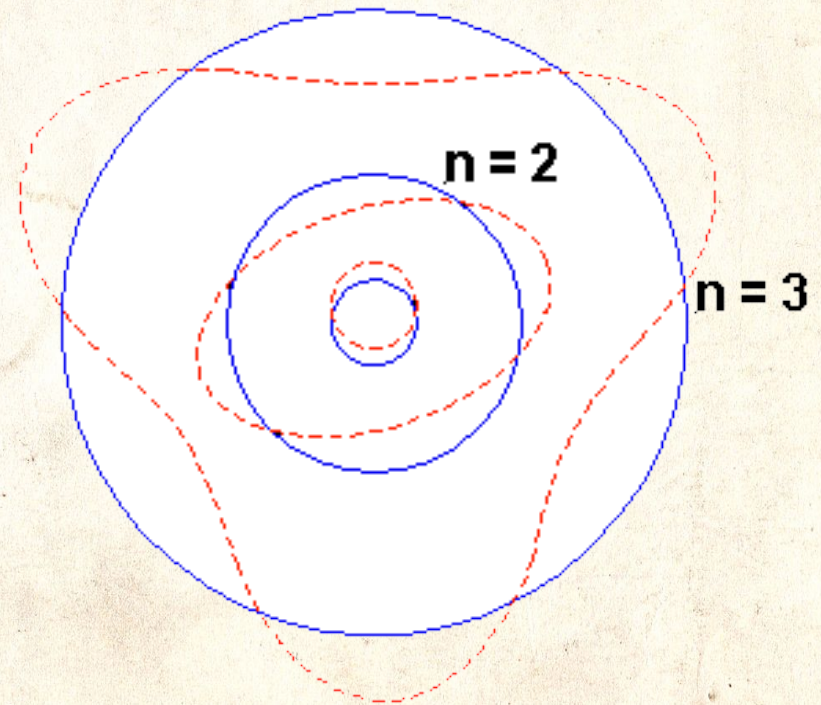
- Raie K = transition  $n \rightarrow 1$
- Énergie  $h\nu = Z^2 e^4 m / \hbar^2 [1 - 1/n^2]$
- (en fait il y a déjà un électron  
sur la couche  $n=1 \Rightarrow Z \rightarrow Z-1$ )

# L'ÉLECTRON EST-IL UNE ONDE ?

- **Louis de Broglie (1892-1987)**
- L'électron est une onde (1924)  
→ prix Nobel de physique 1929
- → longueur d'onde  $\lambda = h/mv$
- longueur d'onde de *de Broglie*
- par analogie avec le photon où  $\lambda = h/p$  ( $p$ =impulsion)



- Quantification de Bohr
  - moment angulaire  
 $L \equiv mvr = n\hbar/2\pi \equiv n\hbar$
- → orbite de Bohr  $\Rightarrow 2\pi r = n\lambda$
- $\Rightarrow$  **onde stationnaire**



# L'ÉLECTRON EST BIEN UNE ONDE !

- Davisson et Germer (1927)
  - diffusion d'électrons sur un cristal

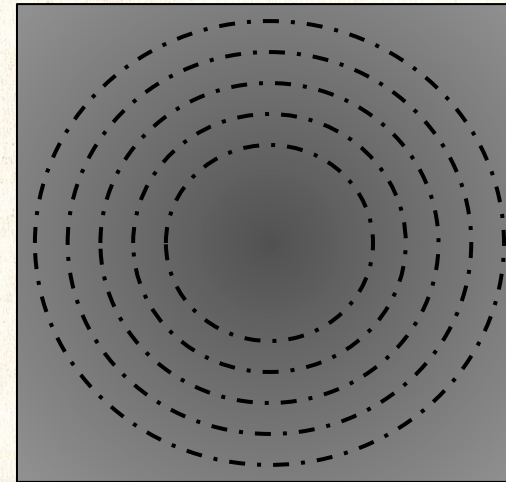
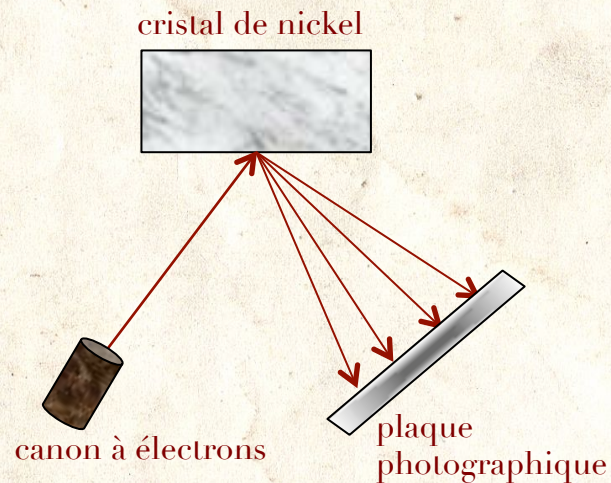


Figure de diffraction

- → relation de Bragg  $n\lambda = 2d \sin\theta$  et figures de diffraction de von Laue
- ⇒ **diffraction des électrons**
- George Paget Thomson (fils de J.J. Thomson)
  - → Davisson et Thomson reçurent le prix Nobel de physique 1937

# MÉCANIQUE ONDULATOIRE

## ○ Erwin Schrödinger (1887–1961)



- Onde  $\Psi(x,t) \Rightarrow$  équation d'onde
- Équation de Schrödinger (1926)

$$i\hbar \partial\Psi/\partial t = H\Psi$$

- $H =$  opérateur hamiltonien
- $H\Psi = -\hbar^2/2m \partial^2\Psi/\partial x^2 + V(x)\Psi$   
dérivée seconde  $\uparrow$  potentiel  $\uparrow$
- $\rightarrow$  prix Nobel 1933 (avec Dirac)

## ○ Max Born (1882–1970)

- Interprétation de l'amplitude de la fonction d'onde  $\Psi$  comme une probabilité (1926)
- ou plus exactement de  $|\Psi|^2$



- Albert Einstein : calcul des probabilités des transitions entre niveaux d'énergie de l'atome de Bohr (1917)
- $\rightarrow$  prix Nobel de physique 1954



# APPLICATIONS DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE

## ○ Équation de Schrödinger

$$i\hbar \partial\Psi/\partial t = H\Psi$$

$$H\Psi = -\hbar^2/2m \partial^2\Psi/\partial x^2 + V(x)\Psi$$

## ○ Équation linéaire en $\Psi$

### ○ $\Rightarrow$ **superposition**

○ solution  $\Psi_1$

○ solution  $\Psi_2$

○  $\rightarrow \Psi_1 + \Psi_2$  est solution

○

$$|\Psi_1 + \Psi_2|^2 \neq |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$$

○  $\Rightarrow$  **interférences**

○  $\rightarrow$  paradoxe du « chat de Schrödinger »



## ○ Pas d'interaction $\Leftrightarrow V = 0$

$$\circ \Rightarrow \Psi = \Psi_0 \exp i\{px \pm Et\}/\hbar$$

○  $\rightarrow$  ondes planes

• impulsion  $p = mV$

• énergie  $E = p^2/2m = \frac{1}{2} mV^2$

## ○ Atomes

○ Potentiel électrostatique

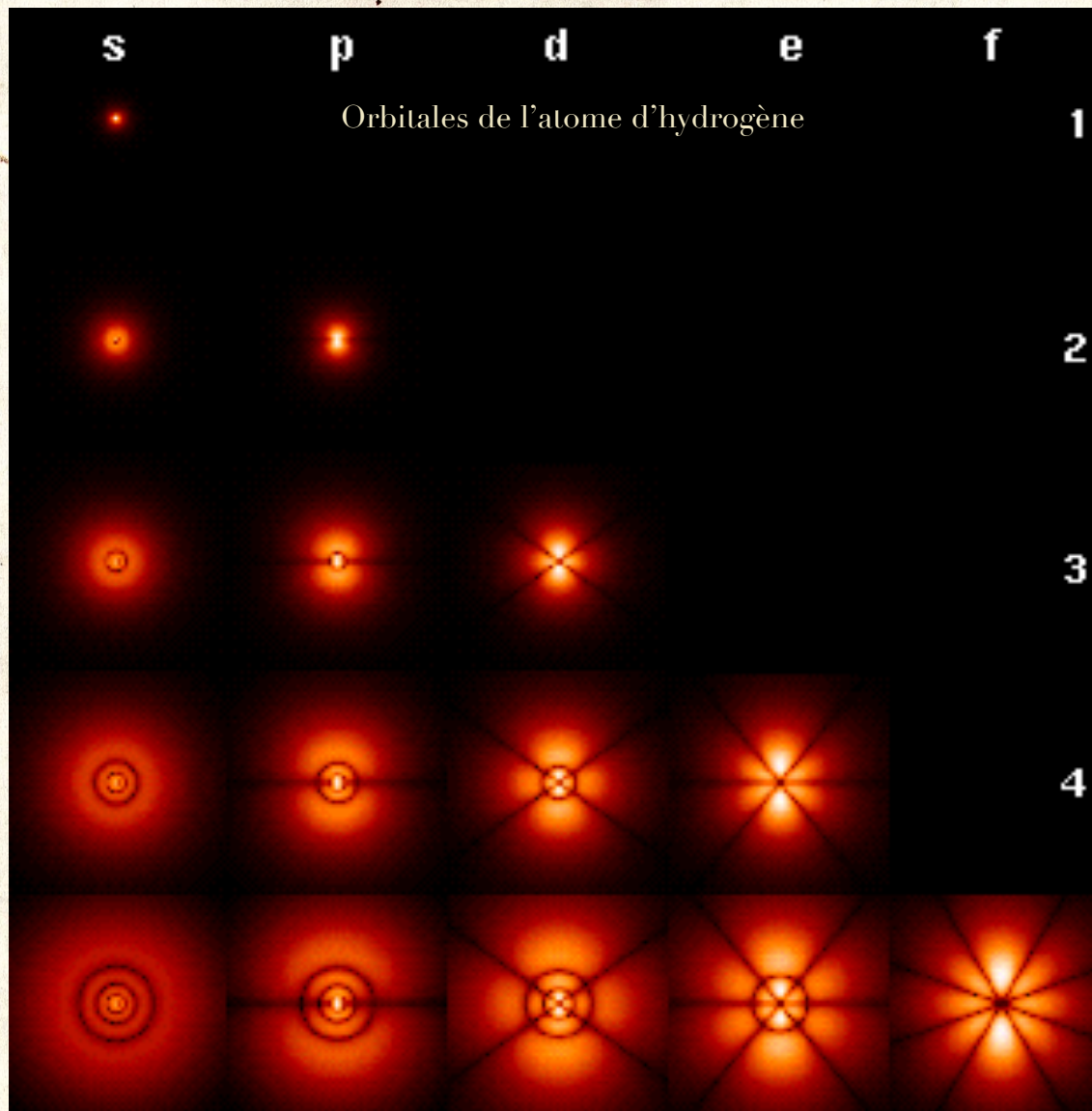
$$\circ V(r) = Ze^2/r$$

○  $\Rightarrow$  orbite  $\rightarrow$  orbitale

○  $\Rightarrow$  niveaux d'énergie et probabilités de transition de l'hydrogène (et des atomes hydrogénoïdes)

○  $\Rightarrow$  (**avec approximations**) niveaux d'énergie et probabilités de transition des atomes et des molécules

# ORBITALES



# MÉCANIQUE DES MATRICES: HEISENBERG, BORN & JORDAN

## ○ Werner Heisenberg (1901-1976)

### ○ Raisonnement diamétralement opposé

○ N'entrent dans la théorie que les notions observables (→ pas d'orbite)

○ Observables :

position    impulsion    énergie    ...

$x_1$	$p_1$	$E_1$
$x_2$	$p_2$	$E_2$
$x_3$	$p_3$	$E_3$
...	...	...

○ Quantités dignes d'intérêt : les *transitions* de  $x_1$  à  $x_2$ , ou de  $E_2$  à  $E_3$ ...

○ → Heisenberg en arriva en 1925 à des tableaux de transitions

○ **Born** y reconnut des *matrices*

## ○ Opérateurs matriciels

$$\begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \end{matrix} = \begin{matrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \\ \dots & \dots & \dots \end{matrix} * \begin{matrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \dots \end{matrix}$$

○  $X = A Y$

○ Mais deux matrices A et B ne commutent généralement pas

○ → relations de commutation

○  $XP - PX = i\hbar I$

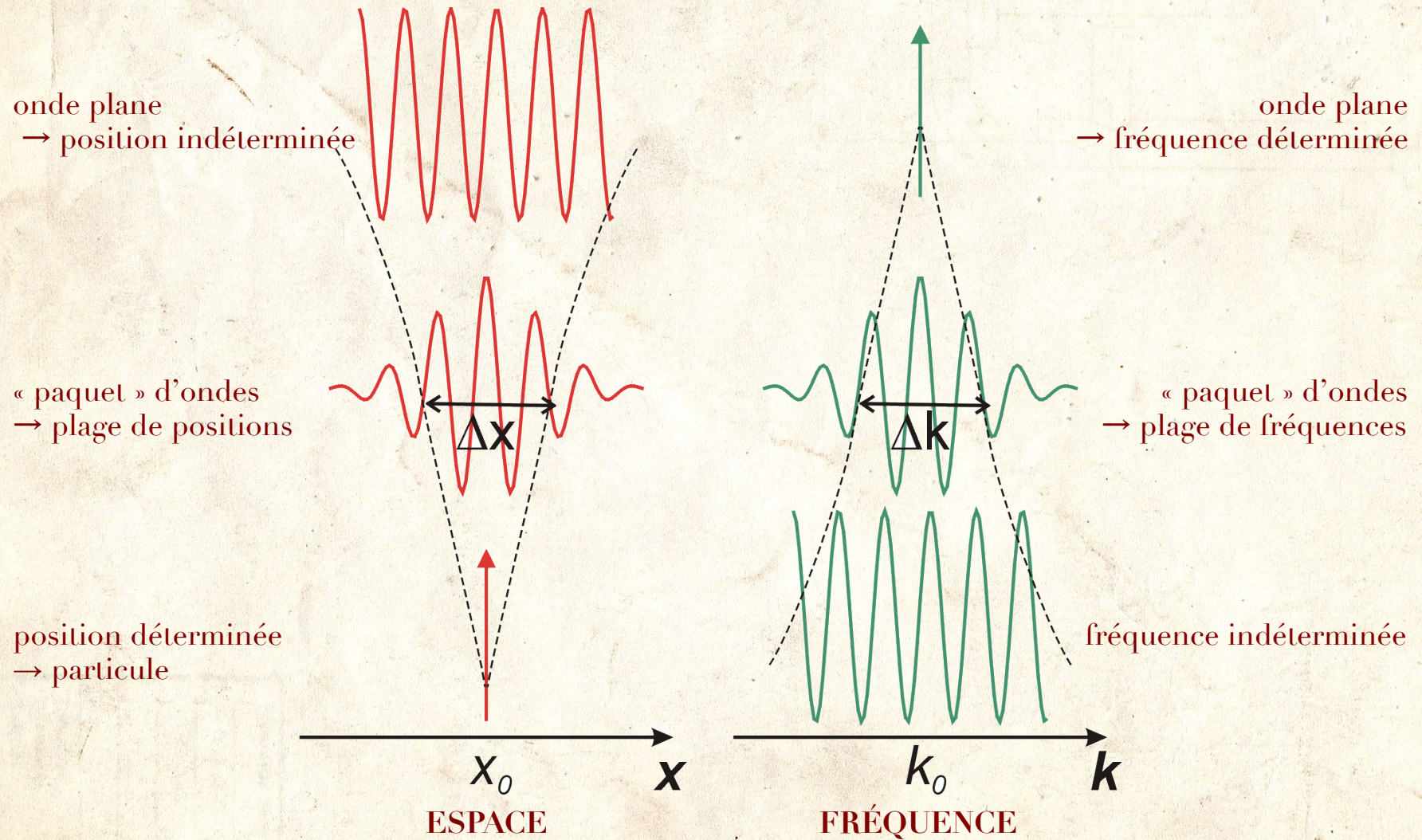
○ → inégalités

○  $\Delta x \cdot \Delta p > \frac{1}{2} \hbar$

○ Prix Nobel 1932



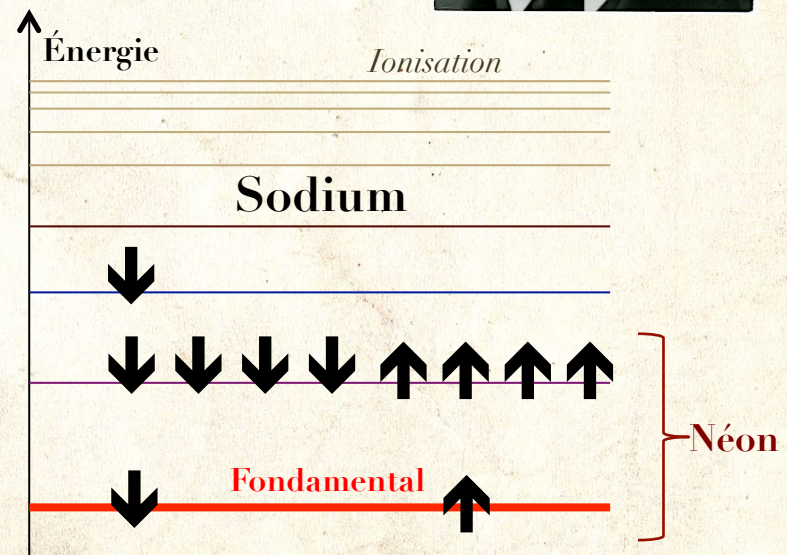
# INÉGALITÉS DE HEISENBERG $\Leftrightarrow$ ONDES



# WOLFGANG PAULI ET STRUCTURE ATOMIQUE



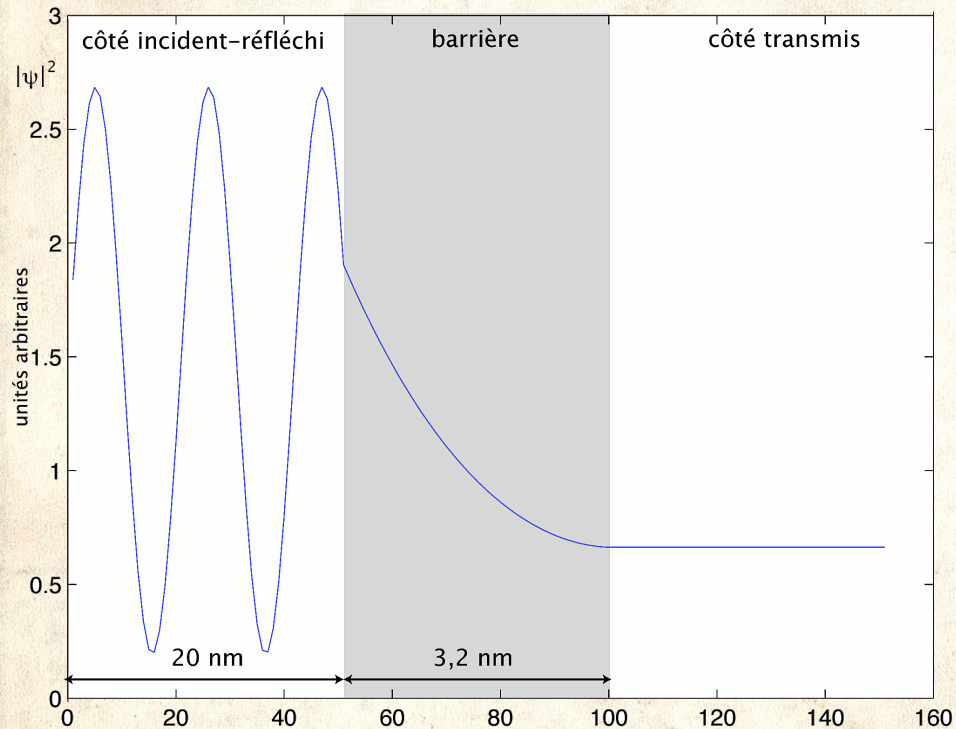
- Permutations et *statistiques* quantiques
  - Bose-Einstein  $\psi(1,2) = \psi(2,1)$
  - Fermi-Dirac  $\psi(1,2) = -\psi(2,1)$   
(seules possibilités)
- **Principe de Pauli (1925) : 2 fermions ne se trouvent jamais dans le même état quantique**
- → Explication de la structure atomique
  - les électrons ne peuvent pas tous être dans l'état d'énergie minimale
  - ils occupent des orbitales d'énergie de plus en plus élevée
  - → explication du tableau de Mendeleiev
  - avec 2 orientations possibles du **spin** (Pauli 1924)



# EFFET TUNNEL

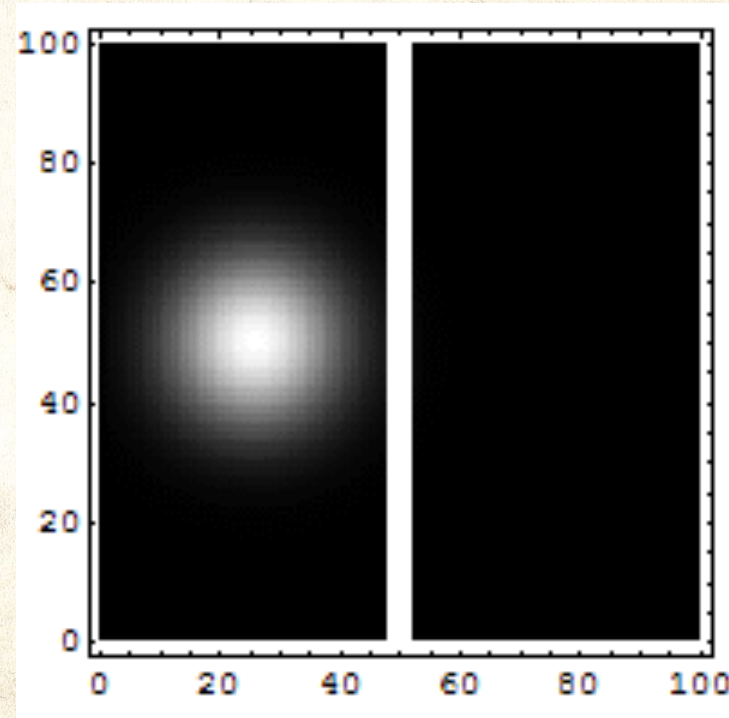
## ○ Effet tunnel

- Onde arrivant devant une barrière de potentiel
- Avant : sinusoïde ( $e^{ipx}$ )
- Pendant : exponentielle ( $e^{-px}$ )



## ○ Fonction d'onde d'un électron

- L'essentiel est réfléchi
- Une partie est transmise

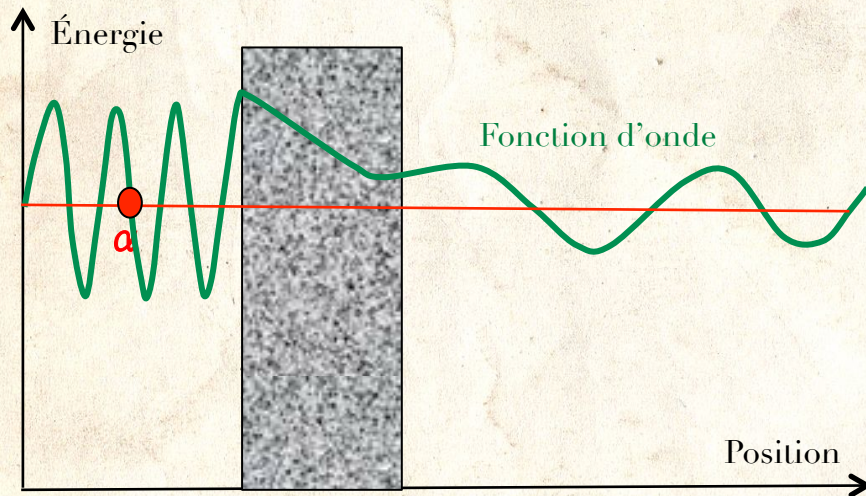


© J.C. Benoist

# ÉMISSION ALPHA

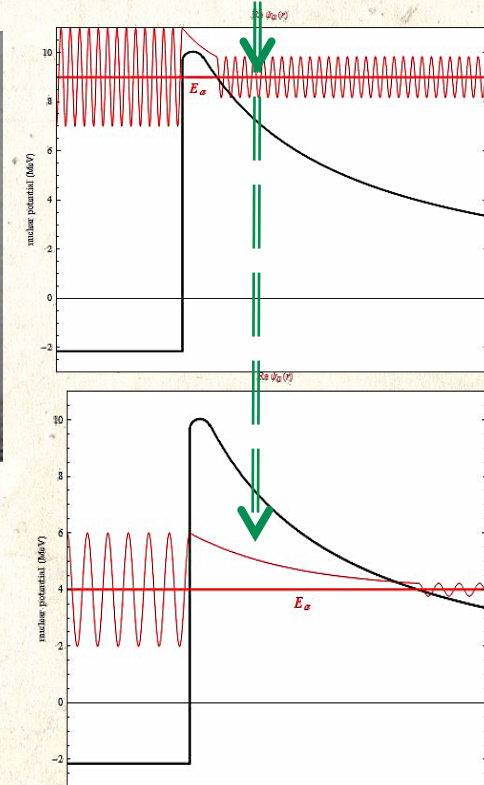
○ **George Gamow (1904–1968)**

○ *Zur Quantentheorie des Atomkernes (1928)*



- L'alpha préexiste dans le noyau
- Il est retenu par un puits de potentiel
- Il traverse la barrière par effet tunnel

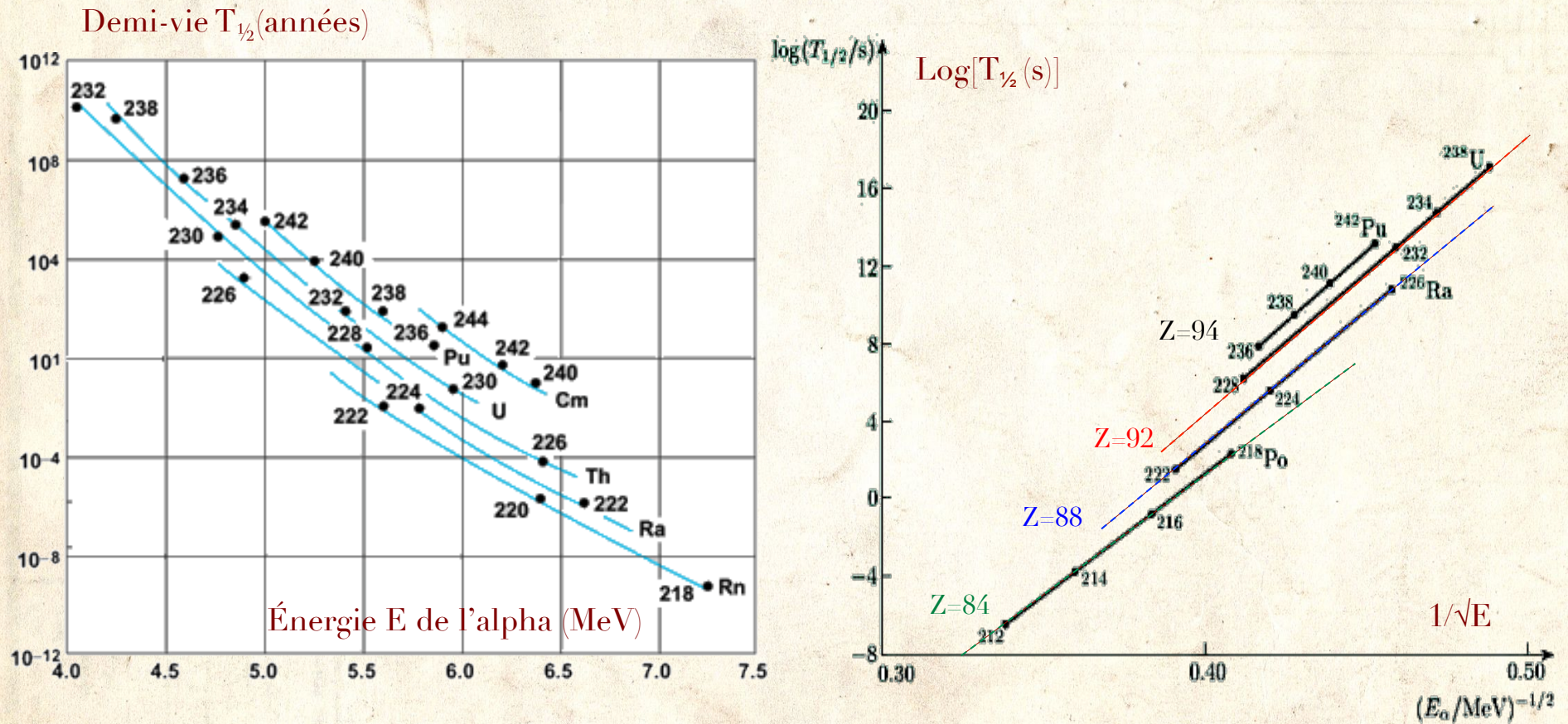
○ ⇒ décroissance exponentielle de la fonction d'onde



○ ⇒ loi empirique de Geiger et Nuttall (1911)

# Loi de Geiger-Nuttall : demi-vie $\sim \exp\{Z/\sqrt{E}\}$

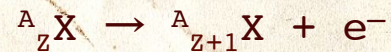
- La demi-vie  $T_{1/2}$  par transmutation alpha d'un élément radioactif diminue très vite quand l'énergie de l'alpha augmente



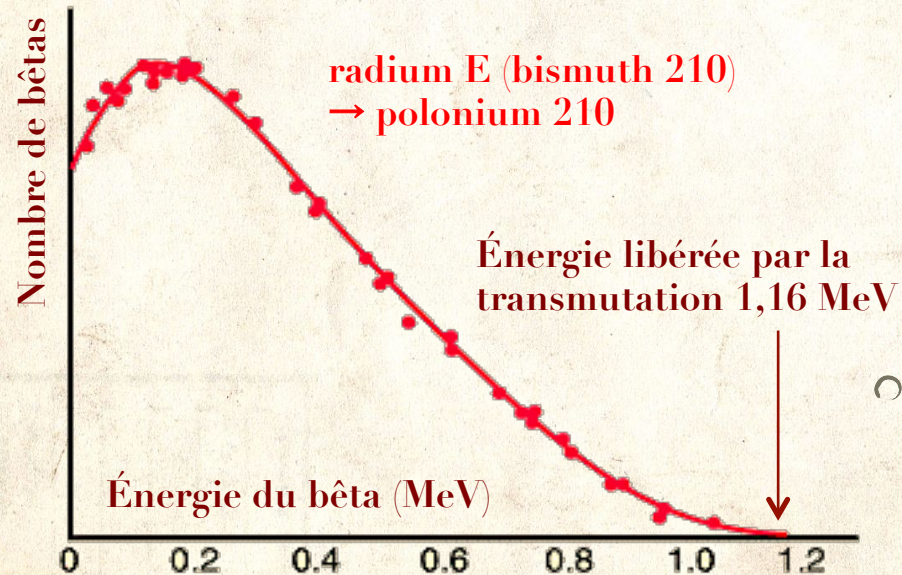


# TRANSMUTATION BÊTA ET NEUTRINO

- Transmutation bêta



- L'énergie de l'électron (particule bêta) a une distribution continue (Hahn et Meitner 1911, Chadwick et Geiger 1914)



- L'énergie ne serait donc pas conservée ?

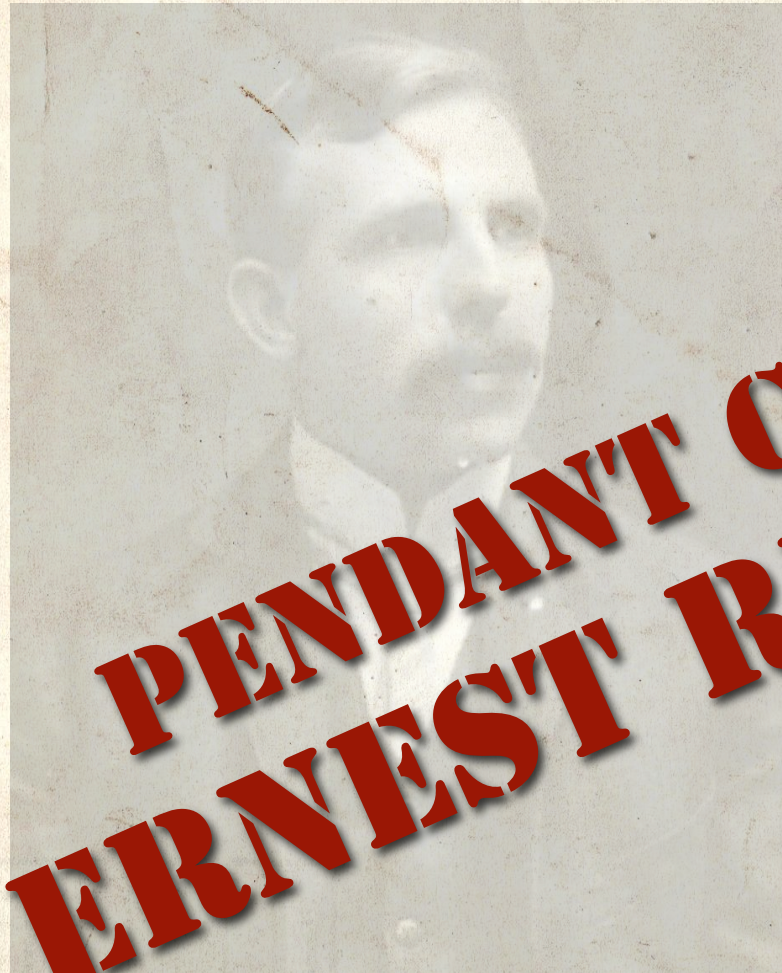
- Suggestion de Bohr

- « *Chers dames et messieurs radioactifs...* »

- Lettre de Wolfgang Pauli le 4 décembre 1930 à plusieurs collègues (dont Lise Meitner et Hans Geiger) suggérant l'existence d'une nouvelle particule, le neutron

1. électriquement neutre
2. plus légère que l'électron
3. emportant l'énergie manquante

- Rebaptisée *neutrino* par Fermi



**PENDANT CE TEMPS LÀ  
ERNEST RUTHERFORD**

# ÉLÉMENTS POUR UN MODÈLE DU NOYAU

- Le **numéro atomique Z** indique la charge positive  $+Ze$  du noyau [*van den Broek 1911, Moseley 1914*]
- La **masse atomique A** (en unités de la masse de l'hydrogène) est à peu près le **double** du numéro atomique Z
- Un même élément chimique peut exister sous formes d'isotopes dont la masse atomique A diffère [*Soddy 1911*]
  
- Radioactivité alpha → il y a des particules alpha (noyaux d'hélium) dans certains noyaux
- Radioactivité bêta → il y a des particules bêta (électrons) dans certains noyaux

# UNE IDÉE DE RUTHERFORD

**We haven't the money,  
so we've got to think**

Rutherford

- **A ~ 2 Z**
- En 1911, Rutherford suggéra que les noyaux étaient peut-être des **assemblages de particules alpha** (A=4, Z=2)
- Mais beaucoup d'éléments s'écartent de ce modèle
  - Charges électriques impaires
  - Masses des éléments lourds  $> 2 * \text{charge électrique}$
- **Peut-être un modèle mixte: héliums + autre chose ?**

# UNE AUTRE IDÉE DE RUTHERFORD (ET D'AUTRES...)

- **Tous les noyaux sont des assemblages de noyaux d'hydrogène ( $A=1$ ,  $Z=1$ )**
- Alors un noyau de masse  $A$  est formé par  $A$  noyaux d'hydrogène
- Mais cela donne une charge électrique  $+Ae$  et non  $+Ze$
- Il faut donc ajouter  $A-Z$  charges négatives, donc  $A-Z$  électrons
- *Cohérent avec l'émission d'électrons par les noyaux dans la radioactivité bêta*
- Deux conséquences
  1. il devrait y avoir des noyaux d'hydrogène dans tous les noyaux
  2. il devrait exister un mécanisme séparant les  $Z$  électrons « périphériques » des  $A-Z$  électrons « nucléaires »

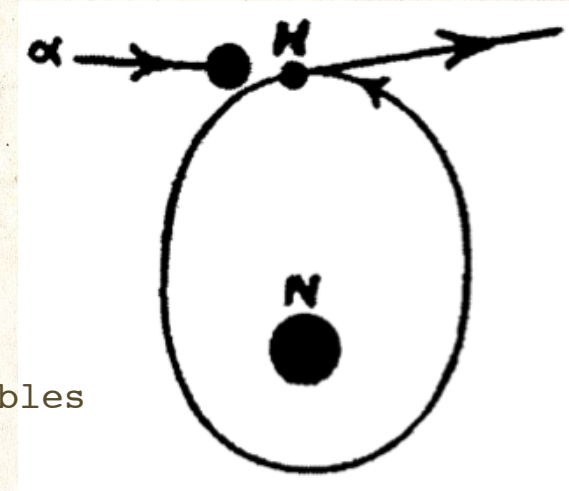
# UNE NOUVELLE BIZARRERIE EXPÉRIMENTALE

- Avec Marsden, Rutherford bombardait en 1915 de l'hydrogène avec des particules alpha (source = radon)
- observation de reculs de l'hydrogène
- mais Marsden signala une émission d'hydrogène par le radon *avant* le remplissage de la chambre en hydrogène
- Rutherford ne crut pas à une nouvelle forme de radioactivité, mais plutôt à une contamination de l'appareillage par l'hydrogène
- Il nota en 1917-1918 que s'il remplissait la chambre d'oxygène ou de gaz carbonique, le nombre de scintillations attribuables à l'hydrogène diminuait, comme il s'y attendait
- Mais il augmentait quand la chambre était remplie d'air et plus encore d'azote



# LE PROTON

- Interprétation de Rutherford en 1919
  - Carbone: masse atomique 12 = 3 alphas
  - Oxygène: masse atomique 16 = 4 alphas
  - Mais azote: masse atomique 14 = 3 alphas + 2 hydrogènes périphériques, facilement arrachables
- Il pensait avoir observé la réaction  
 $\text{alpha} + \text{azote} \rightarrow \text{hydrogène} + \text{carbone} + \text{alpha}$

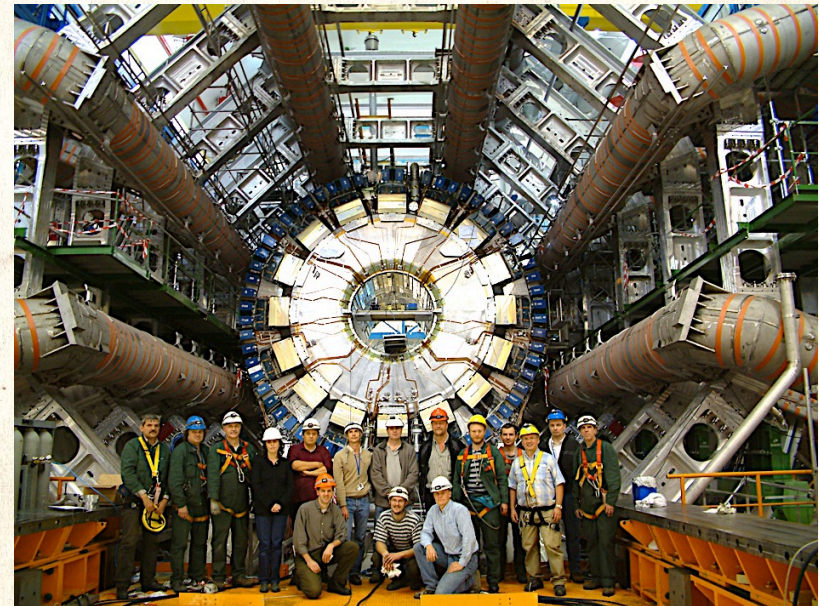
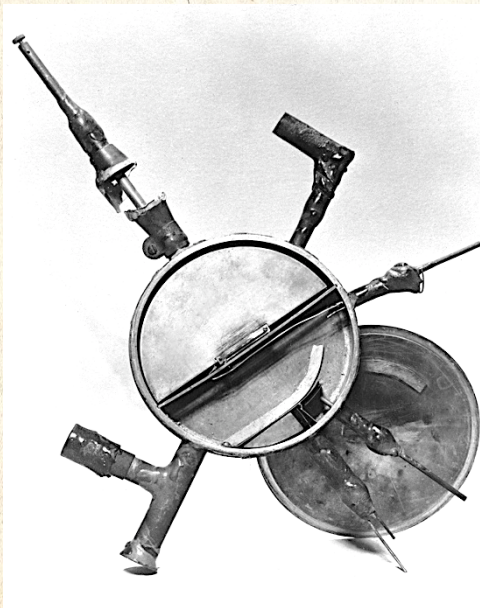


« We must conclude that the nitrogen atom is disintegrated under the intense force developed in a close collision with a swift alpha particle, and that the hydrogen atom which is liberated formed a constituent part of the nitrogen nucleus. »

E. Rutherford, *Philosophical Magazine* June 1919

# CONSÉQUENCE 1

- **Les transmutations nucléaires ne sont pas limitées aux éléments lourds radioactifs**
- Les collisions d'alphas permettent de sonder en profondeur les noyaux, pas seulement le cortège des électrons
  - une nouvelle technique de recherche s'ouvrait
  - limitée par la faible énergie des alphas
  - d'où le développement des accélérateurs

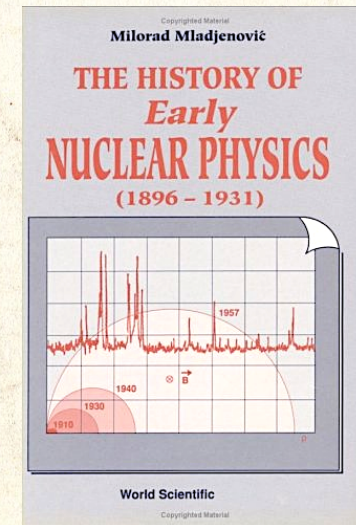
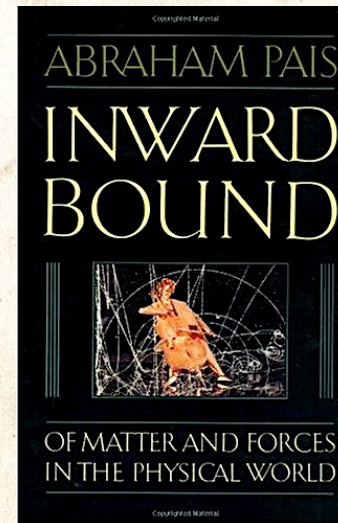




# CONSÉQUENCE 2

- **Il y a bien des noyaux d'hydrogène dans le noyau d'azote**
    - En 1920, Rutherford les baptise proton (du grec  $\pi\rho\acute{\omega}\tau\omicron\nu$  premier)
    - Les expériences de Rutherford valident - apparemment - l'image du noyau comme un assemblage de
      - A protons
      - A-Z électrons « nucléaires »
- } associés de préférence en sous-structures alpha

- Nombreux modèles qualitatifs pour rendre compte des régularités empiriques
  - Peu prédictifs
  - En conflit avec la mécanique quantique



# LE « NEUTRON » DE RUTHERFORD

- Rutherford (Conférence Bakérienne *Nuclear Constitution of Atoms*, 1920)
  - Bilan – et perspectives – des bombardements de noyaux par des  $\alpha$
  - Noyau d'azote ( $Z = 7$ ) formé d'un cœur de 3 alphas, plus un proton isolé «satellite», éjecté dans une collision avec un alpha
  - Masse  $A = 14 \rightarrow$  un deuxième proton additionnel ?
  - Et la charge électrique ?
- Rutherford suggère la 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 développée par G. Gamow, W.D. Harkins et d'autres dans les années 1920
  - Possibilité envisagée d'un «diplon» ( $\rightarrow {}^2\text{H}$ ) et d'un «triplon» ( $\rightarrow {}^3\text{H}$ )
- Recherche infructueuse de ce «neutron» par Chadwick, 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»?

# DIFFICULTÉS AVEC LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

## ○ Inégalité de Heisenberg (1927)

- Deux quantités complémentaires (p.e. position  $x$  et impulsion  $p$ ) ne peuvent pas être mesurées simultanément
- Cela entraîne une inégalité sur la dispersion des mesures de  $x$  et de  $p$

$$\Delta x \cdot \Delta p > \frac{1}{2} \hbar$$

Un électron « enfermé » dans un noyau de taille  $10^{-14}$  m devrait de ce fait posséder une énergie  $> 100$  MeV alors que les bêtas ont rarement plus de 1 ou 2 MeV

## ○ Moments angulaires

- Les moments angulaires sont quantifiés (en unités  $\hbar \equiv h/2\pi$ )
- Les moments orbitaux sont des entiers
- Le proton et l'électron ont un moment intrinsèque (spin)  $\pm \frac{1}{2} \hbar$  [1927]
- Donc un nombre impair de protons et d'électrons a nécessairement un moment angulaire total (orbital + intrinsèque) demi-entier
- Le noyau d'azote 14 a un moment angulaire total égal à 1 [Rasetti 1929]
- Or il est censé être formé de 14 protons et 7 électrons

À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!