Le monde selon Hubble

Bac S 2014 Asie (ancien programme) · Exercice 1 **7 points** **Durée conseillée 1 h 10**

1.1 Indiquer les limites en longueur d'onde de la partie visible du spectre électromagnétique.

Dans le vide, la lumière visible correspond aux longueurs d'onde comprises entre le violet et le rouge.

$400 \text{ nm} \leqslant \lambda \leqslant 800 \text{ nm}$

COMPRENDRE
En dessous de 400 nm s'étend l'ultraviolet, au-dessus de 800 nm l'infrarouge. Ces deux domaines servent dès la question suivante.

1.2 Justifier précisément l'expression « … en infrarouge ou ultraviolet, sans les contraintes dues à l'atmosphère terrestre ».

Données utiles document 2 (opacité de l'atmosphère selon la longueur d'onde) ; altitude de Hubble : 600 km (document 1)

D'après le document 2, l'opacité de l'atmosphère vaut 100 % pour les longueurs d'onde inférieures à 300 nm environ (ultraviolet). Elle est aussi forte, voire totale, sur une grande partie de l'infrarouge, entre 1 µm et 1 mm. Ces rayonnements sont absorbés avant d'atteindre le sol : un télescope terrestre ne peut pas les observer correctement.

Placé à 600 km d'altitude, au-dessus de l'atmosphère, Hubble reçoit les rayonnements ultraviolets et infrarouges sans qu'ils aient été absorbés.

MÉTHODE
« Justifier précisément » à partir d'un document : citer le document, relever des valeurs lues (ici 100 % d'opacité, 300 nm), puis conclure sur la phrase à expliquer.

1.3 Citer une source de rayonnement ultraviolet extraterrestre détectable par le HST.

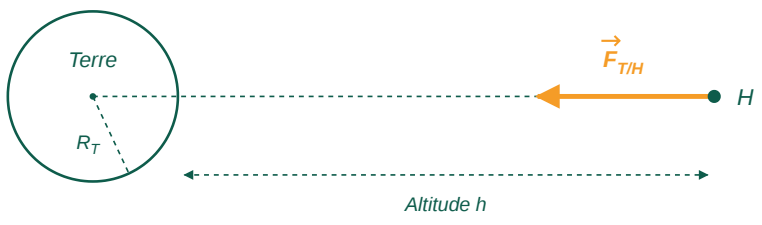
Les étoiles chaudes, dont le Soleil, émettent une partie de leur rayonnement dans l'ultraviolet.

2.1 Représenter sans souci d'échelle, sur la figure 1 de l'annexe, la force d'interaction gravitationnelle $\vec{F}_{T/H}$ exercée par la Terre sur le satellite H.

La force $\vec{F}_{T/H}$ est attractive : elle s'applique en H, sa direction est la droite reliant H au centre de la Terre, son sens va de H vers la Terre.

Flèche tracée à partir de H, le long du segment pointillé, dirigée vers le centre de la Terre (voir la figure).

PIÈGE
Faire partir la flèche du centre de la Terre : on tracerait alors la force exercée par le satellite sur la Terre. Le vecteur part du point qui subit la force.



2.1 · Figure 1 de l'annexe complétée

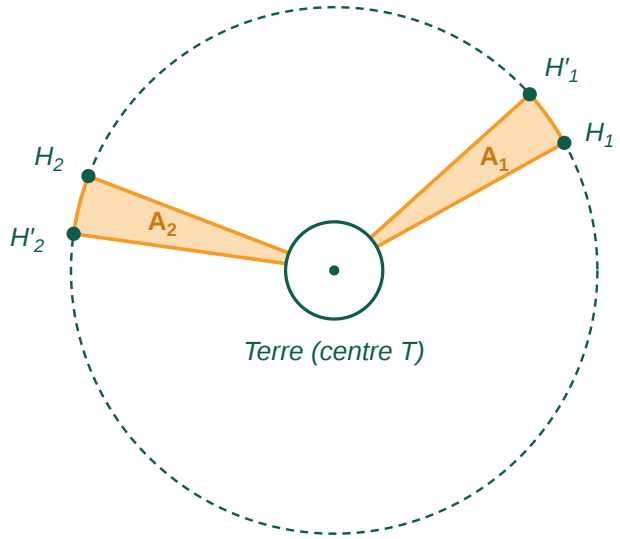
2.2.1 Énoncer la deuxième loi de Kepler et compléter la figure 2 de l'annexe pour illustrer cette loi.

Deuxième loi de Kepler (loi des aires) : le segment qui relie le centre de la Terre au satellite balaie des aires égales pendant des durées égales.

Sur la figure 2, on trace les quatre rayons joignant le centre T de la Terre à H_1, H'_1, H_2 et H'_2, puis on colore les deux secteurs obtenus.

Les durées de parcours étant égales, les aires $\mathcal{A}_1$ (secteur $TH_1H'_1$) et $\mathcal{A}_2$ (secteur $TH_2H'_2$) sont égales.

COMPRENDRE
Énoncée par Kepler pour une planète autour du Soleil, la loi vaut pour tout satellite soumis à la seule attraction de son astre : on remplace le Soleil par la Terre.



Durées égales : aire A₁ = aire A₂

2.2.1 · Figure 2 de l'annexe complétée : deux secteurs de même aire

2.2.2 En déduire que le mouvement du satellite est circulaire uniforme.

La trajectoire est un cercle de centre T : le rayon $r = R_T + h$ est constant. Un secteur de rayon r et d'arc ℓ a pour aire $\mathcal{A} = \frac{1}{2}\, r\, \ell$.

Les aires $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ étant égales et r étant le même, les arcs $H_1H'_1$ et $H_2H'_2$ ont la même longueur ℓ.

Ces arcs sont parcourus pendant la même durée Δt, donc $v_1 = \frac{\ell}{\Delta t} = v_2$. Ce raisonnement vaut pour deux portions quelconques de l'orbite.

La valeur de la vitesse est constante sur une trajectoire circulaire : le mouvement est circulaire uniforme.

PIÈGE
Écrire seulement « les aires sont égales donc la vitesse est constante ». C'est le rayon constant du cercle qui permet de passer des aires égales aux arcs égaux.

2.3 Établir, à l'aide des lois de Newton, l'expression de la valeur a de l'accélération du satellite dans le référentiel géocentrique, en fonction de G, M, h et R_T.

Système : le satellite H, de masse m constante. Référentiel géocentrique, supposé galiléen. Seule force : l'attraction de la Terre, de valeur $F_{T/H} = \dfrac{G\,M\,m}{(R_T+h)^2}$, la distance entre H et le centre de la Terre étant $R_T + h$.

Deuxième loi de Newton : $\vec{F}_{T/H} = m\,\vec{a}$, donc $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}_{T/H}}{m}$. L'accélération est dirigée de H vers le centre de la Terre et sa valeur est $a = \dfrac{F_{T/H}}{m}$.

$$a = \frac{G\,M}{(R_T+h)^2}$$

PIÈGE
Écrire h^2 ou R_T^2 au dénominateur. La loi de la gravitation fait intervenir la distance entre les centres, soit $R_T + h$.

COMPRENDRE
La masse m se simplifie : l'accélération, donc le mouvement du satellite, ne dépend pas de sa masse.

2.4 Montrer que la vitesse du satellite peut se mettre sous la forme $v = \sqrt{\dfrac{G\,M}{R_T+h}}$.

Données utiles $a = \dfrac{G\,M}{(R_T+h)^2}$ (2.3) ; mouvement circulaire uniforme (2.2.2)

Pour un mouvement circulaire uniforme de rayon $r = R_T + h$, l'accélération est centripète et vaut $a = \dfrac{v^2}{R_T+h}$.

En égalant avec l'expression de la question 2.3 :

$$\frac{v^2}{R_T+h} = \frac{G\,M}{(R_T+h)^2} \quad \text{soit} \quad v^2 = \frac{G\,M}{R_T+h}$$

$v = \sqrt{\dfrac{G\,M}{R_T+h}}$, ce qui est l'expression attendue.

MÉTHODE
Satellite en orbite circulaire : 1) deuxième loi de Newton pour obtenir a ; 2) $a = v^2/r$ pour le mouvement circulaire uniforme ; 3) égalité des deux expressions pour isoler v.

2.5 Le calcul de la vitesse conduit à environ $7 \times 10^3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Montrer que cette valeur est compatible avec les données.

Données utiles document 1 : un tour de circonférence $L \approx 42\,000$ km en $T \approx 100$ min

Le sujet ne donne pas les valeurs de G, M et R_T : on utilise le document 1. Le mouvement étant uniforme, le satellite parcourt la circonférence L de son orbite pendant la durée T d'un tour :

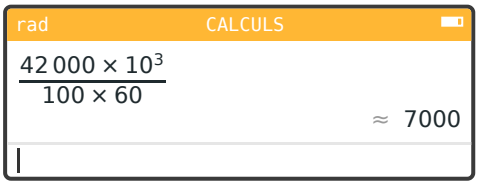
$$v = \frac{L}{T} = \frac{42\,000 \times 10^3}{100 \times 60} = 7{,}0 \times 10^3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$v = 7{,}0 \times 10^3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: on retrouve bien la valeur annoncée, environ $7 \times 10^3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

PIÈGE
Diviser des kilomètres par des minutes. Il faut convertir : $42\,000\ \text{km} = 4{,}2 \times 10^7$ m et $100\ \text{min} = 6{,}0 \times 10^3$ s.

COMPRENDRE
Les données sont approchées (« environ ») et connues à deux chiffres significatifs : le résultat s'écrit avec deux chiffres, $7{,}0 \times 10^3$.

À LA CALCULATRICE



3.1 Pour une source sonore qui s'éloigne de l'observateur, indiquer si le son perçu est plus aigu ou plus grave que lorsque la source est immobile. Justifier.

D'après le document 3, lorsque l'émetteur s'éloigne de l'observateur, la longueur d'onde reçue augmente et la fréquence reçue diminue. Or un son est d'autant plus grave que sa fréquence est faible.

Le son perçu est plus grave que lorsque la source est immobile.

COMPRENDRE
La célérité du son dans l'air ne change pas. Comme $\lambda = \frac{v_{son}}{f}$, une longueur d'onde plus grande correspond à une fréquence plus petite.

3.2 La galaxie NGC 3627 s'éloigne-t-elle ou se rapproche-t-elle de la Terre ?

Données utiles document 3 : raie de l'hydrogène au laboratoire à 6562,8 Å ; même raie dans le spectre de la galaxie vers 6580 Å

Sur le spectre du document 3, la raie de l'hydrogène de la galaxie est située vers 6580 Å, alors que la même raie mesurée au laboratoire (source immobile) est à 6562,8 Å. La longueur d'onde reçue est plus grande : la raie est décalée vers le rouge.

D'après le document 3, un décalage vers le rouge signifie que la galaxie NGC 3627 s'éloigne de la Terre.

PIÈGE
Répondre sans comparer les deux raies. La conclusion repose sur le sens du décalage, donc sur la position de la raie de la galaxie par rapport à la raie de référence.

3.3 Commenter la phrase « Edwin Hubble a remarqué que la vitesse à laquelle semblaient s'éloigner les galaxies qu'il observait était proportionnelle à leur distance à la Terre ».

Données utiles document 4 : vitesse des galaxies en fonction de leur distance (Hubble, 1929)

Les vitesses des galaxies sont obtenues grâce à l'effet Doppler, à partir du décalage vers le rouge des raies de leur spectre. Sur le document 4, les points représentant la vitesse v en fonction de la distance d sont assez dispersés, mais ils se répartissent autour d'une droite passant pratiquement par l'origine.

Le graphique est modélisé par une fonction linéaire, $v = H_0 \times d$: la vitesse d'éloignement est proportionnelle à la distance. Plus une galaxie est lointaine, plus elle s'éloigne vite.

COMPRENDRE
Deux grandeurs sont proportionnelles lorsque leur graphique est une droite passant par l'origine. Une droite qui ne passe pas par l'origine traduit une relation affine, pas une proportionnalité.

3.4.1 À partir du graphique du document 4, estimer la valeur de H_0 proposée par Edwin Hubble, en précisant son unité.

Données utiles document 4 : la droite tracée passe près de l'origine et près du point ($d = 2$ Mpc ; $v = 1000\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)

H_0 est le coefficient directeur de la droite du document 4. On choisit un point de la droite éloigné de l'origine : pour $d = 2$ Mpc, on lit $v \approx 1000\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$.

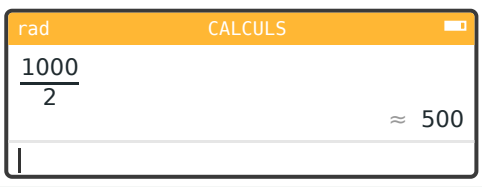
$$H_0 = \frac{v}{d} = \frac{1000}{2} = 5 \times 10^2\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

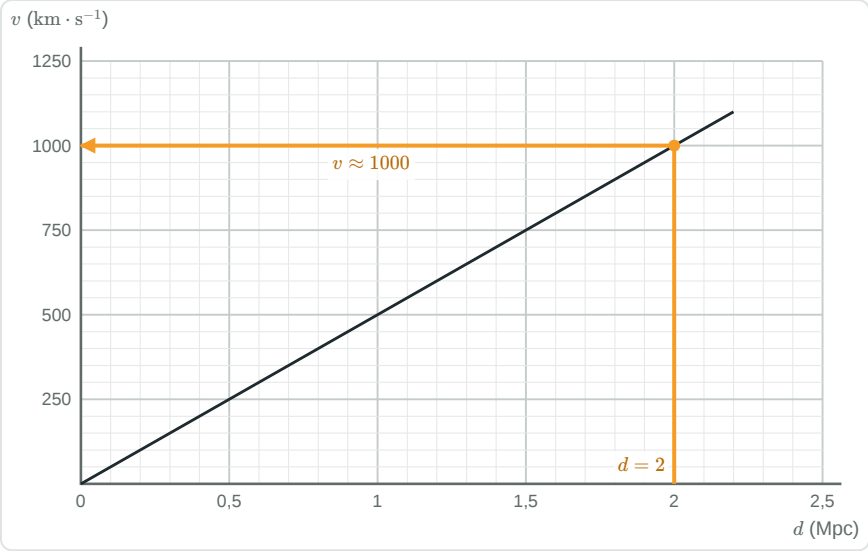
$H_0 \approx 5 \times 10^2\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$

PIÈGE
Calculer H_0 avec un point expérimental isolé. Les points sont dispersés : on lit sur la droite moyenne, le plus loin possible de l'origine.

COMPRENDRE
L'unité se déduit du quotient : une vitesse en $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ divisée par une distance en Mpc. La lecture est grossière, un seul chiffre significatif suffit.

À LA CALCULATRICE





3.4.1 · Document 4 : droite tracée par Hubble et lecture à 2 Mpc

3.4.2 Discuter de la validité de la loi de Hubble et comparer la valeur actuelle de H_0 à celle proposée par Edwin Hubble.

Données utiles document 5 : la droite passe par le point ($d = 400$ Mpc ; $v \approx 25\,000$ km · s^{-1}) ; $H_0 \approx 5 \times 10^2$ km · s^{-1} · Mpc^{-1} (3.4.1)

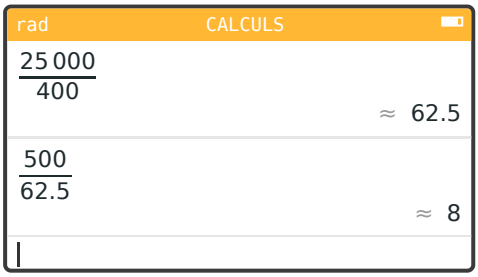
Validité : sur le document 5, les points sont bien alignés sur une droite passant par l'origine, pour des distances allant jusqu'à 450 Mpc environ, alors que Hubble ne disposait que de galaxies situées à moins de 2 Mpc. La loi $v = H_0 \times d$ reste donc valable pour des galaxies bien plus lointaines, avec des points nettement moins dispersés.

Valeur actuelle : pour $d = 400$ Mpc, on lit sur la droite $v \approx 25\,000$ km · s^{-1}.

$$H_0 = \frac{25\,000}{400} \approx 63 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

$H_0 \approx 63$ km · s^{-1} · Mpc^{-1}, soit une valeur environ 8 fois plus faible que celle de Hubble (5×10^2 km · s^{-1} · Mpc^{-1}).

À LA CALCULATRICE



COMPRENDRE

Selon le point lu sur la droite, on trouve entre 60 et 65 km · s^{-1} · Mpc^{-1} : toute valeur de cet ordre est acceptée.

MÉTHODE

« Comparer » deux valeurs demande une conclusion chiffrée : on calcule leur rapport (ici voisin de 8) plutôt que d'écrire seulement « plus petite ».

3.5 Expliquer pourquoi l'application de cette loi à une galaxie située à 10 000 Mpc se heurterait à un principe fondamental de la physique.

Données utiles $H_0 \approx 63\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ (3.4.2) ; $d = 10\,000$ Mpc ; célérité de la lumière dans le vide $c = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

D'après la loi de Hubble :

$$v = H_0 \times d = 63 \times 10\,000 = 6{,}3 \times 10^5\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1} = 6{,}3 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Cette vitesse serait environ deux fois plus grande que la célérité de la lumière dans le vide, $c = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$v \approx 6{,}3 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} > c$: or aucun objet ne peut dépasser la célérité de la lumière dans le vide, vitesse limite selon la relativité restreinte. La loi ne peut pas s'appliquer telle quelle à cette distance.

PIÈGE

Comparer $6{,}3 \times 10^5\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ à $3{,}00 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ sans convertir : on conclurait à tort que la vitesse reste inférieure à c.

COMPRENDRE

La relativité restreinte n'est plus au programme de la spécialité actuelle. À retenir seulement : la célérité de la lumière dans le vide est une vitesse limite.

À LA CALCULATRICE

