

Cohésion des noyaux d'atomes

Le tableau périodique des éléments chimiques recense tous les éléments chimiques de l'univers. Les plus gros d'entre eux, quoique instables, ne comptent pas plus de 250 nucléons. On cherche à comprendre à travers l'étude qui suit :

- L'origine de la cohésion des noyaux
- les raisons pour lesquelles il existe une taille limite des noyaux
- la cohésion des corps célestes que sont les étoiles à neutrons

Document 1 : les 4 types d'interaction qui gouvernent l'univers

Interaction	Portée (ordre de grandeur)	Comparaison Intensité*	Champ d'action
forte	10^{-15} m	1	Attractive
électromagnétique	infinie	10^{-3}	Attractive ou répulsive
gravitationnelle	infinie	10^{-39}	Attractive
faible	10^{-17} m	10^{-6}	-

* La comparaison des intensités est donnée pour 2 protons distants d'environ 2 fm .

Document 2 : propriétés des nucléons

Propriétés du proton : masse : $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ Charge : $q_p = e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ Rayon : $r_p = 0,88 \text{ fm}$	Propriétés du neutron : masse : $m_n = m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ Charge : $q_n = 0$ Rayon : $r_n = r_p = 0,88 \text{ fm}$
---	---

Document 3 : Le noyau atomique

Dès qu'un noyau possède un nombre de nucléons trop grand ($A > 250$), il a tendance à ne pas exister. La raison profonde de ce phénomène vient du fait que l'interaction forte est de très courte portée, alors que les forces électriques portent beaucoup plus loin. En particulier une grande assemblée de protons va ressentir de façon très intense la répulsion électrique, mais de façon très amoindrie l'attraction de l'interaction forte. Un noyau lourd va donc se briser instantanément.

La nature pourtant ne manque pas de ressources, il existe des noyaux super lourds, vraiment étranges car constitués uniquement de neutrons : ce sont les étoiles à neutrons. Dans celles-ci, la gravitation joue un rôle prépondérant. Elle est si intense que les atomes sont comprimés à un point tel qu'ils s'interpénètrent jusqu'à ce que leurs noyaux se touchent. Tous les protons et les électrons se transforment en neutrons. Cette configuration devient stable car la répulsion coulombienne est inopérante : ce type d'étoile, de 10 km de rayon, est en fait un gigantesque noyau de masse volumique voisine 100 millions de tonnes par centimètre cube.

Encyclopaedia Universalis 1999, « Le noyau atomique ».

Données :

Volume d'une sphère de rayon R : $V = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3$

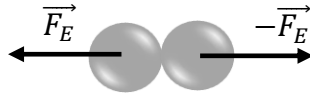
Constante diélectrique : $K = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$

Constante gravitationnelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$

Questions :

1. Calculer la valeur de la force d'interaction électrique \vec{F}_E s'exerçant entre ces deux protons collés l'un à l'autre. Représenter cette interaction sur un schéma.

$$F_E = K \cdot \frac{e^2}{(2r_p)^2} \quad \text{A.N.} \quad F_E = 9,0 \times 10^9 \times \frac{(1,60 \times 10^{-19})^2}{(2 \times 0,88 \times 10^{-15})^2} = 74$$



2. D'après le document 1, quelle interaction permet cependant d'expliquer la cohésion du noyau. Justifier.

Déduire des informations données l'ordre de grandeur de la force forte qui existe entre ces deux protons.

C'est l'interaction forte qui prédomine à courte portée. Elle est attractive et 1000 fois plus forte que l'interaction coulombienne.

$$F_{\text{forte}} = 1000 \times F_E \quad \text{A.N.} \quad F_{\text{forte}} = 74 \times 1000 = 74000 \text{ N}$$

L'ordre de grandeur est de 10^5 N .

3. Calculer la valeur des forces d'interaction gravitationnelle \vec{F}_g existant entre deux protons collés l'un à l'autre. Justifier la valeur 10^{-36} annoncée dans le document 1.

$$F_g = G \cdot \frac{(m_p)^2}{(2r_p)^2} \quad \text{A.N.} \quad F_g = 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{(1,67 \times 10^{-27})^2}{(2 \times 0,88 \times 10^{-15})^2} = 6,0 \times 10^{-35} \text{ N}$$

$$\frac{F_g}{F_E} = \frac{6,0 \times 10^{-35}}{74} = 8,1 \times 10^{-37} \approx 10^{-36}$$

or la force électrostatique est 1000 fois plus faible que l'interaction forte, donc la force gravitationnelle est $\frac{10^{-36}}{1000} = 10^{-39}$.

4. On cherche à vérifier la première phrase du document 3 : un noyau constitué de plus de 250 nucléons ne peut exister.

- a. Calculer le volume d'un nucléon.

$$V_{\text{nucléon}} = \frac{4}{3} \pi \cdot r_{\text{nucléon}}^3 \quad \text{A.N.} \quad V_{\text{nucléon}} = \frac{4}{3} \pi \times (0,88 \times 10^{-15})^3 = 2,85 \times 10^{-45} \text{ m}^3$$

- b. Calculer le volume d'un noyau qui compterait 250 nucléons

$$V_{\text{noyau}} = 250 \times V_{\text{nucléon}} \quad \text{A.N.} \quad V_{\text{noyau}} = 250 \times 2,85 \times 10^{-45} = 7,1 \times 10^{-43} \text{ m}^3$$

- c. En déduire la taille de ce noyau. Conclure quant l'existence potentielle d'un noyau plus gros.

$$r_{\text{noyau}}^3 = \frac{3 \cdot V_{\text{noyau}}}{4\pi} \quad \text{soit} \quad r_{\text{noyau}} = \left(\frac{3 \cdot V_{\text{noyau}}}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{A.N.} \quad r_{\text{noyau}} = \left(\frac{3 \times 7,1 \times 10^{-43}}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} = 5,5 \times 10^{-15} \text{ m}$$

Si le rayon du noyau est de $5,5 \times 10^{-15} \text{ m}$, il atteint la limite de la portée de l'interaction forte.

Celle-ci n'est plus prépondérante et c'est l'interaction coulombienne qui prédomine alors.

Le noyau est instable. Les noyaux plus gros ne sont pas possible.

- d. Déterminer la valeur de l'interaction forte entre 2 protons séparés de la distance calculée.

Expliquer la démarche.

Hypothèse :

si $d > 5,5 \times 10^{-15} \text{ m}$, l'interaction coulombienne prédomine

si $d < 5,5 \times 10^{-15} m$, l'interaction forte prédomine

si $d = 5,5 \times 10^{-5} m$, alors l'interaction forte compense l'interaction coulombienne : $F_{forte} = F_e$

$$\text{On a donc } F_{forte} = K \cdot \frac{e^2}{(2d)^2} \quad \text{A.N.} \quad F_{forte} = 9,0 \times 10^9 \times \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(2 \times 5,5 \times 10^{-15})^2} = 1,9 \text{ N}$$

5. Quel type d'interaction assure la cohésion d'une étoile de ce type ? Justifier.

La taille d'une étoile à neutrons dépasse largement la portée de l'interaction forte.

Les neutrons n'ayant pas de charge, il n'y a pas d'interaction coulombienne entre les neutrons.

La cohésion d'une étoile à neutron est assurée par l'interaction gravitationnelle.

6. En assimilant l'étoile à une sphère, déterminer la masse d'une étoile à neutron à partir des informations données dans le document 3.

$$\text{Volume de l'étoile : } V_{\text{étoile}} = \frac{4}{3} \pi \cdot R_{\text{étoile}}^3 \quad \text{A.N.} \quad V_{\text{étoile}} = \frac{4}{3} \pi \times (10 \times 10^3)^3 = 4,2 \times 10^{12} m^3$$

$$V_{\text{étoile}} = 4,2 \times 10^{18} cm^3$$

$$\text{Masse de l'étoile : } M = \mu \cdot V_{\text{étoile}} \quad \text{A.N.} \quad M = 100 \times 10^6 \times 10^3 \times 4,2 \times 10^{18}$$

$$M = 4,2 \times 10^{29} kg$$

7. Déterminer le nombre de nucléons contenus dans cette étoile.

$$N = \frac{M}{m_{\text{nucléon}}} \quad \text{A.N.} \quad N = \frac{4,2 \times 10^{29}}{1,67 \times 10^{-27}} = 2,5 \times 10^{56}$$

8. Calculer la gravité à la surface de cette étoile et comparer à la gravité sur terre.

$$g_{\text{étoile}} = G \cdot \frac{M}{R_{\text{étoile}}^2} \quad \text{A.N.} \quad g_{\text{étoile}} = 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{4,2 \times 10^{29}}{(10 \times 10^3)^2} = 2,8 \times 10^{11} N \cdot kg^{-1}$$

$$\frac{g_{\text{étoile}}}{g_{\text{Terre}}} = \frac{2,8 \times 10^{11}}{9,8} \approx 3 \times 10^{10}$$

La gravité est 30 milliards de fois plus élevée à la surface de l'étoile que sur Terre.