

# M1 Physique : UE Physique Atomique et Nucléaire Année 2025-2026

## Travaux Dirigés 3 : Modèles du noyau atomique : modèle de la goutte liquide

Date : 26/01/2026

Ex. 1 Rappelons qu'une particule alpha est le noyau de l'isotope le plus abondant de l'hélium,  ${}^4_2\text{He}$ . Elle contient quatre nucléons, deux protons et deux neutrons, chacun étant un fermion. Utilisons nos connaissances de physique fondamentale pour montrer que la particule alpha est un boson.

Considérons un système quantique constitué de deux particules alpha. Si l'échange des étiquettes des deux particules alpha ne modifie pas le signe de la fonction d'onde, cela prouvera que les particules alpha obéissent à des statistiques bosoniques. Nous effectuerons cet échange en le décomposant en échanges successifs de nucléons.

- (a) Écrire la fonction d'onde du système  $\Psi$  en fonction du temps et des coordonnées spatiales des huit particules, notées  $\vec{r}_i$  avec  $i = 1, \dots, 8$ . Les indices  $i = 1, 2, 3, 4$  désignent respectivement les deux protons et les deux neutrons de la première particule alpha, tandis que les indices  $i = 5, 6, 7, 8$  désignent respectivement les deux protons et les deux neutrons de la seconde particule alpha.
- (b) Échanger les étiquettes du premier proton de la première particule alpha avec celles du premier proton de la seconde particule alpha,

c'est-à-dire effectuer l'échange  $1 \leftrightarrow 5$ . Comment la fonction d'onde du système est-elle modifiée ?

- (c) Poursuivre en échangeant successivement les étiquettes des nucléons correspondants dans les deux particules alpha :  $2 \leftrightarrow 6$ , puis  $3 \leftrightarrow 7$ , et enfin  $4 \leftrightarrow 8$ . Suivre soigneusement l'évolution du signe de la fonction d'onde du système au cours de ces échanges.
- (d) Quel est le résultat final de l'échange des étiquettes des deux particules alpha ?

Ex. 2 Il est impossible qu'un noyau de nombre de masse  $A$  et de numéro atomique  $Z$  contienne  $A$  protons et  $A - Z$  électrons. Montrer que l'énergie de point zéro d'un électron confiné dans un noyau de rayon typique  $\sim 1$  fm est supérieure à 10 GeV.

- (a) Utiliser un potentiel d'oscillateur harmonique (O.H.) pour estimer l'énergie de point zéro.
- (b) Utiliser un puits de potentiel carré infini (puits infini) pour estimer l'énergie de point zéro.

Un autre problème du modèle « protons + électrons » est qu'il conduit, pour certains noyaux, à un spin total incorrect ((?)). Considérons  ${}_{7}^{14}\text{N}$ , l'isotope de l'azote le plus abondant. Son spin nucléaire mesuré et son caractère de symétrie sont :  $i = 1$ , *symétrique*.

- (c) Quels sont le nombre de masse  $A$  et le numéro atomique  $Z$  de ce noyau ?
- (d) Quel spin total et quel caractère de symétrie prédirait-on si le noyau contenait  $A$  protons et  $(A - Z)$  électrons ?
- (e) Montrer que le spin total et le caractère de symétrie observés sont

au contraire compatibles avec l'hypothèse moderne selon laquelle les noyaux contiennent  $A$  nucléons, dont  $Z$  protons et  $(A - Z)$  neutrons.

Ex. 3 Conversion de l'unité de masse atomique en énergie.

Montrer que l'énergie équivalente à une unité de masse atomique unifiée  $u$  est de l'ordre de 931,5 MeV.

On rappelle que :

—  $1 u = 1,660\,539\,066\,60 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ,

—  $c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ,

—  $1 \text{ eV} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ J}$ .