

Cours de Physique Nucléaire – PHY3600

professeur: G. Azuelos, Pavillon Roger Gaudry, V-222
automne 2009

<u>PHY3600</u>		Physique nucléaire (3 cr.)						
Section								
Activité	Gr	Jour	De	A	Du	Au	Local	Immeuble
th		Jeu.	09:30	11:30	3 sept.	15 oct.	Z-200	PAV. C-MCNICOLL
th		Ven.	08:30	09:30	4 sept.	16 oct.	Z-200	PAV. C-MCNICOLL
th		Jeu.	09:30	11:30	29 oct.	3 déc.	Z-200	PAV. C-MCNICOLL
th		Ven.	08:30	09:30	30 oct.	4 déc.	Z-200	PAV. C-MCNICOLL
exf		Jeu.	09:00	12:00	10 déc.		Z-200	PAV. C-MCNICOLL

1. Introduction
 - historique
 - expérience de Rutherford: diffusion Coulombienne
2. concepts de base, nomenclature, caractéristiques du noyau
 - niveaux d'énergie: spin, isospin et parité
 - moment magnétique nucléaire
 - moment électrique quadrupolaire
3. Le Deuton: problème à deux corps
4. Interactions radiation-matière
 - électrons
 - photons (gammas)
 - neutrons
5. Désintégrations
 - taux de désintégration
 - désintégrations gammas
 - désintégrations beta
 - interactions (électro-)faibles

6. Structure Nucléaire
 1. noyaux déformés
7. Potentiel Nucléaire et niveaux d'énergie
 - potentiel moyen
 - formule de masse Bethe-Weizsacker
 - modèle de gas de Fermi
 - modèle en couches
8. Diffusions et réactions nucléaires
 - section efficace
9. Fission Nucléaire
10. Fusion Nucléaire
11. Astrophysique et cosmologie

- ❑ Paul Taras, *Concepts de Physique Nucléaire*
Notes de cours, Juillet 2008
 - disponibles chez Prof. Paul Taras, V-236, à partir de lundi
- ❑ J-L Basdevant, J. Rich, M. Spiro, *Fundamentals in Nuclear Physics - From Nuclear Structure to Cosmology*,
Springer (2005), ISBN: 0-387-01672-4, QC173/B378/2005
- ❑ C. A. Bertulani, *Nuclear Physics in a Nutshell*,
Princeton University Press (2007), ISBN:0-691-12505-8, QC777/B47/2007
- ❑ John Lilley, *Nuclear Physics, Principles and Applications*,
Wiley 2001, ISBN-13: 978 0 47197936 4
- ❑ B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, *Particles and Nuclei*,
Springer (2008), ISBN: 978-3-540-79367-0, QC776/T4514/2008
- ❑ S. S. Wong, *Introductory Nuclear Physics*,
Wiley (1998), QC776/W65/1998

LBNL Isotopes Project - LUNDS Universitet

Nuclear Data Dissemination Home Page



ERNEST ORLANDO LAWRENCE
BERKELEY NATIONAL LABORATORY

Isotopes Project

Lund Nuclear Data WWW Service

Table of Isotopes	Isotope Explorer	Database Downloads	Table of Radioactive Isotopes	References	Education
Astrophysics	High Spin	Neutron Capture Gamma	Fission	Atomic Masses	Systematics
Atomic Data	Elemental Data	Interaction with Matter	Nuclear Moments	Sites of Interest	



WWW Table of Nuclear Structure:

Interactively search adopted nuclear level and gamma-ray properties.
Display tables, level scheme ladder diagrams and nuclear charts.



LBNL/LUND Isotope Explorer

Free software for interactive access to nuclear structure and decay data from the ENSDF database. (last updated March, 2005).

- [VuENSDF 1.0](#) for Windows 3.1.
- [Isotope Explorer 2.2](#) for Windows (95/98/NT), [Users Manual](#). Download the most recent [catalog0.log](#) file to access via the Internet all isotopes added since the most recent ENSDF update. Most recent catalog0.log file is March, 2005.
- [Isotope Explorer 3.0](#). JAVA version for most computers.
View the compiled, experimental data file [XUNDL](#) using Isotope Explorer 3.0
- [Download Databases](#): [ENSDF](#) (nuclear structure), [NSR](#) (references), and [TORI](#) (Table of Radioactive

Quelques détails sur le déroulement du cours

- ❑ page web
- ❑ exercices – devoirs: 30%
 - soumis le vendredi
 - à remettre le jeudi
- ❑ examen partiel: 15 octobre 30%
- ❑ examen final : 40%
 - jeudi 10 décembre

❑ L'atome indivisible...

- concept ancien, mais prouvé seulement récemment
- 450 B.C: Démocrite
 - ἄτομος : atome = plus petite partie indivisible de la matière
 - concept purement philosophique
- chimie: étude des réactions entre atomes

❑ 1896: H. Becquerel

- découverte de la radioactivité:
 - plaques photographiques marquées par un rayonnement inconnu provenant de roches riches en Uranium



❑ 1897: J J Thompson

- découverte de l'électron, par des expériences avec tubes cathodiques → prix Nobel 1906

❑ Pierre et Marie Curie

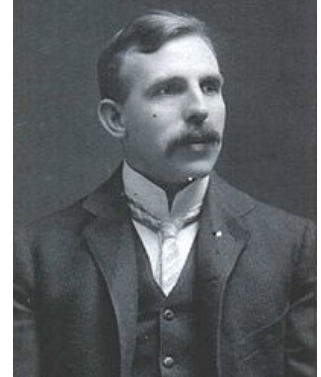
- étude de la radioactivité: séparation chimique des éléments radioactifs dans la chaîne de désintégration de l'uranium



❑ 1903: prix Nobel à H. Becquerel, P et M Curie

❑ Rutherford, à McGill (1898-1907), puis en Angleterre

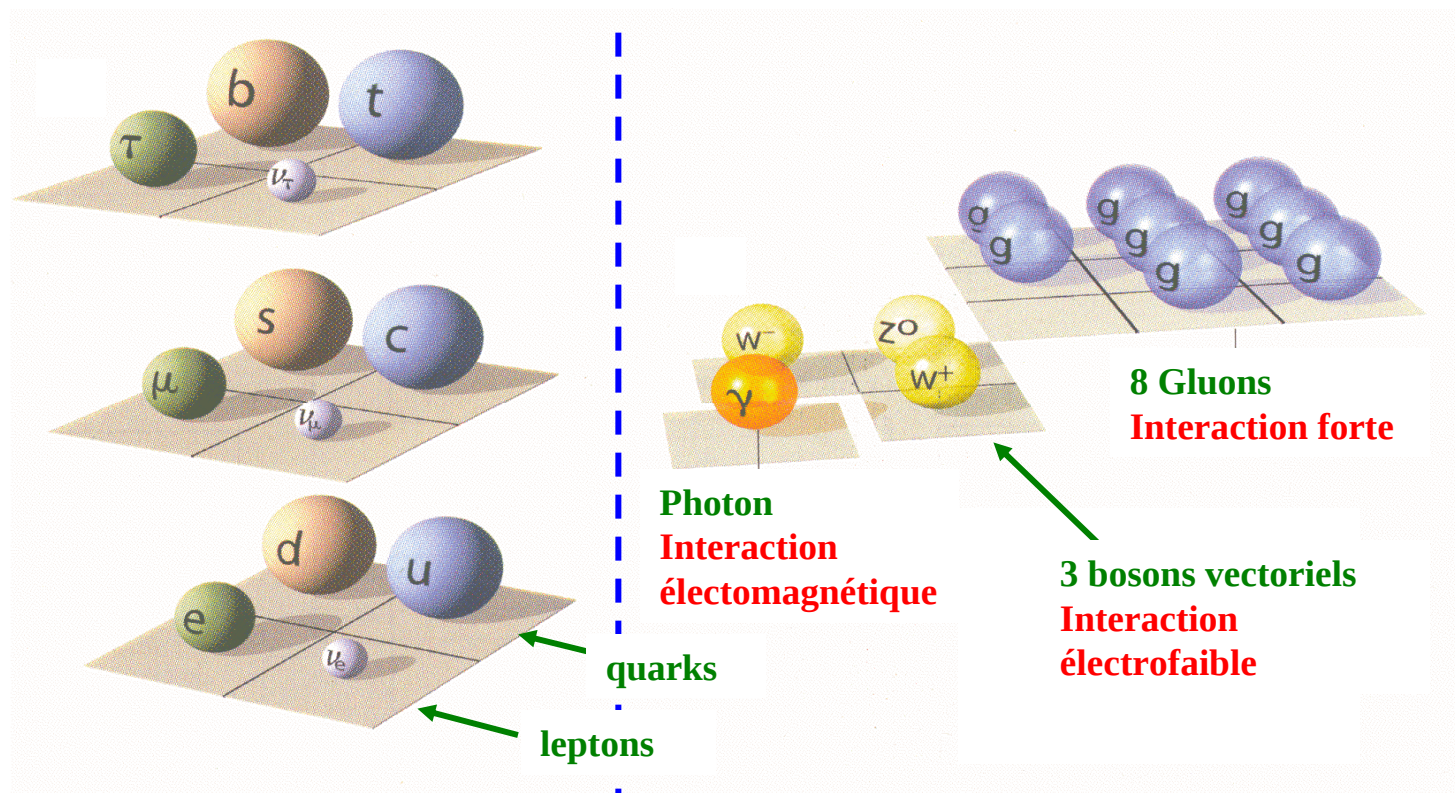
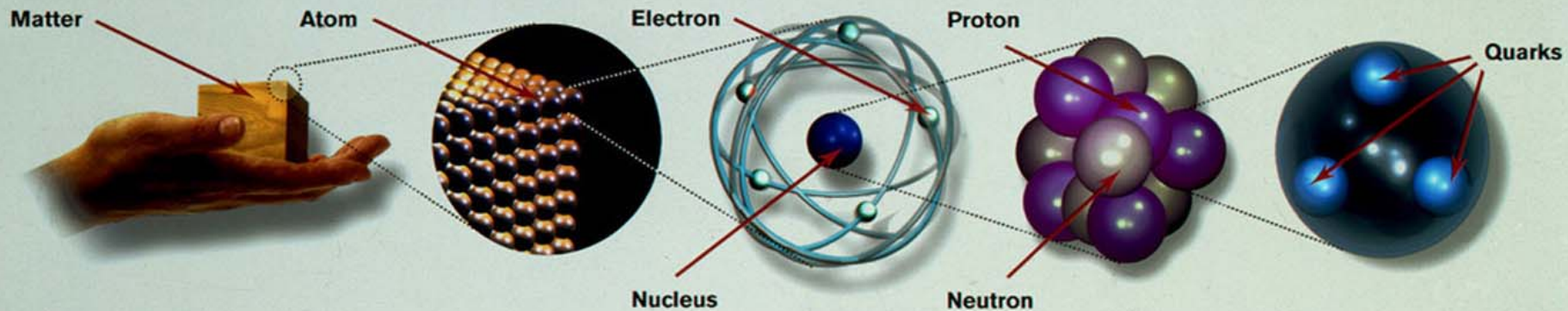
- radioactivités de types α et β changent l'élément, répondent différemment à la présence d'un champ magnétique
 - particule α = hélium
 - particule β = électron
 - rayons γ = photons (rayonnement électromagnétique) plus pénétrants
- diffusion de rayons α sur des feuilles d'Au
 - diffusions à grands angles dans un champ Coulombien
→ découverte du noyau nucléaire:
très petit par rapport à la dimension de l'atome
 - modèle de l'atome planétaire
 - problèmes théoriques:
rayonnement d'énergie → l'électron spirale vers le noyau



❑ isotopes:

- modèle électrons-protons:
 - masses atomiques multiples de la masse de l'hydrogène, mais qq exceptions

- ❑ **noyau composé de protons et d'électrons**
 - problème si on tient compte du spin du noyau
- ❑ **Chadwick, 1932: découverte du neutron**
 - masse $\sim$ masse du proton
- ❑ **Force électrique répulsive entre les protons**
→ nouvelle force: interaction forte, ou nucléaire
- ❑ **1935: Yukawa**
 - force entre les nucléons est due à l'échange d'un méson (théorie quantique des champs)
 - il prédit la masse du méson
 - explique la portée courte de l'interaction forte
- ❑ **désintégration β :**
 - existence du neutrino
 - violation de parité
 - interaction faible
 - interaction électrofaible



Les forces fondamentales

□ Gravitation

Newton, 1687

Einstein, 1905-1915



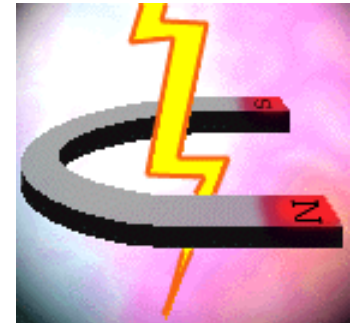
□ force électrique

□ force magnétique

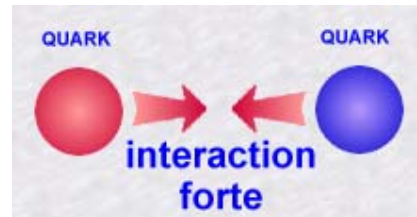


force
électromagnétique

Équations de Maxwell, 1879

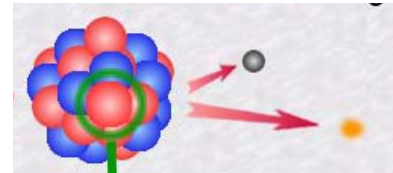


□ force nucléaire forte

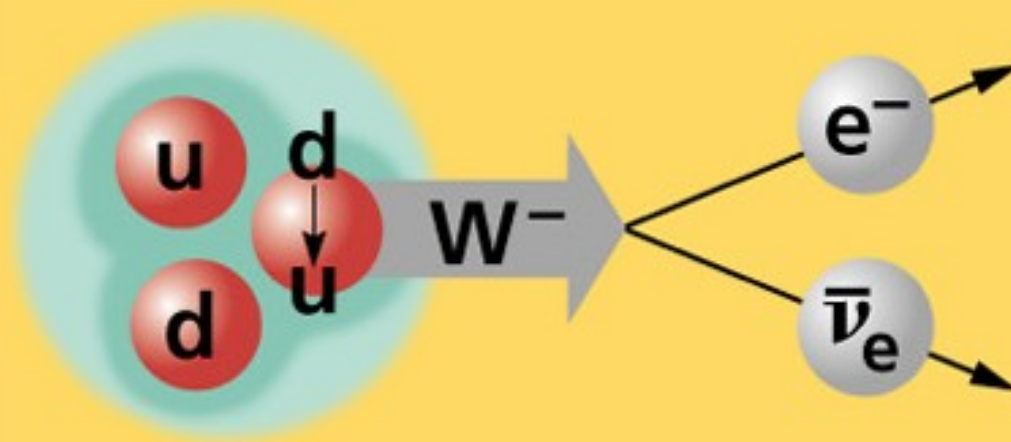


□ interaction faible

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$$



Lois de physique: un ensemble d'idées simples qui semblent universelles et qui ont été vérifiées par l'expérience



A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β decay.

Sy

Spin

π

0

K

0

ρ

1

B

0

η

0

❑ Caractéristiques du Noyau

- problème à plusieurs corps ${}^A_Z X_N$
 - N neutrons, Z protons, $A = N + Z$ nucléons
 - exemple: ${}^{12}_6\text{C}$ Carbone-12: C → 6 protons, $A = 12$
- forces entre les constituents
 - détermine la structure, dimension, énergie de liaison, etc...
- dimensions:
 - ordre du fermi ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)
- masses:
 - ordre du GeV/c^2 ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$)
($1 \text{ eV} = \text{charge de l'électron} \times 1 \text{ Volt}$)
 - masse du proton: $1.007276 \text{ u} = 0.938.27 \text{ GeV}/c^2$
 - masse de l'électron: $0.511 \text{ MeV}/c^2$
- spin: moment angulaire de rotation
 - rotation des protons, neutrons, et révolution autour du c.m.
- moment magnétique
 - courants produisent des aimants

Énergie de liaison et masses nucléaires

Énergie de liaison:

différence entre la masse des nucleons, à l'état libre, constituant le noyau et celle du noyau

$$\begin{aligned} E_B &= \left(Z m_p c^2 + N m_n c^2 \right) - m_A c^2 \\ &= \left(Z m_p c^2 + N m_n c^2 + Z m_e c^2 \right) - \left(M_{\text{atome}} c^2 + E_{B_e} \right) \\ &\approx \left(Z m_H + N m_n - M_{\text{atome}} \right) c^2 \end{aligned}$$

Unité de masse atomique:

12 u $\equiv$ masse de l'atome de Carbone-12

$$= 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 931.494 \text{ MeV}/c^2$$

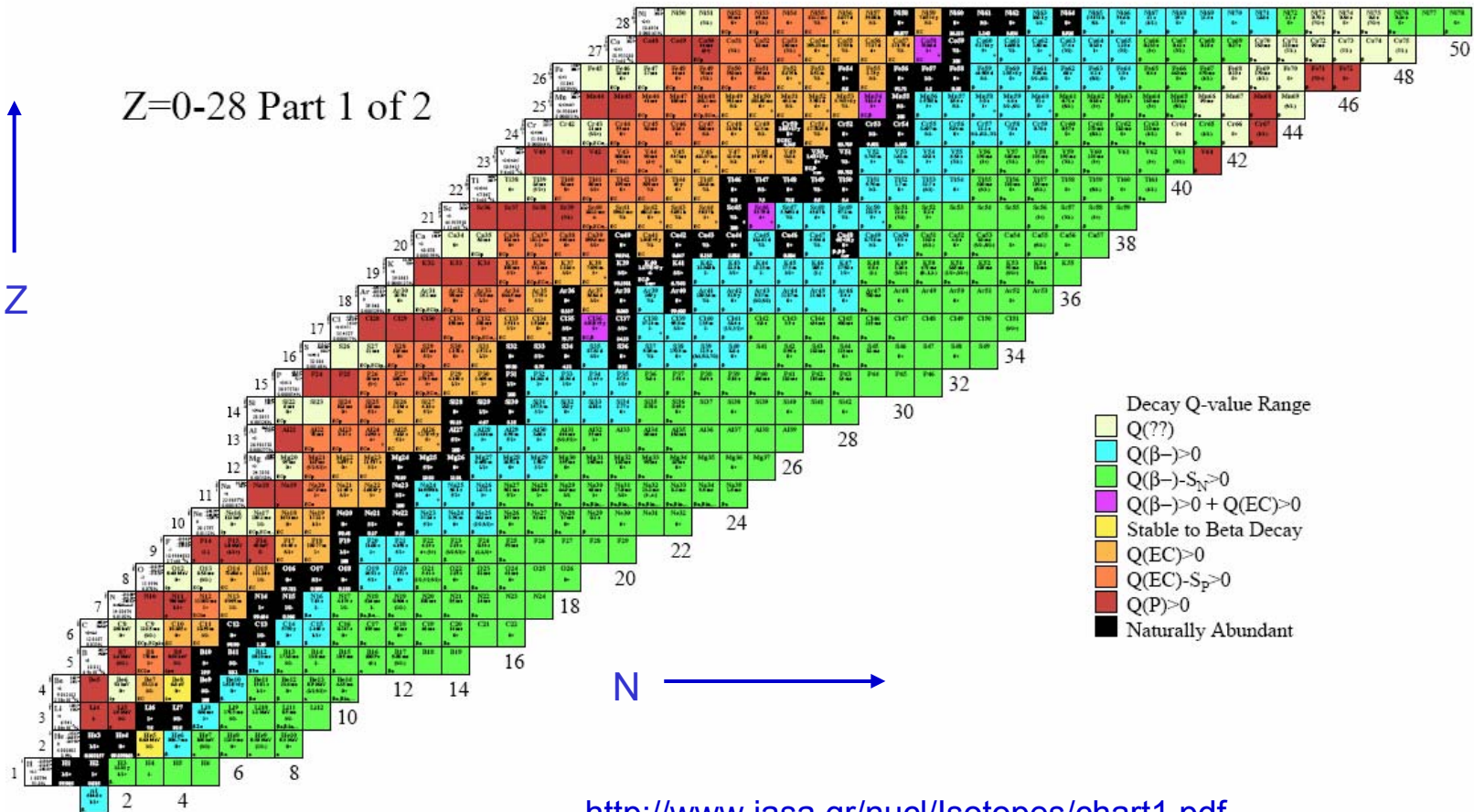
$$m_p = 938.272 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 939.566 \text{ MeV}/c^2$$

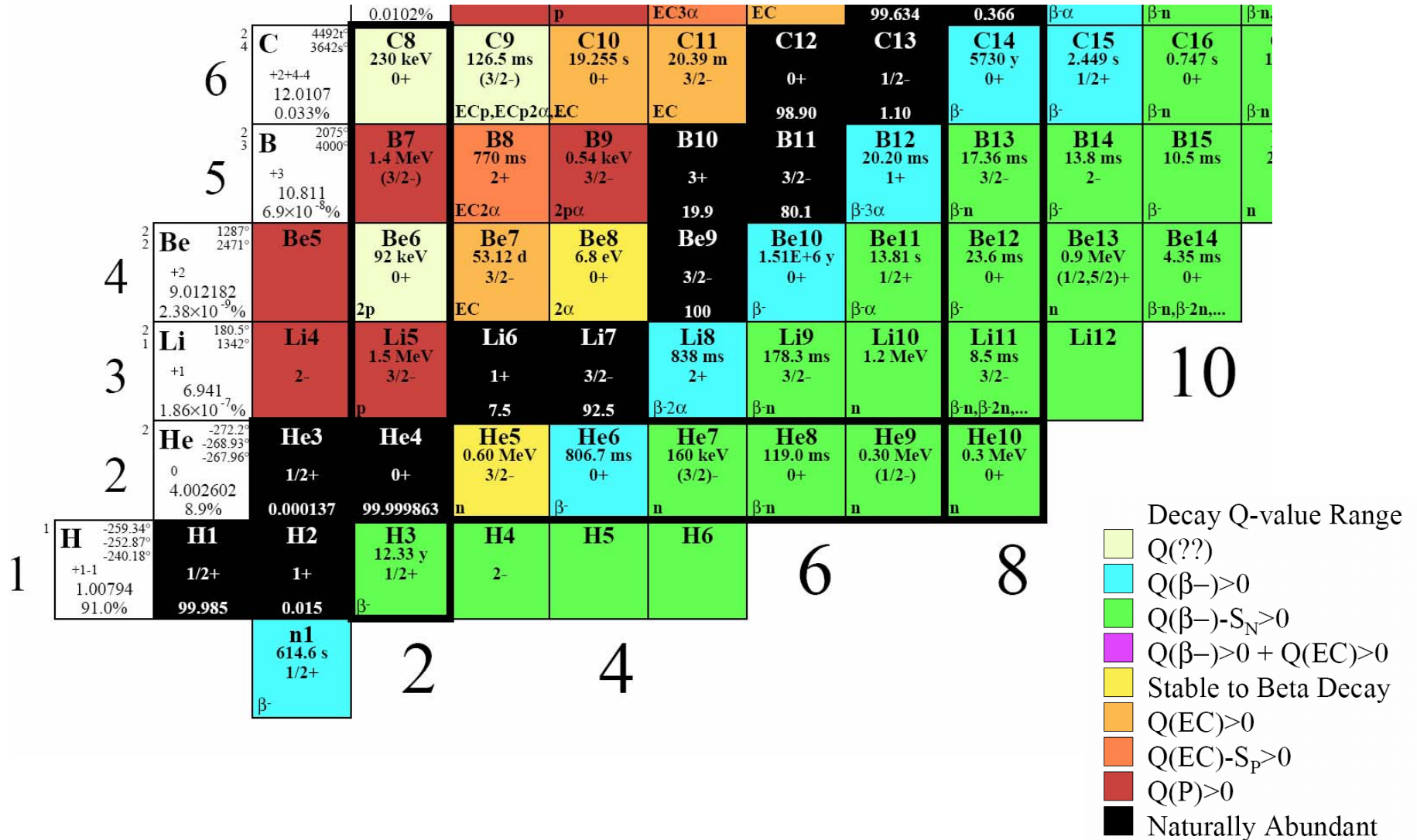
$$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

Carte des Isotopes

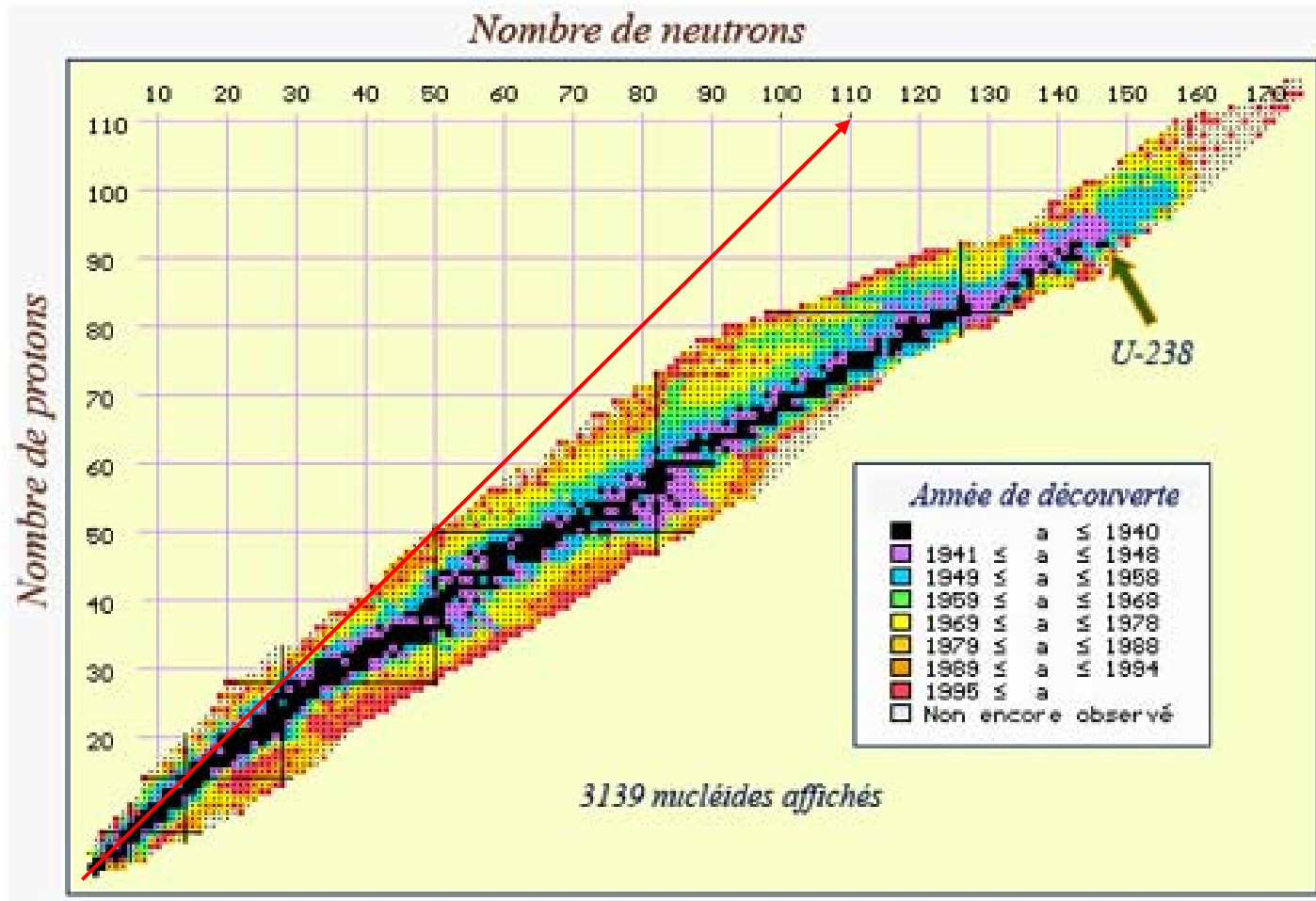
Table of Isotopes (1999)



Carte des Isotopes



Stabilité des noyaux

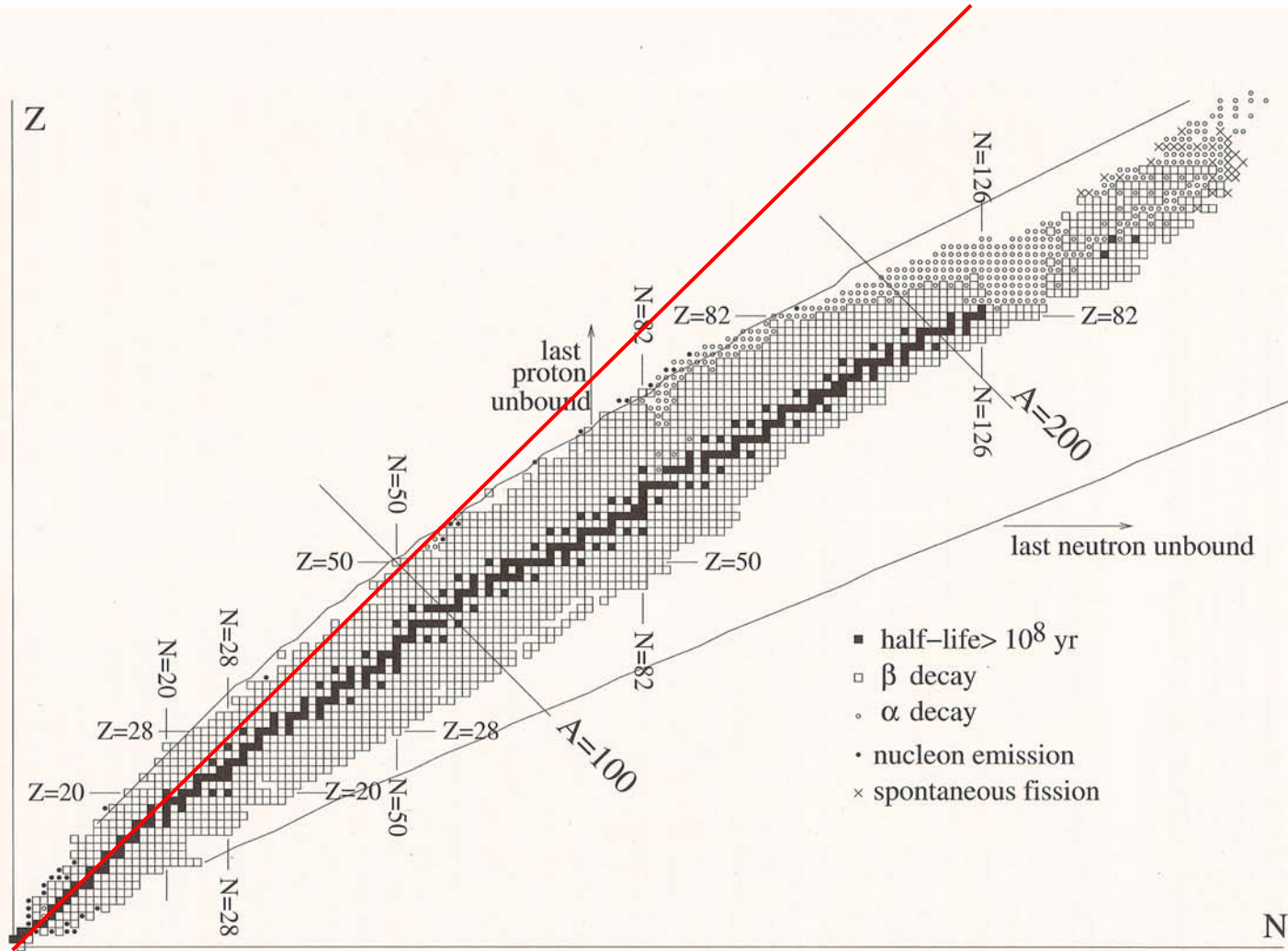


http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/Carte_Noyaux.htm

Stabilité des noyaux

6 Introduction

Fig. 0.2. The nuclei. The black squares are long-lived nuclei present on Earth. Unbound combinations of (N, Z) lie outside the lines marked "last proton/neutron unbound." Most other nuclei β -decay or α -decay to long-lived nuclei.

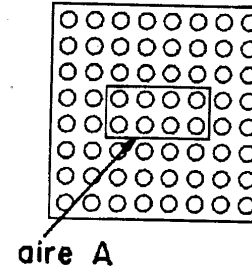


Section Efficace: définition

Représentation classique:

- feuille mince de la cible:

épaisseur dz , aire A , dN_A atomes de rayon R



- particule ponctuelle qui traverse la cible a une probabilité dP de toucher un atome:

$$dP = \frac{dN_A \times \pi R^2}{A} = \sigma \left(\frac{dN_A}{A} \right) = \sigma \left(\frac{dN_A}{dV} \right) dz = \sigma n dz$$

$\sigma = \pi R^2 \equiv$ section efficace d'interaction

← unités de surface (cm^2)

$n =$ densité volumique de noyaux $= \frac{N_A \times \rho}{A}$

barn : $1 b = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$

Angstrom: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$

fermi (femtometre) : $1 f = 10^{-15} \text{ m} = 10^{-13} \text{ cm}$

$$dN = -N dP = -N \times n \sigma dz$$

Pour une épaisseur Δz ,

$$\int_{N_i}^{N_s} \frac{dN}{N} = - \int_0^{\Delta z} n \sigma dz \quad \Rightarrow \quad \ln \left(\frac{N_s}{N_i} \right) = -n \sigma \Delta z$$

$$N_s = N_i e^{-n \sigma \Delta z}$$

N_i = nombre de particules incidentes

N_s = nombre de particules sortant, non-diffusées

section efficace différentielle

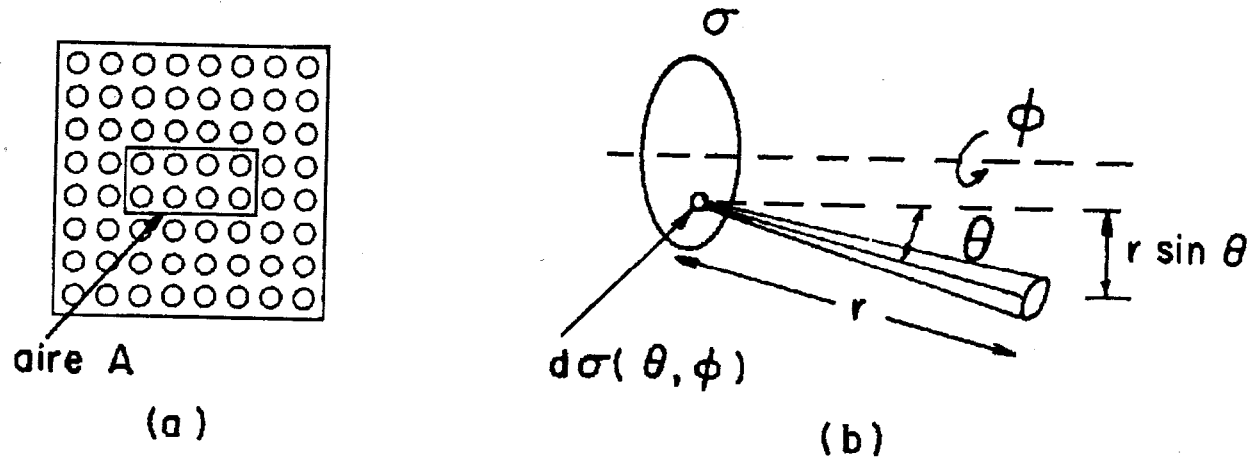


Figure 1.4: Illustration du concept de section efficace totale et différentielle

$$dP = \sigma n dz$$

$$\sigma = \frac{1}{n} \frac{dP}{dz} = \text{aire efficace d'interaction d'un atome (classiquement } \pi R^2 \text{)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{n} \frac{d}{dz} P(\theta, \varphi) = \text{aire efficace d'un atome menant à une diffusion à un angle } (\theta, \varphi)$$

Expérience de Rutherford

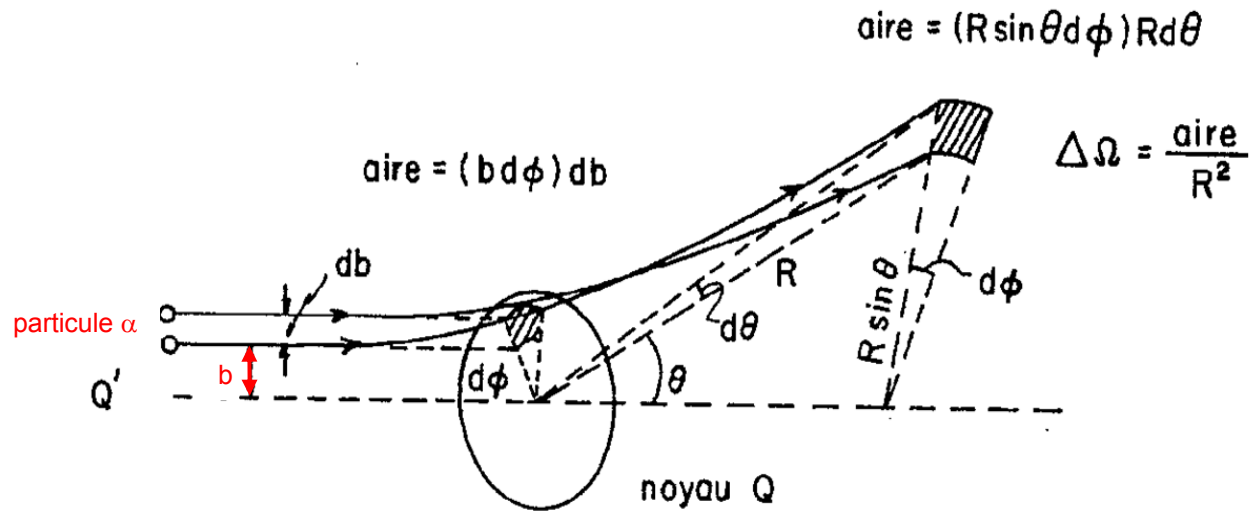


Figure 1.5: Relation entre le paramètre d'impact b et l'angle de déflexion θ

Exercice 1.4:

particule alpha, charge Q' , incidente avec un paramètre d'impact b sur une charge ponctuelle Q de masse infinie, avec une énergie cinétique E
 → trouver l'angle de diffusion θ

Expérience de Rutherford

$$mv_0 b = mr^2 \frac{d\alpha}{dt}. \quad (\text{E.1})$$

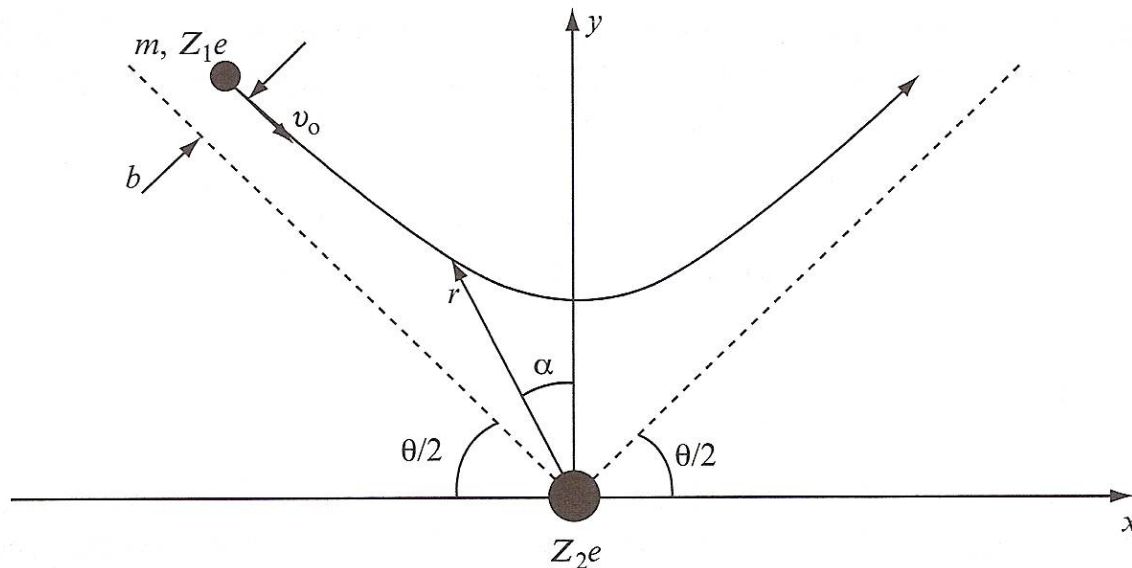


Figure E.1 Trajectory of a particle, mass m , charge $Z_1 e$ being deflected through an angle θ by a charge $Z_2 e$ fixed at the origin. Far from the origin, the particle's speed is v_0 and the impact parameter is b .

J. Lilley, pp 341-342

Expérience de Rutherford

Quantité de mouvement non conservée

(on ne tient pas compte du recul du noyau, supposé être très lourd)

Changement de quantité de mouvement:

$$d\vec{p} = \vec{F} dt$$

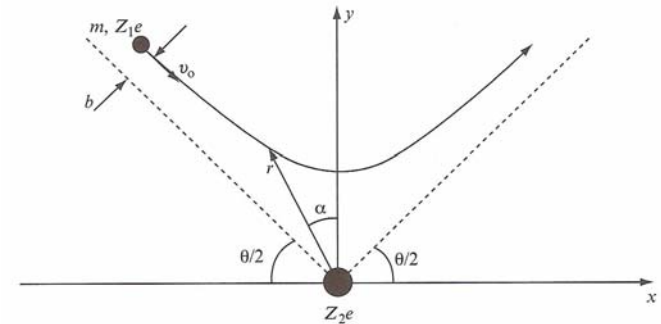
$$2mv_0 \sin \frac{\theta}{2} = \int_{\frac{\theta}{2}-\pi}^{\pi-\frac{\theta}{2}} F \cos \alpha \left(\frac{dt}{d\alpha} \right) d\alpha$$

mais $mr^2 \frac{d\alpha}{dt} = mvb$ K

$$\left. \begin{aligned} 2mv_0 \sin \frac{\theta}{2} &= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{\frac{\theta}{2}-\pi}^{\pi-\frac{\theta}{2}} \frac{1}{r^2} \cos \alpha \left(\frac{dt}{d\alpha} \right) d\alpha \\ mr^2 \frac{d\alpha}{dt} &= mv_0 b \end{aligned} \right\} \Rightarrow 2mv_0 \sin \frac{\theta}{2} = \frac{K}{v_0 b} \int_{\frac{\theta}{2}-\pi}^{\pi-\frac{\theta}{2}} \cos \alpha d\alpha$$

$$= \frac{2K}{v_0 b} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$b = \frac{K}{mv_0^2} \cot \frac{\theta}{2} = \frac{2K}{E} \cot \frac{\theta}{2}$$



Section efficace de diffusion Rutherford

$$b = \frac{K}{mv_0^2} \cot \frac{\theta}{2} = \frac{K}{2E} \cot \frac{\theta}{2} \quad \Rightarrow \quad db = \frac{K}{4E \sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta$$

Supposons un flux Φ de particules α :

Entre les paramètres d'impact b et db :

$2\pi b db \Phi$ particules traversent la cible par seconde
(et sont donc diffusées à un angle θ)

$$dR = 2\pi \times \frac{K}{2E} \cot \frac{\theta}{2} \times \frac{K}{4E \sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta \times \Phi$$

$$\text{mais } \frac{dR}{2\pi \sin \theta d\theta} = \Phi \frac{d\sigma}{d\Omega} \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{K^2}{4E^2} \cdot \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\sin^3 \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{K^2}{4E^2} \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

J. Lilley, pp 341-342

Diffusion Coulombienne

conservation de moment angulaire et d'énergie:

$$mv_0 b = mv_2 r_{\min} \Rightarrow v_2 = v_0 \frac{b}{r_{\min}}$$

$$E \equiv \frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{K}{r_{\min}} \quad \left(K \equiv \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)$$

$$E = E \left(\frac{b}{r_{\min}} \right)^2 + \frac{K}{r_{\min}}$$

$$r_{\min}^2 E - r_{\min} K - E b^2 = 0 \Rightarrow r_{\min} = \frac{K + \sqrt{K^2 + 4E^2 b^2}}{2E}$$
$$= \frac{K}{2E} + \sqrt{\left(\frac{K}{2E} \right)^2 + b^2}$$

$$b = \frac{K}{2E} \cot \frac{\theta}{2} \rightarrow r_{\min} = \frac{K}{2E} \left(\frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} + 1 \right)$$

$$\theta \rightarrow 0 \Rightarrow r_{\min} \rightarrow \infty$$

$$\theta = \pi \Rightarrow r_{\min} = K/E$$

Diffusion Coulombienne

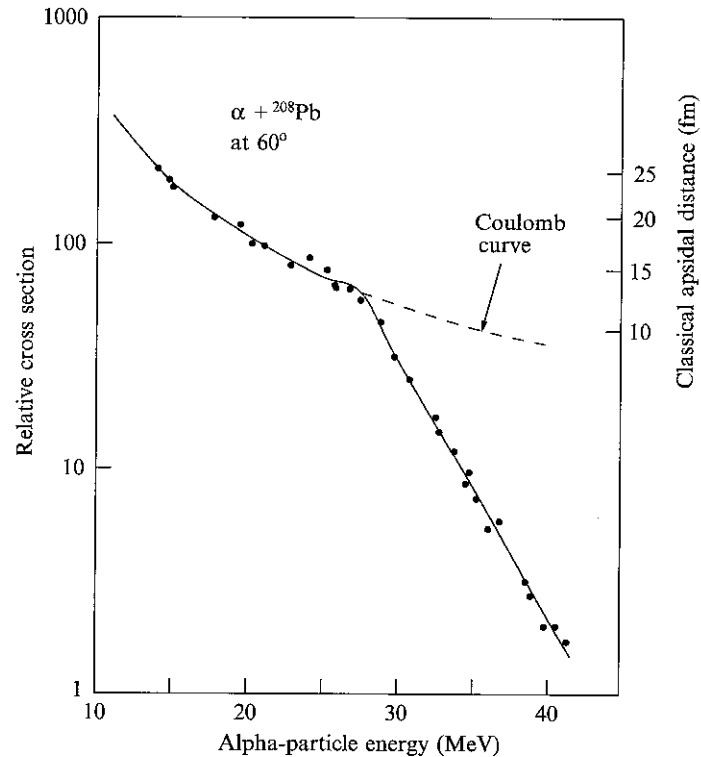


Figure 1.13 Elastic scattering of α particles by lead at a fixed angle of 60° in the laboratory system plotted as a function of incident α energy. The dashed curve is given by Coulomb scattering. The classical distance of closest approach for pure Coulomb scattering is given on the right-hand ordinate, using the dashed curve. Source: Farwell *et al.* (1954).

Diffusion Coulombienne

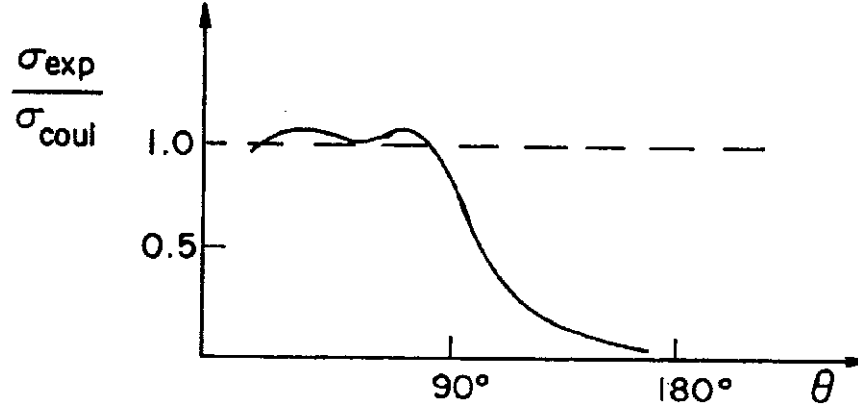


Figure 1.6: Diffusion de particules α de 22 MeV par des noyaux de Pb ($Z=82$), normalisée à la prédiction de Rutherford

$$R \approx (1.41 A^{1/3} + 2.11) \text{ fm}$$

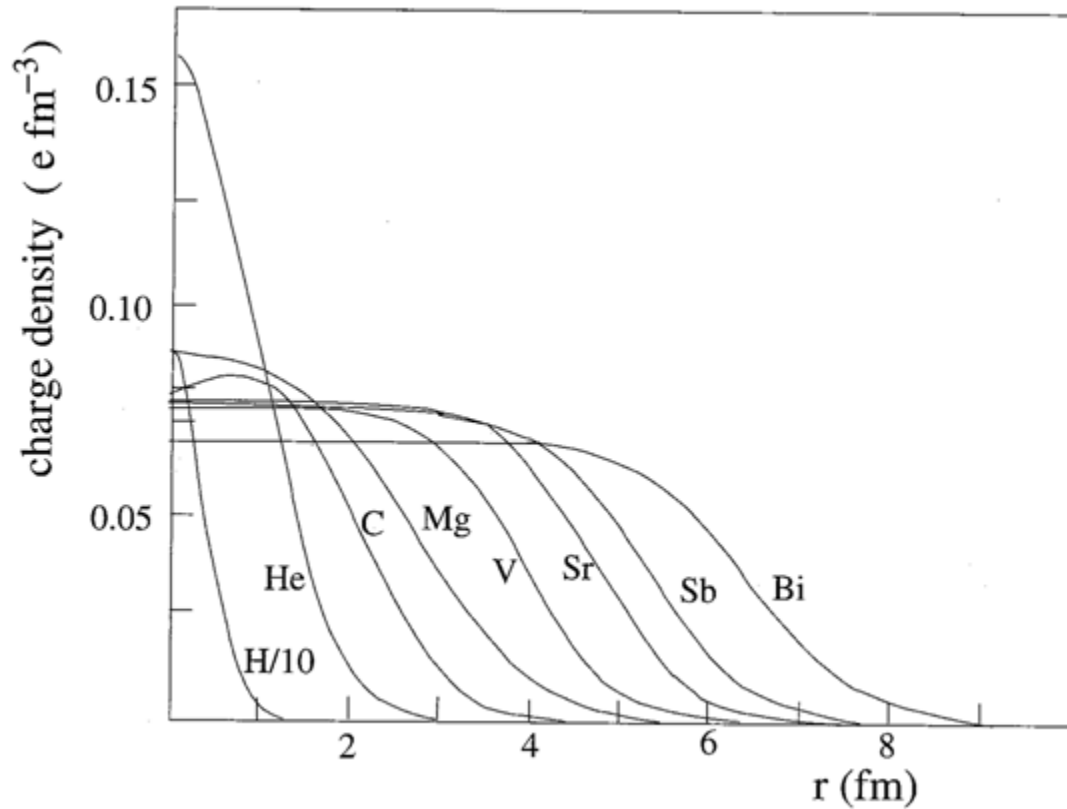
rayon du noyau
($1.2 A^{1/3}$)

rayon de α

0.15 nucleon fm^{-3}
0.075 proton fm^{-3}

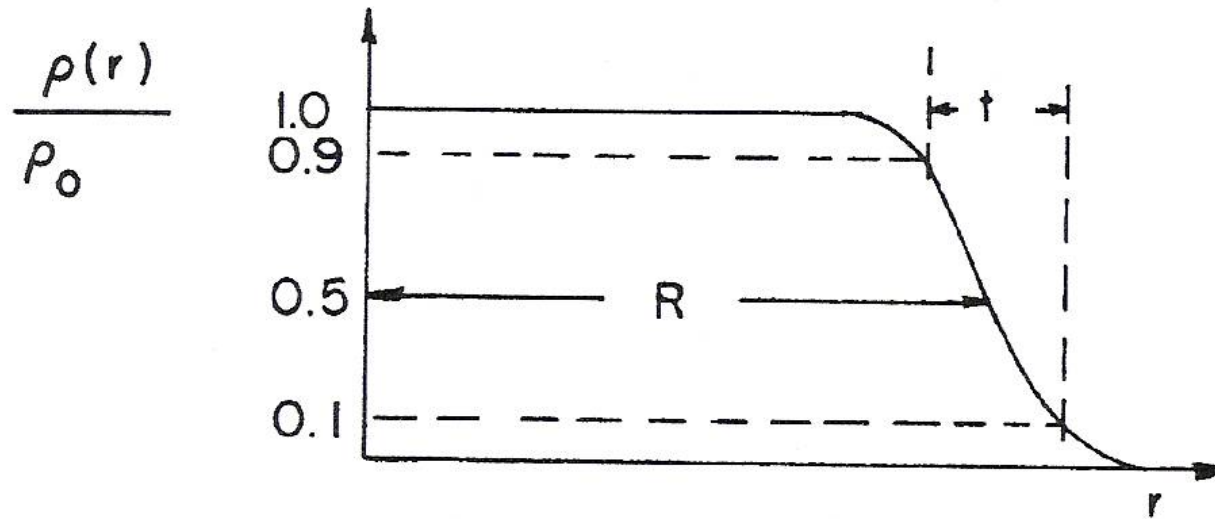
- ces mesures sont approximatives:
pas de coupure abrupte, et la force nucléaire a une certaine portée
- noyau $\sim$ sphérique, volume = $\frac{4}{3} \pi R^3$ proportionnel à A
- diffusion d'électrons donnent une mesure plus précise de la densité de charge en fonction du rayon

densité de charge des noyaux



nucleus	r_{rms} (fm)	R (fm)	$R/A^{1/3}$ (fm)	nucleus	r_{rms} (fm)	R (fm)	$R/A^{1/3}$ (fm)
^1H	0.77	1.0	1.0	^{16}O	2.64	3.41	1.35
^2H	2.11	2.73	2.16	^{24}Mg	2.98	3.84	1.33
^4He	1.61	2.08	1.31	^{40}Ca	3.52	4.54	1.32
^6Li	2.20	2.8	1.56	^{122}Sb	4.63	5.97	1.20
^7Li	2.20	2.8	1.49	^{181}Ta	5.50	7.10	1.25
^9Be	2.2	2.84	1.37	^{209}Bi	5.52	7.13	1.20
^{12}C	2.37	3.04	1.33				

densité de charge des noyaux



$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$

$$t = 4a \ln 3 \approx 2.4 fm$$

Distribution de Fermi

- ❑ **Densité neutronique ne peut être mesurée avec des électrons**
- ❑ **volume varie $\sim A$**
 - $\Rightarrow$ “espace” entre les protons indépendant de A , ou
 - $\Rightarrow$ proton n’interagit qu’avec ses plus proches voisins, ou
 - $\Rightarrow$ force entre protons est de courte portée
 - $\Rightarrow$ à très courtes distances, la force nucléaire est répulsive (force entre quarks)
- ❑ **force Coulombienne**
 - distribution des protons différente de celle des neutrons
 - mais effet petit, car la force nucléaire $\gg$ force électrique, à des distances nucléaires
 - force n-p $\sim$ force p-p $\sim$ force n-n: densité de charge ne varie pas en fonction de A/Z