

Bienvenue au cours de ...

Physique Nucléaire

Prof. Olivier Schneider

Laboratoire de physique des hautes énergies

Site web du cours:

<https://moodle.epfl.ch/user/index.php?id=18593>

OS, 10 septembre 2025

1



OS, 10 septembre 2025

2

Contenu du cours

- Introduction
- Modèles simples du noyau
 - formule semi-empirique de la masse
 - gaz de Fermi
 - instabilités nucléaires
- Nature des forces nucléaires
 - deuton, isospin
- Parité
- Modèles à particules indépendantes
- Modèle en couches
 - interaction spin-orbite
 - propriétés des noyaux (spin, propriétés électromagnétiques, ...)
- Réactions nucléaires
 - théorie quantique de la diffusion
 - développement en ondes partielles, résonances

OS, 10 septembre 2025

3

Organisation

- Horaire

Semaine	Mercredi 13:15–15:00		Mercredi 15:15–17:00	
1	10.09.2025	cours	CE1 105	
2	17.09.2025	cours	CE1 105	17.09.2025 cours ELD 020
3	24.09.2025	exercices	CE1 105	
4	01.10.2025	cours	CE1 105	01.10.2025 exercices ELD 020
5	08.10.2025	cours	CE1 105	
6	15.10.2025	cours	CE1 105	15.10.2025 exercices ELD 020
Interruption				
7	29.10.2025	cours	CE1 105	
8	05.11.2025	cours	CE1 105	05.11.2025 exercices ELD 020
9	12.11.2025	cours	CE1 105	
10	19.11.2025	cours	CE1 105	19.11.2025 exercices ELD 020
11	26.11.2025	cours	CE1 105	
12	03.12.2025	cours	CE1 105	03.12.2025 exercices ELD 020
13	10.12.2025	cours	CE1 105	
14	17.12.2025	cours	CE1 105	17.12.2025 exercices ELD 020

– assistants: Kerim, Anni, Samuel, Théau

- Toutes les infos toujours à jour sur le site Moodle:
 - <https://moodle.epfl.ch/user/index.php?id=18593>
 - + forum de questions/réponses sur le cours et les exercices

OS, 10 septembre 2025

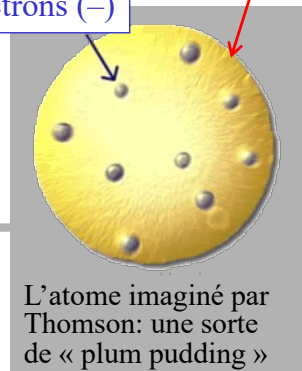
4

Vers la découverte du noyau des atomes

- 1895: découverte des rayons X (Roentgen)
- 1896: découverte de la radioactivité (Becquerel)
- 1897: découverte de l'électron (Thomson)
- 1900: trois types différents de radioactivité connus: α , β , γ
- 1902: radioactivité $\beta \equiv$ émission d'électrons (Kaufman)
- 1903: premier modèle de l'atome (Thomson)
- 1908: radioactivité $\alpha \equiv$ émission d'hélium (Rutherford)
- 1909: expérience de diffusion de particules α sur des feuilles d'or (Rutherford, Marsden, Geiger), menant à des observations incompatibles avec le modèle de Thomson !
- 1911: vision révolutionnaire de l'atome (Rutherford)

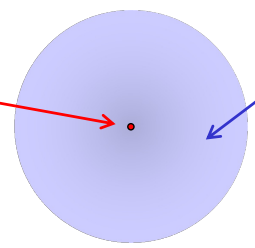
boule uniformément chargée (+), $\sim 10^{-10}$ m

électrons (-)



L'atome imaginé par Thomson: une sorte de « plum pudding »

noyau (+) très petit, $\sim 10^{-14}$ m au plus, portant plus de 99.9% de la masse de l'atome

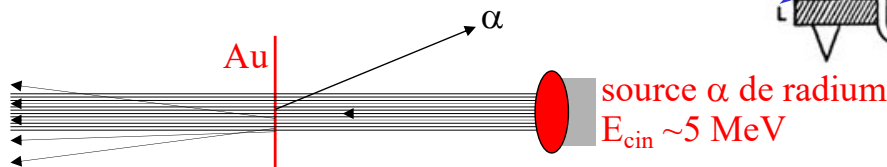


nuage d'électrons (-), $\sim 10^{-10}$ m

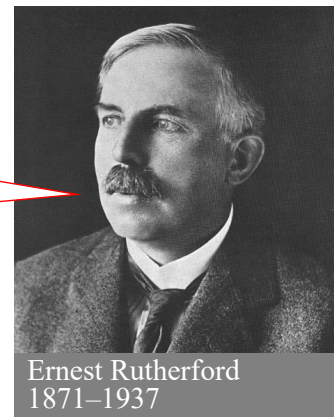
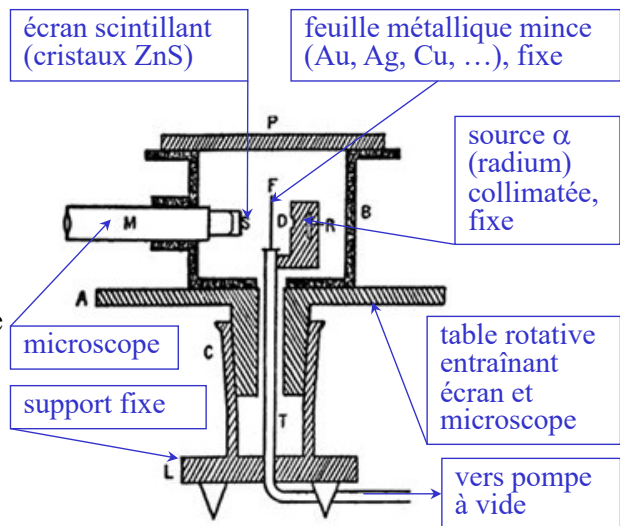
L'atome contient donc essentiellement du « vide »

Rétrodiffusion de Rutherford

- Résultats:
 - La plupart du temps la particule α n'est que très peu déviée en traversant la feuille (voire pas du tout)
 - Elle a pourtant une probabilité non nulle de rebondir vers l'arrière !



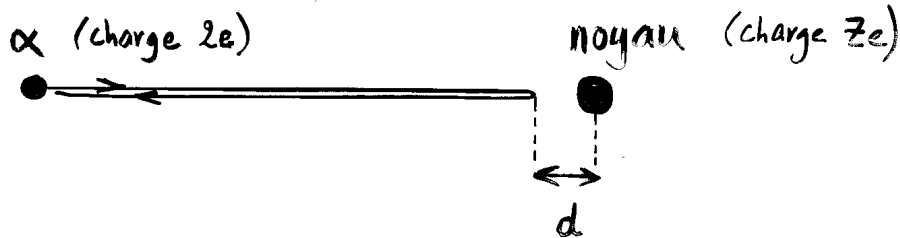
It was quite the most incredible event that has ever happened in my life. It was as incredible as if you fired a 15-inch shell on a piece of tissue paper and it came back and hit you



- Conclusion:
 - présence dans la matière de très petits objets chargés plus massifs que les particules α , donc autres que les électrons ($m_\alpha \sim 8000 m_e$): les noyaux atomiques !

Limite supérieure à la taille des noyaux (Rutherford)

Cas d'une diffusion à 180°
(paramètre d'impact nul)



vitesse v

$$E_{tot} = E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$$

vitesse = 0

$$E_{tot} = E_{pot} = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 d}$$

Conservation énergie:

$$d = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E_{cin}} = 2Z \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \cdot \frac{\hbar c}{E_{cin}} \sim 2Z \cdot \frac{1}{137} \cdot \frac{197 \text{ MeV fm}}{5 \text{ MeV}} \approx 0.575 Z \text{ fm}$$

Constantes et unités

à savoir
par coeur

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \cong \frac{1}{137}$$

constante de structure fine

$$\hbar c \cong 197 \text{ MeV fm}$$

constante de Plank réduite

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

Fermi (= femtomètre)

$$m_p c^2 \cong 938 \text{ MeV}$$

masse du proton

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

électron-volt

$$m_e c^2 \cong 0.511 \text{ MeV}$$

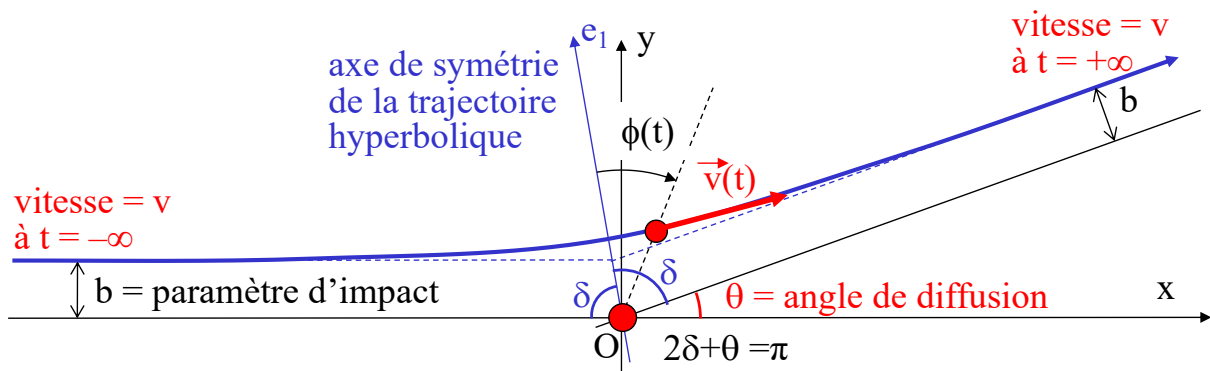
masse de l'électron

$$\begin{aligned} 1 \text{ keV} &= 10^3 \text{ eV} \\ 1 \text{ MeV} &= 10^6 \text{ eV} \\ 1 \text{ GeV} &= 10^9 \text{ eV} \\ 1 \text{ TeV} &= 10^{12} \text{ eV} \end{aligned}$$

Diffusion élastique de Rutherford

- **Diffusion coulombienne élastique de deux charges ponctuelles**

- projectile (particule α) = charge ponctuelle ze , de masse m et vitesse v
- cible (noyau) = charge ponctuelle Ze , sans recul (masse infinie)
- diffusion élastique (pas d'excitation du projectile ou de la cible)
- mécanique classique (non-relativiste)
- seule force en jeu = force de Coulomb = $(zZe^2)/(4\pi\epsilon_0 r^2)$
 - force centrale \rightarrow conservation du moment cinétique (par rapport au noyau)
 - force conservative \rightarrow conservation de l'énergie mécanique



OS, 10 septembre 2025

9

Diffusion élastique de Rutherford

- **Section efficace différentielle de diffusion coulombienne élastique de deux charges ponctuelles**
(\propto probabilité de déviation du projectile d'un angle θ)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{zZe^2}{16\pi\epsilon_0 E_{\text{cin}}} \cdot \frac{1}{\sin^2(\theta/2)} \right)^2$$

Formule de Rutherford

voir exercices

- ze = charge du projectile ($z=2$ pour une particule α)
- Ze = charge de la cible (noyau)
- θ = angle de diffusion
- $E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} mv^2$

Pour tenir compte du recul du noyau:

m = masse réduite

v = vitesse relative

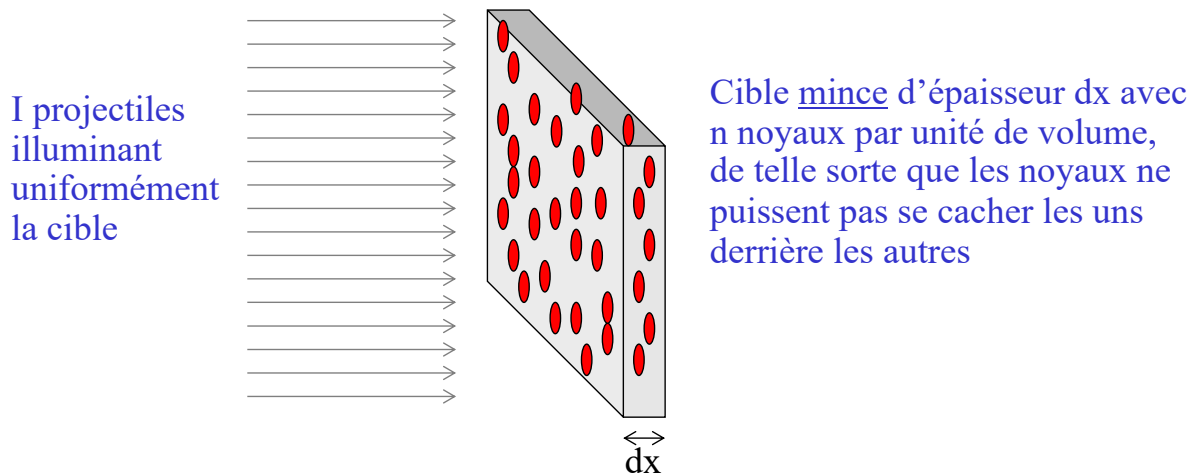
θ = angle de diffusion dans le centre de masse

- Dépendances en $1/\sin^4(\theta/2)$ et en $\sim(\text{masse atomique})^2$ vérifiées expérimentalement par Geiger et Madsen
 - mais déviations observées pour des cibles de petits Z (avec $d \lesssim 4$ fm) ...

OS, 10 septembre 2025

10

Section efficace totale



- Nombre d'interactions $-dI$ (>0) dans la cible proportionnel à I , n , dx
 - Section efficace totale
$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{-dI}{I n dx}$$
 - Probabilité d'interaction
$$\text{prob} = \frac{-dI}{I} = \sigma_{\text{tot}} n dx$$
- σ_{tot} a la dimension d'une aire (1 barn = 10^{-28} m²)
- σ_{tot} = probabilité d'interaction d'un projectile sur une cible contenant un noyau par unité de surface

OS, 10 septembre 2025

11

Sections efficaces partielles

- Plusieurs réactions possibles
 - $p + C \rightarrow a_1 + R_1$ réaction 1 élastique avec $a_1=p$ et $R_1=C$
 - $p + C \rightarrow a_2 + R_2$ réaction 2 inélastique
 - $p + C \rightarrow a_3 + R_3$ réaction 3 inélastique
 - ...
- Section efficace partielle σ_i = probabilité de produire la réaction i au moyen d'un projectile sur une cible contenant un noyau par unité de surface

• On a
$$\sigma_{\text{tot}} = \sum_i^n \sigma_i$$

– en particulier
$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{élastique}} + \sigma_{\text{inélastique}}$$

OS, 10 septembre 2025

12

Section efficace différentielle

- Réaction i: $p + C \rightarrow a_i + R_i$

$$d\sigma_i = \left\{ \begin{array}{l} \text{prob. de produire la réaction i avec un projectile sur} \\ \text{une cible contenant un noyau par unité de surface} \\ \\ \text{et} \\ \\ \text{que la particule } a_i \text{ soit émise dans l'angle solide } d\Omega \end{array} \right.$$

- Section efficace différentielle

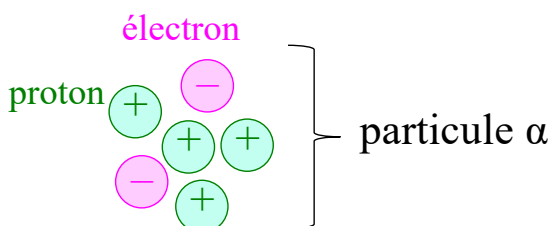
$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega} = \text{fonction de } \theta \text{ et } \varphi$$

ne dépend que de θ
si p et C sont non polarisés

$$\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \frac{d\sigma_i}{d\Omega} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi = \sigma_i$$

Premier modèle du noyau

- “The nucleus, though of minute dimensions, is in itself a very complex system consisting of positively and negatively charged bodies, bound closely together by intense electrical forces”
E. Rutherford, Scientia 16 (1914) 337
- “It is anticipated that the helium nucleus (i.e. the α particle) contains four positive electrons (H particles) and two negative”
E. Rutherford, Phil. Mag. 27 (1914) 488



Pour un noyau (Z, A):
A protons et A-Z électrons

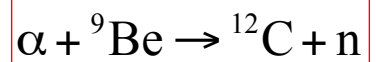
→ modèle simple, “évident”, expliquant la désintégration β

Découverte du neutron

- “I think we shall have to make a real search for the neutron”

Chadwick à Rutherford en 1924

- dès 1920: idée de l’existence du “neutron”, comme un état très lié d’électron et d’une particule H (Rutherford)
- 1930: Bothe et Becker découvrent une “nouvelle radiation” (α du Po sur Be)
- janvier 1932: les Joliot-Curie observent que cette radiation éjecte des protons de la paraffine
- février 1932: Chadwick montre qu’elle est formée de particules neutres de même masse que le proton



- “The neutron may be pictured as a small dipole, or perhaps better, as a proton embedded in an electron”

Chadwick, avril 1932

Une conception moderne du noyau

- “The Attractions of Gravity, Magnetism, and Electricity, reach to very sensible distances, and so have been observed by vulgar Eyes, and there may be others which reach to so small distances as hitherto escape Observation”

Isaac Newton (1642–1727)

- Noyau de nombre de masse A: Z protons + (A–Z) neutrons
- Pour décrire ce noyau, deux nouvelles interactions:
 - **interaction nucléaire forte, pour assurer la cohésion**
 - **interaction nucléaire faible, pour expliquer la désintégration β**
- Les noyaux (comme les protons et neutrons) sont très petits, 1–6 fm
 - décrits par la mécanique quantique

Sondes

- Aujourd'hui comme au temps de Rutherford

étude expérimentale d'un petit objet
=
étude de collisions entre un projectile et cet objet

- Condition sur la longueur d'onde de De Broglie du projectile

$$\lambda = h/p \approx \text{dimension objet à étudier}$$

- Projectiles (sondes) les plus énergétiques:

Accélérateur	Projectiles	Energie de faisceau	λ
LEP 2 @ CERN	e^-, e^+	~ 100 GeV	$\sim 10^{-17}$ m
Tevatron @ Fermilab	p, \bar{p}	~ 900 GeV	$\sim 10^{-18}$ m
LHC @ CERN, 2025	p	6.8 TeV	$\sim 10^{-19}$ m

Large Hadron Collider (2009–2041)

