Effet Doppler et astrophysique

Bac S 2013 Polynésie (ancien programme) · Exercice 2 **6 points** **Durée conseillée 1 h**

1.1 Déterminer, à l'aide du document 3, la longueur d'onde médiane du doublet de Ca^{2+} dans le spectre de NGC 691, puis calculer le « redshift » z de cette galaxie.

Données utiles $\lambda_0 = 5268$ Å ; $z = \dfrac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ (document 1)

Sur le document 3, le doublet est situé un peu après la graduation 5300 Å. L'échelle (100 Å entre 5300 et 5400) donne, pour le milieu du doublet : $\lambda \approx 5315$ Å.

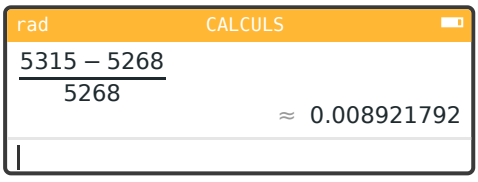
$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{5315 - 5268}{5268} = 8{,}9 \times 10^{-3}$$

$\lambda \approx 5315$ Å et $z \approx 8{,}9 \times 10^{-3}$ (sans unité)

PIÈGE
Inutile de convertir en nanomètres : z est un rapport de deux longueurs, il suffit qu'elles soient dans la même unité.

COMPRENDRE
L'écart $\lambda - \lambda_0 = 47$ Å n'a que deux chiffres significatifs et la lecture se fait à 1 ou 2 Å près : z s'écrit avec deux chiffres au plus. Un résultat 9×10^{-3} est acceptable.

À LA CALCULATRICE



1.2 Calculer la vitesse à laquelle la galaxie NGC 691 s'éloigne de la Terre.

Données utiles $c = 2{,}99792 \times 10^8$ m · s^{-1} ; $\lambda = 5315$ Å et z (1.1)

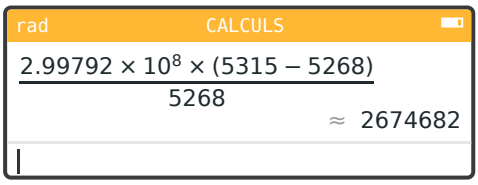
Formule de Doppler du document 1 (cas non relativiste) :

$$V = c\,\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = c\,z = 2{,}99792 \times 10^8 \times \frac{5315 - 5268}{5268} = 2{,}7 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$V \approx 2{,}7 \times 10^6$ m · s^{-1}, soit environ $2{,}7 \times 10^3$ km · s^{-1}

COMPRENDRE
V est très inférieure à c (moins de 1 %) : l'emploi de la formule non relativiste est justifié. La précision de c ne sert à rien ici, c'est z qui limite le résultat à deux chiffres.

À LA CALCULATRICE



1.3 Établir, dans le cas non relativiste, la relation entre la vitesse d'éloignement V de la galaxie et sa distance d à la Terre, et montrer que V est proportionnelle à d.

Document 1 : $V = c\,\dfrac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = c\,z$.

Document 2 (pour un petit « redshift ») : $z = \dfrac{H_0\,d}{c}$.

En remplaçant : $V = c \times \dfrac{H_0\,d}{c}$

$V = H_0\,d$: comme H_0 est une constante, V est proportionnelle à d.

COMPRENDRE
Plus une galaxie est lointaine, plus elle s'éloigne vite : c'est la loi de Hubble, argument en faveur de l'expansion de l'Univers.

1.4 À partir des valeurs de z données dans le document 2, montrer que l'expression de la vitesse d'éloignement du document 1 ne vaut pas pour toutes les galaxies.

D'après le document 2, z atteint 4 ou 5 pour les objets les plus lointains.

L'expression $V = c\,z$ donnerait alors $V = 4c$ à $5c$, donc une vitesse supérieure à la célérité de la lumière dans le vide, ce qui est impossible.

La relation $V = c\,z$ ne s'applique qu'aux petits « redshifts » ($z \ll 1$, soit $V \ll c$), pas aux objets très lointains.

COMPRENDRE
Le cas relativiste relève de la relativité, qui n'est plus au programme actuel de la spécialité. L'effet Doppler et la relation non relativiste restent, eux, au programme.

2.1 Expliquer pourquoi, dans la situation décrite sur le document 4, on a $\lambda_A > \lambda_B$.

Sur le document 4, le vecteur $\vec{V}_A$ est dirigé à l'opposé de l'observateur : l'étoile A s'éloigne de lui. D'après le document 1, sa raie est décalée vers les grandes longueurs d'onde : $\lambda_A > \lambda_0$.

Le vecteur $\vec{V}_B$ est dirigé vers l'observateur : l'étoile B se rapproche, sa raie est décalée vers les courtes longueurs d'onde : $\lambda_B < \lambda_0$.

$\lambda_B < \lambda_0 < \lambda_A$, donc $\lambda_A > \lambda_B$.

PIÈGE
Ne pas raisonner sur la position (gauche ou droite) des étoiles : seul compte le sens de la vitesse le long de l'axe de visée, éloignement ou rapprochement.

COMPRENDRE
Ici λ_0 désigne la longueur d'onde reçue du système si les étoiles n'avaient pas de vitesse le long de la visée. Un mouvement d'ensemble du centre G décalerait les deux raies de la même façon, sans changer la comparaison.

2.2 Compléter, en justifiant, le tableau de l'annexe. Schématiser le spectre correspondant à chaque configuration et montrer que l'évolution temporelle de ces spectres est périodique de période $T/2$.

- Configuration 1 : A s'éloigne et B se rapproche (situation du document 4), donc $\lambda_A > \lambda_B$.
- Configuration 3 : les rôles sont échangés, B s'éloigne et A se rapproche, donc $\lambda_A < \lambda_B$.
- Configurations 2 et 4 : les deux vecteurs vitesse sont perpendiculaires à l'axe de visée, il n'y a pas d'effet Doppler, donc $\lambda_A = \lambda_B$: une seule raie.

Les étoiles passent d'une configuration à la suivante en un quart de tour, soit toutes les $T/4$: 1 ($t = 0$), 2 ($T/4$), 3 ($T/2$), 4 ($3T/4$), puis de nouveau 1 (T).

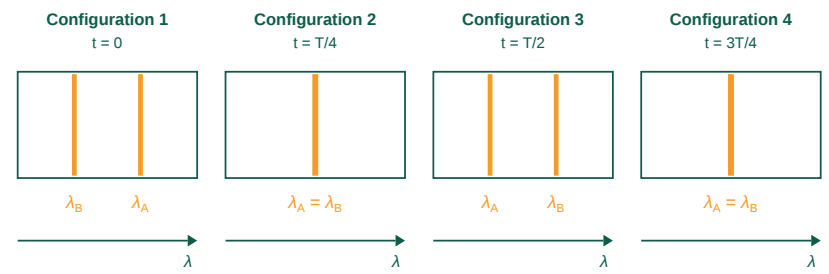
Comme $V_A = V_B$, les deux raies de la configuration 3 occupent les mêmes positions que celles de la configuration 1 (seule l'étoile d'origine change) : les deux spectres sont identiques. De même, les spectres des configurations 2 et 4 sont identiques.

Le spectre se retrouve identique à lui-même au bout d'un demi-tour : son évolution est périodique de période $T/2$.

PIÈGE
La période du mouvement des étoiles est T, mais celle du spectre est $T/2$: sur le spectre, rien ne distingue la raie de A de celle de B.

MÉTHODE
Pour chaque configuration, projeter mentalement chaque vitesse sur l'axe de visée : composante qui s'éloigne, raie décalée vers le rouge ; qui se rapproche, vers le bleu ; nulle, pas de décalage.

Relation	$\lambda_A = \lambda_B$	$\lambda_A > \lambda_B$	$\lambda_A < \lambda_B$
Configuration(s)	2 et 4	1	3



Le spectre de la configuration 3 est identique à celui de la configuration 1 : motif répété tous les T/2.

2.2 · Annexe complétée et allure des spectres (raies d'absorption en orange)

2.3 À l'aide des spectres du document 5 (raie H_α de l'étoile double HD 80715), vérifier que la période T de celle-ci est voisine de 3,8 jours.

Données utiles dates des spectres en jours (document 5) ; période des spectres : $T/2$ (2.2)

À la date 0,061 j, le spectre ne présente qu'une seule raie ($\lambda_A = \lambda_B$). La raie se dédouble ensuite, puis on retrouve une raie unique à 1,886 j et encore à 2,038 j ; elle est de nouveau dédoublée à 2,148 j.

La durée entre deux raies uniques successives vaut $T/2$ (question 2.2). La superposition suivante a donc lieu entre les dates 1,886 j et 2,038 j :

- $T/2 \geqslant 1{,}886 - 0{,}061 = 1{,}825$ j, soit $T \geqslant 3{,}65$ j ;
- $T/2 \leqslant 2{,}038 - 0{,}061 = 1{,}977$ j, soit $T \leqslant 3{,}95$ j.

Valeur moyenne : $T \approx \dfrac{3{,}65 + 3{,}95}{2} = 3{,}80$ j.

$3{,}65 \text{ j} \leqslant T \leqslant 3{,}95$ j, soit $T \approx 3{,}8$ jours : la valeur annoncée est vérifiée.

PIÈGE
L'intervalle entre deux spectres à raie unique est $T/2$ et non T : oublier le facteur 2 donne une période de 1,9 jour.

COMPRENDRE
Contrôle : à 3,654 j et 3,677 j les deux raies sont presque confondues ; la superposition suivante est proche, cohérente avec $0{,}061 + 3{,}8 \approx 3{,}86$ j.

À LA CALCULATRICE

