

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, 11 septembre 2024

1



OS, 11 septembre 2024

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, 11 septembre 2024

3

Organisation

• Horaire

Semaine	Mercredi 13:15–15:00			Mercredi 15:15–17:00		
1	11.09.2024	cours	CE1 105			
2	18.09.2024	cours	CE1 105	18.09.2024	exercices	CM1 121
3	25.09.2024	cours	CE1 105			
4	02.10.2024	cours	CE1 105	02.10.2024	exercices	CM1 121
5	09.10.2024	cours	CE1 105			
6	16.10.2024	cours	CE1 105	16.10.2024	exercices	CM1 121
Interruption						
7	30.10.2024	cours	CE1 105			
8	06.11.2024	cours	CE1 105	06.11.2024	exercices	CM1 121
9	13.11.2024	cours	CE1 105			
10	20.11.2024	cours	CE1 105	20.11.2024	exercices	CM1 121
11	27.11.2024	cours	CE1 105			
12	04.12.2024	cours	CE1 105	04.12.2024	exercices	CM1 121
13	11.12.2024	cours	CE1 105			
14	18.12.2024	cours	CE1 105	18.12.2024	exercices	CM1 121

– assistants: Rita Silva, Pierre Mayencourt, Eliot Bornand

- 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, 11 septembre 2024

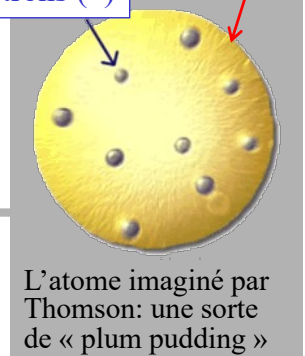
4

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)

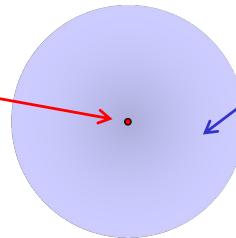
boule uniformément chargée (+), $\sim 10^{-10}$ m

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

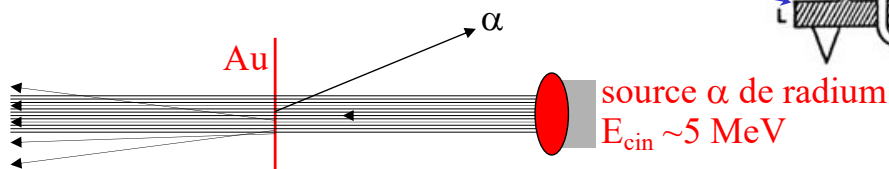
L'atome contient donc essentiellement du « vide »

OS, 11 septembre 2024

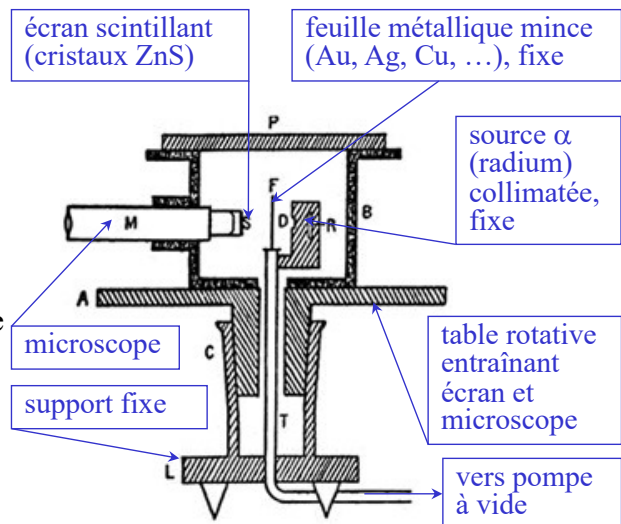
5

Rétrodiffusion de Rutherford

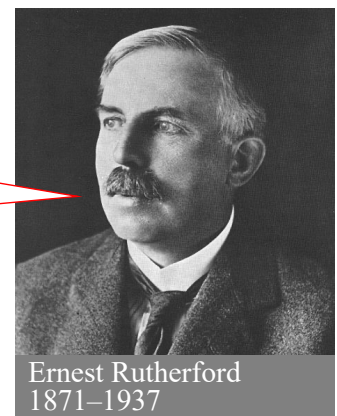
- Résultats:
 - La plupart du temps la particule α n'est que très peu déviée en traversant la feuille (voire pas du tout)
 - Elle a pourtant une probabilité non nulle de rebondir vers l'arrière !



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 !



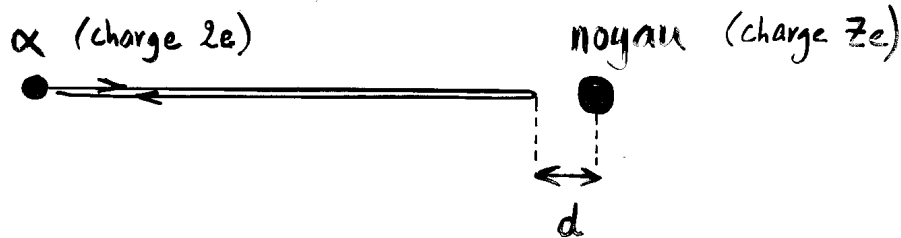
Ernest Rutherford
1871–1937

OS, 11 septembre 2024

6

Limite supérieure à la taille des noyaux (Rutherford)

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



vitesse v

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

vitesse = 0

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

Conservation énergie:

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

OS, 11 septembre 2024

7

Constantes et unités

à savoir
par coeur

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

constante de structure fine

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

constante de Plank réduite

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

Fermi (= femtomètre)

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

électron-volt

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

masse du proton

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

masse de l'électron

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

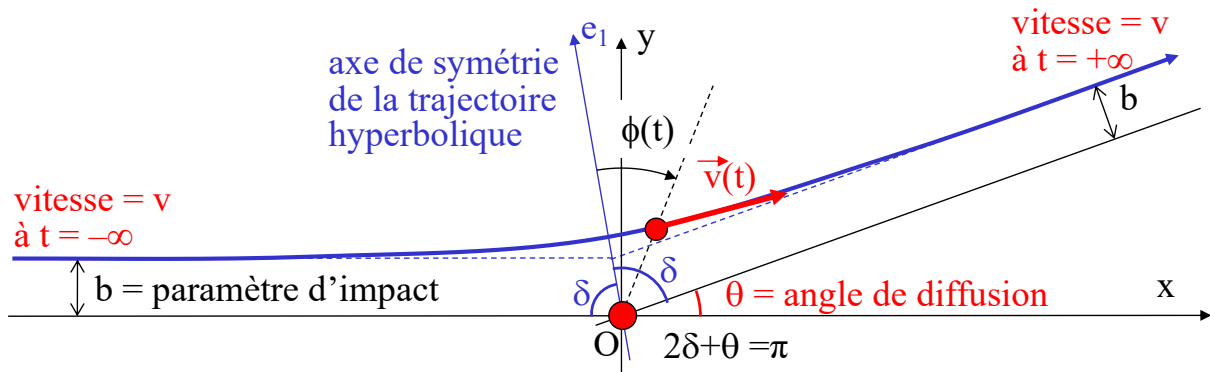
OS, 11 septembre 2024

8

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, 11 septembre 2024

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

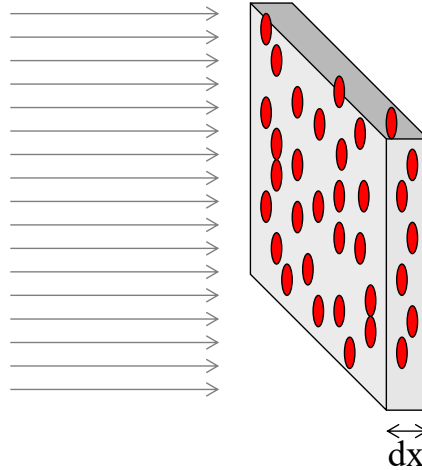
- Dépendances en $1/\sin^4(\theta/2)$ et en $\sim (\text{masse atomique})^2$ vérifiées expérimentalement par Geiger et Mardsen
 - mais deviations observées pour des cibles de petits Z (avec $d \lesssim 4$ fm) ...

OS, 11 septembre 2024

10

Section efficace totale

I projectiles
illuminant
uniformément
la cible



Cible mince d'épaisseur dx avec n noyaux par unité de volume, de telle sorte que les noyaux ne puissent pas se cacher les uns derrière les autres

- 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} m^2)

σ_{tot} = probabilité d'interaction d'un projectile sur une cible contenant un noyau par unité de surface

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

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{élastique}} + \sigma_{\text{inélastique}}$$

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

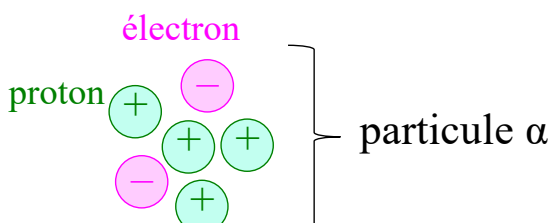
$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega} = \text{fonction de } \theta \text{ et } \varphi$$

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

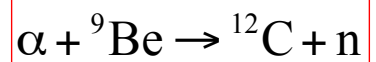
→ modèle simple, “évident”, expliquant la désintégration β

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

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

- Projectiles (sondes) les plus énergétiques:

Accélérateur	Projectiles	Energie de faisceau	λ
LEP 2 @ CERN	e^-, e^+	$\sim 100 \text{ GeV}$	$\sim 10^{-17} \text{ m}$
Tevatron @ Fermilab	p, \bar{p}	$\sim 900 \text{ GeV}$	$\sim 10^{-18} \text{ m}$
LHC @ CERN, 2024	p	6.8 TeV	$\sim 10^{-19} \text{ m}$

Large Hadron Collider (2009–2041 ?)



Dimensions et énergies (échelles)

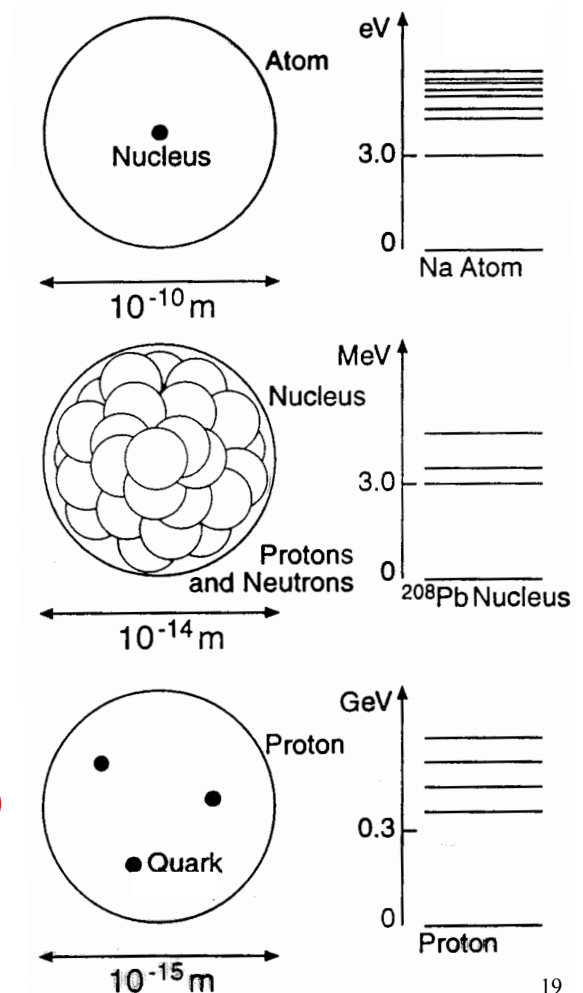
à savoir
par coeur

Les électrons et les quarks ont une taille $< 10^{-19}$ m et sont considérés comme des constituants fondamentaux de la matière

Atome
(forces é.m.)
 $\text{\AA} = 10^{-10}$ m
eV

Noyau
(forces nucléaires)
 10^{-14} m
MeV

Nucléon
(forces de couleur)
fm = 10^{-15} m
GeV



OS, 11 septembre 2024

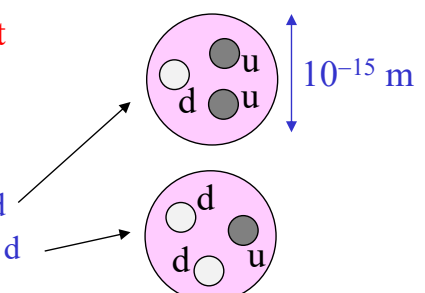
19

Constituants fondamentaux de la matière (fermions de spin $1/2$)

- Toute la matière connue est formée de combinaisons de 6 leptons et 6 quarks
- Pour chacune de ces 12 particules, il existe une anti-particule de charge électrique opposée (anti-matière)
- Ces constituants élémentaires n'ont pas de structure connue

				Charge électrique [e]	Charge de couleur
Leptons	électron e	muon μ	tau τ	-1	non
	neutrino ν_e	neutrino ν_μ	neutrino ν_τ	0	
Quarks	up u	charm c	top t	+2/3	oui
	down d	strange s	bottom b	-1/3	

- La matière courante (stable) est formée seulement de trois types de particules élémentaires: e, u, d
 - Chaque atome contient des électrons et un noyau
 - Les noyau est fait de protons et de neutrons
 - Un proton est une combinaison de quarks u, u et d
 - Un neutron est une combinaison de quarks u, d et d

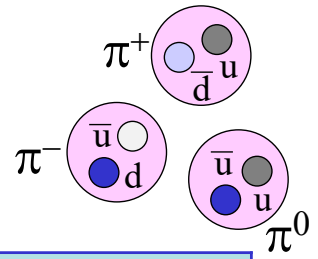


OS, 11 septembre 2024

20

Particules-forces

- Les forces entre particules de matière et d'antimatière s'exercent par l'échange de particules-forces (bosons de spin entier)



Modèle Standard
de la physique
des particules

Interaction	Bosons d'échange	Particules sensibles
Force de couleur [\rightarrow force forte]	8 gluons [mésons π]	seulement quarks & gluons [neutrons, protons, ...]
Electromagnétisme	photon γ	particules chargées électriquement
Force faible	W^+, W^-, Z^0	toutes
Interaction de Higgs	H	particules massives
Gravitation	graviton	toutes

- Bosons W et Z découverts en 1983
- Boson de Higgs découvert en 2012
- Ondes gravitationnelles découvertes en 2016