Concours commun Mines-Ponts, France

Session 2026, filière MP

Physique 2

Durée : 3 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I.A : télescope unique
- Partie I.B : association de deux télescopes
- Partie I.C : association de N télescopes
- Partie II.A : répartition de masse
- Partie II.B : formation d'étoiles

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/mines/mp/2026/physique2

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

A2026 – PHYSIQUE II MP

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS et CHAUSSÉES,
ISAE-SUPAERO, ENSTA,
TÉLÉCOM PARIS, MINES PARIS - PSL,
MINES SAINT-ÉTIENNE, MINES NANCY,
IMT ATLANTIQUE, ENSAE PARIS,
CHIMIE PARISTECH - PSL.

Concours Mines-Télécom,
Concours Centrale-Supélec (Cycle International).

CONCOURS 2026

DEUXIÈME ÉPREUVE DE PHYSIQUE

Durée de l'épreuve : 3 heures

L'usage de la calculatrice ou de tout dispositif électronique est interdit.

Les candidats sont priés de mentionner de façon apparente sur la première page de la copie :

PHYSIQUE II - MP

L'énoncé de cette épreuve comporte 9 pages de texte.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

.

Les sujets sont la propriété du GIP CCMP. Ils sont publiés sous les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 3.0 France.

Tout autre usage est soumis à une autorisation préalable du Concours commun Mines-Ponts.

De la physique avec les galaxies

Ce sujet comporte deux parties totalement indépendantes. La partie **I** s'intéresse à l'observation des galaxies à l'aide d'une association de télescopes. La partie **II** étudie la répartition de matière au sein des galaxies et l'évolution de leur masse au cours du temps.
Les applications numériques seront données avec 1 chiffre significatif.
Les vecteurs sont surmontés d'un chapeau s'ils sont unitaires $\widehat{u}$ ou d'une flèche dans le cas général $\vec{v}$. Les vecteurs unitaires de la base cartésienne sont notés $(\widehat{u}_x, \widehat{u}_y, \widehat{u}_z)$ et ceux de la base sphérique $(\widehat{u}_r, \widehat{u}_\theta, \widehat{u}_\varphi)$.

Un ensemble de données et un formulaire mathématique sont regroupés en fin de sujet.

I L'observation des galaxies

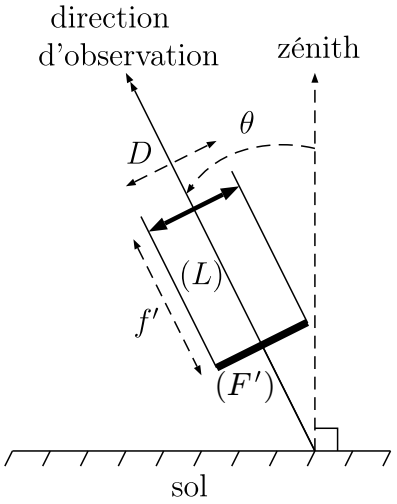
Pour étudier les détails d'une galaxie, il est nécessaire d'avoir des dispositifs d'observation de grande sensibilité (choix du capteur, quantité de lumière récoltée) avec une résolution angulaire qui soit la plus petite possible.
Dans toute la suite, on étudie des ondes lumineuses monochromatiques, de longueur d'onde $\lambda_0 = 2{,}0\,\mu\text{m}$, dans un milieu assimilé au vide.

❑ **– 1.** Dans quel domaine spectral se situent ces ondes ?

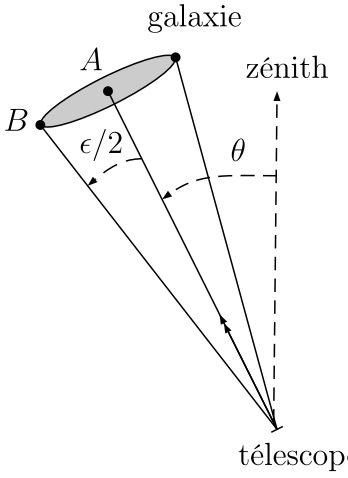
I.A Télescope unique

La plupart des grands télescopes sont aujourd'hui constitués de miroirs paraboliques, avec des diamètres de plusieurs mètres. Néanmoins, pour en modéliser le fonctionnement, tant en optique géométrique qu'en optique ondulatoire, il est équivalent de représenter un tel télescope par une lentille convergente (L) de distance focale f' et de diamètre D ; l'observation se fait alors dans le plan focal image (F') de (L), par une caméra numérique.

La figure 1(a) représente l'ensemble des éléments de ce télescope orientable, dont la direction d'observation fait un angle θ avec la direction verticale (zénith).



(a) Représentation d'un télescope unique



(b) Observation d'une galaxie

FIGURE 1 – Modélisation du dispositif

On étudie d'abord un télescope unique du point de vue de l'optique géométrique. Il pointe une galaxie (assimilée à un disque d'éclairement uniforme) dans sa direction d'observation θ, c'est à dire que son axe optique vise le centre A de la galaxie. Cette galaxie est vue sous un angle $\epsilon \ll 1$.

Pour comprendre les limites de résolution du télescope, on réduit la galaxie à deux de ses points (figure 1(b)) :

— son centre A dans la direction de l'axe optique ;

— un point B au bord de la galaxie dans la direction $\epsilon/2$ par rapport à l'axe optique.

Pour les besoins de la représentation, sur la figure 1(b), ϵ n'est pas très petit devant 1 ; cette représentation ne doit donc pas faire oublier que tous les rayons issus d'un point donné de la galaxie arrivent parallèlement entre eux au niveau du télescope.

❑ **– 2.** Construire les images géométriques A' et B' des points A et B.

Quelle est la distance entre ces deux images ?

Sachant que le capteur est constitué de cellules CCD distantes de a, quelle est la résolution angulaire r_{cap} de ce capteur, c'est-à-dire la plus petite valeur ϵ qu'il peut détecter, en fonction de a et f' ?

En pratique, du fait du phénomène de diffraction à l'entrée du télescope (diamètre D, comme la lentille), les images A' et B' ne sont pas ponctuelles, mais sont des tâches circulaires centrées sur les images géométriques de A et B.

❑ **– 3.** Quelle est, en ordre de grandeur, l'ouverture angulaire de chaque tâche de diffraction, à exprimer en fonction de λ_0 et D ?

On considère qu'on peut distinguer deux points si la distance entre leurs images géométriques est supérieure à la taille caractéristique d'une tâche. En déduire la résolution angulaire due à la diffraction r_{diff} du télescope, en fonction de λ_0 et D.

Pour de grands télescopes, on peut donner les ordres de grandeur suivants : $a = 1{,}0\,\mu\text{m}$ et $f' = 10\,\text{m}$.

❑ **– 4.** Considérant les deux questions précédentes, et les valeurs de a, f' et λ_0 fixées, proposer une expression littérale du diamètre D_{max} du télescope au-delà duquel sa résolution n'augmente pas.

Effectuer l'application numérique pour les ordres de grandeur proposés. Commenter.

I.B Association de 2 télescopes

Depuis plusieurs décennies, l'association de télescopes en systèmes interférentiels permet d'améliorer significativement la résolution angulaire en comparaison d'un télescope unique. C'est un tel système, l'*Event Horizon Telescope*, qui a permis, en avril 2019, de fournir la première « image » d'un trou noir situé au centre d'une galaxie situé à 53 millions d'années lumières de la notre, puis, en 2022, celle du trou noir situé au centre de la Voie lactée.

On considère dans la suite l'association de deux télescopes (T_1) et (T_2) dont les axes optiques pointent dans la même direction θ.

La première sous-partie détaille l'élaboration d'un système interférentiel équivalent aux deux télescopes, tandis que la seconde, très indépendante de la précédente, en exploite le principe de fonctionnement.

I.B.1 Élaboration d'un modèle équivalent

Les deux faisceaux lumineux issus des deux télescopes sont guidés par un système de miroirs et recombinés (superposés), voir figure 2, en une seule figure d'interférence.
Ces deux télescopes, identiques à celui étudié précédemment, sont représentés très schématiquement. Sur la figure 2, la distance au sol entre les deux télescopes (distance de base) est notée b_0.

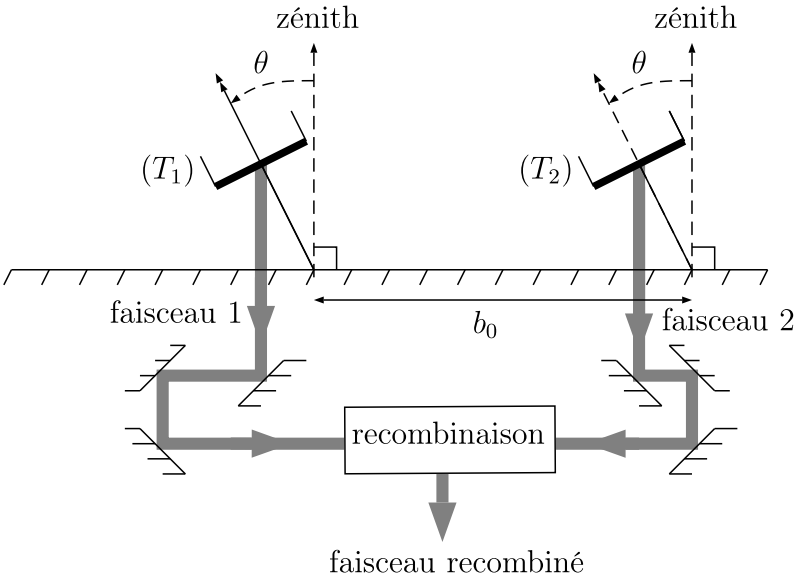


FIGURE 2 – Représentation d'un télescope double

❑ – **5**. On considère deux rayons issus d'une même source ponctuelle à l'infini dans la direction θ et confondus avec les axes optiques des télescopes. À l'aide d'un schéma, exprimer la différence de marche $\delta_0(\theta)$ entre ces deux rayons, à leur entrée dans les télescopes.

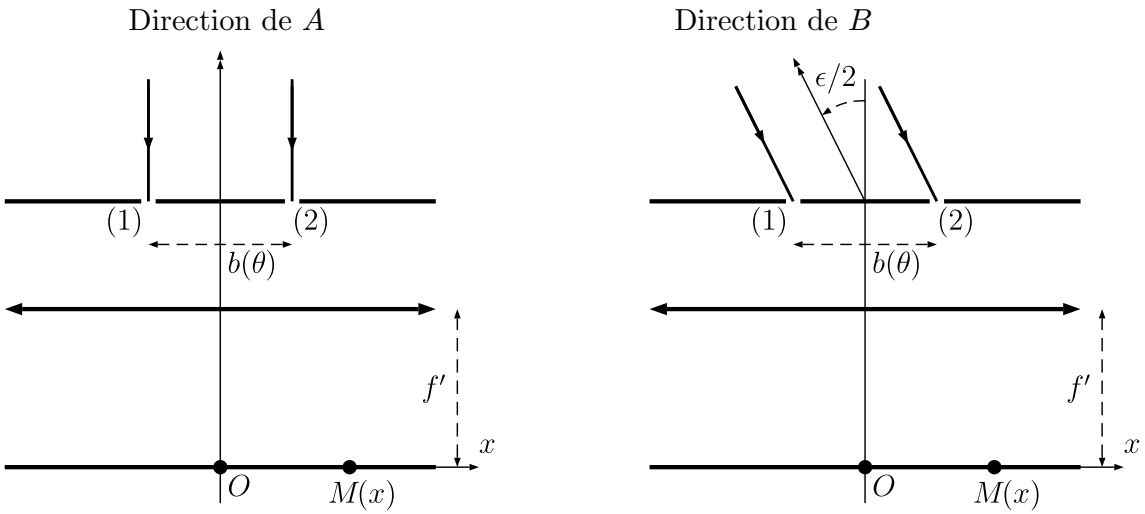
La distance b_0 peut valoir plusieurs centaines de mètres, expliquer pourquoi il est nécessaire que le système de miroirs mobiles menant les faisceaux au dispositif de recombinaison compense cette différence de marche.

❑ – **6**. Montrer par un schéma que la distance entre les deux axes optiques des télescopes, nommée distance de base équivalente, est $b(\theta) = b_0 \cos(\theta)$.

Les télescopes actuels étant capables de pointer en permanence vers un même astre, expliquer pourquoi la distance de base équivalente est considérée comme un paramètre variable.

I.B.2 Étude du système équivalent

On suppose que la différence de marche $\delta_0(\theta)$ est désormais parfaitement compensée, à tout instant.
Les deux télescopes (T_1) et (T_2) peuvent être représentés par un système simplifié de deux fentes de Young (1) et (2) distantes de $b(\theta)$ devant une lentille convergente de distance focale f'.
L'observation se fait dans le plan focal image de cette lentille. Le système équivalent est alors présenté en figure 3, sur laquelle sont représentées deux situations, correspondant à l'observation de deux sources ponctuelles A (centre de la galaxie) et B (bord de la galaxie) à l'infini, supposées de même intensité : l'une dans la direction de l'axe optique, et l'autre dans une direction faisant un angle $\epsilon/2$ avec cet axe.



(a) Rayons issus de A (b) Rayons issus de B

FIGURE 3 – Représentation schématique d'un télescope double

❑ **– 7.** En ayant recours à une construction des rayons issus de A et interférant en $M(x)$, exprimer $p_A(x)$ l'ordre d'interférence en $M(x)$ en fonction de λ_0, x, f' et $b(\theta)$.
Montrer que l'intensité lumineuse dans le plan d'observation se met sous la forme $I_A(x) = 2I_0\left[1+\cos\left(\frac{2\pi b(\theta)x}{\lambda_0 f'}\right)\right]$.
Que représente I_0 ?
Décrire l'allure de la figure d'interférence : formes des franges, interfrange, contraste.
Dans quelle mesure le contraste et l'interfrange dépendent-ils de $b(\theta)$?

❑ **– 8.** Exprimer de la même manière $p_B(x)$, l'ordre d'interférence en $M(x)$ pour les rayons issus de B.
Pourquoi la figure d'interférence obtenue par la présence simultanée de A et B est la superposition des deux figures ?
En déduire pour quelles valeurs de $b(\theta)$ il y a brouillage des franges.

❑ **– 9.** Quelle est la plus petite valeur de $b(\theta)$ permettant d'annuler le contraste ?
Comment utiliser la figure d'interférence pour mesurer la taille d'une galaxie, en supposant connue sa distance au télescope ?

❑ **– 10.** Sachant que $b(\theta)$ peut varier entre les valeurs extrémales 0 et b_0, déterminer la résolution angulaire r_{double} d'un tel télescope en fonction de λ_0 et b_0.
Pourquoi dit-on qu'un tel télescope est équivalent à un unique télescope de diamètre b_0 ?
Effectuer l'application numérique de r_{double} pour $b_0 = 1$ km.

❑ **– 11.** Néanmoins, pourquoi un tel télescope double ne permet-il pas l'observation d'objets moins lumineux, comme le ferait un télescope unique de diamètre b_0 ?

On considère désormais l'ensemble de la galaxie : son centre est pointé par l'axe optique du télescope. Les étoiles de la galaxie vues sous les angles de α à $\alpha + \mathrm{d}\alpha$ génèrent une intensité lumineuse $\mathrm{d}I_{\text{gal}}(x) = \Gamma \mathrm{d}\alpha\left\{1+\cos\left[\frac{2\pi b(\theta)(x/f'+\alpha)}{\lambda_0}\right]\right\}$, avec Γ une grandeur constante.

❑ **– 12.** Déterminer l'intensité totale de $I_{\text{gal}}(x)$ résultante, en faisant apparaître la fonction sinus cardinal définie en annexe.
En déduire l'expression du contraste de la figure d'interférence obtenue en fonction de $b(\theta)$, en tracer l'allure, et commenter.
Qu'est-ce qui permet de distinguer une galaxie d'une étoile double, qui se réduirait à deux points sources vus sous un angle $\epsilon/2$?

I.C Association de N télescopes

Certains systèmes d'observation utilisent un nombre $N > 2$ télescopes alignés pointant tous la même direction, et distants de b_0 constant à leur base.

❑ – **13.** Représenter schématiquement un tel dispositif comme en figure 3. Pour N grand, l'intensité lumineuse n'est non nulle que lorsque deux rayons issus d'un même point source et reçus par deux télescopes voisins sont en phase. Expliquer dans quelle mesure tout se passe comme si on avait un télescope de diamètre infiniment grand.

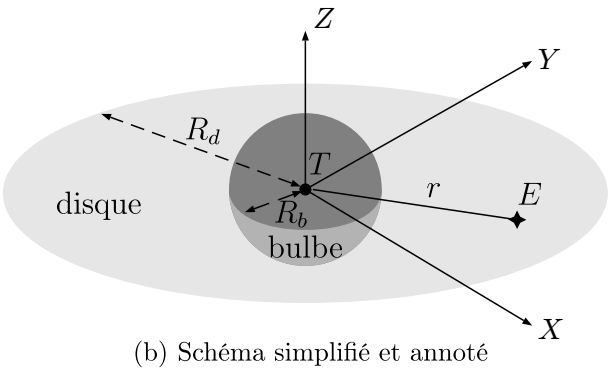
II Quelques propriétés galactiques

II.A Répartition de masse

On modélise une galaxie comme la Voie Lactée par un bulbe sphérique de rayon $R_b = 2\,\text{kpc}$ entouré d'un disque de rayon $R_d = 15\,\text{kpc}$ (figure 4). Au centre de la galaxie se situe un trou noir ponctuel T de masse $M_T = 4 \times 10^6 M_\odot$ où $M_\odot \simeq 2 \times 10^{30}\,\text{kg}$ désigne la masse du Soleil.



(a) Photographie d'une galaxie par le télescope Hubble



(b) Schéma simplifié et annoté

FIGURE 4 – Photo et modélisation d'une galaxie

On considère dans un premier temps une étoile E de masse $M_\odot$ qui ne serait soumise qu'à la seule attraction gravitationnelle du trou noir T. Elle décrit une trajectoire circulaire de rayon r dans le plan du disque (T,XY).

❑ – **14.** Montrer que le mouvement est uniforme.

Exprimer la vitesse $v(r)$ et la période τ du mouvement de l'étoile en fonction de r et des données.

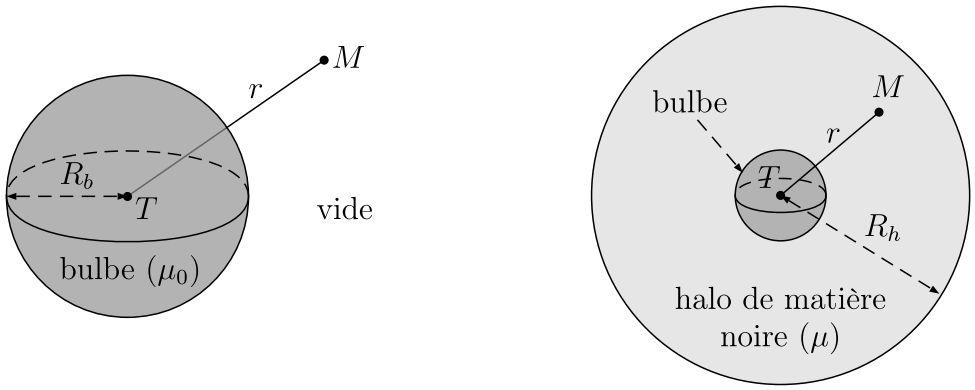
Pour le Soleil, situé à 8 kpc du centre galactique, des observations fournissent une vitesse de $200\,\text{km.s}^{-1}$, le trou noir seul peut-il en être la cause ?

On néglige dorénavant l'influence gravitationnelle du trou noir devant celle du bulbe de masse $M_b = 2 \times 10^{11} M_\odot \gg M_T$. On repère un point M de l'espace par ses coordonnées sphériques de centre T et le vecteur $\overrightarrow{TM} = r\widehat{u}_r$. Pour la galaxie, on adopte le modèle suivant, cf. figure5 (a) :

— Bulbe, $r \in [0,R_b]$: boule de matière répartie uniformément de masse volumique μ_0 ;

— Disque, $r \in [R_b,R_d]$: infiniment mince et très faible densité de matière assimilée au vide.

❑ – **15.** Grâce à une analogie électrostatique, justifier que le théorème de Gauss pour le champ gravitationnel $\vec{g}$ s'écrit $\oiint_S \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{\text{int}}$ où M_{int} désigne la masse située à l'intérieur de la surface fermée S.



(a) Influence gravitationnelle du bulbe

(b) Présence de matière noire

FIGURE 5 – Modèles galactiques

❑ – **16.** Déterminer, en fonction notament de M_b, le champ gravitationnel créé en un point M de l'espace, selon que $r \leq R_b$ ou $R_b \leq r \leq R_d$.

En déduire la vitesse v_0 d'une étoile en mouvement circulaire de rayon r dans ces deux domaines, puis tracer l'allure de la courbe $v_0(r)$.

Justifier quel domaine suit les lois de Kepler ?

Le modèle précédent s'appuie sur la répartition de masse de la matière visible (étoiles et gaz interstellaire). Il n'est pas compatible avec les observations car les étoiles situées dans le disque ($R_b \leq r \leq R_d$) possèdent une vitesse de rotation indépendante de r. Pour interpréter ce fait, on postule l'existence d'un gigantesque halo de matière non visible, appelée matière noire, entourant le bulbe. Les caractéristiques de ce nouveau modèle sont les suivantes (figure 5(b)) :

— la matière noire est sensible à l'interaction gravitationnelle ;

— le halo de matière noire, de forme sphérique, s'étend de R_b à $R_h = 100\,\text{kpc}$ avec une masse volumique $\mu(r)$;

— à l'intérieur du halo de matière noire, le bulbe n'a aucun effet gravitationnel ;

— les étoiles du disque décrivent des mouvements circulaires de vitesse v_1 constante.

❑ – **17.** À partir du théorème de Gauss, exprimer, en tout point M de l'espace, $\text{div}\vec{g}$ en fonction de la masse volumique en ce point.

En déduire $\mu(r)$ dans le halo en fonction de v_1, G et r.

Retrouver ce résultat, à un préfacteur numérique près, par analyse dimensionnelle.

❑ – **18.** Pour $v_1 = 200\,\text{km.s}^{-1}$, exprimer puis calculer la masse de matière noire dans la galaxie en unités de masses solaires.

Quel pourcentage de la masse galactique représente-t-elle ?

II.B Formation d'étoiles

Les galaxies sont connectées entre elles par une grande « toile cosmique » résultant de la compétition entre l'expansion de l'Univers qui tend à le disperser et la gravitation qui tend à le concentrer. La capacité d'une galaxie à produire de nouvelles étoiles résulte de également de cette compétition :

— L'apport de matière issu notamment des filaments de la toile cosmique qui confèrent sa masse à la galaxie ;

— La consommation de matière dans les étoiles déjà formées.

La figure 6 regroupe des résultats de mesure pour des galaxies situées dans l'environnement proche de la Voie Lactée. Ils montrent que le taux de formation d'étoiles $\dot{m} = \dfrac{dm}{dt}$ (en $M_\odot$/an) au sein d'une galaxie est lié à la masse m de l'ensemble des étoiles qu'elle contient (en $M_\odot$). En échelle logarithmique, les galaxies se répartissent principalement le long d'une droite appelée séquence principale.

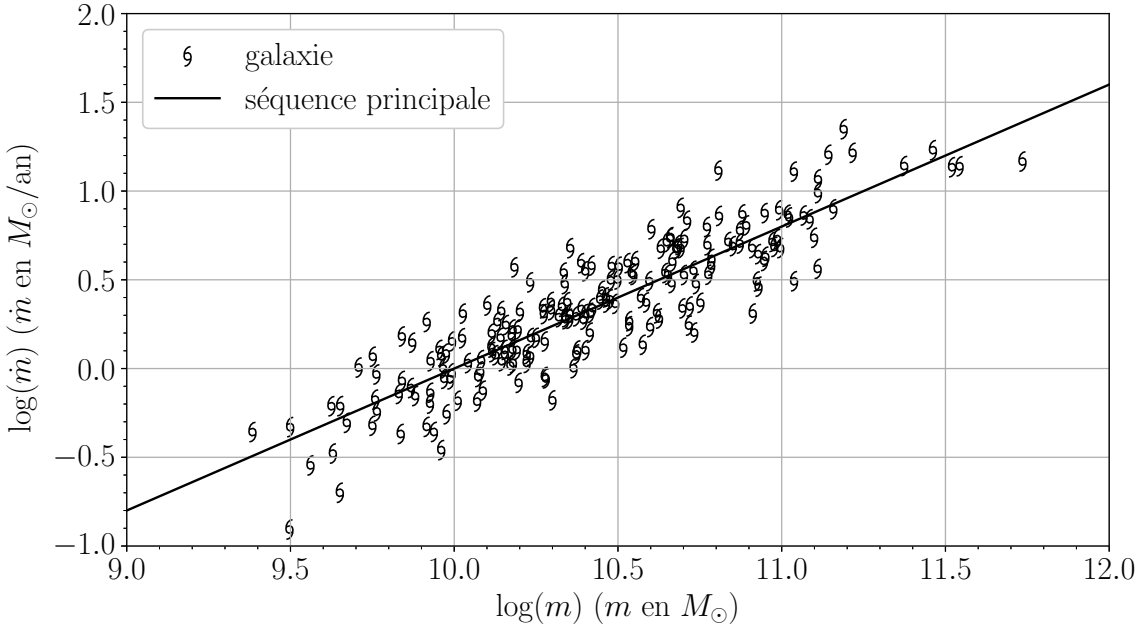


FIGURE 6 – Séquence principale des galaxies

❑ – **19**. Pour des galaxies de la séquence principale, écrire l'équation différentielle vérifiée par $m(t)$ sous la forme $\dot{m} = \alpha_0 m^{\beta_0}$ où α_0 et β_0 sont des paramètres numériques à estimer en conservant les unités du graphe.

Justifier pourquoi la création d'étoiles est plus efficace dans les galaxies les moins massives. Quelle inégalité devrait vérifier β_0 pour que ce ne soit plus le cas ?

On note m_0 la masse d'une galaxie à un instant $t = 0$ pris comme origine des temps.

❑ – **20**. Déterminer $m(t)$ puis tracer et commenter l'allure de la courbe correspondante. On montrera notamment l'existence de deux régimes limites liés à une durée caractéristique τ_0 à introduire.

On quantifie l'éloignement d'une galaxie de la nôtre, dû à l'expansion de l'Univers, par un paramètre $z \geq 0$ appelé redshift. Chaque valeur de z correspond à une certaine durée Δt écoulée depuis l'origine de l'Univers appelée Big Bang :

— $z = 0$ désigne l'instant présent soit $\Delta t = 13{,}8$ milliards d'années après le Big Bang.

— $z \to +\infty$ caractérise le Big Bang soit $\Delta t = 0$

— Pour $z > 1$ cette correspondance est donnée par la relation approchée :

$$\frac{1}{1+z} \simeq \frac{3}{4}\Big(H_0 \Delta t\Big)^{2/3} \qquad \text{avec } H_0 = 70\,\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1} \text{ la constante de Hubble.}$$

La figure 6, obtenue pour des galaxies dans l'environnement proche de la Voie Lactée, fournit une image de la séquence principale dans le présent ($z = 0$). Récemment, l'observation de galaxies très lointaines, a permis de tracer cette même séquence à $z = 2$. Son évolution est représentée figure 7 sur laquelle on a également reproduit le résultat de la figure 6.

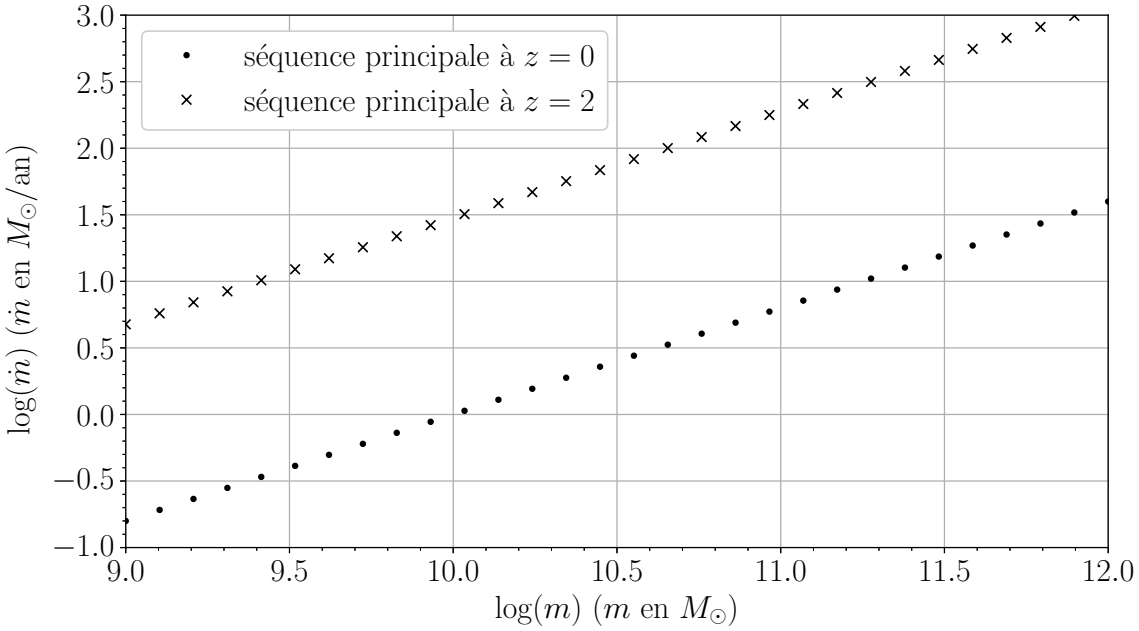


FIGURE 7 – Évolution du taux de formation d'étoiles en fonction du redshift z

❑ **– 21.** En milliards d'années, quelle durée s'est écoulée depuis le Big Bang, pour des mesures effectuées à $z = 2$?

❑ **– 22.** Dans quelle proportion le taux de formation d'étoiles a-t-il évolué entre $z = 2$ et $z = 0$? Proposer une explication à cette observation.

Données numériques

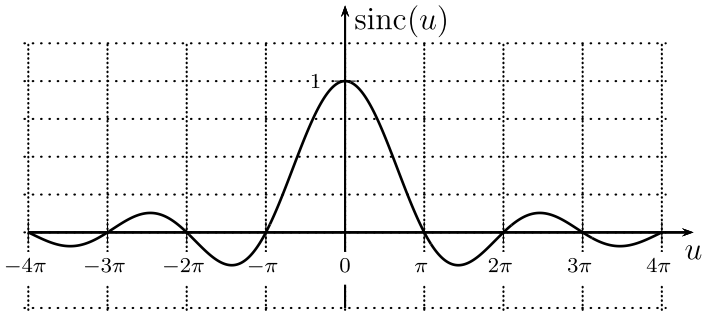
- Constante de gravitation : $G = 6{,}7 \times 10^{-11}\,\mathrm{m^3.kg^{-1}.s^{-2}}$
- Le parsec est une unité de longueur utilisée en astronomie :

$$1\,\mathrm{pc} = 3 \times 10^{16}\mathrm{m} \qquad 1\,\mathrm{kpc} = 10^3\,\mathrm{pc} \qquad 1\,\mathrm{Mpc} = 10^6\,\mathrm{pc}$$

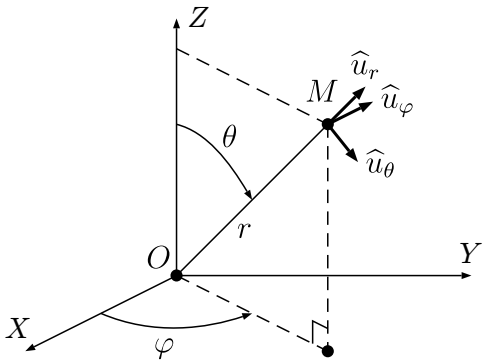
- Masse du Soleil : $1M_\odot = 2^{30}\,\mathrm{kg}$
- On prendra 1 année $= 3 \times 10^7\,\mathrm{s}$

Formulaire

- $\sin(p) - \sin(q) = 2\sin\left(\frac{p-q}{2}\right)\cos\left(\frac{p+q}{2}\right)$
- Fonction sinus cardinal définie sur $\mathbb{R}$: $\mathrm{sinc}(u) = \frac{\sin(u)}{u}$



- Opérateurs en coordonnées sphériques :



$\vec{\text{grad}}\, U = \frac{\partial U}{\partial r}\widehat{u}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial \theta}\widehat{u}_\theta + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial U}{\partial \varphi}\widehat{u}_\varphi$

$\text{div}\vec{A} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial (r^2 A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial (\sin\theta A_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi}$

$\vec{\text{rot}}\vec{A} = \left[\frac{1}{r\sin\theta}\left(\frac{\partial(\sin\theta A_\varphi)}{\partial\theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial\varphi}\right)\right]\widehat{u}_r + \left[\frac{1}{r}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial A_r}{\partial\varphi} - \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r}\right)\right]\widehat{u}_\theta + \left[\frac{1}{r}\left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial\theta}\right)\right]\widehat{u}_\varphi$

— Théorème de Stokes : $\oint_\Gamma \vec{A}\cdot\vec{d\ell} = \iint_S \vec{\text{rot}}(\vec{A})\cdot \text{d}\vec{S}$

— Théorème de Green-Ostrogradski : $\oiint_S \vec{A}\cdot \text{d}\vec{S} = \iiint_V \text{div}(\vec{A})\text{d}V$

Formulaire d'optique géométrique pour une lentille mince

Dans les conditions de GAUSS, si A est un point objet sur l'axe optique et A' le point image conjugué par une lentille mince située en O, dont le foyer objet est en F et le foyer image en F', on a :

Formules d'optique géométrique de NEWTON (origines aux foyers)

Formule de conjugaison :

$$\overline{FA}\times\overline{F'A'} = \overline{FO}\times\overline{F'O}$$

Formule du grandissement :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$$

où $A'B'$ est l'image de l'objet AB perpendiculaire à l'axe optique.

Formules d'optique géométrique de DESCARTES (origines au centre optique)

Formule de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}}$$

Formule du grandissement :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

FIN DE L'ÉPREUVE

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de MP chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Optique géométrique et formation des images
- Superposition d'ondes lumineuses, trous d'Young et réseau
- Modèle scalaire des ondes lumineuses
- Fonctions usuelles et lecture des graphes

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/mines/mp