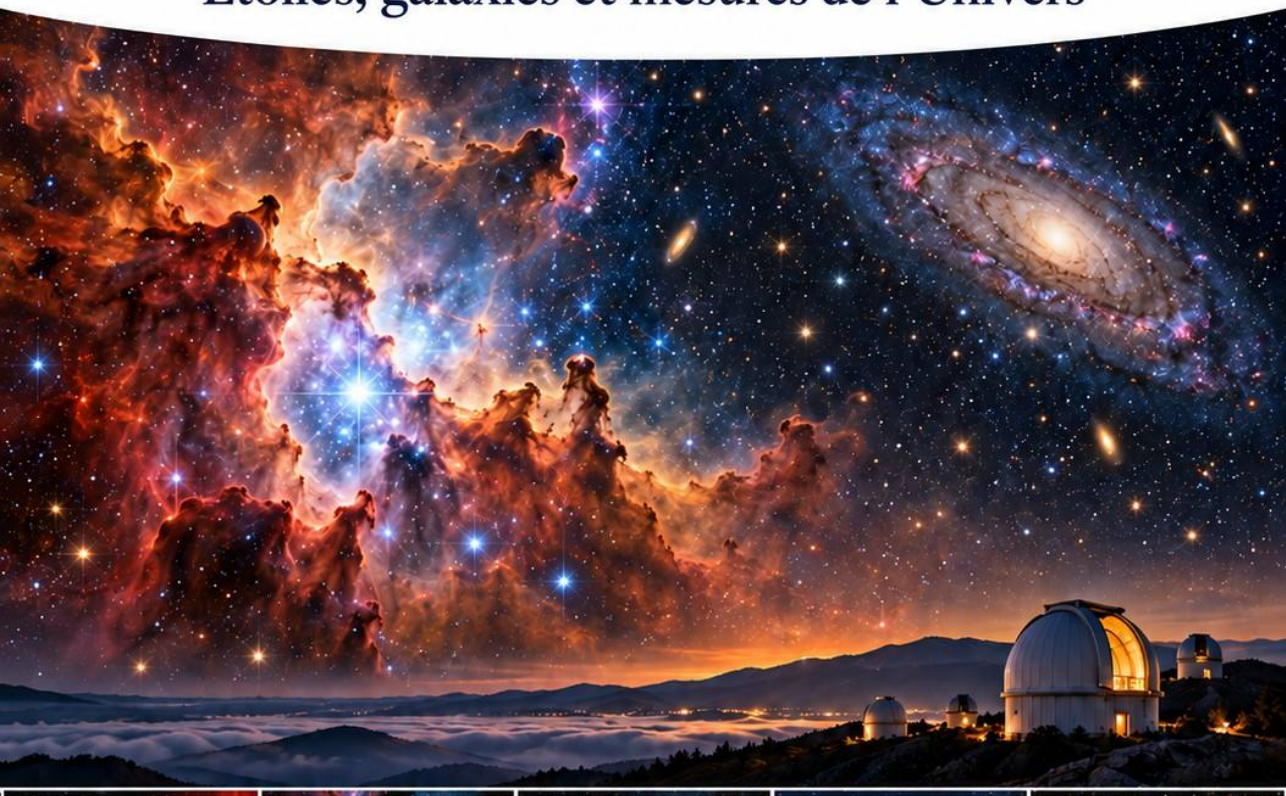
COMPRENDRE L'UNIVERS

TOME III

COMPRENDRE L'ASTROPHYSIQUE

Étoiles, galaxies et mesures de l'Univers



ÉTOILES

NÉBULEUSES

GALAXIES

OBSERVATOIRES

ÉCHELLES COSMIQUES

STEVE CIMOLINO

ÉDITIONS LES VIEUX LIVRES

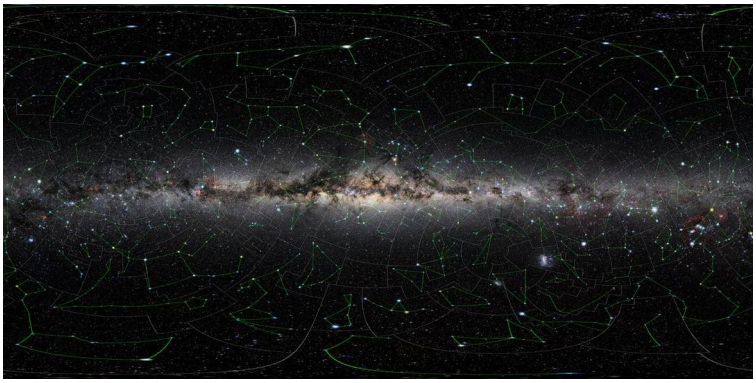
Comprendre l’astrophysique

Des lois physiques aux frontières de la cosmologie

Steve Cimolino

Collection Comprendre l’Univers • Tome III • 2026

Lois physiques • Lumière • Étoiles • Galaxies • Relativité • Quantique • Cosmologie



ÉDITIONS LES VIEUX LIVRES

PDF eBook · Version 1.0 · Octobre 2026

ISBN : 978-99987-432-7-4

62 chapitres • Exemples calculés • Exercices corrigés

Édition et conventions

Comprendre l’univers — Tome III
Comprendre l’astrophysique
Steve Cimolino • Les Vieux Livres Éditions

Cette édition développe les fondements physiques de l’astronomie, des objets proches à la cosmologie. Les tomes I et II accompagnent respectivement l’observation et l’exploration du ciel. Le hors-série consacré aux parcours solaires détaille leur réalisation sur le terrain.

Texte et schémas pédagogiques originaux préparés pour cette édition. Les photographies conservées de la série possèdent leurs propres crédits, regroupés en fin d’ouvrage. Les données d’exemple annoncées comme synthétiques ne sont pas des observations réelles.

Les nombres sont arrondis selon leur usage. Les valeurs des missions et les liens ont été vérifiés en octobre 2026 ; les calendriers, catalogues et résultats en cours peuvent évoluer. Les constantes conventionnelles sont distinguées des mesures. Les références identifiées S01, S02, etc. renvoient à la bibliographie commentée.

Les formules servent la compréhension. Les calculs élémentaires utilisent les unités indiquées ; les résultats supposent les approximations annoncées. Un calcul de démonstration ne remplace pas une éphéméride de précision ou une réduction scientifique complète.

© 2026 Steve Cimolino • Les Vieux Livres Éditions. Les droits propres des images tierces restent ceux indiqués dans les crédits. Les usages autorisés des ouvrages de la collection relèvent des mentions de diffusion de l’éditeur.

Comment lire ce tome

Le livre part d’une question simple : comment connaître la nature d’objets que nous ne pouvons presque jamais toucher ? Les réponses viennent de mesures, de lois physiques et de comparaisons entre explications. La lumière fournit le fil conducteur ; la gravitation organise les systèmes et la physique quantique explique leurs constituants.

Une première lecture peut suivre les chapitres dans l’ordre. Les encadrés mathématiques ne demandent que des opérations courantes, des puissances et quelques fonctions présentées dans le texte. Le lecteur qui préfère une approche qualitative peut lire les explications, les figures et les paragraphes « À retenir », puis revenir aux exemples.

Les chapitres sur les hypothèses avancées précisent leur statut. Une proposition mathématique féconde ne devient pas un fait observé par sa seule élégance. Inversement, une incertitude sur une composante de l’Univers n’efface pas les observations qui motivent sa recherche.

Chaque chapitre donne un objectif, une explication progressive, un exemple, deux questions et un mini-lexique. Les réponses regroupées en fin d’ouvrage permettent de vérifier le raisonnement. Le glossaire et l’index facilitent les retours ; les références conduisent aux sources institutionnelles et aux publications originales.

Pour les activités d’observation, les repères du tome I restent utiles : noter la date et le lieu, décrire le matériel, garder les données brutes et annoncer les corrections effectuées. Un résultat modeste mais traçable est plus instructif qu’un nombre spectaculaire impossible à reproduire.

Les repères visuels du livre

À observer
Une cible ou une expérience simple à essayer sur le terrain.

À retenir
Une notion qui facilite la lecture du ciel ou le choix du matériel.

Vigilance
Un réglage à contrôler ou une précaution à respecter.

Pour aller plus loin
Un rapprochement avec une autre fiche, une carte ou un logiciel.

Cible du ciel
Une étoile, un amas ou une galaxie à retrouver dans les cartes et les catalogues.

Photographie
Un repère pour comprendre une image et la distinguer de la vision à l’oculaire.

Observer le Soleil
Consultez la page de sécurité et utilisez uniquement une configuration solaire adaptée et vérifiée.

Dans ce tome, l’ampoule accompagne les idées à retenir ; le symbole de vigilance signale une limite de modèle ou une confusion fréquente. Les repères d’observation relient la théorie à une cible ou à une expérience réalisable.

Observer en sécurité

Soleil. Un instrument pointé vers le Soleil concentre une énergie capable de léser définitivement l’œil. Utilisez uniquement une configuration solaire prévue pour cet usage et vérifiée avant chaque séance. Sur un télescope ordinaire, le filtre solaire approprié se fixe devant l’ouverture et doit être retenu mécaniquement. Protégez les deux objectifs des jumelles. Retirez ou bouchez le chercheur. Les lunettes d’éclipse ne protègent pas un œil placé derrière un instrument non filtré. Un filtre vissé à l’oculaire, du verre fumé ou un film improvisé ne conviennent pas. [1, 2]

Terrain. Repérez l’accès et les obstacles de jour. Respectez les propriétés et les zones protégées. Prévenez un proche lorsque vous partez seul. Gardez un moyen de communication, des vêtements chauds et une lumière adaptée à la marche.

Matériel. Montez les pièces selon la notice, serrez les fixations et maintenez une pièce dont l’axe est déverrouillé. Les contrepoids et câbles ne doivent pas encombrer les passages. Les projets de construction définissent une géométrie ; leurs assemblages porteurs, fondations et installations électriques doivent être validés pour le lieu et les charges réels.

Les activités proposées ici privilégient les données publiques et les observations nocturnes simples. Pour toute observation solaire directe, suivre les prescriptions du matériel et les recommandations spécifiques du tome I. Les photographies solaires publiques permettent de travailler sur la rotation et l’activité sans improviser un dispositif optique.

Sommaire

I Mesurer et raisonner.....9

1 Notre place dans l'Univers.....10
2 Mesurer et comparer.....14
3 De la lumière aux connaissances.....18
4 Mouvement forces et énergie.....22
5 Matière température et pression.....26

II La lumière et la matière.....30

6 Ondes et rayonnements.....31
7 Photons atomes et spectres.....35
8 Couleur flux et luminosité.....39
9 Doppler et vitesses.....43
10 Probabilités incertitude et particules.....47
11 Réactions nucléaires et origine des éléments.....51

III La gravitation et la relativité.....55

12 Newton et les orbites.....56
13 Kepler et les mouvements apparents.....60
14 Marées résonances et collisions.....64
15 Relativité restreinte.....68
16 Relativité générale.....72
17 Trous noirs et horizons.....76

IV La vie des étoiles.....80

18 La formation des étoiles et des disques.....81
19 La séquence principale et l'équilibre stellaire.....85
20 Le Soleil comme laboratoire.....89
21 Le diagramme de Hertzsprung Russell.....93
22 Étoiles doubles et systèmes multiples.....97
23 Variables novae et céphéides.....101
24 Géantes naines blanches et nébuleuses planétaires.....105
25 Supernovae étoiles à neutrons et pulsars.....109

V Des nuages aux galaxies.....113

26 Gaz poussières et nébuleuses.....114
27 Amas ouverts et amas globulaires.....118
28 La Voie lactée.....121

29 Galaxies et évolution.....125
30 Noyaux actifs quasars et jets.....129
31 Amas de galaxies et toile cosmique.....132

VI Mesurer les distances cosmiques.....136

32 Parallaxe et première marche des distances.....137
33 Chandelles standard et supernovae Ia.....141
34 Les lentilles gravitationnelles.....145
35 Cartographier l’Univers en profondeur.....149
36 Incertitudes statistiques et désaccords.....153

VII L’histoire de l’Univers.....157

37 L’expansion et la géométrie cosmique.....158
38 Le Big Bang et l’Univers primordial.....162
39 Le fond diffus cosmologique.....166
40 La matière noire.....170
41 L’énergie noire et les futurs possibles.....174
42 Inflation et limites du modèle cosmologique.....178

VIII Des mondes et de la vie.....182

43 La formation des systèmes planétaires.....183
44 Mondes rocheux géantes et petits corps.....187
45 Détecter et caractériser les exoplanètes.....191
46 Atmosphères climat et habitabilité.....195
47 Astrobiologie et biosignatures.....199

IX Les instruments de la découverte.....203

48 Comment travaille un observatoire.....204
49 Miroirs détecteurs et spectrographes.....208
50 Optique active adaptative et interférométrie.....212
51 Radioastronomie et Univers froid.....216
52 Le Soleil et la météo spatiale.....220
53 Télescopes spatiaux satellites et sondes.....223
54 Ondes gravitationnelles neutrinos et rayons cosmiques.....227

X Aux frontières des théories.....231

55 Gravitation quantique et échelles de Planck.....232
56 Cordes dimensions supplémentaires et modèles.....236
57 Les multivers et les interprétations quantiques.....240
58 Lire une découverte et évaluer une explication.....244

XI Expérimenter et vérifier.....248

59 Mesurer une variation de lumière.....249

60 Calculer un Système solaire à l’échelle.....253

61 Exploiter un catalogue public.....257

62 Relier les lois aux observations.....261

Constantes et relations utiles.....265

Tables du parcours solaire.....270

Réponses aux exercices.....272

Glossaire.....283

Bibliographie et crédits.....299

Liens et codes QR.....309

Index thématique.....316

Cahier pratique du portail.....Portail III · 1

Crédits de l’édition.....fin du volume

PARTIE I

I

Mesurer et raisonner

Les outils pour passer d’une observation à une explication.

DANS CETTE PARTIE

1 Notre place dans l’Univers

2 Mesurer et comparer

3 De la lumière aux connaissances

4 Mouvement forces et énergie

5 Matière température et pression

1 Notre place dans l’Univers

Objectifs Situer les principales structures cosmiques et distinguer distance, dimension et temps de parcours de la lumière.

Des objets emboîtés

La Terre tourne autour d’une étoile, le Soleil. Le Système solaire comprend aussi les autres planètes, leurs satellites, des petits corps et un milieu de gaz, de poussières et de particules. Cet ensemble appartient à la Voie lactée. Notre Galaxie contient des étoiles, mais également du gaz, des poussières, des objets compacts et une importante composante de matière noire dont la nature reste inconnue. Une galaxie constitue donc un système physique, pas seulement une collection de points lumineux.

La Voie lactée et la galaxie d’Andromède appartiennent au Groupe local. À une échelle supérieure, les galaxies dessinent des filaments et des concentrations séparés par de grands vides. Les limites de ces ensembles ne ressemblent pas à celles de pays sur une carte. Leur définition dépend des positions, des vitesses, de la gravitation et de la méthode de classement. Toutes les structures que l’on nomme ne sont pas nécessairement liées gravitationnellement.

Voir loin revient à voir ancien

La lumière se propage à une vitesse finie. Un signal venant de la Lune arrive environ 1,3 seconde après son émission ; celui du Soleil met environ 8 minutes et 20 secondes. Une étoile distante de cent années-lumière est observée telle qu’elle était cent ans auparavant, à l’approximation des mouvements relatifs et de la géométrie locale près. Nous ne contemplons pas une photographie simultanée de l’ensemble du ciel.

Dans l’Univers lointain, cette relation devient plus subtile. Pendant le trajet de la lumière, l’espace entre les grandes structures évolue. Le temps de regard en arrière, la distance actuelle et la distance déduite d’une luminosité sont alors des grandeurs distinctes. L’âge d’environ 13,8 milliards d’années du modèle cosmologique de référence n’impose donc pas un rayon observable de 13,8 milliards d’années-lumière.

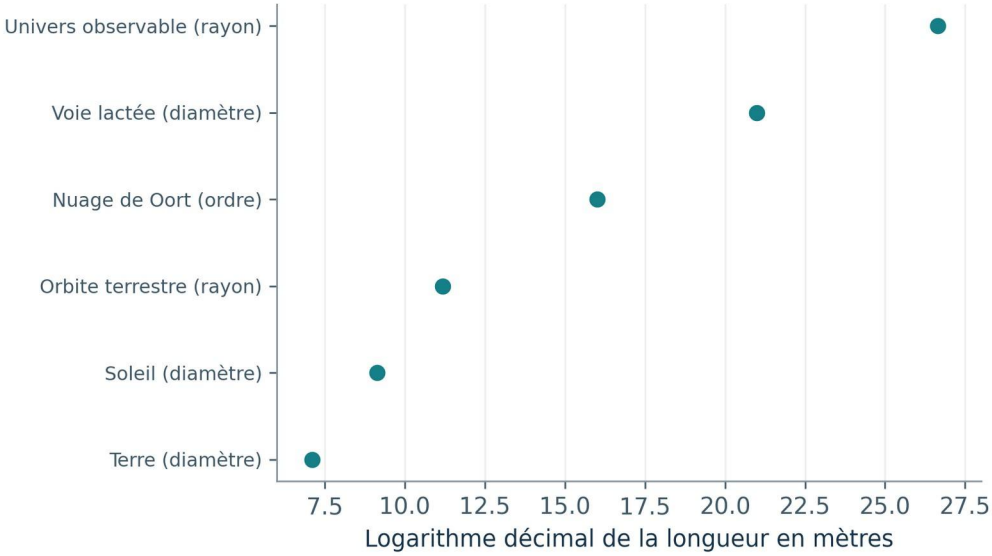


Figure 1 — Échelles indicatives de quelques structures. Les positions représentent des ordres de grandeur, sans prétendre définir des frontières nettes. Schéma original.

Un horizon lié à notre observation

L’Univers observable désigne la région dont des signaux ont pu nous parvenir depuis les premières phases accessibles à nos modèles. Dans le modèle cosmologique standard, son rayon actuel est voisin de 46 milliards d’années-lumière. Ce nombre décrit une distance actuelle calculée, et non le trajet parcouru dans un espace demeuré immobile. Il ne fournit pas la taille de l’Univers entier.

L’observateur situé dans une galaxie lointaine possède son propre horizon observable. Notre position centrale sur une carte de ce que nous voyons exprime une condition d’observation ;

elle ne démontre pas que la Terre occupe un centre physique du cosmos. L’expansion, étudiée plus loin, n’a pas besoin d’un point central dans l’espace pour être décrite.

Une carte impose des choix

Une photographie conserve assez naturellement les directions, mais elle écrase la profondeur. Une carte en trois dimensions demande des distances, donc des mesures et des modèles. Deux étoiles proches sur la voûte céleste peuvent être très éloignées l’une de l’autre. Inversement, un amas peut occuper un petit angle tout en contenant de nombreux objets réellement voisins.

Les images astronomiques ajoutent parfois de fausses couleurs pour représenter des rayonnements invisibles. Elles restent des mesures lorsque la correspondance entre longueur d’onde et couleur est annoncée. Une vue d’artiste remplit un autre rôle : elle propose une représentation. Il faut toujours identifier laquelle on regarde avant d’en tirer une conclusion physique.

Trois limites qui ne coïncident pas

Le rayon de Hubble c/H_0 est une longueur construite à partir du taux d’expansion actuel. Avec 70 km/s/Mpc, il vaut environ 14 milliards d’années-lumière. Ce rayon ne représente pas en général la frontière de tout ce que nous observons. Des photons reçus aujourd’hui peuvent provenir de régions dont la distance actuelle dépasse cette longueur, parce que l’histoire de l’expansion intervient pendant leur propagation.

L’horizon des particules décrit ce qui a pu communiquer avec nous depuis les phases anciennes du modèle. Un horizon des événements cosmologique décrit ce qui pourra encore communiquer avec nous dans le futur ; son existence dépend de l’expansion future. Les trois notions répondent donc à trois questions. Le mot « horizon » employé seul dans une illustration peut masquer cette différence. Un calcul de distance

cosmologique doit préciser la limite discutée avant de lui associer une valeur.

Exemple Un message à vingt années-lumière

Imaginons une sonde immobile à vingt années-lumière dans un référentiel où la Terre est également immobile. Un message radio nécessite vingt ans pour l’atteindre. Une réponse immédiate demande encore vingt ans : le délai total vaut quarante ans. La puissance de l’émetteur peut rendre le signal détectable ; elle ne réduit pas son temps de propagation. Cet exemple néglige volontairement les mouvements et l’expansion, sans effet important à cette échelle.

À retenir

Le ciel superpose des directions, des distances et des époques. Un horizon observable limite l’information accessible, sans définir une paroi autour de l’Univers.

Mini-lexique

Galaxie : système d’étoiles, de gaz et d’autres composantes liées par la gravitation.
Horizon : limite de communication définie dans un modèle d’espace-temps.

Vérifier sa compréhension

1. Une étoile à 300 années-lumière disparaît aujourd’hui dans son référentiel local. Quand pouvons-nous en être informés, dans l’approximation usuelle ?

2. Pourquoi deux étoiles voisines sur une photographie ne constituent-elles pas nécessairement une étoile double ?

Références S01 • S02

2 Mesurer et comparer

Objectifs Employer les unités astronomiques, manipuler les puissances de dix et contrôler un ordre de grandeur.

Choisir une unité adaptée

Le mètre convient à une salle, mais l’écriture de distances galactiques en mètres devient encombrante. Changer d’unité ne change pas la grandeur physique. L’unité astronomique, notée ua, vaut exactement 149 597 870 700 mètres. Elle sert de référence pour les distances dans un système planétaire. La distance réelle Terre–Soleil varie au cours de l’année : l’unité est fixe, l’orbite ne l’est pas.

Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant une année julienne de 365,25 jours. Elle vaut environ $9{,}461 \times 10^{15}$ mètres. Il s’agit d’une longueur, malgré le mot « année ». Le parsec est défini à partir de l’angle de parallaxe ; il vaut environ $3{,}086 \times 10^{16}$ mètres, soit 3,262 années-lumière. Les astronomes utilisent couramment le kiloparsec et le mégaparsec pour les galaxies.

Unité	Valeur approchée	Usage fréquent
ua	$1{,}496 \times 10^{11}$ m	Orbites planétaires
année-lumière	$9{,}461 \times 10^{15}$ m	Présentation des distances stellaires
parsec	$3{,}086 \times 10^{16}$ m	Mesures stellaires
mégaparsec	10^{6} pc	Distances extragalactiques

Lire les puissances de dix

La notation scientifique sépare un nombre compris entre 1 et 10 d’une puissance de dix. Ainsi, $5{,}2 \times 10^{6}$ signifie 5 200 000 ; $5{,}2 \times 10^{-6}$ signifie 0,000 005 2. Pour multiplier des puissances de même base, on additionne les exposants. Pour diviser, on les

soustrait. Le résultat reste plus facile à interpréter si l’on conserve les unités à chaque étape.

Une échelle logarithmique donne la même longueur graphique à chaque multiplication par dix. Elle permet de représenter simultanément une planète, une étoile et une galaxie. Mais un intervalle identique n’y correspond pas à la même différence absolue. Passer de 1 à 10 ajoute 9 ; passer de 10 à 100 ajoute 90. Lire un axe avant une courbe constitue déjà une vérification scientifique.

La précision a un coût

Une valeur écrite avec de nombreux chiffres n’est pas forcément bien connue. Écrire une distance « 500,000 » sans préciser l’unité et l’incertitude ne permet pas de savoir si le dernier chiffre est significatif. Dans un calcul pédagogique, on conserve quelques chiffres intermédiaires, puis on arrondit le résultat en fonction de la qualité des données de départ.

Les constantes définissant les unités peuvent être exactes. Une température stellaire, un rayon de planète ou une masse galactique résultent de mesures et de modèles. Les valeurs nominales adoptées par l’Union astronomique internationale facilitent les conversions, mais ne prétendent pas transformer un Soleil variable en étalon parfaitement immuable. Pour les masses, le produit GM est souvent mieux mesuré que M séparément.

Contrôler les dimensions

Une vitesse possède la dimension d’une longueur divisée par un temps. Multiplier une vitesse par une durée donne donc une distance. Si un calcul annoncé comme une distance aboutit à des mètres par seconde, il contient une erreur, même si le nombre semble plausible. Le contrôle dimensionnel ne garantit pas la validité d’un modèle, mais détecte beaucoup de fautes de calcul.

Le préfixe est une autre source d’erreur : milli signifie 10^{-3}, micro 10^{-6}, kilo 10^{3} et méga 10^{6}. Un angle de 20 millisecondes d’arc n’est pas un angle de 20 secondes d’arc. Dans un catalogue, il faut lire la définition exacte de la colonne avant d’appliquer une formule de distance.

Pourquoi l’angle doit être en radians

La relation de petit angle $s \approx d\theta$ relie une dimension transverse s, une distance d et un angle θ. Elle provient de la longueur d’un arc de cercle : le radian est défini par le rapport entre arc et rayon. Introduire directement un angle en degrés dans cette formule multiplie le résultat par un facteur d’environ 57,3. Les unités angulaires doivent donc être converties avant le calcul.

Pour un objet de 1 minute d’arc à 1 000 pc, θ vaut environ $2{,}909 \times 10^{-4}$ rad et s environ 0,291 pc. Il faut encore préciser quelle dimension est mesurée sur l’image et quelle distance est utilisée. Dans une application cosmologique, la distance angulaire convient à cette relation. Dans le voisinage stellaire, une distance géométrique ordinaire suffit généralement. La même géométrie simple traverse ainsi plusieurs domaines, mais les définitions restent indispensables.

✦ Exemple Convertir une distance en temps de lumière

Pour 1 ua, on divise 149 597 870 700 m par 299 792 458 m/s. Le résultat vaut environ 499,0 s, soit 8 min 19 s. En arrondissant la distance et en tenant compte du caractère variable de l’orbite terrestre, « environ 8 min 20 s » est une formulation adaptée. La conversion n’exige aucune hypothèse sur la puissance lumineuse du Soleil.

À retenir

Une grandeur comporte un nombre, une unité et une précision. Conserver les unités pendant le calcul évite des erreurs qui peuvent atteindre des facteurs mille ou un million.

Mini-lexique

Dimension : nature physique d’une grandeur. Valeur nominale : référence conventionnelle exacte utilisée pour les conversions.

Vérifier sa compréhension

1. Convertir 2,5 kpc en années-lumière à trois chiffres significatifs.

2. Une vitesse de 30 km/s est maintenue pendant deux heures. Quelle distance est parcourue ?

Références S03 • S04 • S05

3 De la lumière aux connaissances

Objectifs Suivre la chaîne qui relie une mesure à une propriété physique et distinguer observation, modèle et interprétation.

Ce que mesure un instrument

Une caméra astronomique enregistre des charges électriques produites par les photons reçus. Un spectrographe répartit ces photons selon leur longueur d’onde. Une antenne mesure un signal électrique lié à un champ électromagnétique. Les résultats immédiats sont des comptages, des intensités, des positions, des temps ou des fréquences. Une masse ou une température n’apparaît pas directement sur le capteur.

Pour passer de ces signaux à une propriété du ciel, il faut connaître la réponse de l’appareil. Un détecteur ajoute du bruit, certains pixels répondent davantage que d’autres, l’atmosphère absorbe une partie de la lumière et l’optique déforme les images. La calibration mesure ou modélise ces effets. Elle fait partie de l’observation, au même titre que le temps passé à exposer le capteur.

Construire une inférence

Considérons une étoile dont le spectre contient une raie d’hydrogène décalée. On mesure la position de cette raie, on la compare à une référence de laboratoire, puis on choisit la relation physique adaptée pour estimer une vitesse radiale. Cette vitesse dépend d’une calibration en longueur d’onde et du mouvement de l’observateur. D’autres effets, notamment gravitationnels, peuvent également déplacer des raies.

L’inférence fonctionne aussi dans l’autre sens. Un modèle de l’atmosphère stellaire prédit un spectre pour une température, une composition et une gravité de surface données. On cherche les paramètres qui reproduisent les observations, puis on

examine les écarts. Plusieurs jeux de paramètres peuvent donner des signaux proches : cette ambiguïté s’appelle une dégénérescence. Une mesure supplémentaire, dans une autre bande, peut la réduire.

Étape	Exemple	Question à poser
Signal	Charges du capteur	Quel bruit et quelle saturation ?
Calibration	Flux relatif	Quel étalon et quelle correction ?
Modèle	Spectre stellaire	Quelles hypothèses physiques ?
Résultat	Température estimée	Quelle incertitude et quelle ambiguïté ?

Tester au lieu d’illustrer seulement

Un modèle scientifique doit produire des conséquences comparables à des mesures. Une jolie image d’un disque de matière peut aider à comprendre une hypothèse, mais elle ne la confirme pas. Une simulation devient informative lorsqu’on connaît ses équations, ses conditions initiales, sa résolution et les observables calculées. On peut alors déterminer si une structure obtenue constitue une prédiction robuste ou un effet du réglage choisi.

Un résultat gagne en solidité lorsqu’il résiste à des méthodes indépendantes. La masse d’un objet peut être contrainte par les orbites voisines et par une lentille gravitationnelle. Les deux méthodes n’ont pas les mêmes difficultés. Leur accord ne supprime pas toute possibilité d’erreur, mais réduit la probabilité qu’un unique défaut instrumental explique l’ensemble.

Lire un désaccord

Deux valeurs différentes ne sont pas automatiquement contradictoires. Il faut comparer les incertitudes, les grandeurs réellement définies et les hypothèses. Une température de couleur n’est pas nécessairement une température effective ;

une distance de luminosité n’est pas une distance actuelle. Le vocabulaire précis évite d’opposer des résultats qui ne mesurent pas la même chose.

À l’inverse, des valeurs proches peuvent partager une erreur commune. Deux analyses reposant sur le même étalon ne constituent pas deux calibrations indépendantes. Lorsqu’un désaccord persiste, on teste les données, les méthodes et les modèles. Modifier immédiatement une loi fondamentale serait prématuré ; refuser toute modification par principe le serait aussi.

Identifier ce que les données peuvent déterminer

Supposons qu’une mesure dépende du produit de deux paramètres A et B. Connaître très précisément AB ne permet pas de connaître séparément A et B : doubler A et diviser B par deux conserve la prédiction. Répéter la même mesure réduit le bruit sur le produit, sans supprimer cette ambiguïté structurelle. Une deuxième observable ayant une dépendance différente est nécessaire.

L’astrophysique rencontre souvent cette situation sous des formes plus complexes. Une luminosité et un rayon déterminent une température effective ; un flux seul laisse une ambiguïté de luminosité et de distance. Avant d’acheter du temps de télescope, on peut donc demander si l’observation proposée apporte une direction d’information nouvelle. Une mesure moins précise mais réellement complémentaire peut être plus utile que cent répétitions d’une observable dégénérée. Cette question d’identifiabilité fait partie de la conception de l’expérience, en amont du calcul final.

Exemple Déduire une température de couleur

Un capteur donne, après calibration, davantage de flux bleu relativement au rouge pour l’étoile A que pour l’étoile B. Dans une première approximation de corps noir, A paraît plus chaude. Mais une extinction plus forte vers B peut aussi rougir son signal. Une distance, des raies spectrales et une estimation de la poussière apportent des informations complémentaires. Deux mesures de flux seules ne suffisent pas toujours à identifier une unique température.

À retenir

Le résultat astronomique associe un signal, une calibration et un modèle. La confiance vient de tests reproductibles et de contraintes indépendantes.

Mini-lexique

Inférence : déduction de propriétés à partir de données et d’hypothèses. Dégénérescence : possibilité pour plusieurs modèles ou paramètres de produire des observables similaires.

Vérifier sa compréhension

1. Une simulation très détaillée reproduit une photographie. Cela prouve-t-il que ses conditions initiales sont les seules possibles ?

2. Pourquoi publier les données et les méthodes renforce-t-il un résultat ?

Références S06 • S07

4 Mouvement forces et énergie

Objectifs Relier un mouvement à une force et utiliser les conservations pour expliquer orbites, collisions et contraction.

Décrire le mouvement

Une position ne possède de sens qu’en référence à un système de coordonnées et à une date. La vitesse décrit la variation de cette position ; l’accélération décrit la variation de la vitesse. Un objet qui tourne à vitesse constante en valeur subit une accélération, car la direction de sa vitesse change. Ce point permet de comprendre pourquoi une planète en orbite a besoin d’une interaction gravitationnelle même si elle ne se rapproche pas continuellement du Soleil.

Dans un référentiel inertiel et pour les vitesses usuelles, la deuxième loi de Newton relie la résultante des forces à l’accélération. La masse mesure alors la résistance à la modification du mouvement. Une force ne sert pas à entretenir une vitesse rectiligne uniforme dans le vide ; elle modifie le mouvement. Les frottements du quotidien cachent souvent cette distinction.

$$F = ma$$

Transformer l’énergie

L’énergie cinétique d’un objet lent devant la lumière vaut la moitié du produit de sa masse par le carré de sa vitesse. Doubler la vitesse multiplie cette énergie par quatre. L’énergie potentielle gravitationnelle de deux masses isolées est négative lorsque l’on choisit zéro à une séparation infinie. Une orbite liée possède une énergie mécanique totale négative.

Une étoile en formation se contracte. L’énergie potentielle devient plus négative ; une partie de l’énergie libérée chauffe le gaz et une partie est rayonnée. La conservation de l’énergie

n’exige donc pas que la température reste constante. Pour un système ouvert, il faut comptabiliser les échanges : lumière, particules, matière entrante ou sortante et travail des forces extérieures.

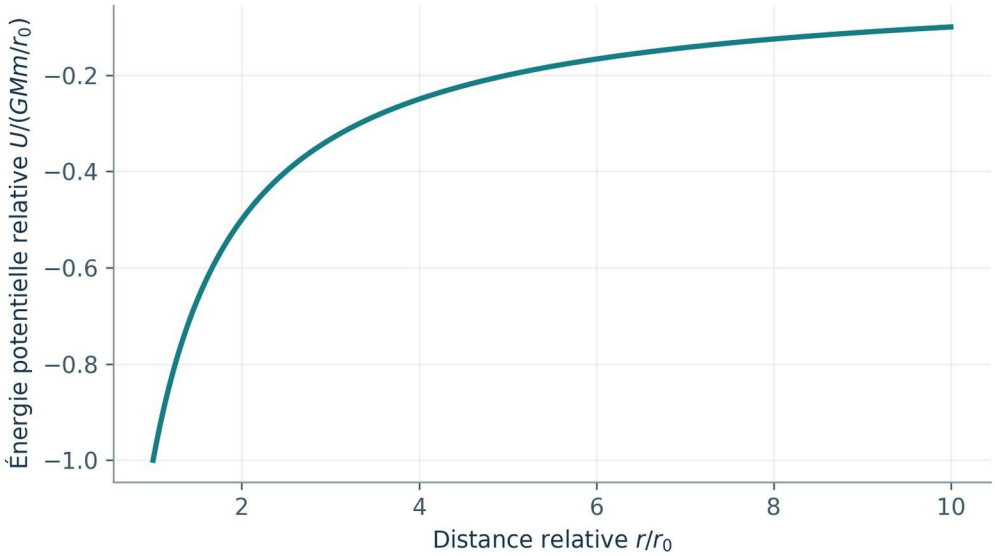


Figure 2 — Dans un potentiel newtonien, l’énergie potentielle est négative avec la convention indiquée. La courbe ne représente pas l’intérieur de l’astre. Schéma calculé original.

Quantité de mouvement et recul

La quantité de mouvement d’un objet non relativiste est le produit de sa masse par sa vitesse. Dans un système isolé, sa somme vectorielle se conserve. Une étoile et sa planète tournent toutes deux autour du centre de masse commun. Dire que la planète tourne autour d’une étoile parfaitement immobile est souvent une approximation commode, pas une description exacte.

Lors d’une collision, la quantité de mouvement totale se conserve si les actions extérieures sont négligeables pendant l’événement. L’énergie cinétique peut se transformer en chaleur, en déformation ou en rayonnement. Une collision dite inélastique ne détruit donc pas de l’énergie ; elle redistribue ses formes.

Cette distinction vaut pour les petits corps du Système solaire comme pour les chocs entre nuages de gaz.

Moment cinétique et rotation

Un système en rotation possède un moment cinétique. Lorsque la matière d’un nuage se rapproche de l’axe sans couple extérieur important, la rotation tend à s’accélérer. Ce mécanisme explique pourquoi l’effondrement d’un nuage favorise un disque au lieu d’une chute purement radiale de toute la matière. Les détails demandent cependant d’étudier comment le moment cinétique est transporté.

Les champs magnétiques, les jets et les interactions gravitationnelles redistribuent ce moment cinétique. L’image d’une patineuse qui ramène les bras aide à comprendre la conservation, mais ne remplace pas la physique d’un disque. Un disque réel échange de la matière, de l’énergie et du moment cinétique avec son environnement.

Le bilan viriel et une température qui augmente

Pour certains systèmes gravitationnels proches de l’équilibre, le théorème du viriel relie l’énergie cinétique moyenne K et l’énergie potentielle U par $2K + U \approx 0$, sous des hypothèses adaptées. L’énergie totale vaut alors $E \approx -K$. Si le système perd de l’énergie et se contracte vers un nouvel équilibre de ce type, K peut augmenter. Dans un gaz, cela peut correspondre à une hausse de température malgré une perte d’énergie totale.

Ce comportement surprenant ne viole pas la conservation : l’énergie potentielle devient plus négative, une partie est rayonnée et une partie augmente l’agitation. Il éclaire la contraction des protoétoiles et certains systèmes stellaires. La relation ne s’applique pas sans examen à un objet en explosion, à un système soumis à un fort champ extérieur ou à un gaz dont

pression et échanges de surface dominent. Son utilité vient précisément de conditions annoncées.

Exemple Comparer deux vitesses

Pour une masse de 1 kg à 10 m/s, l’énergie cinétique vaut 50 J. À 20 m/s, elle atteint 200 J. Si l’objet s’arrête, cette énergie doit être transférée ailleurs. La même dépendance en vitesse intervient pour une météorite : une masse modeste arrivant très vite peut déposer une énergie importante. Le calcul ne prédit pas à lui seul l’altitude de fragmentation ni la taille d’un cratère, qui dépendent de nombreux paramètres.

À retenir

Une accélération peut modifier la direction seule. Les conservations d’énergie, de quantité de mouvement et de moment cinétique restent des outils puissants lorsque les échanges sont correctement définis.

Mini-lexique

Référentiel inertiel : référentiel où un corps libre suit un mouvement rectiligne uniforme.
Système lié : ensemble dont les composants ne peuvent s’éloigner à l’infini sans apport d’énergie.

Vérifier sa compréhension

1. Une planète sur une orbite circulaire accélère-t-elle ?

2. À masse constante, que devient l’énergie cinétique lorsque la vitesse est multipliée par trois ?

Références S03 • S08

5 Matière température et pression

Objectifs Relier l’état microscopique de la matière au comportement d’un gaz et comprendre les limites du modèle de gaz parfait.

Atomes ions et plasma

La matière ordinaire est composée de noyaux et d’électrons. Un noyau contient des protons et, sauf pour l’hydrogène le plus courant, des neutrons. Le nombre de protons identifie l’élément chimique. Changer le nombre de neutrons produit un isotope ; enlever ou ajouter des électrons produit un ion. Ces opérations ne sont pas interchangeables : ioniser de l’hydrogène ne le transforme pas en hélium.

Dans un plasma, une partie importante des particules porte une charge libre. Les étoiles et de nombreux gaz interstellaires se trouvent dans cet état. Un plasma peut être globalement neutre tout en répondant fortement aux champs électriques et magnétiques. La neutralité globale signifie que les charges positives et négatives se compensent à grande échelle ; elle ne supprime pas leurs interactions locales.

Température et agitation

La température caractérise un état thermique. Dans un gaz classique à l’équilibre, elle est reliée à l’énergie moyenne d’agitation des particules. Toutes les particules n’ont pas la même vitesse ; elles suivent une distribution. À température égale, des particules plus légères se déplacent en moyenne plus vite que des particules lourdes.

La chaleur désigne un transfert d’énergie lié à une différence de température. Ce n’est pas une substance contenue dans un objet. Un gaz très chaud mais extrêmement peu dense peut transporter moins d’énergie thermique par unité de volume

qu'un gaz beaucoup plus froid et dense. C'est l'une des raisons pour lesquelles la température de la couronne solaire ne décrit pas à elle seule les conditions physiques que l'on y rencontrerait.

$$P = nkT$$

La pression comme effet collectif

Les particules échangent de la quantité de mouvement avec les parois ou les couches voisines. Leurs impacts produisent une pression. Pour un gaz parfait classique, P = nkT, où n représente le nombre de particules par unité de volume et k la constante de Boltzmann. Le volume, le nombre de particules et leur température contribuent ensemble au résultat.

Dans une étoile, la pression du gaz peut soutenir les couches contre la gravitation. La pression du rayonnement devient importante dans les étoiles très lumineuses. Dans une naine blanche, une pression quantique de dégénérescence intervient. Appliquer systématiquement la seule loi du gaz parfait à tous ces objets conduirait à des erreurs : il faut identifier le régime physique.

Milieu	État dominant	Phénomène important
Nuage moléculaire	Gaz froid et poussières	Refroidissement et gravitation
Intérieur solaire	Plasma dense	Pression thermique et fusion
Naine blanche	Matière très dense	Dégénérescence des électrons
Couronne solaire	Plasma peu dense	Champs magnétiques et chauffage

Équilibre et temps caractéristiques

Un système peut être proche de l'équilibre pour un phénomène et évoluer pour un autre. Le Soleil change très peu pendant une nuit d'observation, mais transforme lentement son hydrogène central. Un nuage choqué peut présenter des températures

électroniques et ioniques différentes pendant un certain temps. L’expression « température du gaz » doit alors être précisée.

Comparer des durées aide à décider quelle approximation employer. Si les collisions redistribuent rapidement l’énergie devant la durée d’évolution, un équilibre thermique local peut être raisonnable. Si le gaz se dilue ou reçoit un rayonnement intense avant de se rééquilibrer, les populations atomiques peuvent s’écarter d’une simple distribution d’équilibre. Les spectres révèlent justement ces écarts.

Collisions et libre parcours moyen

Le libre parcours moyen représente une distance typique entre interactions. Dans un modèle de particules identiques, il diminue lorsque la densité et la section efficace d’interaction augmentent. Un milieu peut donc être très vaste tout en restant presque transparent si les interactions sont rares. Inversement, un objet relativement petit peut être opaque à certaines longueurs d’onde.

Les collisions redistribuent l’énergie et peuvent rapprocher les particules d’un équilibre thermique. Mais une faible densité peut rendre ce processus lent devant l’évolution du milieu. Les mêmes mots de température ou de pression doivent alors être utilisés avec davantage de précautions. Dans un plasma magnétisé, les mouvements collectifs et les champs ajoutent d’autres échelles que le seul intervalle entre collisions. Comparer temps de collision, temps de refroidissement et temps de déplacement aide à décider si un modèle de gaz localement à l’équilibre est justifié.

Exemple Doubler la densité d’un gaz

Prenons un gaz classique à 300 K avec $n = 10^{20}$ particules/m³. Sa pression vaut environ 0,414 Pa. Si l’on double n en maintenant la température, on obtient 0,828 Pa. Si l’on comprime réellement

un gaz sans lui laisser évacuer son énergie, sa température peut augmenter : l’hypothèse de température constante doit donc être imposée par le dispositif, et non supposée automatiquement.

À retenir

Composition, densité et température déterminent ensemble l’état d’un gaz. Le mot « plasma » n’impose pas une température unique ; le gaz parfait possède un domaine de validité.

Mini-lexique

Ionisation : modification du nombre d’électrons liés à un atome. Dégénérescence : régime où les statistiques quantiques contraignent fortement l’occupation des états.

Vérifier sa compréhension

1. Un atome d’oxygène qui perd deux électrons devient-il un autre élément ?

2. À densité numérique constante, comment varie la pression d’un gaz parfait si sa température absolue double ?

Références S03 • S09

PARTIE II

II

La lumière et la matière

Comprendre les messages électromagnétiques et leurs fondements quantiques.

DANS CETTE PARTIE

6 Ondes et rayonnements

7 Photons atomes et spectres

8 Couleur flux et luminosité

9 Doppler et vitesses

10 Probabilités incertitude et particules

11 Réactions nucléaires et origine des éléments

6 Ondes et rayonnements

Objectifs Relier longueur d’onde et fréquence, parcourir le spectre électromagnétique et choisir une fenêtre d’observation.

Une même lumière sous plusieurs formes

La lumière visible occupe une petite partie du spectre électromagnétique. Les ondes radio, micro-ondes, infrarouges, ultraviolets, rayons X et rayons gamma appartiennent à la même famille physique. Dans le vide, ces rayonnements se propagent à la même vitesse c. Leur différence porte notamment sur la fréquence et, dans une description quantique, sur l’énergie de leurs photons.

Une onde périodique possède une fréquence, nombre d’oscillations par seconde, et une longueur d’onde, distance entre deux états identiques successifs. Le hertz vaut une oscillation par seconde. Lorsque la longueur d’onde augmente dans le vide, la fréquence diminue. Il faut préciser le milieu, car la vitesse de propagation dans une matière peut être inférieure à c.

$$c = \lambda \nu$$

Des frontières conventionnelles

Le visible s’étend approximativement de 380 à 750 nanomètres, sans frontière physiologique parfaitement nette. Les dénominations des autres domaines sont des conventions utiles ; elles ne créent pas des espèces différentes de photons. La séparation entre rayons X et gamma peut même dépendre de l’origine physique du rayonnement plutôt que d’une unique limite d’énergie.

Le choix de la bande révèle des phénomènes différents. Les poussières froides rayonnent surtout dans l’infrarouge lointain et le domaine millimétrique. Le gaz très chaud d’un amas de

galaxies émet en rayons X. Des électrons accélérés dans un champ magnétique produisent un rayonnement synchrotron observable sur plusieurs bandes. Une image visible ne résume donc pas toute l’activité d’une région.

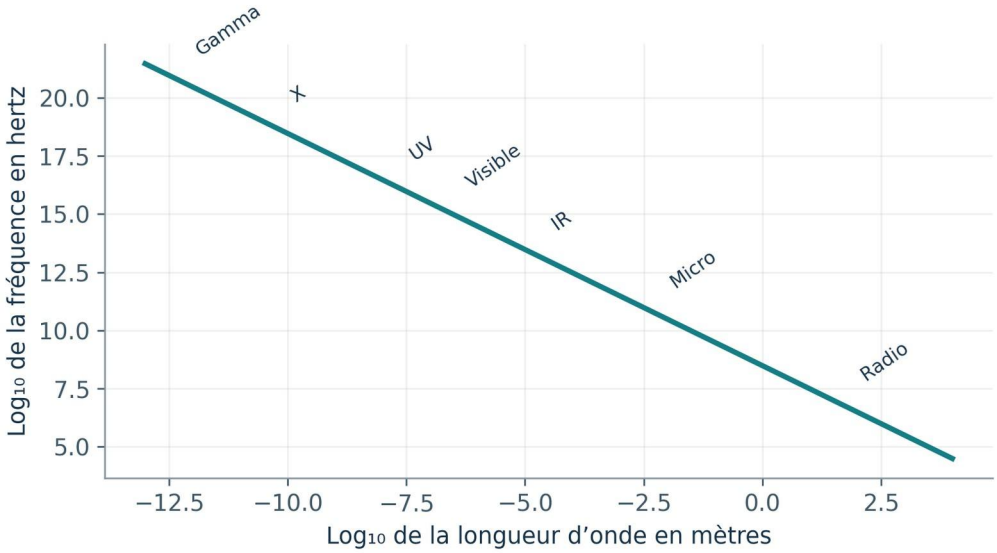


Figure 3 — Fréquence et longueur d’onde dans le vide. Les domaines sont indicatifs et les limites arrondies. Graphique original calculé avec c.

Traverser l’atmosphère

L’atmosphère terrestre transmet certaines longueurs d’onde et en absorbe fortement d’autres. Le visible et plusieurs bandes radio offrent des fenêtres exploitables depuis le sol. La vapeur d’eau gêne beaucoup l’infrarouge et le submillimétrique, d’où l’intérêt de sites secs et élevés. Les rayons X cosmiques demandent des instruments au-dessus de l’atmosphère pour être étudiés directement.

Cette protection atmosphérique explique pourquoi les observatoires spatiaux complètent les grands télescopes terrestres. Le plus grand miroir au sol ne remplace pas un instrument spatial dans une bande absorbée. À l’inverse, une installation terrestre peut être entretenue, équipée de détecteurs

plus lourds et reliée à d’autres antennes sur de grandes distances.

Intensité polarisation et phase

La lumière ne transporte pas uniquement une couleur et une intensité. La polarisation décrit l’organisation des oscillations du champ électrique. Elle renseigne sur la diffusion, les champs magnétiques et certaines géométries. Une polarisation mesurée demande un étalonnage soigneux, car l’instrument peut lui-même en introduire une partie.

La phase indique l’état de l’oscillation à un instant donné. Les interféromètres combinent des signaux en conservant cette information. Des interférences constructives et destructives permettent alors d’obtenir des contraintes angulaires très fines. Cela ne signifie pas que l’on additionne simplement plusieurs photographies ; la cohérence et la synchronisation des signaux sont essentielles.

Choisir la largeur d’une bande

Une mesure photométrique ne reçoit pas une longueur d’onde infiniment précise. Un filtre transmet une bande avec une courbe de réponse ; le signal additionne le spectre de la source pondéré par cette réponse et celle du détecteur. Deux filtres portant un nom proche peuvent donc produire des nombres différents si leurs transmissions diffèrent. Les systèmes de référence permettent de comparer ces mesures.

Une bande large recueille davantage de photons, mais mélange davantage de caractéristiques spectrales. Une bande étroite peut isoler une raie et réduire certains fonds, au prix d’un signal total plus faible. Le meilleur choix dépend de l’objectif. Pour étudier une nébuleuse d’émission, isoler une raie peut améliorer le contraste ; pour mesurer la couleur globale d’une étoile faible,

une bande plus large peut être préférable. Le nombre de photons et la sélectivité doivent être considérés ensemble.

Exemple Une onde radio de dix centimètres

Pour $\lambda = 0{,}10$ m, la relation $\nu = c/\lambda$ donne environ $3{,}0 \times 10^9$ Hz, soit 3,0 GHz. Une onde visible de 500 nm possède une fréquence environ 200 000 fois plus élevée. Ce rapport concerne la fréquence ; il ne dit rien de la puissance totale de deux sources, qui dépend aussi du nombre de photons émis ou reçus.

À retenir

Les différentes bandes électromagnétiques partagent une physique commune. L’atmosphère et les propriétés de la source déterminent quel observatoire peut répondre à une question.

Mini-lexique

Fréquence : nombre d’oscillations par seconde. Polarisation : propriété décrivant l’orientation et l’évolution des oscillations du champ électrique.

Vérifier sa compréhension

1. Quelle fréquence correspond à une longueur d’onde de 1 mm dans le vide ?

2. Pourquoi un télescope spatial X ne peut-il pas être remplacé par un simple miroir visible plus grand au sol ?

Références S03 • S10

7 Photons atomes et spectres

Objectifs Expliquer les raies spectrales et comprendre comment une composition chimique peut être identifiée à distance.

Des échanges quantifiés

Un photon d’une fréquence donnée transporte une énergie hν, où h est la constante de Planck. Une source plus intense à fréquence identique peut fournir davantage de photons sans augmenter l’énergie de chacun. Cette distinction explique pourquoi un faible flux de photons ultraviolets peut déclencher des processus qu’une lumière rouge beaucoup plus intense ne déclenche pas de la même façon.

Les électrons liés à un atome n’occupent pas n’importe quel état énergétique. L’absorption d’un photon peut permettre une transition vers un état plus énergétique si l’énergie correspond à la différence entre les états et si la transition est autorisée. Le retour vers un état plus bas peut émettre un photon. Les probabilités des transitions déterminent aussi l’intensité des raies.

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

Trois aspects d’un spectre

Un milieu dense et opaque peut produire un spectre continu proche d’un rayonnement thermique. Un gaz peu dense excité produit souvent des raies d’émission. Si un gaz plus froid se trouve devant une source continue, certaines longueurs d’onde peuvent être absorbées et former des raies sombres. Dans une étoile réelle, plusieurs couches et processus se combinent ; ces trois cas sont des repères, pas un inventaire exhaustif.

Une raie n’est pas infiniment fine. Les mouvements thermiques, les collisions, la rotation, les champs et la résolution

instrumentale l’élargissent. Sa largeur contient donc de l’information physique. Une raie très large ne démontre pas à elle seule une température extrême : il faut identifier les autres contributions possibles.

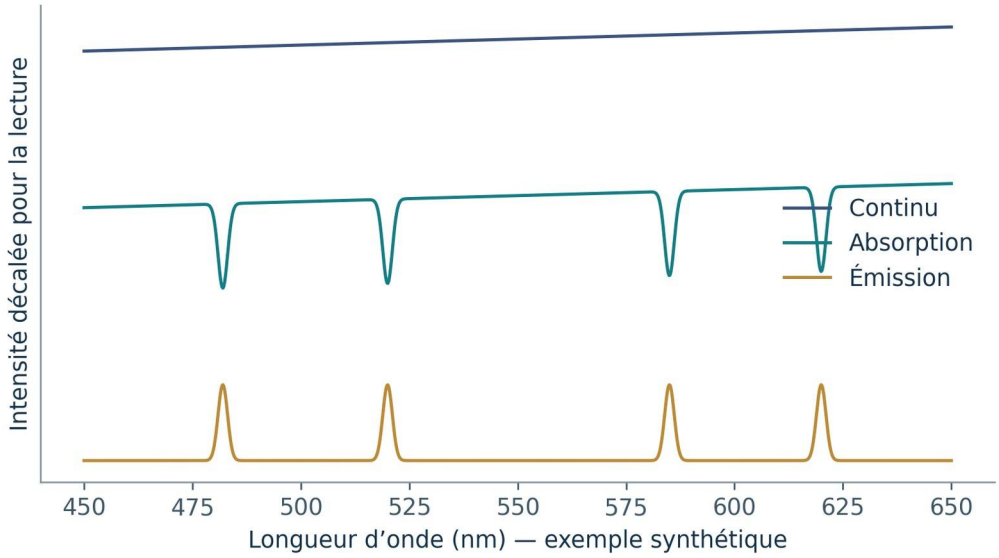


Figure 4 — Continu, absorption et émission dans un exemple synthétique. Les positions des raies sont choisies pour la démonstration et ne constituent pas un spectre observé.

Une empreinte chimique à interpréter

Chaque espèce atomique ou moléculaire possède un ensemble caractéristique de transitions. Identifier plusieurs raies cohérentes est plus fiable qu’attribuer un seul creux isolé. Une raie peut être mélangée à une autre ou provenir de l’atmosphère terrestre. La comparaison avec des références de laboratoire et des modèles de transfert du rayonnement fait partie de l’analyse.

L’absence d’une raie ne démontre pas l’absence de l’élément. À certaines températures, les atomes sont ionisés ou les niveaux nécessaires sont peu peuplés. L’hélium peut être présent sans afficher les mêmes raies d’une étoile à l’autre. La composition chimique et l’état d’excitation doivent être étudiés ensemble.

Mesurer une abondance

Une abondance compare le nombre d’atomes d’une espèce à celui d’une autre, souvent l’hydrogène. Les astrophysiciens appellent fréquemment « métaux » tous les éléments plus lourds que l’hélium. Cet usage diffère du vocabulaire chimique courant : l’oxygène entre ainsi dans la métallicité d’une étoile.

Une raie plus profonde ne se traduit pas toujours par une abondance proportionnellement plus grande. Lorsqu’une raie devient saturée, ajouter des absorbeurs n’approfondit plus son centre de façon simple. La température, la gravité de surface et les vitesses microscopiques modifient aussi le profil. Une mesure sérieuse associe plusieurs raies et une incertitude sur le modèle.

La largeur équivalente d’une raie

Pour mesurer la force d’une raie d’absorption, on peut comparer son aire manquante au continuum voisin. La largeur équivalente est la largeur d’un rectangle qui retirerait la même quantité de lumière si son absorption était complète. Elle possède l’unité de l’axe spectral, souvent le nanomètre ou l’ångström. Elle résume l’aire, sans donner toute la forme du profil.

Une raie large et peu profonde peut avoir la même largeur équivalente qu’une raie étroite et profonde. Leur information cinématique diffère pourtant. Le placement du continuum et les mélanges de raies deviennent des sources d’incertitude importantes. Pour transformer cette aire en abondance, il faut modéliser l’excitation et la saturation. Cette construction explique pourquoi une mesure spectrale soigneuse ne consiste pas seulement à comparer visuellement la profondeur de deux creux sur des images de spectres réglées différemment.

Exemple L’énergie d’un photon vert

Pour une longueur d’onde de 500 nm, hc/λ vaut environ 3,97 × 10^{-19} J, soit 2,48 eV. Un photon de 250 nm possède deux fois cette énergie. Il faut éviter de comparer directement ce résultat à la puissance d’une lampe : une puissance se mesure en joules par seconde et dépend du rythme d’émission des photons.

À retenir

Le spectre donne accès à la composition et à l’état physique du gaz. Une identification robuste repose sur un ensemble de transitions et sur leur contexte.

Mini-lexique

Raie spectrale : signature localisée en longueur d’onde d’une transition ou d’un processus. Électronvolt : énergie acquise par une charge élémentaire traversant une différence de potentiel de un volt.

Vérifier sa compréhension

1. Que devient l’énergie d’un photon si sa longueur d’onde double ?

2. Pourquoi une étoile contenant de l’hydrogène peut-elle avoir des raies d’hydrogène faibles ?

Références S03 • S11

8 Couleur flux et luminosité

Objectifs Distinguer luminosité intrinsèque et éclat reçu, utiliser les magnitudes et estimer une température thermique.

Ce qui est émis et ce qui est reçu

La luminosité est une puissance totale émise, exprimée en watts. Le flux reçu est une puissance par unité de surface, généralement exprimée en watts par mètre carré. Pour une source isotrope et en l’absence d’absorption, la même puissance traverse des sphères de surface croissante. Le flux diminue donc comme l’inverse du carré de la distance.

Une étoile deux fois plus éloignée fournit quatre fois moins de flux. Elle n’est pas devenue moins lumineuse pour autant. Si la poussière absorbe ou diffuse une partie du rayonnement, le flux diminue encore. Une estimation de distance fondée sur la luminosité doit donc traiter cette extinction au lieu de l’attribuer entièrement à l’éloignement.

$$F = L/\left(4\pi d^2\right)$$

La couleur d’une étoile

Un corps noir idéal émet un spectre dont la forme dépend de sa température. Lorsque celle-ci augmente, le maximum se déplace vers les petites longueurs d’onde. Une étoile froide paraît davantage rouge ; une étoile chaude possède proportionnellement plus de bleu et d’ultraviolet. Les étoiles ne rayonnent toutefois pas dans une seule couleur : leurs spectres couvrent une large gamme.

La loi de Wien relie le maximum du spectre par unité de longueur d’onde à la température. La valeur numérique de ce maximum diffère si l’on représente le spectre par unité de fréquence. Ce détail évite d’interpréter deux graphiques corrects comme

contradictoires. Les atmosphères stellaires s’écartent par ailleurs du corps noir idéal, notamment à cause des raies.

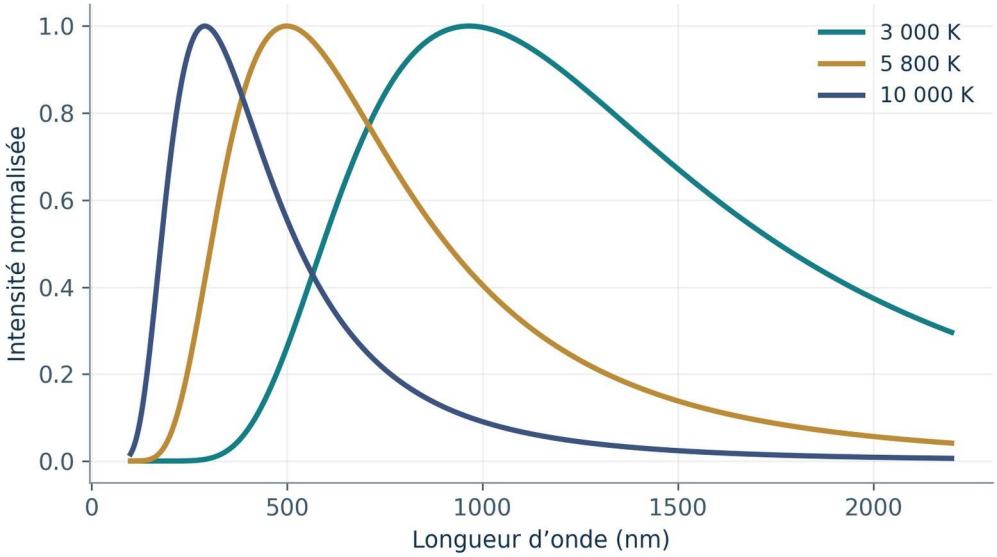


Figure 5 — Spectres de Planck calculés pour trois températures, normalisés séparément pour comparer leur forme. Les hauteurs relatives ne représentent donc pas leurs puissances absolues.

Rayon et température

La puissance totale rayonnée par une sphère thermique varie comme le carré du rayon et la quatrième puissance de la température effective. Deux étoiles de même couleur peuvent donc avoir des luminosités très différentes si leurs rayons diffèrent. C’est le cas d’une géante rouge et d’une naine rouge : une couleur proche ne signifie pas un même volume ni une même étape d’évolution.

La température effective est définie à partir du flux total et d’un modèle de surface. Elle ne correspond pas à la température du cœur. Le Soleil possède une température effective voisine de 5 772 K, alors que son centre atteint des millions de kelvins. Une mesure de couleur renseigne surtout sur les couches d’où s’échappe le rayonnement.

Le langage des magnitudes

Les magnitudes constituent une échelle logarithmique : les petits nombres correspondent aux grands éclats. Une différence de cinq magnitudes représente un rapport de flux de cent. La magnitude apparente décrit l’éclat reçu dans une bande définie ; la magnitude absolue correspond à l’éclat que l’objet aurait à dix parsecs, avec les conventions de cette bande.

Une magnitude doit être accompagnée du filtre ou du système utilisé. Comparer directement une magnitude infrarouge à une magnitude visible peut être trompeur. La magnitude intégrée d’une galaxie ne décrit pas non plus sa facilité d’observation : sa lumière se répartit sur une surface étendue, ce qui rend le contraste avec le fond du ciel décisif.

La brillance de surface d’un objet étendu

Dans la géométrie locale sans absorption, éloigner un objet étendu réduit son flux total comme $1/d^2$, mais réduit aussi son aire apparente comme $1/d^2$. Le flux par unité d’angle solide reste donc approximativement constant tant que l’objet demeure résolu. La diminution de taille et les limites de résolution restent cependant déterminantes pour le reconnaître.

Cette propriété ne doit pas être prolongée sans correction à l’Univers lointain. L’expansion produit une diminution cosmologique de brillance de surface, avec un facteur bolométrique usuel en $(1 + z)^4$ dans le cadre standard, auquel s’ajoutent bande et évolution. Pour l’observation amateur proche, elle explique surtout pourquoi une galaxie de magnitude intégrée favorable peut rester difficile : sa lumière est répartie sur une grande étendue et le fond du ciel fixe le contraste. Un instrument qui collecte plus de lumière ne peut ignorer cette répartition.

Exemple Deux étoiles séparées de deux magnitudes

Si A a une magnitude 2 et B une magnitude 4 dans le même filtre, le rapport de leurs flux vaut 10^(0,4 × 2), soit environ 6,31. A fournit donc environ six fois plus de flux que B. Cette comparaison ne permet pas de déduire laquelle possède la plus grande luminosité intrinsèque sans connaître les distances et l’extinction.

À retenir

La couleur renseigne sur la distribution du rayonnement ; l’éclat dépend aussi du rayon, de la distance et de l’extinction. Une magnitude est toujours liée à une définition photométrique.

Mini-lexique

Flux : puissance reçue par unité de surface. Température effective : température d’un corps noir rayonnant le même flux total par unité de surface.

Vérifier sa compréhension

1. Deux étoiles ont le même rayon, mais la température de B vaut deux fois celle de A. Quel est le rapport idéal de leurs luminosités ?

2. Une source perd un facteur cent de flux. De combien sa magnitude augmente-t-elle ?

Références S04 • S12

9 Doppler et vitesses

Objectifs Déduire une vitesse radiale d’un décalage spectral et distinguer les origines possibles d’un décalage vers le rouge.

Un espacement qui change

Lorsqu’une source et un observateur se rapprochent, les oscillations reçues sont plus rapprochées dans le temps ; lorsqu’ils s’éloignent, elles sont plus espacées. Pour la lumière, cet effet se mesure en comparant les longueurs d’onde des raies reçues à leurs valeurs de référence. On définit le décalage z comme la différence de longueur d’onde divisée par la longueur d’onde au repos.

Un z positif correspond à un décalage vers les grandes longueurs d’onde, souvent appelé décalage vers le rouge même lorsque les photons appartiennent à l’infrarouge ou à la radio. Un z négatif correspond à un décalage vers le bleu. Le mot décrit le sens du déplacement spectral ; il n’affirme pas encore sa cause.

$$z = (\lambda observée - \lambda repos) / \lambda repos$$

L’approximation des faibles vitesses

Lorsque la vitesse relative est très petite devant c et que le décalage provient principalement d’un mouvement radial, on utilise $v \approx cz$. Le signe positif désigne habituellement un éloignement. Une vitesse tangentielle, perpendiculaire à la ligne de visée, ne se mesure pas directement avec cette approximation Doppler ; elle demande notamment un mouvement propre et une distance.

À grande vitesse, la relativité restreinte remplace la relation linéaire. Pour une source qui s’éloigne exactement le long de la ligne de visée dans un espace-temps local plat, $1 + z = \sqrt{(1 + \beta)/(1 - \beta)}$, avec $\beta = v/c$. Appliquer $v = cz$ sans limite conduirait à interpréter incorrectement de grands décalages.

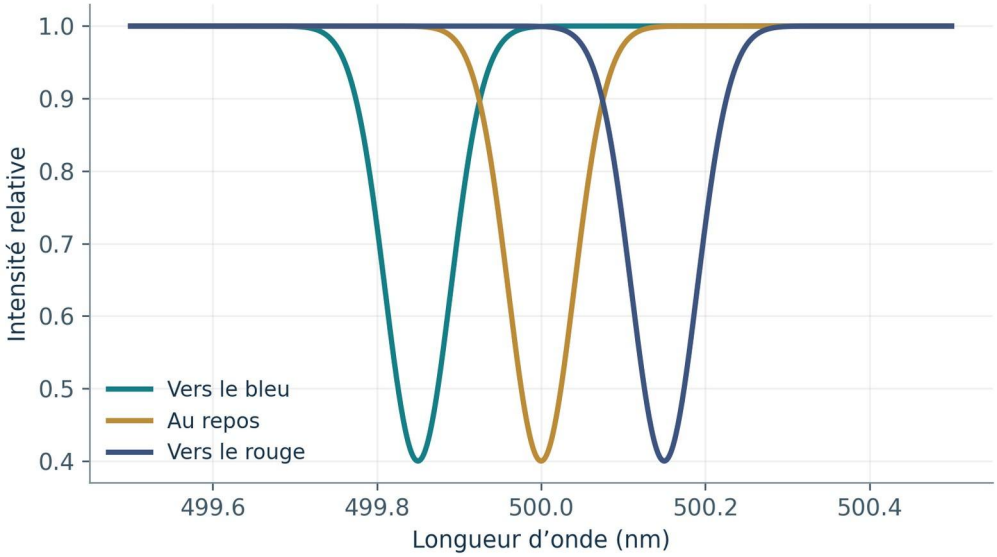


Figure 6 — Profil d’absorption synthétique déplacé de part et d’autre de sa position de référence. Le schéma illustre un déplacement spectral et ne représente pas une mesure réelle.

Le mouvement de l’observateur

La Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Ces mouvements contribuent à la vitesse mesurée. Pour comparer des observations prises à plusieurs dates, on les rapporte à une référence commune, souvent le barycentre du Système solaire. Le spectrographe doit également rester stable ou être calibré assez précisément pour suivre ses dérives.

Les surfaces stellaires compliquent encore la mesure. Une tache qui traverse un disque en rotation modifie la répartition des contributions rouges et bleues. Une pulsation déplace les couches de gaz ; la convection déforme les profils. La recherche d’exoplanètes par vitesses radiales exige donc de séparer le mouvement global de l’étoile de son activité propre.

Plusieurs chemins vers le rouge

Un photon qui s’échappe d’un champ gravitationnel peut être reçu avec une fréquence plus faible. Le décalage cosmologique provient de l’évolution du facteur d’échelle durant la

propagation. Dans une observation lointaine, des mouvements locaux, la gravitation et l’expansion peuvent contribuer ensemble. Le contexte permet de choisir la relation adaptée.

Une galaxie du Groupe local peut se rapprocher de nous malgré l’expansion générale. Les systèmes liés possèdent leur dynamique propre. Présenter chaque décalage rouge comme la preuve d’une fuite mécanique dans un espace immobile ferait perdre la distinction entre dynamique locale et description cosmologique.

La rotation élargit sans tout déplacer

Une étoile en rotation présente un bord qui se rapproche et un bord qui s’éloigne. Le spectre intégré combine des contributions décalées vers le bleu et vers le rouge. Dans un cas symétrique, la raie s’élargit sans que son centre corresponde à une vitesse globale supplémentaire. L’élargissement dépend de la vitesse projetée v sin i, avec i l’inclinaison de l’axe.

Une tache ou une région brillante peut rompre cette symétrie : le centre apparent du profil se déplace légèrement à mesure que la région tourne. Un faux signal périodique peut alors imiter une partie du mouvement recherché pour une planète. Examiner les variations de forme, les indicateurs d’activité et plusieurs raies aide à distinguer les mécanismes. Le centre d’une raie, sa largeur et son asymétrie sont donc trois informations complémentaires, qu’un seul nombre de vitesse ne conserve pas entièrement.

Exemple Une raie légèrement déplacée

Une raie de référence à 500,00 nm est reçue à 500,05 nm. On obtient z = 0,0001. Dans l’approximation Doppler non relativiste, cela correspond à un éloignement d’environ 30 km/s. Il faut encore soustraire les contributions de l’observateur et examiner

les effets astrophysiques avant d’attribuer tout ce nombre au mouvement du centre de masse de l’étoile.

À retenir

Un décalage spectral est une mesure ; une vitesse est une interprétation fondée sur un régime physique et un référentiel.

Mini-lexique

Vitesse radiale : composante de la vitesse selon la ligne de visée. Mouvement propre : déplacement angulaire d’un objet sur le ciel par unité de temps.

Vérifier sa compréhension

1. Une raie à 600 nm est observée à 599,94 nm. Calculer z et la vitesse approchée.

2. Pourquoi un spectre unique ne fournit-il généralement pas la vitesse spatiale complète d’une étoile ?

Références S08 • S14

10 Probabilités incertitude et particules

Objectifs Comprendre quelques principes quantiques utiles aux étoiles sans attribuer aux particules des propriétés classiques incompatibles.

Des probabilités calculables

La mécanique quantique décrit un système par un état permettant de calculer les probabilités de résultats de mesure. Un électron lié à un atome ne suit pas une petite orbite planétaire déterminée que l’on pourrait simplement photographier. Une orbitale décrit une structure de probabilité associée à un état. Cette description produit des prédictions précises sur les spectres et les interactions.

Des résultats individuels peuvent être imprévisibles alors que les distributions sont extrêmement bien déterminées. Une source radioactive fournit un exemple : on ne prévoit pas l’instant de désintégration d’un noyau particulier, mais on prévoit la proportion moyenne de noyaux survivants. L’incertitude quantique n’est donc pas une permission de remplacer le calcul par n’importe quel récit.

Une limite sur des distributions

Le principe d’incertitude relie, notamment, la dispersion des positions et celle de la quantité de mouvement dans un état. Pour ces grandeurs, leur produit ne peut être inférieur à $\hbar/2$. Il ne s’agit pas seulement de la maladresse d’un appareil qui aurait bousculé une particule. La limite porte sur la structure des états quantiques et les observables considérées.

Il faut également éviter de transformer une relation énergie–temps en autorisation de violer momentanément la conservation de l’énergie. Les particules virtuelles apparaissant dans certains

calculs sont des éléments d'une méthode mathématique, pas nécessairement des objets qui surgissent littéralement puis « remboursent » une énergie empruntée au vide.

$$\Delta x \ \Delta p \ \geq \ \hbar / 2$$

Deux familles statistiques

Les fermions, comme les électrons, obéissent au principe d'exclusion de Pauli : deux fermions identiques ne peuvent occuper exactement le même état quantique. Cette règle structure les couches électroniques et contribue à la stabilité de la matière. Dans une naine blanche, elle intervient dans une pression qui subsiste même lorsque l'agitation thermique devient relativement faible.

Les bosons peuvent occuper collectivement un même état. Les photons appartiennent à cette famille. Les statistiques quantiques ne décrivent pas seulement des laboratoires microscopiques : elles conditionnent le rayonnement thermique, la matière dense et une partie de l'histoire de l'Univers primordial.

Notion	Ce qu'elle permet de décrire	Contresens à éviter
État quantique	Probabilités des résultats	Petite trajectoire toujours définie
Exclusion de Pauli	Occupation des états fermioniques	Force électrique supplémentaire
Intrication	Corrélations entre mesures	Messagerie plus rapide que la lumière

Intrication et information

Deux systèmes intriqués présentent des corrélations qui ne se réduisent pas à l'attribution de certaines propriétés locales préexistantes dans les descriptions classiques usuelles. Des expériences testent ces corrélations. Cependant, le résultat isolé

obtenu par un observateur ne permet pas d’envoyer un message contrôlé instantanément à l’autre.

La mesure ne nécessite pas une conscience humaine pour modifier la description du système. Une interaction physique avec un appareil et son environnement suffit à poser la question du résultat et de la décohérence. Les interprétations de la mécanique quantique proposent des lectures différentes de ce formalisme ; elles seront distinguées des multivers cosmologiques au chapitre 57.

Les particules composées et la statistique

Protons et neutrons sont eux-mêmes composés de quarks, mais peuvent être traités comme des fermions dans de nombreuses descriptions de basse énergie. Un objet composé peut présenter une statistique globale différente de celle de chacun de ses constituants. Le spin total et les conditions expérimentales déterminent le comportement collectif pertinent ; additionner simplement les étiquettes sans préciser l’état ne suffit pas.

Cette distinction apparaît lorsqu’on compare des isotopes ou des atomes refroidis en laboratoire. Elle rappelle que le niveau de description doit correspondre à l’échelle étudiée. Dans une étoile ordinaire, le plasma et les interactions dominent souvent la présentation macroscopique ; dans un résidu compact, la statistique des électrons ou des nucléons devient essentielle. Le succès d’un modèle classique dans une gamme de densité ne supprime donc pas les règles quantiques : il signifie que leurs effets particuliers peuvent y être approximés autrement.

Exemple Confiner un électron

Prenons une dispersion de position de 10^{-10} m. La relation d’incertitude impose une dispersion de quantité de mouvement d’au moins environ $5{,}27 \times 10^{-25}$ kg m/s. Cette estimation n’est pas la vitesse mesurée d’un électron dans un atome précis. Elle

montre que chercher à confiner très fortement un état interdit d’en rendre simultanément la quantité de mouvement arbitrairement précise.

À retenir

La physique quantique prédit des distributions et des corrélations testables. Ses limites ne se résument ni à des défauts instrumentaux ni au rôle d’un observateur conscient.

Mini-lexique

Fermion : particule à spin demi-entier soumise à l’exclusion de Pauli. Intrication : état commun dont certaines corrélations ne se décrivent pas par des états indépendants des composants.

Vérifier sa compréhension

1. Peut-on utiliser l’intrication pour choisir à distance le résultat aléatoire d’une mesure ?

2. Pourquoi la pression de dégénérescence ne disparaît-elle pas simplement lorsque le gaz refroidit ?

Références S03 • S09 • S38

11 Réactions nucléaires et origine des éléments

Objectifs Distinguer réactions chimiques et nucléaires et relier les éléments aux différentes étapes de l’histoire cosmique.

Modifier les noyaux

Une réaction chimique redistribue surtout les électrons liés aux atomes. Une réaction nucléaire modifie les noyaux. La fusion assemble des noyaux légers ; la fission fragmente certains noyaux lourds. Une désintégration radioactive transforme spontanément un noyau instable suivant des probabilités caractéristiques. Ces mécanismes n’ont ni les mêmes conditions ni les mêmes énergies.

La masse au repos totale des produits peut être inférieure à celle des réactifs. La différence correspond à de l’énergie libérée selon $E = \Delta mc^2$. Il faut compter toutes les particules et toutes les formes d’énergie. Une masse « perdue » dans un bilan incomplet n’a pas disparu sans cause : elle apparaît dans l’énergie transportée par les produits et le rayonnement.

L’hydrogène au cœur des étoiles

Dans les conditions du centre solaire, la chaîne proton–proton convertit globalement de l’hydrogène en hélium. Elle comporte plusieurs réactions et produit des neutrinos. Dans des étoiles plus chaudes et massives, le cycle carbone–azote–oxygène contribue fortement à la conversion de l’hydrogène. Les noyaux de carbone, d’azote et d’oxygène y jouent un rôle de catalyseurs dans le bilan global.

Les noyaux positifs se repoussent électriquement. La température augmente leur énergie, mais l’effet tunnel quantique intervient aussi dans les taux de réaction. Il serait incorrect de dire que tous les protons franchissent simplement

une barrière grâce à une vitesse suffisante. La fusion stellaire résulte de probabilités de réaction extrêmement sensibles aux conditions du plasma.

Figure 7 — Origines principales de familles d’éléments. Le schéma présente des voies dominantes et ne constitue pas un tableau exclusif : plusieurs processus peuvent contribuer à un même élément.

Une histoire répartie entre plusieurs sites

Les premières minutes de l’Univers produisent principalement de l’hydrogène, de l’hélium et des traces d’éléments légers. Les étoiles fabriquent ensuite du carbone, de l’oxygène et d’autres noyaux. Dans les étoiles massives, des étapes successives de combustion peuvent conduire jusqu’aux éléments du groupe du fer. La fusion au-delà de cette région ne fournit pas un réservoir d’énergie comparable.

Des captures de neutrons lentes se produisent notamment dans certaines étoiles évoluées. Des captures rapides interviennent dans des environnements riches en neutrons, dont les fusions d’étoiles à neutrons. Plusieurs sites contribuent probablement à la diversité des éléments lourds ; attribuer tout l’or ou tout l’uranium à une unique catégorie d’événements simplifierait excessivement la recherche actuelle.

Enrichir les générations suivantes

Les vents stellaires et les explosions rejettent une partie de la matière transformée dans le milieu interstellaire. Une nouvelle génération d’étoiles et de planètes peut se former à partir de ce mélange enrichi. La composition d’une étoile conserve ainsi une information sur l’histoire du gaz dont elle provient, tout en pouvant être modifiée à sa surface dans certaines phases.

Les rayons cosmiques fragmentent aussi des noyaux et contribuent à la production du lithium, du béryllium et du bore. L’origine des éléments n’est donc pas une simple chaîne unique allant des étoiles légères aux étoiles massives. Les abondances observées constituent un ensemble de contraintes sur la cosmologie, l’évolution stellaire et les phénomènes explosifs.

Le rythme d’une désintégration radioactive

Une demi-vie est la durée au bout de laquelle la moitié d’une grande population de noyaux radioactifs subsiste en moyenne. Après deux demi-vies, il reste un quart ; après trois, un huitième. Il ne s’agit pas d’une date d’expiration individuelle identique pour tous les noyaux. La probabilité de désintégration par unité de temps est caractéristique de l’espèce et du processus considéré.

La puissance d’un matériau radioactif dépend du nombre de noyaux, de leur rythme de désintégration et de l’énergie déposée par événement. Dans des éjectas stellaires, une partie du rayonnement peut s’échapper sans chauffer efficacement la matière. Une courbe de lumière n’est donc pas toujours la simple exponentielle d’une demi-vie unique. Le transport des photons, les chaînes de désintégration et la transparence évolutive doivent être combinés. La radioactivité fournit une horloge, mais l’astre ajoute sa propre physique de transport.

Exemple Le bilan énergétique solaire

En prenant $L_\odot = 3{,}828 \times 10^{26}$ W, le rapport $L_\odot/c^2$ vaut environ $4{,}26 \times 10^9$ kg/s. C’est l’équivalent de masse de l’énergie lumineuse émise chaque seconde, et non la masse totale d’hydrogène transformée. Comme seule une petite fraction de la masse des réactifs est convertie en énergie, la masse de combustible impliquée est bien plus grande. Les neutrinos ajoutent un terme au bilan énergétique complet.

À retenir

Les éléments résultent de plusieurs épisodes et de plusieurs sites. La fusion stellaire fournit de l’énergie lorsque le bilan de liaison nucléaire le permet.

Mini-lexique

Nucléosynthèse : production de noyaux atomiques. Effet tunnel : possibilité quantique de traverser une barrière qu’une description classique rendrait infranchissable pour l’énergie considérée.

Vérifier sa compréhension

1. Pourquoi la masse équivalente L/c^2 n’est-elle pas la masse de combustible consommé ?

2. Le carbone de la Terre a-t-il été produit principalement pendant les premières minutes cosmologiques ?

Références S04 • S13 • S15

PARTIE III

III

La gravitation et la relativité

Des orbites familières aux horizons des trous noirs.

DANS CETTE PARTIE

12 Newton et les orbites

13 Kepler et les mouvements apparents

14 Marées résonances et collisions

15 Relativité restreinte

16 Relativité générale

17 Trous noirs et horizons

12 Newton et les orbites

Objectifs Calculer une vitesse orbitale, comprendre le centre de masse et reconnaître le domaine de validité de la gravitation newtonienne.

Une interaction universelle

Deux masses s'attirent avec une force proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur séparation. Pour des corps sphériques séparés, on peut traiter leur attraction extérieure comme si chaque masse était concentrée en son centre. À l'intérieur d'un objet étendu ou pour une distribution complexe, il faut additionner les contributions des différentes régions.

La constante G fixe l'intensité de l'interaction. La force exercée sur une petite masse augmente avec cette masse, mais sa résistance à l'accélération augmente dans la même proportion. Dans un champ donné, les corps en chute libre suivent ainsi la même accélération à l'approximation où les frottements, les effets de marée et d'autres interactions sont négligeables.

$$F = GMm / r^2$$

Une chute qui manque le sol

Une orbite circulaire résulte d'une vitesse tangentielle adaptée à la gravitation. Le corps tombe continuellement vers le centre, tandis que son déplacement latéral l'empêche de l'atteindre. À un rayon r autour d'une masse dominante M, la vitesse circulaire vaut √(GM/r). Elle diminue lorsque r augmente. Une planète éloignée du Soleil se déplace donc plus lentement qu'une planète proche dans cette approximation.

Changer la vitesse change l'orbite. Une vitesse légèrement différente produit généralement une ellipse ; une énergie suffisamment grande permet une trajectoire non liée. La vitesse

de libération √(2GM/r) correspond, dans ce modèle isolé, à l'énergie minimale pour atteindre l'infini avec une vitesse finale nulle. Elle ne garantit pas qu'une fusée réelle évite l'atmosphère ou possède le bon trajet.

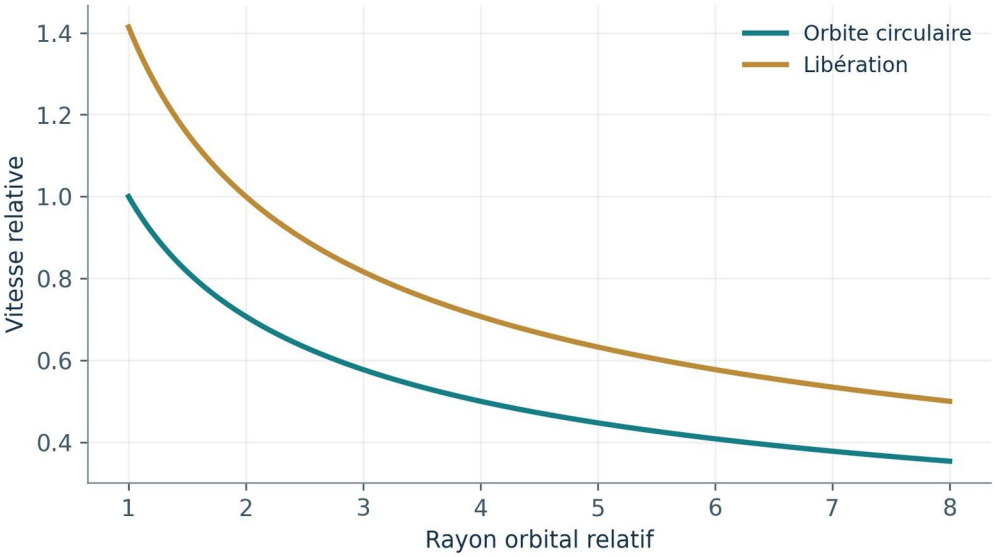


Figure 8 — Vitesses circulaire et de libération autour d'une masse ponctuelle, en unités relatives. Les deux courbes ne valent pas à l'intérieur de l'astre.

Deux corps mobiles

Une étoile ne reste pas exactement fixe pendant qu'une planète l'accompagne. Les deux objets tournent autour de leur centre de masse. Pour le système à deux corps, le mouvement relatif dépend de la somme des masses. L'approximation d'une étoile immobile convient lorsque sa masse domine fortement, mais elle masque précisément le petit mouvement recherché par la méthode des vitesses radiales.

Avec trois corps ou davantage, les interactions perturbent les ellipses idéales. Les calculs numériques suivent alors l'accélération de chaque objet et mettent à jour les mouvements par petits intervalles. La qualité de l'intégration se vérifie notamment par la conservation des grandeurs adaptées. Une

courbe jolie à l’écran peut cacher une erreur numérique cumulative.

Pourquoi Newton reste utile

La gravitation newtonienne décrit très bien de nombreuses situations où les vitesses sont faibles devant c et les champs modérés. Elle permet de prévoir des éclipses, de préparer des trajectoires et d’estimer des masses stellaires. La relativité générale devient nécessaire pour des mesures très précises, des champs intenses et la description globale de l’espace-temps.

Passer à une théorie plus générale ne rend pas les calculs précédents sans valeur. On cherche le niveau de description qui répond à la précision demandée. Pour la trajectoire d’une étoile très proche du centre galactique, les effets relativistes deviennent mesurables ; pour un premier calcul de la période de Jupiter, Newton reste une excellente approximation.

La vitesse change le long d’une ellipse

Pour une orbite à deux corps, la relation de vis-viva s’écrit $v^2 = G(M + m)(2/r - 1/a)$, avec r la séparation instantanée et a le demi-grand axe relatif. Elle relie l’énergie orbitale à la vitesse locale. Au périastre, r est plus petit et la vitesse plus grande. Pour $r = a$, on retrouve la valeur circulaire correspondant à ce rayon, même si l’orbite considérée n’est pas circulaire.

Cette formule permet de vérifier une simulation sans imposer une vitesse constante sur l’ellipse. Une trajectoire dessinée correctement mais parcourue à vitesse uniforme ne respecte pas la dynamique keplérienne. Dans une mission, on peut également comparer les vitesses avant et après une impulsion. Les manœuvres réelles demandent ensuite plusieurs corps, des contraintes de propulsion et parfois des corrections relativistes. Le calcul à deux corps fournit un premier contrôle physique, pas la totalité de la navigation.

Exemple La vitesse de la Terre

Avec $GM_\odot \approx 1{,}327 \times 10^{20}$ m³/s² et r = 1 ua, on obtient environ 29,8 km/s pour une orbite circulaire. La vitesse de libération au même endroit vaut environ 42,1 km/s par rapport au Soleil. Ce second nombre ne représente pas la vitesse à fournir directement au sol terrestre : la Terre possède déjà une vitesse solaire et sa propre gravitation doit être prise en compte.

À retenir

Une orbite est un mouvement accéléré. Sa vitesse et sa forme dépendent de la masse centrale, de la distance et de l'énergie initiale.

Mini-lexique

Barycentre : centre de masse d'un ensemble. Vitesse de libération : vitesse minimale correspondant à une trajectoire marginalement non liée dans un modèle donné.

Vérifier sa compréhension

1. À masse centrale identique, comment varie la vitesse circulaire si le rayon orbital est multiplié par quatre ?

2. Une orbite fermée autour d'une étoile signifie-t-elle que l'objet ne subit aucune force ?

Références S03 • S04 • S08

13 Kepler et les mouvements apparents

Objectifs Utiliser les trois lois de Kepler et expliquer la rétrogradation sans modifier arbitrairement les lois du mouvement.

Des ellipses et un foyer

Dans le problème newtonien à deux corps, une orbite liée est une ellipse dont un foyer correspond au centre de force du mouvement relatif. Le demi-grand axe a décrit sa taille ; l’excentricité décrit son allongement. Le cercle est le cas d’excentricité nulle. Le Soleil n’est donc pas placé au centre géométrique de l’ellipse dans la représentation habituelle d’une planète.

La deuxième loi de Kepler affirme que le segment reliant la planète au Soleil balaie des aires égales pendant des durées égales. La planète se déplace plus vite près du périhélie et plus lentement près de l’aphélie. Cette règle traduit la conservation du moment cinétique lorsque la force est centrale. Elle n’impose pas une vitesse constante le long de l’orbite.

La relation entre taille et période

Le carré de la période est proportionnel au cube du demi-grand axe pour des objets orbitant autour de la même masse dominante. Dans les unités année, ua et masse solaire, on peut écrire approximativement $P^2 = a^3$ pour une planète de masse négligeable autour du Soleil. Le choix des unités absorbe ici plusieurs constantes ; il ne s’agit pas d’une égalité valable avec n’importe quelles unités.

Pour un système général, la relation fait intervenir G et la somme des masses. Elle permet de peser des étoiles doubles lorsqu’on connaît la taille réelle de l’orbite et la période. Mesurer

uniquement une séparation angulaire ne suffit pas : une distance et la géométrie orbitale sont également nécessaires.

$$P^2 = 4\pi^2 a^3 / [G(M + m)]$$

Une planète semble reculer

Depuis la Terre, on observe la direction d’une planète par rapport aux étoiles lointaines. Lorsque la Terre dépasse une planète extérieure, cette direction peut se déplacer temporairement dans le sens opposé au mouvement habituel : c’est la rétrogradation apparente. La planète poursuit pourtant son mouvement orbital dans le même sens autour du Soleil.

La boucle dépend des orbites et des vitesses relatives. Une carte héliocentrique représente les trajectoires ; une carte géocentrique montre les directions observées. Le chapitre 2 du tome II illustre l’écliptique et distingue les douze signes conventionnels des treize constellations traversées par le Soleil. Les inclinaisons planétaires figurent dans les tableaux de données.

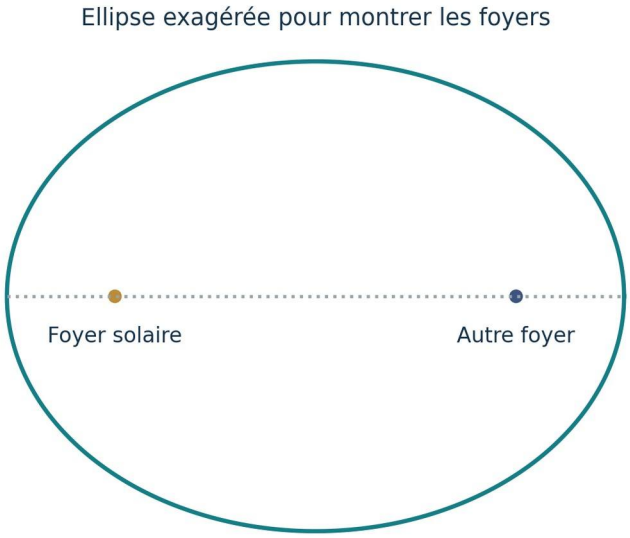


Figure 9 — Ellipse avec ses deux foyers. Le dessin exagère l’excentricité pour rendre la géométrie lisible ; les orbites planétaires ne possèdent pas toutes cette forme.

Période sidérale et période synodique

La période sidérale correspond au tour par rapport aux directions stellaires lointaines. La période synodique mesure le retour d’une configuration relative avec la Terre et le Soleil, par exemple deux oppositions successives de Mars. Pour des mouvements circulaires uniformes dans le même sens, l’inverse de la période synodique vaut la différence absolue des fréquences orbitales.

Les orbites réelles sont elliptiques et perturbées. L’intervalle entre deux événements peut donc s’écarter d’une valeur moyenne. Un calendrier d’observation précis demande des éphémérides calculées pour la date et le lieu ; une formule moyenne explique le mécanisme sans remplacer ces données.

Changer la masse centrale

La relation $P^2 \propto a^3/M$ montre qu’une même distance orbitale ne correspond pas à la même période autour de toutes les étoiles. Autour d’une étoile de demi-masse solaire, une planète de masse négligeable à 1 ua possède une période de $\sqrt{2}$ ans, soit environ 1,41 an. La distance seule ne permet donc pas de lire un calendrier planétaire.

Le même effet intervient lorsqu’un rayon orbital est déduit d’une période mesurée : il faut une estimation de la masse stellaire. Une incertitude sur cette masse se transmet aux paramètres planétaires. Dans un système où le compagnon n’est plus négligeable, on emploie la somme des masses et l’orbite relative. Ces précautions expliquent pourquoi les catalogues d’exoplanètes publient aussi des paramètres de l’étoile hôte. Le système planétaire se caractérise comme un ensemble ; les propriétés du point lumineux central font partie du résultat.

Exemple La période de Jupiter

Avec un demi-grand axe arrondi à 5,20 ua, $P = \sqrt{(5{,}20^3)}$ donne environ 11,9 ans. Ce résultat suffit pour comprendre la lenteur du déplacement zodiacal de Jupiter. Pour Mars, une période d’environ 1,881 an donne une période synodique moyenne proche de 2,14 ans, soit un peu plus de deux ans entre oppositions.

À retenir

Les lois de Kepler relient géométrie, vitesse et période. Une rétrogradation sur le ciel ne correspond pas à une inversion de l’orbite autour du Soleil.

Mini-lexique

Périhélie : point d’une orbite le plus proche du Soleil. Période synodique : durée moyenne de retour d’une configuration relative.

Vérifier sa compréhension

1. Estimer la période d’une planète à 4 ua autour d’une étoile de masse solaire.

2. Pourquoi les oppositions de Mars ne reviennent-elles pas chaque année ?

Références S04 • S37

14 Marées résonances et collisions

Objectifs Expliquer les effets de marée, distinguer résonance et coïncidence et comprendre le rôle des collisions dans l’évolution des systèmes.

La gravitation varie d’un point à l’autre

La face d’un objet tournée vers une masse extérieure est attirée un peu plus fortement que sa face opposée. Cette différence de champ produit une déformation de marée. Le phénomène ne concerne pas uniquement l’eau des océans : il agit aussi sur la roche, les étoiles et les nuages de gaz. À grande distance d’une masse perturbatrice, son intensité différentielle dépend approximativement de l’inverse du cube de la séparation.

La description des deux renflements océaniques utilise un référentiel adapté au système Terre–Lune et la réponse de la Terre. Les marées réelles dépendent aussi des continents, de la profondeur des bassins, des frottements et de l’action solaire. La hauteur observée dans un port ne se déduit donc pas d’un simple dessin de deux bosses.

Dissiper de l’énergie

Une déformation qui varie dans le temps peut dissiper de l’énergie à l’intérieur d’un corps. Les marées réchauffent ainsi certains satellites. Elles échangent également du moment cinétique entre rotations et orbites. La synchronisation de la Lune explique pourquoi elle présente approximativement la même face à la Terre, tout en tournant sur elle-même une fois par révolution sidérale.

La synchronisation n’immobilise pas le satellite dans l’espace. Les librations permettent d’apercevoir au fil du temps un peu plus de la moitié de sa surface. Une planète en rotation

synchrone peut conserver des saisons, une atmosphère et des circulations complexes ; un verrouillage ne suffit pas à conclure que tout un hémisphère est nécessairement inhabitable.

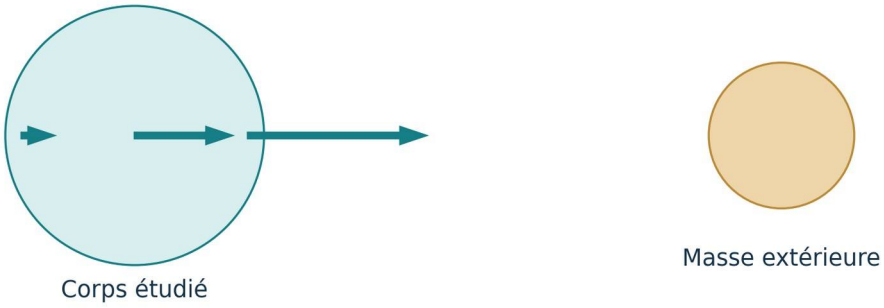


Figure 10 — Différence d’accélération entre plusieurs points d’un petit corps soumis à une masse extérieure. Schéma de principe ; les flèches et les dimensions ne sont pas à l’échelle.

Répéter une perturbation

Deux périodes proches d’un rapport de petits entiers peuvent créer une résonance orbitale. La perturbation se répète alors selon une géométrie particulière. Certaines résonances stabilisent des configurations ; d’autres favorisent une croissance de l’excentricité ou une évacuation d’objets. Une proximité numérique des périodes ne démontre toutefois pas seule une résonance dynamique : il faut étudier des angles et leur évolution.

Io, Europe et Ganymède offrent un exemple célèbre de périodes proches d’une chaîne 1:2:4. Les échanges gravitationnels contribuent au maintien d’excentricités qui permettent une dissipation de marée. Ce mécanisme relie une structure orbitale à une activité géologique. La quantité de chaleur produite

dépend aussi des propriétés internes, difficiles à mesurer directement.

Rencontres et fragmentation

Les collisions assemblent parfois de la matière et la fragmentent parfois. Leur effet dépend de la vitesse relative, de la géométrie, de la gravitation et de la résistance des matériaux. Un disque de petits corps peut se refroidir dynamiquement par certaines collisions tout en produisant de la poussière par d’autres. Une simulation doit donc choisir un modèle de collision adapté à l’échelle étudiée.

À l’échelle galactique, les étoiles sont tellement espacées que deux galaxies en interaction ne se comportent pas comme deux solides qui se heurtent. Le gaz subit des chocs ; les étoiles répondent surtout au champ gravitationnel collectif. De longues queues de marée peuvent se former sans que les étoiles entrent fréquemment en collision directe.

La limite de Roche dépend de l’objet

Un satellite trop proche d’une masse peut subir des marées comparables à sa cohésion gravitationnelle. Dans un modèle classique de satellite fluide sans résistance matérielle, la limite de Roche est de l’ordre de 2,44 rayons du corps central multipliés par la racine cubique du rapport des densités. Le facteur change avec les hypothèses de forme, de rotation et de cohésion.

Un bloc rocheux résistant ne se comporte pas comme un fluide autogravitant ni comme un agrégat poreux. Il serait donc faux de tracer un cercle universel qui détruirait instantanément tous les corps le franchissant. Les anneaux et les débris proches des planètes illustrent le rôle de cette compétition, avec une dynamique de collisions et de réassemblage. La leçon utile est de comparer les gradients gravitationnels aux mécanismes qui

tiennent l’objet ensemble, puis de choisir le modèle de structure correspondant.

Exemple Approcher deux fois plus près

Dans l’approximation de marée lointaine, diviser la distance à la masse perturbatrice par deux multiplie le gradient gravitationnel par huit. La force gravitationnelle sur le centre serait, elle, multipliée par quatre. Cette différence montre pourquoi les effets d’étirement deviennent rapidement importants lors d’une approche rapprochée.

À retenir

Les marées viennent des différences de gravitation. Les résonances et la dissipation relient les mouvements orbitaux à l’évolution interne des objets.

Mini-lexique

Rotation synchrone : rotation dont la période correspond à la révolution orbitale. Résonance : couplage dynamique associé à une répétition particulière des configurations.

Vérifier sa compréhension

1. La Lune tourne-t-elle sur elle-même ?

2. Une résonance orbitale rend-elle toujours un système instable ?

Références S08 • S37

15 Relativité restreinte

Objectifs Comprendre la constance de c, calculer une dilatation du temps simple et éviter les contradictions liées à la simultanéité.

Des lois communes aux référentiels inertiels

La relativité restreinte associe deux principes : les lois physiques ont la même forme dans les référentiels inertiels et la vitesse de la lumière dans le vide vaut c pour ces observateurs. Ce second principe ne s’accorde pas avec l’addition classique des vitesses. Il oblige à modifier les relations entre mesures d’espace et de temps.

Une expérience d’horloge lumineuse aide à comprendre l’idée. Deux miroirs se renvoient un signal. Pour un observateur qui voit l’horloge se déplacer transversalement, le trajet du signal est plus long. Comme sa vitesse reste c, la durée mesurée entre les mêmes événements est plus grande. Le raisonnement ne dépend pas d’une imperfection particulière de l’horloge.

Temps propre et durées coordonnées

Le temps propre est celui qu’une horloge mesure le long de sa trajectoire. Pour une horloge en mouvement uniforme à vitesse v dans un référentiel inertiel, l’intervalle de temps coordonné vaut γ fois l’intervalle de temps propre, avec $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$. Le facteur reste proche de un aux vitesses ordinaires et augmente fortement près de c.

Dire qu’une horloge mobile « ralentit » demande de préciser les événements comparés et la procédure de synchronisation. Deux observateurs inertiels peuvent chacun attribuer une marche plus lente aux horloges de l’autre sans contradiction, car ils ne définissent pas de la même manière la simultanéité d’événements éloignés.

$$\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$$

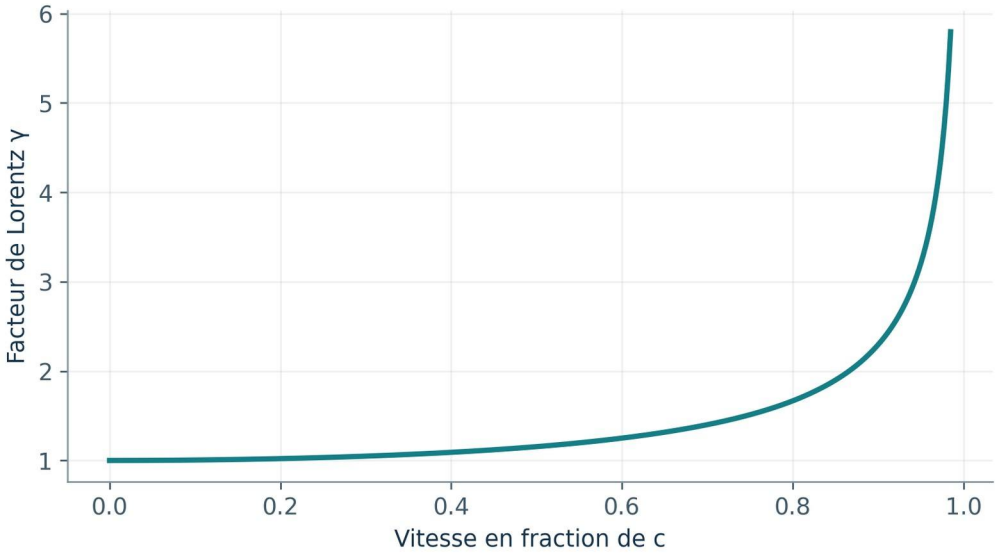


Figure 11 — Facteur de Lorentz en fonction de v/c. La divergence près de c interdit d'accélérer un objet massif jusqu'à c avec une énergie finie dans cette théorie.

Voyage aller et retour

Le célèbre problème des jumeaux compare deux trajectoires entre un départ commun et des retrouvailles communes. Une personne reste sur Terre dans une approximation inertielle ; l'autre part puis revient. Les trajectoires dans l'espace-temps ne sont pas équivalentes. Le voyageur doit changer de référentiel inertiel au retournement, même si cette phase est courte.

La différence finale d'âge se calcule en additionnant le temps propre de chaque trajet. Elle ne dépend pas d'un effet psychologique et ne se réduit pas à un retard visuel des messages. Les signaux reçus sont effectivement retardés et décalés, mais on peut corriger leur propagation pour comparer les horloges lors des retrouvailles.

Énergie masse et causalité

L’énergie au repos d’un corps vaut mc^2. L’énergie totale d’un corps libre massif vaut γmc^2 ; son énergie cinétique correspond à la différence entre les deux. Près de c, augmenter encore la vitesse exige une énergie croissante. Un photon, de masse au repos nulle, possède néanmoins une énergie et une quantité de mouvement.

La limite c organise la causalité locale : elle sépare les événements pouvant échanger des signaux de ceux qui ne le peuvent pas. Elle n’interdit pas qu’une distance cosmologique définie sur une tranche spatiale augmente à un taux supérieur à c. Il faut distinguer une vitesse locale mesurée et une évolution de distance dans un espace-temps courbe.

Additionner les vitesses relativistes

Dans une dimension, si un objet se déplace à la vitesse u' dans un vaisseau qui se déplace à v par rapport à la Terre, la vitesse terrestre s’écrit $u = (u' + v)/(1 + u'v/c^2)$, pour des directions et conventions adaptées. Avec $u' = v = 0{,}8\ c$, on obtient environ 0,976 c, et non 1,6 c.

La règle classique réapparaît lorsque les produits de vitesses sont très petits devant c^2. Ce raccordement est indispensable : une théorie plus générale doit retrouver les régimes où les mesures ordinaires fonctionnent déjà. Lancer de la lumière depuis le vaisseau conserve $u = c$ dans cette relation. L’explication ne consiste pas à supposer un freinage mystérieux des photons ; ce sont les relations entre coordonnées, durées et simultanéités qui diffèrent de celles de la cinématique classique. L’addition des vitesses résume ces transformations dans ce cas particulier.

Exemple Un voyage à 0,8 c

À $v = 0{,}8\ c$, $\gamma = 1/\sqrt{0{,}36} \approx 1{,}667$. Un trajet qui dure dix ans dans le référentiel terrestre correspond à six ans de temps propre à bord si la vitesse reste constante durant le segment considéré. Pour un aller-retour, on additionne les deux segments et on décrit le retournement ; le même raisonnement ne suppose pas qu’un astronaute puisse instantanément changer de vitesse sans contrainte.

À retenir

L’espace et le temps dépendent des procédures de mesure et du mouvement. Le temps propre le long d’une trajectoire fournit une comparaison physique entre horloges.

Mini-lexique

Temps propre : durée mesurée par une horloge accompagnant une trajectoire. Simultanéité : convention physique permettant d’associer des temps à des événements séparés spatialement.

Vérifier sa compréhension

1. Calculer γ pour $v = 0{,}6\ c$.

2. La dilatation du temps est-elle seulement due au temps mis par la lumière pour parvenir à l’observateur ?

Références S03 • S08

16 Relativité générale

Objectifs Relier gravitation et géométrie, distinguer chute libre et immobilité et identifier plusieurs tests observationnels.

Tomber sans sentir son poids

Une personne en chute libre, dans une cabine assez petite, ne ressent pas de force de soutien. Une personne immobile au sol ressent la poussée du sol qui empêche sa chute. Cette distinction conduit au principe d’équivalence : localement, les effets d’un champ gravitationnel uniforme et d’une accélération du référentiel présentent une relation profonde.

Le mot « localement » compte. Sur une région assez étendue, les marées révèlent les variations du champ. Une cabine peut annuler les effets ressentis d’une accélération commune, mais pas faire disparaître toutes les différences de trajectoire entre objets séparés. Ces différences expriment la courbure de l’espace-temps.

La matière et la géométrie

Dans la relativité générale, matière et énergie sont reliées à la géométrie de l’espace-temps. Les corps libres suivent des géodésiques, généralisation de trajectoires aussi droites que possible dans cette géométrie. Cette description ne consiste pas à poser une force supplémentaire sur le modèle de Newton ; elle change le cadre dans lequel les mouvements sont calculés.

L’image d’une toile déformée aide à visualiser une courbure spatiale, mais utilise une gravitation extérieure pour faire rouler une bille. Elle ne constitue donc pas une explication complète. L’espace-temps possède aussi une dimension temporelle, essentielle aux trajectoires et aux rythmes des horloges. Aucun espace extérieur n’est requis pour définir mathématiquement sa courbure.

Effet	Observation possible	Interprétation
Déflexion lumineuse	Positions et images déformées	Trajets lumineux dans la géométrie
Décalage gravitationnel	Fréquences et horloges	Comparaison de temps propres
Précession orbitale	Orientation de l’orbite	Correction à l’ellipse newtonienne
Ondes gravitationnelles	Variation relative des distances	Propagation d’une perturbation géométrique

Horloges et lumière

Deux horloges maintenues à des hauteurs différentes dans un champ stationnaire ne cumulent pas exactement la même durée entre des événements convenablement comparés. Près de la Terre, l’horloge située plus haut avance légèrement davantage. Les systèmes de navigation par satellites prennent en compte des effets gravitationnels et des effets liés au mouvement.

La lumière suit également la géométrie. Une masse peut dévier les trajets, produire plusieurs images d’une même source et modifier les temps d’arrivée. Une lentille gravitationnelle ne demande pas que le photon possède une masse au repos. L’énergie lumineuse et les trajectoires nulles s’intègrent directement dans le cadre relativiste.

Mettre la théorie à l’épreuve

L’avance du périhélie de Mercure fut un test historique. Les pulsars doubles, les lentilles, les ondes gravitationnelles et les mouvements proches du centre galactique testent aujourd’hui des régimes différents. Les observations de l’étoile S2 autour de Sagittarius A* ont notamment révélé des effets de décalage relativiste et de précession compatibles avec les prédictions de la théorie.

Une théorie bien vérifiée possède pourtant des limites d’application possibles. La relativité générale classique ne fournit pas à elle seule une description quantique complète des régions où les effets gravitationnels et quantiques deviennent simultanément essentiels. La chercher à remplacer dans ces régimes ne signifie pas que toutes ses prédictions déjà testées cessent d’être valables.

Un espace vide peut être courbe

L’absence locale de matière ne garantit pas une géométrie plate. L’extérieur d’un astre, même décrit comme vide, possède des effets de marée et des trajectoires lumineuses déviées. Dans les équations relativistes, les conditions globales et les masses voisines déterminent une géométrie qui peut conserver une courbure sans densité matérielle locale au point examiné.

Cette propriété aide à lire les termes « vide » et « gravitation ». Le vide d’une solution ne signifie pas que toutes les composantes de la courbure s’annulent. Une onde gravitationnelle peut également se propager dans une région sans matière ordinaire. Pour détecter la gravitation localement, une petite expérience de chute libre annule les effets communs au premier ordre, mais les comparaisons entre points séparés révèlent les marées. La géométrie ne se résume donc ni à une force ressentie ni à la présence d’un objet visible dans la même case d’une carte.

Exemple Deux horloges séparées de mille mètres

Dans le champ terrestre faible et pour une petite différence de hauteur h, le décalage relatif vaut environ gh/c^2. Avec h = 1 000 m, on obtient environ $1{,}09 \times 10^{-13}$. Sur une journée, cela représente environ 9,4 nanosecondes. L’estimation néglige les différences de rotation terrestre et les variations locales du potentiel ; elle indique l’ordre de grandeur gravitationnel.

À retenir

La chute libre et l’immobilité soutenue sont physiquement différentes. Les effets de gravitation portent sur la géométrie, les trajectoires et les comparaisons d’horloges.

Mini-lexique

Géodésique : trajectoire libre déterminée par la géométrie de l’espace-temps. Courbure : propriété responsable notamment des écarts relatifs entre trajectoires voisines.

Vérifier sa compréhension

1. Une station spatiale en orbite échappe-t-elle à toute gravitation ?

2. Pourquoi une grande cabine en chute libre peut-elle détecter la gravitation ?

Références S08 • S14 • S15

17 Trous noirs et horizons

Objectifs Définir un horizon, distinguer trou noir et matière lumineuse environnante et lire correctement une image de son voisinage.

Une frontière causale

Un trou noir est une région dont aucun signal futur ne peut atteindre l’infini extérieur dans la description considérée. Sa frontière, l’horizon des événements, est une frontière causale. Elle n’est pas une surface solide où un voyageur pourrait se poser. Pour un trou noir idéal sans rotation ni charge, le rayon de Schwarzschild vaut $2GM/c^2$.

Les trous noirs astrophysiques possèdent généralement une rotation, ce qui modifie leur géométrie. La formule de Schwarzschild reste une bonne échelle de comparaison, mais ne décrit pas tous leurs détails. Une singularité apparaît dans certaines solutions classiques ; elle signale une limite de cette description, et non une observation directe d’un point matériel de densité infinie.

$$rS = 2GM / c^2$$

Comment les détecter

On peut inférer un objet compact invisible à partir des mouvements d’étoiles ou du gaz, du rayonnement d’une accrétion et des ondes gravitationnelles. Ces approches contraignent des masses, des dimensions et des propriétés dynamiques. Leur convergence fournit une base beaucoup plus forte que l’idée vague d’une région sombre dans une photographie.

La matière qui tombe ne traverse pas forcément immédiatement l’horizon. Elle peut former un disque, s’échauffer, émettre et perdre son moment cinétique. Des jets peuvent être produits par

les régions magnétisées extérieures. Aucune matière ne sort de l’intérieur de l’horizon pour alimenter ces jets : l’environnement extérieur et la rotation jouent un rôle essentiel.

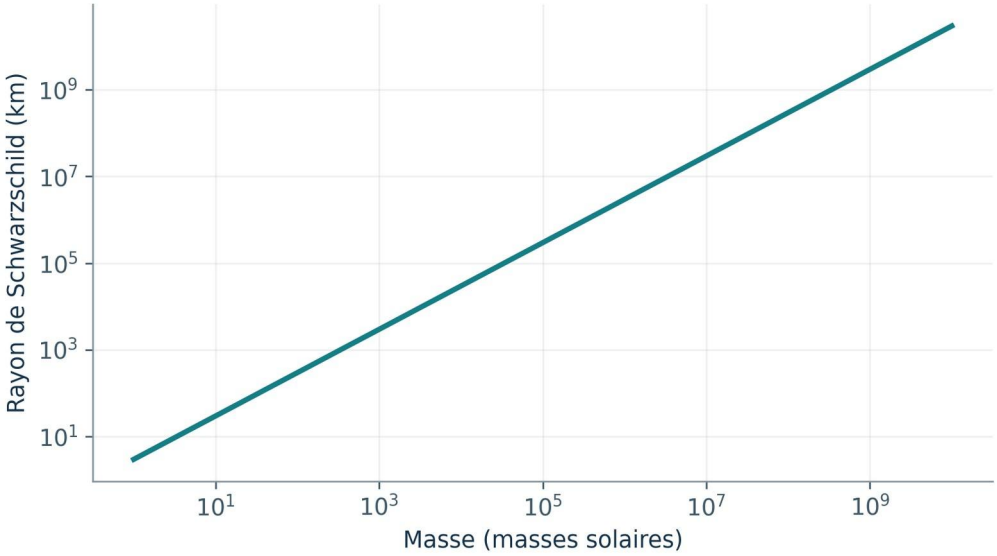


Figure 12 — Rayon de Schwarzschild en fonction de la masse. Relation calculée pour un trou noir sans rotation ni charge ; cette droite n’est pas une mesure de rayons stellaires.

Anneau lumineux et ombre

Les images interférométriques de l’Event Horizon Telescope reconstruisent le rayonnement du plasma proche de trous noirs supermassifs. L’anneau observé résulte de l’émission, de la géométrie et de la propagation relativiste. La région centrale sombre est liée à la capture de rayons lumineux et à la structure du rayonnement environnant.

Il serait incorrect de présenter cet anneau comme une photographie d’une surface solide du trou noir. Sa brillance peut varier avec les mouvements du plasma et les effets relativistes. La reconstruction utilise des mesures incomplètes et des contrôles entre méthodes ; les modèles servent à relier l’image aux paramètres physiques.

Ce qu’un horizon ne fait pas

Un trou noir n’aspire pas toute la matière de sa galaxie. Loin d’un objet sphérique, le mouvement dépend essentiellement de sa masse. Si le Soleil était remplacé par un trou noir de même masse, la Terre conserverait approximativement son orbite initiale, tout en perdant la lumière solaire nécessaire à son climat. Cette expérience de pensée sépare gravitation et rayonnement.

Le rayonnement de Hawking est une prédiction semi-classique associant champs quantiques et espace-temps courbe. Il n’a pas été directement détecté pour des trous noirs astrophysiques. Les analogies d’une paire de particules créée au bord de l’horizon ne doivent pas être prises pour une description littérale complète du mécanisme.

L’horizon et l’ombre n’ont pas la même taille

Pour un trou noir de Schwarzschild, des orbites lumineuses circulaires instables existent à un rayon de 1,5 rS. La taille apparente de la zone de capture vue de loin implique aussi la déflexion des rayons. Le rayon de l’ombre idéale est d’environ 2,6 rS dans la géométrie appropriée. Il ne faut donc pas mesurer le bord sombre d’une image et l’appeler directement rayon de l’horizon.

La rotation, l’inclinaison et surtout la distribution du plasma modifient l’image réelle. L’anneau brillant observé ne coïncide pas obligatoirement avec une unique orbite photonique mathématique. Des modèles de rayonnement relativiste relient la taille caractéristique et les profils aux paramètres. Cette distinction est essentielle lorsque l’on compare une photographie reconstruite, une simulation et un schéma de principe. Les trois peuvent être utiles, à condition de ne pas leur attribuer la même définition de bord.

Exemple Compacter une masse solaire

Pour une masse solaire, $2GM/c^2$ vaut environ 2,95 km. Une masse de dix Soleils donne environ 29,5 km. Ces valeurs n’indiquent pas que les étoiles correspondantes mesuraient ces rayons avant leur effondrement. Elles donnent l’échelle de l’horizon dans le modèle idéal. Le voisinage extérieur peut être lumineux sur des dimensions bien plus grandes.

À retenir

Un trou noir est défini par sa structure causale. Nous observons ses effets et son environnement ; les limites quantiques de sa description restent un champ de recherche.

Mini-lexique

Horizon des événements : frontière d’une région qui ne peut envoyer de signaux vers l’extérieur lointain. Accrétion : capture et accumulation de matière par un objet.

Vérifier sa compréhension

1. Un trou noir de cent masses solaires possède quel rayon de Schwarzschild approximatif ?

2. Pourquoi l’existence d’un jet ne contredit-elle pas la définition de l’horizon ?

Références S08 • S16 • S20

PARTIE IV

IV

La vie des étoiles

Formation, équilibre et transformations des étoiles.

DANS CETTE PARTIE

18 La formation des étoiles et des disques

19 La séquence principale et l’équilibre stellaire

20 Le Soleil comme laboratoire

21 Le diagramme de Hertzsprung Russell

22 Étoiles doubles et systèmes multiples

23 Variables novae et céphéides

24 Géantes naines blanches et nébuleuses planétaires

25 Supernovae étoiles à neutrons et pulsars

18 La formation des étoiles et des disques

Objectifs Suivre la naissance d’une étoile et comprendre pourquoi un nuage peut se fragmenter, former un disque et éjecter une partie de sa matière.

Des nuages froids mais structurés

Les étoiles naissent principalement dans les régions denses de nuages moléculaires. Le gaz y est froid, avec des températures souvent de quelques dizaines de kelvins, mais il n’est pas immobile. La turbulence, les champs magnétiques, la pression extérieure et les mouvements galactiques influencent son évolution. Un nuage contient aussi des poussières qui absorbent le visible et rayonnent dans l’infrarouge.

La gravitation favorise la contraction lorsque certaines régions possèdent assez de masse relativement à leur pression de soutien. Le critère de Jeans fournit un repère idéal, établi pour un milieu simplifié. Un nuage réel n’est ni parfaitement uniforme ni isolé : les géométries, les champs et les vitesses modifient les conditions d’effondrement. Dépasser une masse théorique ne permet donc pas de prédire à lui seul le nombre d’étoiles futures.

Un effondrement qui chauffe

Au cours de la contraction, la densité augmente. Le gaz peut d’abord évacuer une grande partie de l’énergie par rayonnement et rester relativement froid. Lorsqu’il devient plus opaque, l’énergie s’échappe moins facilement et la température monte. Une protoétoile se forme au centre, encore alimentée par la matière environnante.

Le rayonnement d’une protoétoile provient largement de l’accrétion et de la contraction avant que la fusion centrale de l’hydrogène assure durablement sa puissance. Il faut donc

distinguer une étoile jeune lumineuse d’une étoile déjà installée sur la séquence principale. Des observations infrarouges et millimétriques traversent une partie des enveloppes poussiéreuses qui masquent ces phases.

Figure 13 — Étapes générales d’une formation stellaire. Les durées et les géométries dépendent de la masse et de l’environnement ; le diagramme est un schéma original de synthèse.

Le disque et les éjections

La matière initiale possède généralement un moment cinétique. En se contractant, elle ne peut pas tout déposer radialement sur le centre. Un disque apparaît et redistribue ce moment cinétique. Des processus magnétiques, des instabilités et des interactions transportent une partie de la matière vers l’intérieur tandis que d’autres régions gagnent du moment cinétique.

Des jets et des écoulements accompagnent souvent la formation. Ils évacuent de la matière et de l’énergie et influencent le nuage environnant. Le disque n’est donc pas une simple réserve tranquille où chaque grain attendrait de devenir une planète. C’est un milieu évolutif, irradié et traversé de mouvements, dans lequel plusieurs processus se font concurrence.

Une naissance rarement solitaire

Les nuages se fragmentent en plusieurs condensations. Beaucoup d’étoiles naissent dans des groupes ou des systèmes multiples. Les rencontres et le rayonnement des étoiles massives peuvent modifier les disques voisins. Une partie du gaz est dispersée avant d’être transformée en étoiles, ce qui limite l’efficacité globale de la formation.

Un objet trop peu massif ne maintient pas durablement la fusion centrale de l’hydrogène. La frontière avec les naines brunes se situe autour de 0,075 masse solaire, selon la composition et les modèles. Une naine brune n’est pas une étoile morte : elle n’a jamais connu une séquence principale durable comparable à celle du Soleil.

Le refroidissement favorise la fragmentation

Dans le modèle idéal de Jeans, la masse caractéristique instable varie comme $T^{3/2}\rho^{-1/2}$ à composition fixée. Augmenter la température renforce le soutien thermique ; augmenter la densité favorise l’effondrement à plus petite masse. Si la température est divisée par deux, cette masse caractéristique est multipliée par environ 0,354, toutes les autres hypothèses maintenues.

Le refroidissement peut donc aider un nuage à former plusieurs condensations plutôt qu’un seul objet. Lorsque le gaz devient opaque et chauffe pendant la compression, la tendance change. Les champs et la turbulence ajoutent des soutiens et des compressions que ce calcul simple n’inclut pas. Il ne donne pas directement la masse finale d’une étoile, car l’accrétion et les pertes continuent après la fragmentation. Il permet surtout de comprendre pourquoi température et densité doivent être étudiées ensemble dans les régions de naissance stellaire.

Exemple Contracter un nuage tournant

Imaginons une petite masse de gaz dont la distance à l’axe est divisée par dix, sans échange de moment cinétique. Dans un modèle ponctuel simple, sa vitesse tangentielle doit être multipliée par dix. La vitesse angulaire augmente encore davantage. Ce calcul explique l’importance de la rotation, tout en montrant pourquoi une description réelle doit inclure des transports et des pertes de moment cinétique.

À retenir

La formation stellaire associe gravitation, refroidissement, rotation et champs magnétiques. Les disques et les éjections font partie du processus d’assemblage.

Mini-lexique

Protoétoile : objet central en formation encore dominé par l’accrétion et la contraction.
Nuage moléculaire : milieu interstellaire où une fraction importante de l’hydrogène est moléculaire.

Vérifier sa compréhension

1. Pourquoi l’infrarouge aide-t-il à étudier une région cachée par la poussière ?

2. Toute la masse d’un nuage devient-elle nécessairement stellaire ?

Références S12 • S19 • S28

19 La séquence principale et l’équilibre stellaire

Objectifs Comprendre le soutien d’une étoile et relier sa masse, sa luminosité et sa durée de vie.

Soutenir les couches contre la gravitation

À l’intérieur d’une étoile stable, la pression varie avec la profondeur. La différence de pression entre deux couches compense approximativement leur poids : c’est l’équilibre hydrostatique. L’étoile ne reste pas stable parce que la fusion pousserait mécaniquement chaque atome vers l’extérieur comme une explosion permanente. La fusion fournit l’énergie qui entretient les conditions thermiques et le rayonnement.

Si le cœur se contracte légèrement, sa température peut augmenter et accélérer les réactions. Une réponse de l’enveloppe peut alors ramener l’ensemble vers un état voisin de l’équilibre. Ce mécanisme de régulation dépend de la structure et du régime physique. Dans de la matière fortement dégénérée, une hausse de température ne produit pas la même réponse de pression, ce qui permet des phénomènes plus instables.

Transporter l’énergie

L’énergie se déplace par rayonnement, convection et, dans certains milieux, conduction. Une zone radiative transporte l’énergie par une succession d’interactions du rayonnement avec la matière. Un photon émis au cœur ne traverse pas directement l’étoile selon un unique trajet rectiligne. Son énergie est absorbée, réémise et redistribuée de nombreuses fois.

Dans une zone convective, des mouvements de matière transportent une partie de l’énergie. La structure des zones dépend de la masse, de l’opacité et de la composition. Le Soleil possède une région centrale radiative et une enveloppe externe

convective. Des étoiles moins massives peuvent être largement ou entièrement convectives, ce qui modifie leur évolution et le mélange du combustible.

Une masse initiale décisive

Sur la séquence principale, la fusion centrale de l’hydrogène domine la production d’énergie. Les étoiles les plus massives disposent de davantage de combustible, mais elles le consomment à un rythme beaucoup plus élevé. Leur luminosité augmente rapidement avec la masse. Elles vivent donc moins longtemps que des étoiles plus légères, contrairement à l’intuition d’un plus grand réservoir forcément plus durable.

Une loi approchée de type $L \propto M^{3.5}$ est utile sur une gamme limitée de masses, sans constituer une règle exacte universelle. En supposant une fraction de combustible comparable, la durée varie comme M/L. Les étoiles massives peuvent évoluer en quelques millions d’années, tandis que les plus petites étoiles de la séquence principale devraient vivre bien plus longtemps que l’âge actuel de l’Univers.

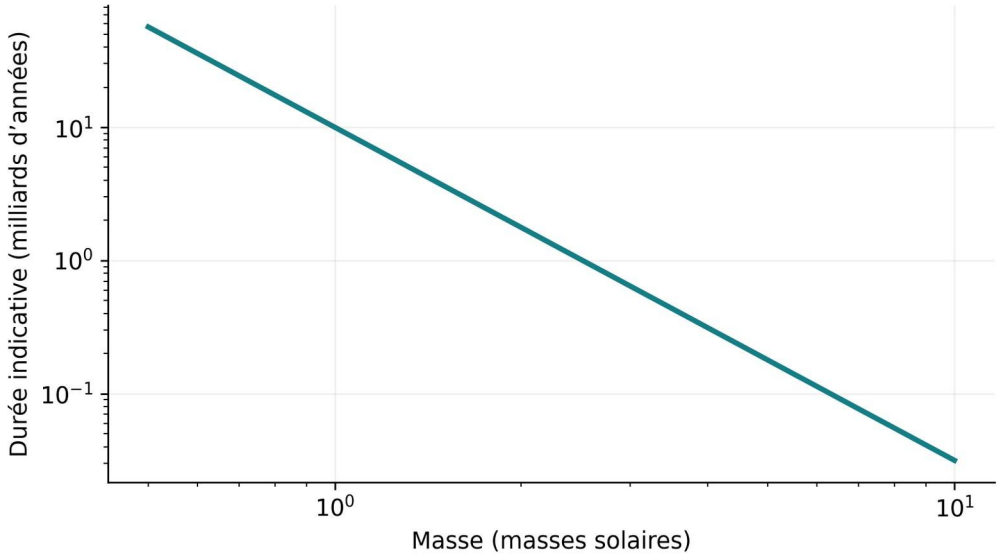


Figure 14 — Durée indicative obtenue avec t ≈ 10 milliards d’années × $(M/M_\odot)^{-2.5}$. Cette loi pédagogique simplifiée ne remplace pas des modèles d’évolution stellaire.

Observer les différences

La séquence spectrale O, B, A, F, G, K, M classe surtout les températures de surface, des plus chaudes aux plus froides. Les limites sont approximatives et chaque classe comporte des sous-classes. Une classe de luminosité complète la classification pour distinguer, par exemple, une géante d’une étoile de séquence principale présentant une température voisine.

La composition, la rotation, les champs et les compagnons modifient aussi l’évolution. Deux étoiles de même masse initiale ne suivent pas nécessairement des histoires exactement identiques. Les modèles sont comparés aux amas, aux binaires et à l’astérosismologie pour vérifier leurs paramètres. La masse constitue un guide majeur, mais ne dispense pas d’examiner les autres conditions.

La lumière exerce aussi une pression

Les photons transportent une quantité de mouvement. Lorsqu’ils sont absorbés ou diffusés, ils peuvent pousser la matière. Dans un modèle sphérique et stationnaire, la luminosité d’Eddington compare cette action radiative à la gravitation : $L_{Edd} = 4\pi GMc/\kappa$, où κ est une opacité par unité de masse. La valeur dépend donc de la composition et du mécanisme d’interaction.

Avec une opacité illustrative de 0,034 m^2/kg, une masse solaire donne une luminosité d’Eddington d’environ $1{,}5 \times 10^{31}$ W, soit près de 38 000 luminosités solaires. Cela explique pourquoi la pression radiative compte davantage dans des objets très lumineux. Ce seuil idéal n’est pas une interdiction absolue de tout dépassement apparent : géométrie, instabilité et écoulements peuvent modifier la situation. Il relie toutefois quantitativement la lumière à la dynamique et aux pertes de matière, au-delà de son rôle de simple messagère.

Exemple Une étoile de deux masses solaires

Avec la loi approchée $L/L_\odot = (M/M_\odot)^{3,5}$, une étoile de deux masses solaires atteint environ 11,3 luminosités solaires. Sa durée de séquence principale est alors estimée à $10 \times 2/11{,}3 \approx 1{,}77$ milliard d’années. Le résultat donne une tendance : un calcul d’évolution précis tient compte du mélange, de la composition et du combustible réellement accessible au cœur.

À retenir

L’équilibre stellaire associe soutien mécanique, production et transport d’énergie. Les grandes masses raccourcissent fortement la vie d’une étoile de séquence principale.

Mini-lexique

Équilibre hydrostatique : compensation locale entre gradient de pression et gravitation.
Convection : transport d’énergie par déplacement collectif de matière.

Vérifier sa compréhension

1. Pourquoi une étoile massive peut-elle vivre moins longtemps qu’une étoile légère ?

2. Une étoile en équilibre hydrostatique est-elle nécessairement immuable pendant des milliards d’années ?

Références S04 • S12 • S13

20 Le Soleil comme laboratoire

Objectifs Relier les régions du Soleil à leurs mécanismes physiques et comprendre ce que neutrinos et oscillations nous apprennent sur son intérieur.

Une étoile proche

Le Soleil est une étoile dont la masse sert de référence pour comparer les autres étoiles, de type spectral G2 V. Son âge est proche de 4,6 milliards d’années. Il se trouve sur la séquence principale et tire l’essentiel de sa puissance de la conversion centrale d’hydrogène en hélium. Il ne possède pas assez de masse pour finir par un effondrement de cœur de type supernova.

Sa proximité permet de résoudre sa surface apparente et de suivre son activité. La photosphère n’est pas une croûte solide : c’est la région d’où s’échappe une grande partie du rayonnement visible. Sa température effective est voisine de 5 772 K. L’intérieur atteint des températures et des pressions beaucoup plus élevées.

Des couches aux mécanismes différents

La production nucléaire se concentre dans le cœur. Une vaste région radiative transporte ensuite l’énergie, puis la convection domine dans l’enveloppe externe. La granulation visible reflète les mouvements convectifs près de la photosphère : des régions plus chaudes montent, rayonnent et la matière refroidie redescend.

Au-dessus se trouvent la chromosphère et la couronne, avec une transition rapide de température. La couronne peut atteindre des millions de kelvins malgré sa faible densité. Son chauffage et l’accélération du vent solaire font intervenir les champs, les ondes et la dissipation magnétique. Résumer toute l’atmosphère

à une succession de couches de plus en plus froides serait donc faux.

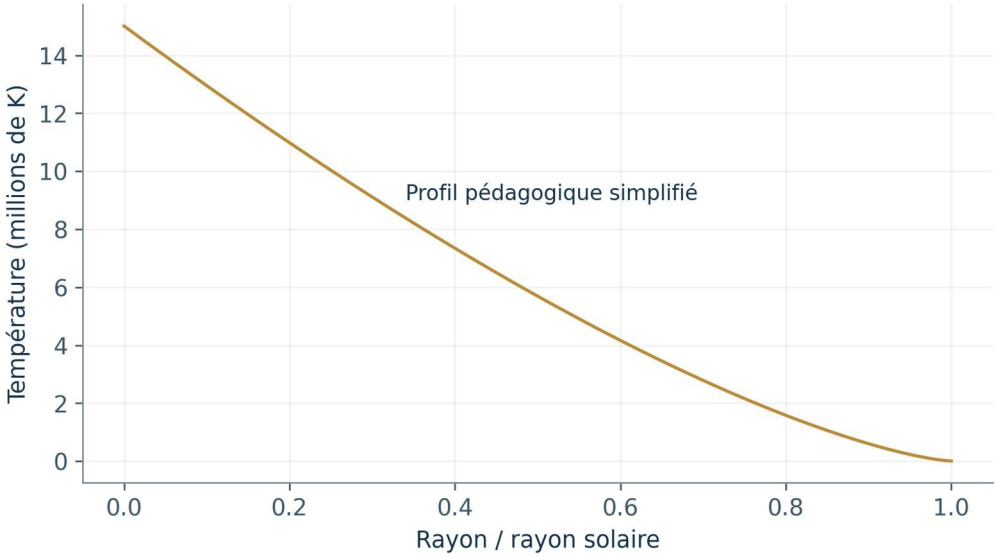


Figure 15 — Profil thermique pédagogique de l'intérieur solaire. La courbe illustre la forte différence entre cœur et surface ; elle n'est pas un modèle solaire calibré ni un relevé de température.

Les messages de l'intérieur

Les neutrinos produits dans les réactions nucléaires quittent facilement l'intérieur, car ils interagissent très peu avec la matière. Leur détection teste directement les réactions et les propriétés des neutrinos. Le déficit historique de neutrinos électroniques observés a été résolu par la transformation entre saveurs de neutrinos, plutôt que par l'arrêt supposé du réacteur solaire.

L'héliosismologie étudie les oscillations de la surface. Les ondes traversent différentes régions et leurs fréquences dépendent de la structure interne. Comme une étude sismique terrestre, cette méthode relie des vibrations mesurées à un modèle de l'intérieur. Elle contraint notamment la vitesse du son et la rotation, sans nécessiter une photographie directe du cœur.

Magnétisme et activité

Les taches sont des régions photosphériques où de forts champs modifient les mouvements et réduisent le flux émergent. Elles sont plus froides que les régions environnantes, mais restent très lumineuses en valeur absolue. Leur aspect sombre dépend du contraste. Les éruptions et éjections de masse coronale sont des phénomènes distincts, qui peuvent être associés sans être identiques.

Le nombre de taches varie selon un cycle d’environ onze ans, avec une durée et une amplitude variables. La polarité magnétique globale s’inverse d’un cycle au suivant. La rotation dépend de la latitude : le Soleil n’est pas un solide rigide. Des images publiques prises à plusieurs dates permettent de mesurer des déplacements apparents en respectant la projection du disque.

Mesurer une rotation solaire sans regarder le Soleil

Des archives d’images prises dans une même bande permettent de suivre un groupe de taches. On commence par noter les dates, l’orientation du nord solaire et l’échelle du disque. Une tache près du bord subit un fort raccourcissement de projection ; son déplacement en pixels ne correspond pas directement à une longitude constante parcourue chaque jour.

Une mesure sur une série doit distinguer rotation vue depuis la Terre et rotation par rapport aux étoiles. Le mouvement orbital terrestre ajoute une différence entre périodes synodique et sidérale. Les taches changent aussi de forme et peuvent disparaître : un pointage approximatif du même groupe doit être annoncé comme tel. Cette activité ne demande aucune observation optique improvisée. Elle relie géométrie, mouvement et magnétisme avec des images publiques, tout en montrant pourquoi une période n’est pas seulement la distance en pixels divisée par l’intervalle de temps.

Exemple Une densité moyenne surprenante

Avec une masse d’environ $1{,}99 \times 10^{30}$ kg et un rayon proche de $6{,}96 \times 10^{8}$ m, la densité moyenne solaire vaut environ 1 410 kg/m³. Cette moyenne n’implique pas une étoile uniforme : le cœur est bien plus dense que les couches externes. Diviser masse par volume fournit un repère global, pas la structure locale.

À retenir

Le Soleil associe fusion, transport d’énergie, convection et magnétisme. Des signaux de natures différentes permettent de tester son intérieur.

Mini-lexique

Photosphère : région d’émission de l’essentiel du rayonnement visible solaire. Héliosismologie : étude de l’intérieur solaire par ses oscillations.

Vérifier sa compréhension

1. Une tache solaire est-elle un trou froid et noir dans une surface solide ?

2. Quel avantage particulier possèdent les neutrinos pour étudier le cœur ?

Références S04 • S13 • S55

21 Le diagramme de Hertzsprung Russell

Objectifs Lire un diagramme HR et distinguer les propriétés directement observées de celles déduites d’un modèle stellaire.

Une carte des états stellaires

Le diagramme de Hertzsprung–Russell place les étoiles selon leur luminosité intrinsèque et leur température effective, ou selon des grandeurs photométriques apparentées. Par convention, les températures élevées sont souvent à gauche et les faibles à droite. Une lecture rapide sans vérifier les axes peut donc inverser le sens d’évolution thermique.

La séquence principale traverse le diagramme des étoiles chaudes et lumineuses vers les étoiles froides et peu lumineuses. Les géantes occupent une région lumineuse à température relativement basse. Les naines blanches, chaudes mais peu lumineuses, apparaissent vers le bas à gauche. La relation $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ explique que des positions différentes correspondent à des rayons très différents.

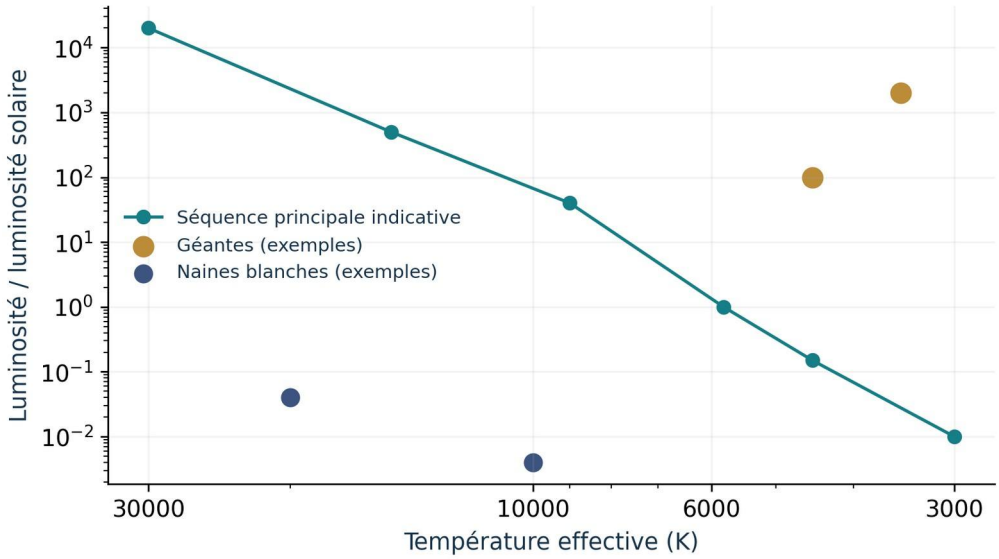


Figure 16 — Diagramme HR pédagogique avec quelques positions indicatives. Les points ne constituent pas un échantillon observé ; le tracé sert à lire les familles et les axes.

Une trajectoire n'est pas une photographie

Une étoile se déplace dans le diagramme au cours de son évolution. Une trajectoire théorique décrit les états successifs d'un modèle de masse et de composition données. Elle ne suit pas le déplacement de l'étoile dans l'espace. Les deux usages du mot « mouvement » doivent être séparés.

Les durées passées dans chaque région sont très inégales. Une phase brève peut être représentée par une longue portion de courbe ; une phase très longue par une petite région. La densité des points observés dépend donc à la fois des populations initiales, des durées et de la sélection des observations. On ne lit pas une vitesse d'évolution simplement avec la longueur d'une flèche.

L'âge d'un amas

Les étoiles d'un amas sont approximativement contemporaines et se trouvent à des distances voisines, avec des compositions souvent apparentées. Les plus massives quittent la séquence

principale en premier. Le point de sortie, ou turn-off, sert ainsi à estimer l’âge en comparant le diagramme aux modèles d’évolution.

Cette méthode demande de corriger l’extinction et de distinguer les membres de l’amas des étoiles de premier plan. Des étoiles doubles non résolues paraissent plus lumineuses qu’une étoile seule ; une rotation rapide peut aussi modifier les couleurs apparentes. Une estimation d’âge sérieuse annonce les hypothèses et l’incertitude liée aux modèles.

Couleur magnitude et distance

Un diagramme couleur–magnitude ressemble au diagramme HR, mais utilise des mesures dans des filtres définis. La couleur est une différence de magnitudes ; elle dépend du spectre, de la poussière et des filtres. La magnitude peut être apparente ou absolue. Sans distance, l’axe vertical n’est pas immédiatement une puissance intrinsèque.

Les grands catalogues astrométriques permettent de construire des diagrammes riches à partir de parallaxes et de photométrie. Il faut néanmoins choisir des données de qualité, traiter les valeurs incertaines et comprendre les sélections. Une limite en éclat favorise les objets intrinsèquement brillants à grande distance ; l’échantillon ne représente alors pas directement la proportion réelle des étoiles dans l’espace.

Mesurer un âge ne signifie pas dater une étoile seule

Une isochrone relie, à un âge donné, des modèles de masses différentes. Une trajectoire d’évolution suit au contraire une seule masse au cours du temps. Les deux courbes peuvent se croiser sur un diagramme. Une étoile isolée placée près de ce croisement ne possède donc pas forcément un âge unique déductible de sa seule couleur et de sa luminosité.

Dans un amas, l’ensemble des points réduit l’ambiguïté. Le point de sortie, les géantes et les naines blanches donnent des contraintes complémentaires. Il faut néanmoins conserver les erreurs de distance, d’extinction et de composition. Les étoiles bleues plus lumineuses que le point de sortie, appelées traînardes bleues, peuvent avoir été modifiées par des interactions ou des fusions. Elles rappellent qu’un objet atypique n’est pas nécessairement la preuve que tout l’amas possède un âge différent. L’histoire individuelle peut s’écarter de l’évolution d’une étoile isolée.

Exemple Déduire un rayon relatif

Une étoile possède cent luminosités solaires et la même température effective que le Soleil. La relation thermique donne $R/R_\odot = \sqrt{100} = 10$. Si sa température valait la moitié de celle du Soleil à luminosité identique, son rayon serait encore multiplié par quatre. La luminosité seule ne suffit donc pas à décider si une étoile est grande ou petite.

À retenir

Le diagramme HR relie température, luminosité et rayon. Son interprétation exige de distinguer échantillon observé, trajectoire d’évolution et effets de sélection.

Mini-lexique

Isochrone : courbe reliant des modèles d’étoiles de masses différentes à un même âge.
Point de sortie : région où les étoiles d’une population quittent la séquence principale.

Vérifier sa compréhension

1. Où placer une étoile très chaude et très peu lumineuse dans un diagramme HR conventionnel ?

2. Pourquoi les étoiles d’un amas aident-elles à tester l’évolution ?

Références S06 • S12

22 Étoiles doubles et systèmes multiples

Objectifs Reconnaître les principales méthodes de détection des couples et comprendre comment elles permettent de mesurer des masses.

Association apparente ou physique

Deux étoiles proches sur le ciel peuvent former une double optique : elles sont alignées dans notre direction sans être voisines dans l’espace. Une binaire physique est liée gravitationnellement. Les parallaxes, les mouvements propres et les variations de vitesse permettent de tester cette association. Un beau contraste de couleur à l’oculaire ne constitue pas à lui seul une preuve de liaison.

Albireo illustre bien l’intérêt visuel des doubles colorées, mais son statut et sa structure demandent plus de prudence qu’une simple étiquette de couple évident. Epsilon de la Lyre offre un exemple de système multiple. Dans tous les cas, une observation amateur décrit d’abord une séparation, un angle de position et des éclats apparents.

Trois méthodes complémentaires

Une binaire visuelle peut être résolue en deux images et suivie au fil des années. Une binaire spectroscopique révèle des décalages périodiques de raies. Une binaire à éclipses présente des baisses d’éclat lorsque les disques se masquent. Un même système peut appartenir à plusieurs catégories : ces noms désignent des méthodes d’observation, pas des espèces incompatibles.

Les éclipses donnent une forte contrainte sur l’inclinaison. Les vitesses radiales indiquent les mouvements selon la ligne de visée. La photométrie contraint les rayons relatifs et le rapport

des luminosités de surface. Combiner ces observations permet d’obtenir des masses et des rayons beaucoup plus directement que pour une étoile isolée.

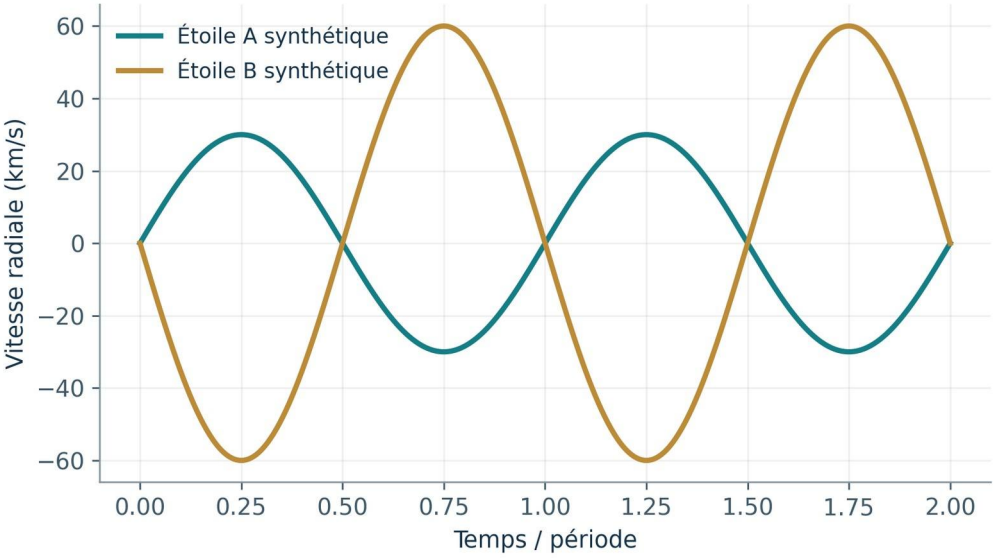


Figure 17 — Vitesses radiales synthétiques de deux étoiles sur une orbite circulaire vue de profil. Leurs amplitudes inverses illustrent le rapport des masses ; la vitesse du barycentre a été fixée à zéro.

Une balance gravitationnelle

Pour une orbite dont on connaît le demi-grand axe relatif a et la période P, la troisième loi de Kepler fournit la somme des masses. Dans les unités ua, années et masses solaires, $M_1 + M_2 \approx a^3/P^2$. La position du barycentre ou le rapport des amplitudes de vitesse sépare ensuite les deux contributions.

Une seule courbe spectroscopique fournit une combinaison de masses et d’inclinaison, appelée fonction de masse. Sans inclinaison ou contrainte supplémentaire, la masse du compagnon ne se déduit pas de manière unique. Cette ambiguïté explique pourquoi une amplitude de vitesse ne suffit pas toujours à distinguer une planète lourde d’un compagnon stellaire vu sous un petit angle.

Les couples évoluent ensemble

Si une étoile grandit suffisamment, de la matière peut être transférée à sa compagne. Les masses, les compositions et les orbites changent. Les étiquettes de « plus massive donc plus évoluée » peuvent alors devenir trompeuses si l’on ignore l’histoire des échanges. Des novae, des explosions thermonucléaires et des sources X compactes dépendent de ces interactions.

Une phase d’enveloppe commune peut rapprocher fortement les composants lorsque la matière entoure les deux cœurs et emporte de l’énergie et du moment cinétique. Certains couples d’objets compacts finissent par fusionner en émettant des ondes gravitationnelles. L’évolution binaire relie ainsi les observations d’étoiles ordinaires aux événements les plus énergétiques.

Retrouver la taille d’une orbite par les vitesses

Pour une binaire circulaire, l’amplitude de vitesse radiale de chaque composant vaut $K = 2\pi a \sin i/P$, où a désigne ici son rayon orbital autour du barycentre. En additionnant les deux amplitudes, on obtient la taille relative projetée : $a \text{ total} \sin i = P(K_1 + K_2)/(2\pi)$. Une inclinaison connue par les éclipses transforme cette projection en dimension réelle.

Supposons $P = 10$ jours et $K_1 + K_2 = 100$ km/s. La taille relative projetée vaut environ 13,8 millions de kilomètres, soit 0,092 ua. La masse totale se déduit ensuite de Kepler. Une excentricité non nulle modifie les relations entre amplitude et demi-grand axe et doit être ajustée. Cet enchaînement montre comment un spectre et une horloge peuvent fournir une dimension sans résoudre directement les deux disques stellaires sur une photographie.

Exemple Peser un couple

Une binaire possède un demi-grand axe relatif de 4 ua et une période de 8 ans. La somme des masses vaut $4^3/8^2 = 1$ masse solaire. Si l’amplitude de vitesse de A est deux fois celle de B, A possède la moitié de la masse de B. On obtient alors environ 0,333 et 0,667 masse solaire, dans le cadre du modèle keplérien utilisé.

À retenir

Les étoiles doubles permettent de mesurer des masses et de tester les modèles. Leur géométrie et leurs échanges de matière sont indispensables à l’interprétation.

Mini-lexique

Binaire spectroscopique : couple détecté par les variations périodiques de ses raies.
Angle de position : orientation d’un compagnon sur le ciel, selon une convention définie.

Vérifier sa compréhension

1. Dans un couple, l’étoile qui décrit la plus grande orbite autour du barycentre est-elle la plus massive ?

2. Pourquoi une binaire à éclipses aide-t-elle à lever une ambiguïté de masse ?

Références S06 • S12 • S15

23 Variables novae et céphéides

Objectifs Séparer les mécanismes de variation lumineuse et comprendre le rôle des céphéides dans la mesure des distances.

Plusieurs raisons de changer d’éclat

Une étoile peut varier parce que sa surface pulse, parce que des taches tournent avec elle, parce qu’un compagnon la masque ou parce qu’elle reçoit ou perd de la matière. Une variation mesurée peut aussi provenir de l’atmosphère terrestre ou d’une calibration imparfaite. La courbe de lumière constitue le point de départ, pas le diagnostic final.

Les périodes vont de fractions de seconde à plusieurs années. La forme de la courbe, la couleur, le spectre et la répétition permettent de distinguer les mécanismes. Une baisse régulière peut venir d’une éclipse ; une asymétrie avec montée rapide et baisse lente peut orienter vers certaines pulsations. Aucun de ces indices n’évite l’examen de l’ensemble des données.

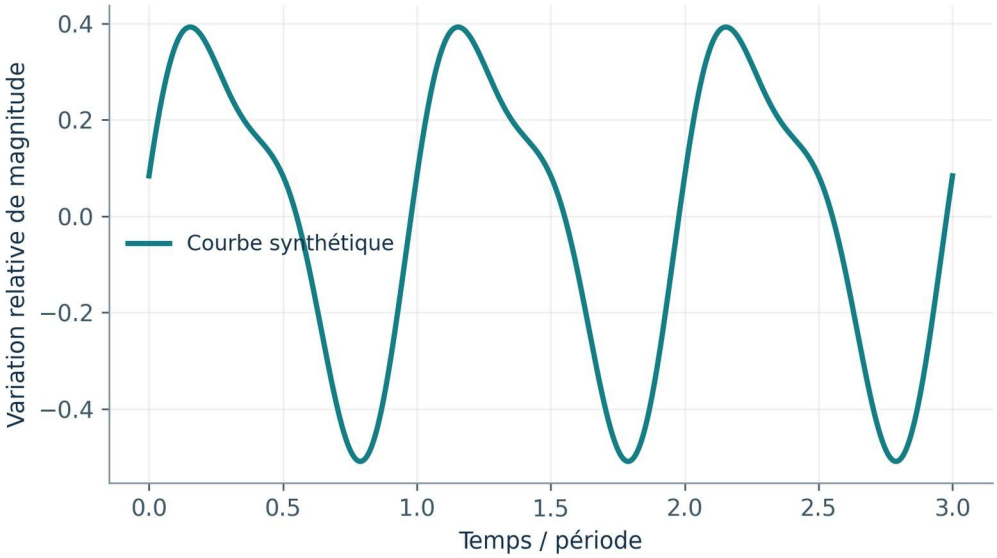


Figure 18 — Courbe périodique synthétique. L’axe vertical représente une variation de magnitude : une valeur plus petite correspond à un éclat plus élevé. Aucun nom d’étoile réelle ne lui est associé.

Pulsation et structure interne

Une étoile pulsante change de rayon et de température. Dans certaines couches, l’opacité varie avec la compression et peut retenir puis libérer l’énergie de manière à entretenir l’oscillation. Les céphéides et les étoiles RR Lyrae occupent des régions particulières des diagrammes stellaires et ne correspondent pas à une variabilité aléatoire quelconque.

La période des céphéides est reliée à leur luminosité moyenne, avec des relations dépendant de la bande photométrique et de la population. Il faut distinguer les céphéides classiques des céphéides de type II. Utiliser la mauvaise relation conduit à une distance fausse même si la période est parfaitement mesurée.

Une nova n’est pas une nouvelle étoile

Dans une nova classique, une naine blanche accumule de la matière provenant d’un compagnon. Une réaction thermonucléaire instable dans la couche accumulée provoque un fort sursaut. La naine blanche peut survivre ; l’événement ne correspond pas à la création soudaine d’une étoile. Certaines novae sont récurrentes, selon des intervalles variables.

Une supernova constitue une autre famille de phénomènes, avec une explosion beaucoup plus énergétique. Les mots historiques se ressemblent, mais ne décrivent pas la même évolution. Les variables cataclysmiques présentent également des sursauts liés au disque d’accrétion, dont le mécanisme ne doit pas être confondu avec l’explosion thermonucléaire d’une nova.

Mesurer une variation

Une série utile possède des dates précises, un filtre annoncé et des étoiles de comparaison adaptées. Un objet de contrôle supposé stable aide à détecter les effets instrumentaux. La régularité de l’échantillonnage compte : une observation

quotidienne peut manquer ou déformer une variation dont la période est proche d’un jour.

Des outils cherchent des périodicités dans les séries incomplètes, mais un pic statistique n’est pas automatiquement une période astrophysique. La fenêtre d’observation et les interruptions créent des alias. Répéter l’observation sur plusieurs nuits et comparer les méthodes améliore la robustesse du diagnostic. Les réseaux amateurs apportent ici une continuité temporelle précieuse.

La période sonde une densité

Une pulsation globale d’étoile possède un temps caractéristique lié à la gravitation et à la densité moyenne. Un repère dimensionnel est $t \approx 1/\sqrt{(G\rho)}$, avec des facteurs et des dépendances de mode qui exigent un modèle stellaire. Une étoile très étendue et peu dense peut donc varier plus lentement qu’un objet compact.

Cette idée relie la période observable à une structure intérieure. Elle ne suffit pas à fabriquer une relation période–luminosité universelle pour toutes les variables. La masse, le rayon, le mode excité et les propriétés des couches ionisantes interviennent. Les relations de céphéides sont calibrées par des populations bien identifiées, dans des filtres définis. Confondre des classes de variables peut donner un diagramme apparemment ordonné mais une distance fausse. Une période précise devient une contrainte physique seulement lorsque la famille de pulsation et la calibration correspondante sont établies.

Exemple Retrouver une phase

Une variable possède une période de 5 jours et un maximum de référence à la date t_0. Une observation réalisée 12 jours après t_0 se situe à une phase de 12/5 = 2,4 cycles, soit 0,4 après retrait des deux cycles complets. Cette phase permet de superposer

plusieurs périodes pour construire une courbe moyenne, à condition que la période reste stable.

À retenir

Une courbe de lumière peut révéler structure, orbite ou accrétion. Les céphéides deviennent des indicateurs de distance après calibration de leur relation période–luminosité.

Mini-lexique

Phase : position fractionnaire dans un cycle. Alias : périodicité apparente produite ou déplacée par l’échantillonnage des observations.

Vérifier sa compréhension

1. Une nova classique détruit-elle nécessairement sa naine blanche ?

2. Une période de deux heures peut-elle être étudiée correctement avec une seule mesure par nuit ?

Références S12 • S17 • S36

24 Géantes naines blanches et nébuleuses planétaires

Objectifs Suivre l’évolution d’une étoile de masse faible ou intermédiaire après la séquence principale.

Quand l’hydrogène central se raréfie

Une étoile de masse solaire ne devient pas géante parce que toute sa matière commencerait soudain à brûler. Lorsque l’hydrogène central disponible diminue, la structure se réorganise. Le cœur se contracte, tandis que la fusion peut continuer dans une coquille. L’enveloppe se dilate et se refroidit en surface, donnant une géante rouge très lumineuse grâce à sa grande superficie.

L’hélium peut ensuite fusionner en carbone et en oxygène. Pour certaines masses et conditions de dégénérescence, son allumage est rapide dans le cœur : c’est le flash de l’hélium. Ce terme ne désigne pas nécessairement une explosion visible détruisant l’étoile. Une grande partie de l’énergie participe à la réorganisation interne.

Des enveloppes perdues

Dans des phases évoluées, des vents retirent une importante fraction de l’enveloppe. Les pulsations, les poussières et le rayonnement participent à cette perte de masse, avec des détails qui restent étudiés. Le destin final dépend de la masse initiale, de la composition et des interactions éventuelles avec un compagnon.

Le cœur chaud dégagé peut ioniser le gaz précédemment expulsé et former une nébuleuse planétaire. Le nom provient de l’aspect de certains objets dans les premiers télescopes ; il n’indique pas un lieu de formation de planètes. M27 et M57

offrent des exemples accessibles à l’observation amateur, avec des morphologies et des contrastes différents.

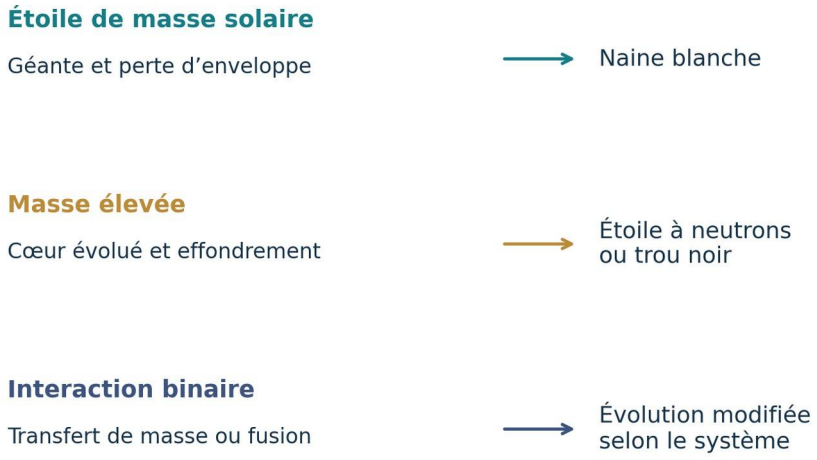


Figure 19 — Voies d’évolution simplifiées. Les frontières de masse dépendent des modèles, des pertes de matière et des interactions binaires ; plusieurs issues restent possibles.

Une naine blanche

Le résidu possède typiquement une masse comparable à une fraction de masse solaire dans un volume proche de celui de la Terre. Sa forte densité impose un régime de dégénérescence électronique. Une naine blanche ordinaire ne maintient pas une fusion centrale durable comparable à celle d’une étoile de séquence principale ; elle refroidit au cours du temps.

Ajouter de la masse à une naine blanche ne la fait pas simplement grandir. Dans le régime idéal non relativiste, son rayon tend au contraire à diminuer lorsque la masse augmente. La limite de Chandrasekhar, proche de 1,4 masse solaire sous des hypothèses idéalisées, reflète les limites du soutien électronique pour certaines compositions. Les objets réels demandent de traiter rotation, température et interactions.

Le futur solaire avec prudence

Le Soleil devrait traverser des phases de géante et perdre son enveloppe pour laisser une naine blanche. Il ne deviendra pas un trou noir par effondrement de son cœur. Les détails de l’interaction avec la Terre durant les phases de grande expansion dépendent des modèles de pertes de masse et de marées ; une chronologie précise ne se résume pas à une date unique.

Les « naines noires » désignent des résidus hypothétiques refroidis après des durées extrêmement longues. L’Univers actuel est trop jeune pour qu’une population de tels objets issue du refroidissement stellaire ordinaire ait eu le temps de se constituer. Elles ne doivent pas être confondues avec les naines brunes, dont l’histoire est différente dès la naissance.

Le refroidissement garde une mémoire

Une naine blanche perd progressivement l’énergie stockée, mais sa courbe de refroidissement n’est pas celle d’une boule uniforme de matériau ordinaire. La composition du cœur, l’épaisseur des couches externes, les pertes par neutrinos à certaines étapes et la cristallisation influencent le rythme. La séparation chimique et la libération d’énergie lors de certaines transitions peuvent retarder le refroidissement.

Une population de naines blanches fournit ainsi une horloge après comparaison aux modèles. Il faut ajouter la durée de vie de l’étoile avant son résidu pour obtenir l’âge de la population. Une naine blanche froide n’a pas nécessairement été créée froide : elle a suivi une histoire. L’interprétation des diagrammes de luminosité teste simultanément la formation stellaire passée et la physique de matière dense. Cette méthode est complémentaire du point de sortie de la séquence principale, parce qu’elle ne dépend pas exactement des mêmes phases.

Exemple Une densité de naine blanche

Prenons une masse de 0,6 M☉ et un rayon de 7 000 km. La densité moyenne vaut environ $8{,}3 \times 10^8$ kg/m³. Un centimètre cube représenterait alors environ 830 kg si l’on pouvait conserver cet état, ce qu’un prélèvement ordinaire ne permettrait pas. L’analogie sert à mesurer un ordre de grandeur, pas à décrire un matériau manipulable sur Terre.

À retenir

La nébuleuse planétaire est une enveloppe éclairée par un cœur chaud. La naine blanche restante est un résidu dense qui refroidit, soutenu principalement par la physique quantique des électrons.

Mini-lexique

Coquille de fusion : région de réactions entourant un cœur de composition différente. Naine blanche : résidu stellaire compact soutenu principalement par la dégénérescence électronique.

Vérifier sa compréhension

1. M57 est-elle un nuage où des planètes se forment actuellement autour d’une jeune étoile ?

2. Pourquoi ne trouve-t-on pas de naines noires stellaires ordinaires déjà refroidies dans l’Univers actuel ?

Références S12 • S16 • S19

25 Supernovae étoiles à neutrons et pulsars

Objectifs Distinguer les grandes familles de supernovae et comprendre la naissance et la détection des résidus compacts.

L’effondrement d’un cœur massif

Dans une étoile initialement assez massive, des combustions successives modifient le cœur. Lorsque celui-ci ne peut plus être soutenu, un effondrement peut se produire. La structure, les pertes de masse et les interactions déterminent l’issue. La limite souvent donnée autour de huit masses solaires est un ordre de grandeur, pas une frontière universelle indépendante de l’évolution.

L’effondrement libère une immense énergie gravitationnelle, dont la majorité est transportée par les neutrinos dans les modèles usuels. L’explosion visible dépend de mécanismes complexes couplant hydrodynamique et transport des neutrinos. Certains effondrements peuvent conduire à une faible explosion ou à une formation plus directe d’un trou noir. « Étoile massive » ne garantit donc pas une supernova lumineuse identique dans tous les cas.

Une autre route thermonucléaire

Les supernovae de type Ia sont associées à l’explosion thermonucléaire d’une naine blanche dans un contexte binaire. Plusieurs voies de déclenchement sont étudiées, notamment l’accrétion et des interactions ou fusions entre naines blanches. Présenter chaque type Ia comme l’explosion obligatoire à exactement 1,4 masse solaire serait trop restrictif.

Les classifications spectrales décrivent les signatures observées, notamment la présence ou l’absence de certaines raies. Elles ne se traduisent pas toutes directement en un mécanisme unique.

Les courbes de lumière et les spectres aident à reconstruire la masse éjectée, la composition et l’environnement. Des éléments radioactifs produits dans l’explosion alimentent une partie importante de l’émission tardive.

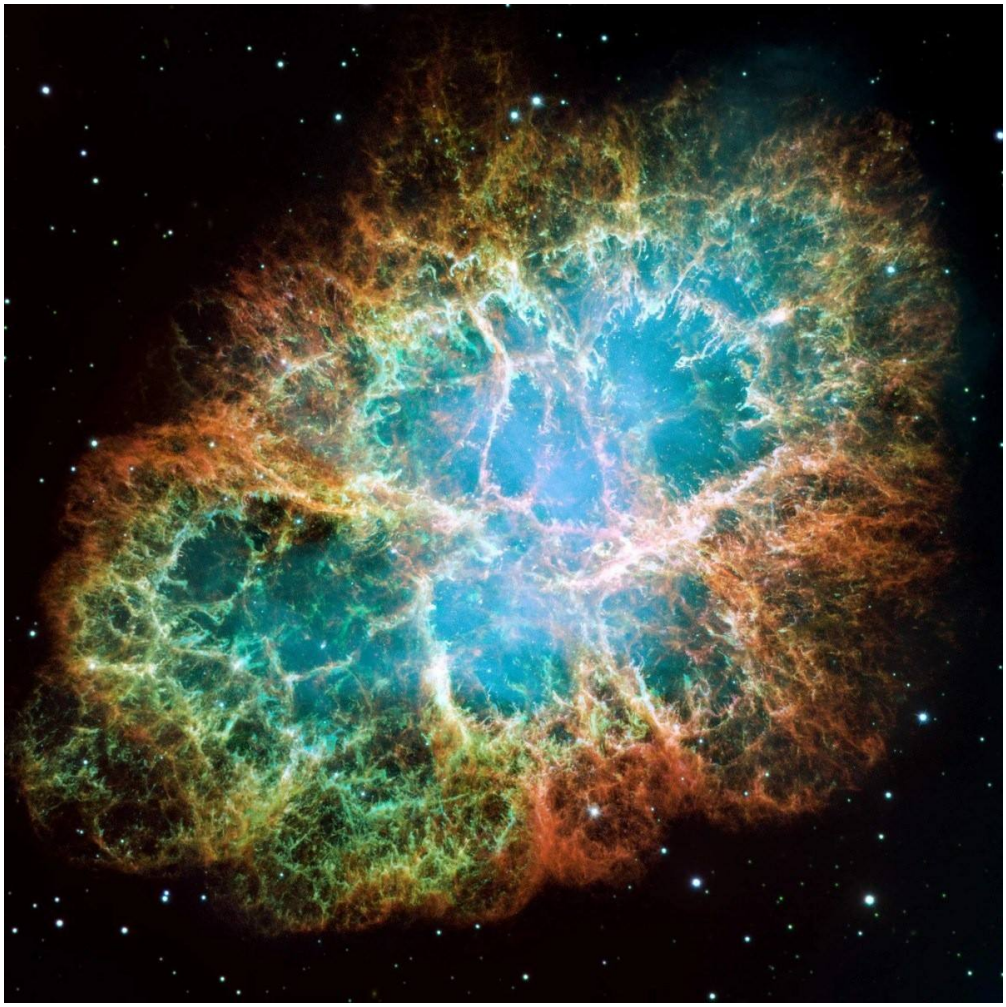


Figure 20 — La nébuleuse du Crabe, M1, résidu de la supernova observée en 1054. Photographie Hubble conservée de la série ; crédit NASA, ESA, J. Hester et A. Loll, Arizona State University. L’image ne représente pas l’instant de l’explosion.

Une étoile à neutrons

Un résidu d’effondrement peut posséder une masse supérieure à celle du Soleil dans un rayon de l’ordre de dix à quinze kilomètres. La matière y atteint des densités nucléaires. La

structure dépend d’une équation d’état encore imparfaitement contrainte. La limite de masse d’une étoile à neutrons ne se réduit donc pas à la limite de Chandrasekhar des naines blanches.

La rotation et le champ magnétique peuvent produire un rayonnement directionnel. Si le faisceau traverse notre ligne de visée, on observe des impulsions : c’est un pulsar. Le mécanisme ressemble géométriquement à un phare, mais les détails de l’émission sont ceux d’un plasma magnétisé relativiste. Tous les pulsars ne sont pas détectés dans toutes les bandes.

Des horloges et des collisions

Les pulsars peuvent fournir des signaux temporels remarquablement réguliers. Dans les systèmes doubles, leurs temps d’arrivée révèlent des effets orbitaux et relativistes. Leur rotation ralentit généralement avec les pertes d’énergie, même si des irrégularités brusques et des phases de réaccélération par accrétion existent.

Les fusions d’étoiles à neutrons associent ondes gravitationnelles, sursaut gamma possible et émission d’une kilonova. Elles produisent des conditions favorables aux captures rapides de neutrons. L’événement GW170817 a établi un lien observationnel majeur entre ces messagers. Il ne permet pas, à lui seul, d’affirmer que tous les éléments lourds de toutes les galaxies ont cette origine unique.

Une courbe d’explosion dépend du transport

Une supernova peut produire une émission sur des semaines alors que la phase de libération initiale d’énergie est bien plus brève. Les photons diffusent à travers les éjectas, qui s’étendent et deviennent progressivement transparents. La matière radioactivement chauffée et les interactions avec un environnement dense peuvent prolonger ou modifier la lumière.

La largeur de la courbe dépend donc de la masse éjectée, des vitesses, de l’opacité et du chauffage. Deux explosions ayant une énergie comparable ne doivent pas nécessairement avoir le même maximum ni la même durée. Les spectres pris à plusieurs dates révèlent des couches différentes à mesure que la profondeur visible évolue. C’est une des raisons de surveiller rapidement puis longtemps un événement. Une seule photographie proche du maximum ne remplace pas la série temporelle nécessaire pour reconstruire la nature et l’environnement de l’explosion.

Exemple Une rotation en dix millisecondes

Une étoile à neutrons de rayon 12 km tournant en 0,010 s possède une vitesse équatoriale géométrique d’environ $2\pi R/P \approx$ 7 540 km/s. Cette estimation ignore les corrections relativistes et la déformation, mais montre l’importance de la rotation. Une période dix fois plus courte ne pourrait être envisagée sans vérifier les limites de stabilité de l’objet.

À retenir

Les supernovae regroupent plusieurs mécanismes. Les étoiles à neutrons et leurs fusions testent la gravitation, la matière dense et la production des éléments.

Mini-lexique

Pulsar : étoile à neutrons observée par une émission périodiquement dirigée vers nous.
Kilonova : émission transitoire liée notamment aux éjectas radioactifs d’une fusion d’objets compacts riches en neutrons.

Vérifier sa compréhension

1. Le Soleil devrait-il former un pulsar après une supernova ?

2. La pulsation observée d’un pulsar correspond-elle généralement à l’expansion et à la contraction de toute l’étoile ?

Références S12 • S15 • S16

PARTIE V

V

Des nuages aux galaxies

La matière s’organise à plusieurs échelles.

DANS CETTE PARTIE

26 Gaz poussières et nébuleuses

27 Amas ouverts et amas globulaires

28 La Voie lactée

29 Galaxies et évolution

30 Noyaux actifs quasars et jets

31 Amas de galaxies et toile cosmique

26 Gaz poussières et nébuleuses

Objectifs Distinguer les mécanismes qui rendent une nébuleuse lumineuse ou sombre et relier leur observation au cycle de la matière.

Un milieu entre les étoiles

L’espace interstellaire n’est pas vide. Il contient un gaz de densité très variable, des poussières, des champs magnétiques et des particules énergétiques. L’hydrogène y domine, mais il peut être moléculaire, atomique neutre ou ionisé. Des régions chaudes et diluées côtoient des nuages froids et denses. Une image visible ne montre qu’une partie de cette diversité.

Les poussières représentent une petite fraction de la masse, mais influencent fortement le rayonnement et la chimie. Elles absorbent plus efficacement certaines longueurs d’onde, diffusent la lumière et rayonnent après chauffage. Leurs surfaces facilitent aussi des réactions, dont la formation d’hydrogène moléculaire. Une petite composante en masse peut donc jouer un grand rôle physique.

Émission et réflexion

Une région H II contient principalement de l’hydrogène ionisé par des étoiles chaudes. Après recombinaison et cascades de transitions, le gaz émet des raies. La raie Hα à environ 656,3 nm contribue au rouge de nombreuses images. La couleur finale dépend toutefois des filtres et du traitement ; une palette photographique n’est pas toujours la couleur qu’un œil percevrait.

Une nébuleuse par réflexion diffuse la lumière d’étoiles proches. Elle ne doit pas être décrite comme un gaz nécessairement porté à la fusion. Le bleu peut être favorisé par la diffusion, selon les grains et la géométrie. Les Pléiades montrent ce type de lumière

diffusée ; les étoiles de l’amas et le nuage traversé ne doivent pas être confondus dans une unique histoire simplifiée de naissance.

Aspect	Mécanisme principal	Exemple de lecture
Émission	Gaz excité ou ionisé	Raies et sources d’ionisation
Réflexion	Diffusion de lumière stellaire	Spectre lié aux étoiles éclairantes
Nébuleuse sombre	Extinction devant un fond	Silhouette, pas absence de matière
Infrarouge thermique	Poussières chauffées	Température et distribution des grains

Le sombre révèle aussi de la matière

Une nébuleuse sombre apparaît devant un fond plus brillant. Le nuage absorbe et diffuse la lumière qui aurait atteint l’observateur. L’absence de points lumineux dans une région peut donc indiquer un excès de matière, plutôt qu’un grand vide. Les observations infrarouges et radio permettent de rechercher ce qui est caché.

L’extinction s’accompagne souvent d’un rougissement parce que les courtes longueurs d’onde sont plus atténuées. Cependant, la loi d’extinction varie avec les propriétés des poussières et l’environnement. Corriger un spectre avec une loi unique sans examiner son domaine d’application peut biaiser une température, une luminosité ou une distance.

Recycler la matière

Les étoiles se forment dans le gaz puis le transforment. Leurs vents, leur rayonnement et leurs explosions modifient les nuages. Les chocs compriment certaines régions et en dispersent d’autres. La formation stellaire peut donc être encouragée localement ou interrompue selon les conditions ; « une explosion déclenche toujours des étoiles » serait une règle trop simple.

M42, M8 et M17 illustrent des régions de formation et d’ionisation ; les Dentelles du Cygne révèlent les conséquences d’une explosion ancienne. Les nébuleuses planétaires relèvent d’une autre étape d’évolution. Le mot « nébuleuse » décrit d’abord un aspect diffus, et ne définit pas un mécanisme physique unique.

Les raies dites interdites

Certaines transitions possèdent une très faible probabilité radiative dans les conditions du laboratoire et sont historiquement appelées « interdites ». Elles ne violent pas les lois quantiques : elles sont fortement défavorisées selon les règles et approximations pertinentes. Dans un gaz très peu dense, l’état excité peut survivre assez longtemps pour émettre le photon correspondant.

À plus forte densité, une collision peut retirer l’énergie avant cette émission. Le rapport de certaines raies devient donc un indicateur de densité, avec une dépendance à la température et aux populations atomiques. Les belles couleurs de l’oxygène ionisé ou d’autres espèces dans les nébuleuses possèdent ainsi une information physique au-delà de l’esthétique. Une raie présente dans le ciel mais difficile à produire dans une lampe de laboratoire ne demande pas un élément chimique exotique : les densités et les durées de vie des états peuvent suffire à expliquer la différence.

Exemple Une extinction d’une magnitude

Si la poussière ajoute une magnitude d’extinction dans un filtre, le flux reçu est divisé par 10^0,4, soit environ 2,512. Si l’on ignore cette absorption et attribue toute la baisse à la distance, la distance déduite est trop grande d’un facteur √2,512 ≈ 1,585. Une correction de poussière intervient donc directement dans l’échelle des distances.

À retenir

Une nébuleuse peut émettre, réfléchir ou masquer. Les observations dans plusieurs bandes séparent les mécanismes et révèlent le cycle du gaz.

Mini-lexique

Région H II : région dominée par l’hydrogène ionisé. Extinction : diminution du rayonnement reçu par absorption et diffusion sur la ligne de visée.

Vérifier sa compréhension

1. Une région sombre dans la Voie lactée est-elle nécessairement vide ?

2. Une nébuleuse rouge photographie-t-elle toujours la couleur que l’on verrait à l’oculaire ?

Références S19 • S28 • S39

27 Amas ouverts et amas globulaires

Objectifs Comparer deux familles d’amas et utiliser leurs populations pour étudier la formation et l’évolution stellaire.

Des étoiles réellement regroupées

Un amas est une concentration physique d’étoiles, à distinguer d’un astérisme dont les membres peuvent être à des distances différentes. Les amas ouverts contiennent généralement des dizaines à quelques milliers d’étoiles, avec une structure relativement lâche. Ils sont souvent associés au disque galactique et couvrent une large gamme d’âges.

Les amas globulaires sont plus denses et plus riches, avec des populations souvent très anciennes. Ils occupent notamment le halo galactique. Les descriptions de forme et de nombre sont des tendances : la nature offre des cas intermédiaires et les définitions dépendent aussi de l’histoire dynamique. La densité apparente dépend fortement de la distance et de la résolution.

Une expérience sur plusieurs masses

Les membres d’un amas ont une histoire de formation apparentée. Leur diagramme couleur–magnitude permet de comparer des étoiles de masses différentes à un âge approximativement commun. Le point de sortie de la séquence principale donne une estimation d’âge. Les naines blanches offrent également une chronologie liée à leur refroidissement.

Les amas globulaires ne sont cependant pas toujours des populations chimiquement uniques. On observe des variations d’abondances et des sous-populations qui complexifient leur histoire. Les présenter systématiquement comme des ensembles où toutes les étoiles possèdent exactement le même âge et la même composition supprimerait des informations importantes de la recherche contemporaine.

Propriété	Amas ouvert typique	Amas globulaire typique
Structure	Peu concentrée à modérée	Forte concentration
Population	Âges variés selon l’amas	Souvent très ancienne
Localisation	Principalement disque	Halo et régions centrales
Exemples	M45, M44, M37	M13, M3, M5, M92

Une évolution collective

Les étoiles échangent de l’énergie lors des rencontres gravitationnelles. Les objets de masses différentes ne restent pas nécessairement répartis de la même façon. Des étoiles peuvent gagner assez d’énergie pour quitter l’amas ; le champ galactique et les passages près de nuages ou du disque favorisent également les pertes.

Un amas ouvert peut ainsi se disperser et devenir un courant stellaire difficile à identifier sans mesures précises de positions et de vitesses. Un amas globulaire dense peut survivre très longtemps, tout en changeant de structure. Les binaires jouent un rôle dans ses échanges d’énergie et peuvent ralentir certaines phases de contraction du cœur.

Regarder sans confondre

À l’oculaire, les Pléiades demandent un grand champ ; un amas globulaire compact réclame plutôt du contraste et une résolution suffisante pour séparer ses étoiles externes. Le degré de résolution ne fournit pas directement le nombre total de membres. Une tache non résolue peut contenir beaucoup d’étoiles trop faibles ou trop proches angulairement.

Depuis le Luxembourg, M13 ou M92 peuvent être de bonnes cibles saisonnières. Omega du Centaure, objet remarquable du ciel austral, reste trop bas et sous l’horizon pour l’observation ordinaire à ces latitudes. Un catalogue physique doit être complété par la géométrie locale du ciel avant de proposer une séance.

Comparer traversée et relaxation

Le temps de traversée d’un amas vaut approximativement sa taille divisée par sa vitesse caractéristique. Pour 2 pc et 1 km/s, on trouve environ deux millions d’années. Dans un système idéal de mille objets comparables, un repère de relaxation vaut environ quatorze traversées, soit quelques dizaines de millions d’années. Masses variées, binaires et champ galactique modifient ce résultat. L’âge des étoiles et l’évolution dynamique collective correspondent donc à deux horloges différentes.

Exemple Transformer un angle en dimension

Un amas situé à 500 pc s’étend sur un angle de 1°. Pour un petit angle exprimé en radians, la dimension transverse vaut approximativement dθ. Avec 1° ≈ 0,01745 rad, on obtient environ 8,7 pc. Le contour choisi dépend des membres retenus ; cette dimension apparente n’est pas une frontière matérielle nette.

À retenir

Les amas servent à comparer l’évolution stellaire et la dynamique collective. Leur population n’est pas toujours parfaitement uniforme et leurs limites évoluent.

Mini-lexique

Astérisme : dessin apparent d’étoiles sans nécessaire association physique. Relaxation : redistribution progressive des énergies par les interactions gravitationnelles.

Vérifier sa compréhension

1. Deux étoiles d’un amas ont-elles nécessairement la même masse ?

2. Un amas globulaire dont les étoiles ne sont pas résolues est-il nécessairement pauvre en membres ?

Références S06 • S12 • S40

28 La Voie lactée

Objectifs Décrire les composantes de notre Galaxie et comprendre comment la cartographier depuis une position intérieure.

Une vue depuis le disque

La bande claire de la Voie lactée correspond à une forte concentration d’étoiles et de matière dans des directions proches du plan galactique. Nous nous trouvons à l’intérieur du disque, à environ huit kiloparsecs du centre. La poussière masque une partie du visible, ce qui rend notre Galaxie plus difficile à cartographier qu’une simple spirale dessinée vue de dessus.

La Voie lactée possède un disque mince, un disque plus épais, une région centrale avec une barre et un halo étendu. Ces mots décrivent des populations et des structures dont les transitions sont progressives. Les étoiles du halo, les amas globulaires et la matière noire ne se répartissent pas comme le gaz froid du disque.

Cartographier les positions et les vitesses

Les parallaxes et les mouvements propres donnent accès à une partie de la structure tridimensionnelle proche. Les vitesses radiales complètent le mouvement spatial. Les observations radio suivent le gaz à travers la poussière ; l’infrarouge améliore l’accès aux régions centrales. Chaque méthode possède ses limites et ses effets de sélection.

Une vitesse radiale du gaz ne fournit pas toujours une distance unique. La conversion dépend d’un modèle de rotation et de la direction observée, avec parfois plusieurs solutions. Les mouvements non circulaires, les bras et la barre ajoutent des difficultés. Une carte galactique résulte donc d’un assemblage de

contraintes, pas de la transformation automatique d’une image en relief.

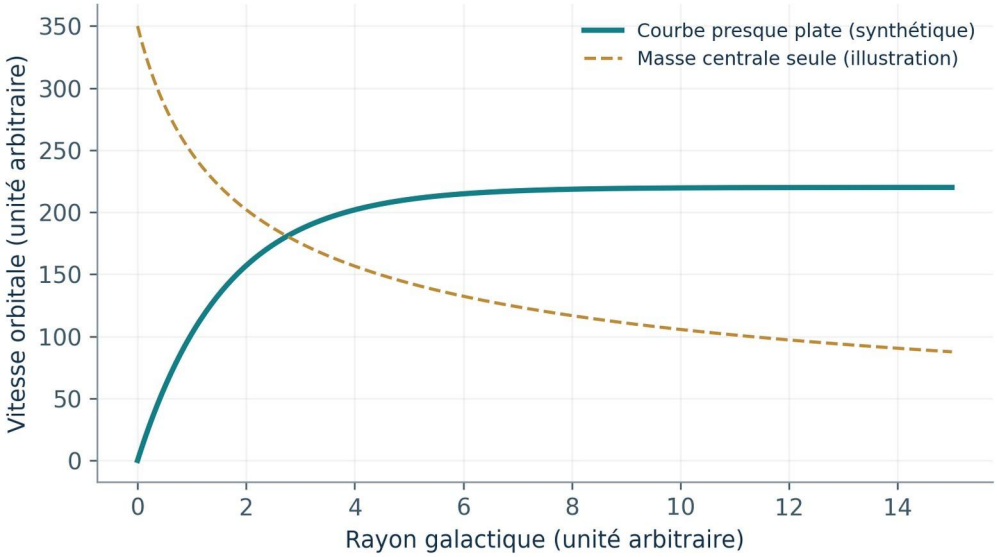


Figure 21 — Courbes de rotation synthétiques comparant une tendance presque plate et une masse centrale isolée. Les valeurs et les points ne sont pas des données de la Voie lactée.

Le mouvement du Soleil

Le Soleil participe à la rotation galactique, tout en possédant un mouvement par rapport à son voisinage. Une vitesse orbitale de l’ordre de quelques centaines de kilomètres par seconde conduit à une période de l’ordre de deux cents millions d’années. L’orbite n’est pas un cercle parfait dans un potentiel parfaitement figé.

Les étoiles du disque ne tournent pas toutes avec une même vitesse angulaire. Les bras spiraux ne doivent donc pas être imaginés comme des bras solides entraînant éternellement les mêmes étoiles. Des structures de densité, la dynamique du gaz et des perturbations participent à leur formation et à leur évolution. Leur description exacte dépend du système étudié.

Une histoire de fusions et de recyclage

Les compositions chimiques et les mouvements conservent la trace de l’assemblage galactique. Des courants stellaires

révèlent des galaxies satellites ou des amas en cours de dispersion. Des populations aux orbites et aux abondances distinctes peuvent témoigner d’épisodes anciens d’accrétion. La Galaxie continue d’évoluer aujourd’hui.

Au centre se trouve Sagittarius A*, associé à un trou noir d’environ quatre millions de masses solaires. Son effet domine les trajectoires suffisamment proches, mais il ne fournit pas toute la gravitation de la Voie lactée. Les étoiles éloignées répondent à la masse collective du disque, du bulbe et du halo. Le centre brillant ou compact ne doit pas être confondu avec la masse totale.

La chimie complète les trajectoires

Deux populations peuvent aujourd’hui se mélanger sur le ciel tout en conservant des compositions différentes. Les abondances relatives de fer et de certains éléments produits par des voies distinctes renseignent sur le rythme de l’enrichissement du gaz. Des explosions avec des délais caractéristiques différents ne contribuent pas simultanément à toutes les générations stellaires.

Il faut éviter d’en faire une horloge universelle à une seule graduation. Le mélange, les apports de gaz, les éjections et les rendements stellaires varient selon les environnements. Une étoile enrichie par un compagnon peut également modifier sa surface. La combinaison d’une chimie détaillée, d’une trajectoire et d’un âge estimé permet néanmoins de retrouver des familles que la photographie seule ne distingue pas. Cette archéologie galactique illustre le rôle des données complémentaires : position et vitesse racontent la dynamique, tandis que le spectre conserve une partie de l’histoire du milieu de naissance.

Exemple Une année galactique approximative

Avec un rayon de 8,2 kpc et une vitesse circulaire choisie de 230 km/s, la relation 2πr/v donne environ 219 millions d’années. Les deux nombres sont ici des valeurs arrondies de démonstration. Leur incertitude et les écarts à une orbite circulaire empêchent d’en faire un calendrier exact de chaque révolution solaire.

À retenir

Nous reconstruisons la Voie lactée depuis l’intérieur en combinant plusieurs rayonnements et plusieurs mesures de mouvement. Son histoire apparaît dans les populations stellaires.

Mini-lexique

Halo galactique : composante étendue entourant les régions denses d’une galaxie. Courbe de rotation : vitesse orbitale caractéristique en fonction de la distance au centre.

Vérifier sa compréhension

1. Sagittarius A* représente-t-il l’essentiel de la masse totale de la Voie lactée ?

2. Pourquoi la radio et l’infrarouge complètent-ils le visible pour cartographier notre Galaxie ?

Références S06 • S18 • S20

29 Galaxies et évolution

Objectifs Décrire les grandes morphologies galactiques et relier forme, gaz, formation stellaire et environnement.

Des familles de formes

Les galaxies spirales possèdent un disque avec des structures en bras, parfois une barre centrale. Les galaxies elliptiques présentent une distribution plus arrondie ou allongée d’étoiles. Les lenticulaires possèdent un disque sans bras spiraux marqués ; les irrégulières n’entrent pas aisément dans ces catégories. L’inclinaison et la longueur d’onde influencent fortement l’apparence.

Une classification morphologique ne constitue pas automatiquement une suite chronologique. Une elliptique ne devient pas nécessairement une spirale en suivant une place sur un diagramme. La masse, le gaz disponible, les fusions et l’environnement déterminent des histoires diverses. Les premières classifications décrivaient surtout des images, avant que les mécanismes soient mieux compris.

Le gaz alimente les générations stellaires

La formation stellaire nécessite du gaz capable de refroidir et de se concentrer. Les jeunes étoiles massives donnent une lumière bleue intense, mais disparaissent rapidement. Une galaxie rouge peut être dominée dans sa lumière par des populations plus âgées ; la poussière peut toutefois rougir également une galaxie qui forme encore des étoiles.

Les vents stellaires, les explosions et les noyaux actifs renvoient énergie et matière dans l’environnement. Ces rétroactions peuvent ralentir la formation stellaire, déplacer le gaz ou modifier son état. Il faut distinguer une réserve de gaz présente

et une réserve réellement accessible à la formation. Un halo très chaud ne s’effondre pas comme un nuage moléculaire froid.

Observation	Information possible	Ambiguïté à examiner
Couleur bleue	Jeunes étoiles lumineuses	Métallicité et poussière
Disque et bras	Dynamique organisée	Inclinaison et bande observée
Queues de marée	Interaction récente ou ancienne	Projection et durée de visibilité
Émission infrarouge	Poussières chauffées	Étoiles ou noyau actif

Interagir sans collisionner comme des solides

Lors d’une rencontre, les champs gravitationnels déforment les galaxies. Le gaz peut subir des chocs et migrer ; des queues de marée se développent. Les collisions directes entre étoiles sont généralement rares parce que leur séparation est immense relativement à leurs dimensions. Le mot « collision de galaxies » désigne une interaction collective.

Une fusion peut augmenter temporairement la formation stellaire et nourrir le centre, mais son résultat dépend des masses, des orbites et de la proportion de gaz. Des rencontres mineures modifient aussi les structures. L’accumulation d’événements de tailles différentes participe à l’assemblage galactique sur des milliards d’années.

Comparer différentes époques

Observer loin donne accès à des galaxies plus jeunes dans l’histoire cosmique. Mais une image très lointaine possède une résolution physique différente, une sélection en éclat et une longueur d’onde au repos différente pour un même filtre. Comparer directement sa forme à celle d’une galaxie proche sans ces corrections crée des biais.

Les simulations prédisent des populations sous des hypothèses de gravitation, de gaz et de rétroaction. On les compare aux

masses, aux tailles, aux compositions et aux rythmes de formation. Reproduire un seul aspect ne suffit pas. L’évolution galactique est testée par plusieurs observables, à plusieurs époques, avec les mêmes règles physiques autant que possible.

Les indicateurs ne regardent pas tous la même durée

La lumière ultraviolette est sensible à des populations jeunes ; certaines raies de gaz ionisé sont particulièrement liées aux étoiles très massives et très brèves. L’infrarouge révèle l’énergie absorbée puis réémise par la poussière, mais cette poussière peut aussi être chauffée par des étoiles plus âgées ou un noyau actif. Les indicateurs de formation stellaire ne partagent donc pas exactement la même fenêtre temporelle.

Une galaxie ayant récemment interrompu une poussée de formation peut conserver une émission d’étoiles jeunes tout en produisant peu de nouvelles étoiles au moment considéré. Comparer les traceurs aide à reconstituer cette histoire. Une conversion d’éclat en masse formée par an suppose aussi une distribution des masses stellaires initiales. Les étoiles brillantes dominent certains signaux, alors qu’une grande partie de la masse se cache dans les moins lumineuses. Les calibrations doivent annoncer cette hypothèse de population.

Exemple Une cadence de formation

Une galaxie formant en moyenne 2 masses solaires d’étoiles par an pendant 100 millions d’années transforme environ 200 millions de masses solaires de gaz en étoiles. Ce total n’est pas entièrement conservé sous forme stellaire à long terme : des étoiles rejettent une fraction de leur matière. Le calcul suppose aussi une cadence constante, souvent trop simple pour une histoire réelle.

À retenir

La forme d’une galaxie ne résume pas son histoire. Gaz, étoiles, matière noire et interactions doivent être étudiés ensemble.

Mini-lexique

Rétroaction : effet de l’énergie et de la matière émises sur l’évolution du milieu.
Morphologie : description de la forme et de l’organisation apparente.

Vérifier sa compréhension

1. Une galaxie rouge est-elle nécessairement dépourvue de toute formation stellaire ?

2. Deux galaxies en fusion provoquent-elles normalement la collision directe de la majorité de leurs étoiles ?

Références S18 • S19 • S21

30 Noyaux actifs quasars et jets

Objectifs Expliquer la puissance des noyaux actifs et distinguer les effets de l’accrétion, de l’orientation et de l’environnement.

Un centre plus lumineux que ses étoiles

Certaines galaxies présentent un noyau dont l’émission dépasse largement celle attendue des étoiles centrales. Leur puissance provient principalement de l’accrétion de matière autour d’un trou noir supermassif. Le gaz perd de l’énergie gravitationnelle, s’échauffe et rayonne avant de franchir l’horizon. Le trou noir lui-même n’est pas une surface thermique ordinaire.

Un quasar est un noyau actif extrêmement lumineux. Les galaxies hôtes peuvent être difficiles à voir sous son éclat. Le mot historique vient d’un aspect presque ponctuel dans les premiers relevés ; il ne signifie pas que l’objet soit une étoile proche. Les grands décalages spectraux et les observations des hôtes ont établi sa nature extragalactique.

Une source compacte variable

Une variation rapide de l’ensemble d’une région émettrice fournit une contrainte sur sa dimension causale. Dans le cas le plus simple, une région ne peut coordonner un changement global sur un temps plus court que son temps de traversée lumineuse. On estime donc une taille de l’ordre de $c\Delta t$, avec des corrections de décalage cosmologique et parfois de mouvement relativiste.

Cette relation donne un ordre de grandeur, pas une règle universelle sans hypothèses. Une géométrie particulière, un faisceau variable ou une propagation dans un jet peuvent modifier l’interprétation. Néanmoins, l’association de forte puissance et de variation rapide a montré que certains noyaux produisent leur énergie dans une région très compacte.

Composante	Rayonnement ou rôle	Point de vigilance
Disque d’accrétion	Émission thermique et ionisante	Extinction et inclinaison
Couronne chaude	Rayons X	Géométrie encore étudiée
Gaz environnant	Raies et absorption	Vitesses et distribution
Jet relativiste	Radio à gamma selon les cas	Orientation et amplification

L’orientation change l’apparence

Des structures poussiéreuses peuvent masquer une partie du centre selon la ligne de visée. Les modèles d’unification relient ainsi plusieurs classes de noyaux actifs à des différences de géométrie et d’orientation, tout en reconnaissant des variations physiques intrinsèques. Toutes les différences ne sont pas réductibles à un simple angle.

Lorsqu’un jet relativiste pointe près de notre direction, son émission peut être fortement amplifiée. Un blazar présente ce type de configuration. Des mouvements apparents plus rapides que la lumière peuvent se produire sur les images par combinaison de projection et de temps de propagation ; ils ne prouvent pas que la matière dépasse localement c.

Agir sur une galaxie

Les jets et les vents peuvent transférer de l’énergie au gaz galactique et au milieu des amas. Des cavités observées en rayons X témoignent de ce couplage. La croissance du trou noir et celle de la galaxie sont liées statistiquement, mais leurs causes et leurs échanges ne se réduisent pas à une relation mécanique unique.

Un trou noir central peut être peu actif s’il reçoit peu de matière. Sagittarius A* est aujourd’hui bien moins lumineux qu’un quasar de même ordre de masse pourrait l’être dans une autre phase d’alimentation. La masse du trou noir ne suffit donc pas à prédire la

luminosité du noyau ; le taux et le mode d’accrétion comptent fortement.

Un rapport plutôt qu’une seule luminosité

Le rapport à la luminosité d’Eddington aide à comparer des noyaux de masses différentes. Son estimation demande toutefois une masse, une luminosité totale et des corrections d’extinction. Une seule bande ne donne pas directement le débit d’accrétion : le rendement et l’énergie emportée par des écoulements interviennent. Ce rapport est donc un repère de régime, avec ses incertitudes, plutôt qu’une balance universelle de matière absorbée.

Exemple Convertir un débit en puissance

Supposons un rendement radiatif de 10 % et un débit d’accrétion de 1 masse solaire par an. La relation $L = 0{,}1\ \dot{M}c^2$ donne environ $5{,}7 \times 10^{38}$ W. Le rendement choisi est illustratif et varie avec le régime et la rotation. Ce calcul montre qu’une faible quantité de matière relativement à une masse galactique peut alimenter une très grande puissance.

À retenir

Les noyaux actifs rayonnent grâce à la matière située hors de l’horizon. Leur éclat et leur apparence dépendent de l’alimentation, de la géométrie et parfois de jets relativistes.

Mini-lexique

Quasar : noyau actif extragalactique très lumineux. Blazar : noyau actif dont le jet est orienté près de notre ligne de visée.

Vérifier sa compréhension

1. Un trou noir très massif est-il obligatoirement un quasar très lumineux ?

2. Une structure de jet qui paraît se déplacer plus vite que c viole-t-elle nécessairement la relativité ?

Références S16 • S18 • S41

31 Amas de galaxies et toile cosmique

Objectifs Relier les galaxies à leur environnement et distinguer systèmes liés, filaments et structures définies par les relevés.

Des groupes aux grands amas

Les galaxies se regroupent dans des systèmes dont les masses et les populations varient considérablement. Un amas riche peut contenir des centaines ou des milliers de galaxies, un gaz très chaud et une importante composante de matière noire. La lumière stellaire n’en révèle donc qu’une fraction de la masse. Les groupes plus modestes sont également des lieux importants d’interactions.

Le gaz intra-amas émet des rayons X et modifie le rayonnement cosmologique par diffusion sur ses électrons chauds, effet appelé Sunyaev–Zeldovich. Ces observations complètent le recensement des galaxies. La masse peut être estimée par les mouvements, les lentilles et l’état du gaz, avec des hypothèses différentes pour chaque méthode.

Des filaments et des vides

Les relevés tridimensionnels montrent des concentrations allongées, des nœuds et de vastes régions moins peuplées. Cette toile cosmique résulte de la croissance des inhomogénéités dans un Univers en expansion. La gravitation amplifie certaines différences initiales, tandis que le gaz ajoute refroidissement, pression et rétroactions.

Un vide cosmique n’est pas un espace absolument vide. Il contient moins de galaxies que la moyenne et peut posséder du gaz et de la matière noire. Sa définition dépend de l’échantillon et de l’algorithme. Les contours d’un filament ou d’un superamas

ne doivent pas être lus comme la surface d’un objet solide parfaitement délimité.

Figure 22 — Réseau fictif construit pour illustrer nœuds, filaments et régions moins peuplées. Il ne s’agit pas d’une carte d’un relevé astronomique.

L’environnement transforme les galaxies

Une galaxie traversant un gaz intra-amas dense peut perdre une partie de son propre gaz par pression dynamique. Les marées et les rencontres modifient aussi sa structure. Ces processus contribuent à expliquer pourquoi les populations galactiques dépendent de l’environnement. La corrélation observée doit être confrontée aux mécanismes et aux histoires individuelles.

Le gaz chaud peut également refroidir dans certaines régions centrales. L’activité d’un noyau peut y réinjecter de l’énergie. L’équilibre entre refroidissement et chauffage n’est pas nécessairement statique ; des cycles et des épisodes se succèdent. Les cartes radio et X montrent des aspects complémentaires de cette dynamique.

Quelle structure est réellement liée

Une concentration apparente dans un relevé n’est pas toujours un ensemble qui restera lié à l’infini. Les superamas peuvent contenir des sous-ensembles liés et d’autres régions qui participent encore à l’expansion. Pour discuter leur futur, il faut connaître les masses, les vitesses et le modèle cosmologique.

Les vitesses particulières déforment aussi la carte reconstruite à partir des décalages spectraux. Un amas peut apparaître étiré selon la ligne de visée : ce n’est pas nécessairement sa forme réelle. La cosmologie exploite ces déformations comme informations statistiques, à condition de ne pas les confondre avec une photographie géométrique directe.

Une température ne pèse pas un amas toute seule

Un gaz chaud soutenu dans un potentiel gravitationnel présente une structure de pression liée à la masse intérieure. Pour obtenir une masse hydrostatique, il faut connaître les profils de densité et de température, pas seulement une température moyenne. Les dérivées de ces profils interviennent dans le calcul. Une valeur globale de quelques keV donne une échelle d’énergie, mais pas une carte de masse complète.

Des mouvements turbulents, des champs ou une fusion récente peuvent ajouter un soutien non thermique ou rompre l’équilibre. Comparer cette masse à celle d’une lentille devient alors un test de l’état du gaz et du modèle. Un désaccord ne doit pas être immédiatement attribué à une nouvelle gravitation ni automatiquement effacé par une correction arbitraire. Les morphologies X, les vitesses et les structures radio aident à déterminer si l’approximation hydrostatique convient au système étudié.

Exemple La température d’un gaz d’amas

Une énergie thermique de 5 keV correspond à une température d’environ 58 millions de kelvins via kT. Cette température très élevée concerne un plasma extrêmement dilué. Le nombre seul ne permet pas de comparer l’énergie totale contenue dans deux milieux : la densité et le volume doivent aussi être pris en compte.

À retenir

La toile cosmique se reconstruit avec des relevés et des modèles de mouvement. Les amas réunissent galaxies, gaz chaud et matière noire, observés par des méthodes complémentaires.

Mini-lexique

Milieu intra-amas : gaz et autres composantes situés entre les galaxies d’un amas.
Vitesse particulière : mouvement local ajouté à la tendance cosmologique moyenne.

Vérifier sa compréhension

1. Un grand vide de galaxies ne contient-il absolument aucune matière ?

2. Pourquoi une masse déduite du gaz chaud dépend-elle de son état dynamique ?

Références S18 • S21 • S23

PARTIE VI

VI

Mesurer les distances cosmiques

Construire et tester une échelle des distances.

DANS CETTE PARTIE

32 Parallaxe et première marche des distances

33 Chandelles standard et supernovae Ia

34 Les lentilles gravitationnelles

35 Cartographier l'Univers en profondeur

36 Incertitudes statistiques et désaccords

32 Parallaxe et première marche des distances

Objectifs Utiliser la parallaxe stellaire et comprendre les précautions nécessaires avec des mesures astrométriques incertaines.

Un changement de point de vue

Tendre un doigt devant un fond lointain puis fermer alternativement chaque œil montre un déplacement apparent. La parallaxe annuelle utilise le changement de position de la Terre autour du Soleil. Une étoile proche décrit un petit mouvement apparent par rapport à des références plus lointaines. L’amplitude dépend de la distance et de la direction de l’étoile.

La parallaxe p est conventionnellement associée au rayon de l’orbite terrestre, et non à son diamètre. Avec p en secondes d’arc, la distance d en parsecs vaut 1/p dans la relation usuelle des petits angles. Une parallaxe de 0,1 seconde d’arc correspond à dix parsecs. Une milliseconde d’arc vaut un millième de seconde d’arc.

$$d(pc) = 1/p('')$$

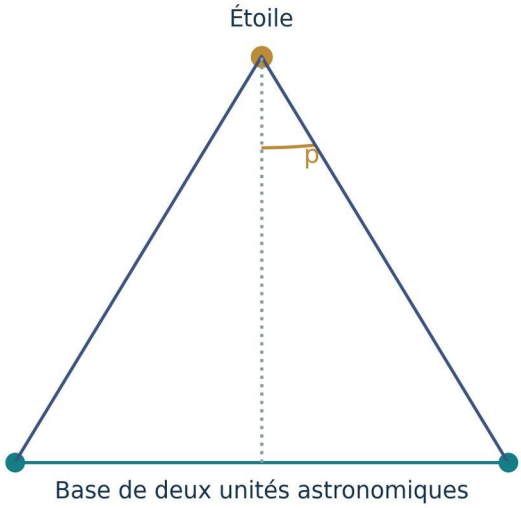


Figure 23 — Principe géométrique de la parallaxe annuelle. La base dessinée correspond à deux positions terrestres séparées de six mois ; p est le demi-angle de parallaxe dans la géométrie idéale.

Séparer plusieurs mouvements

Une étoile se déplace également dans l’espace. Son mouvement propre produit une dérive sur le ciel, tandis que la parallaxe ajoute une signature annuelle. Un compagnon non résolu peut imposer une oscillation supplémentaire. Les instruments doivent donc accumuler des observations à plusieurs dates et ajuster un modèle de mouvement.

L’astrométrie demande aussi une référence stable, une calibration géométrique et une connaissance de la position de l’observateur. Les catalogues fournissent des paramètres corrélés et des indicateurs de qualité. Réduire une ligne de catalogue à un seul nombre de parallaxe ferait perdre une partie essentielle de l’information.

Gaia et les populations stellaires

La mission Gaia a mesuré positions, parallaxes, mouvements et propriétés photométriques ou spectroscopiques pour d’immenses populations. Sa science ne se limite pas à produire

une carte : elle permet d’identifier des amas, de reconstruire des trajectoires et de tester les modèles stellaires. Les observations scientifiques se sont achevées en janvier 2025 ; les traitements et publications de catalogues possèdent leur calendrier propre.

Chaque version de données possède une documentation. Les corrections de zéro de parallaxe dépendent notamment de la couleur, de l’éclat et de la position. Une correction moyenne unique n’est pas toujours appropriée à un objet particulier. Il faut citer la version utilisée et les critères de sélection pour que l’analyse soit reproductible.

L’inversion peut devenir trompeuse

Lorsque p est bien mesuré relativement à son incertitude, 1/p fournit une distance approximative utile. Lorsque l’incertitude devient grande, l’inversion transforme une distribution presque symétrique en une distribution de distance très asymétrique. Une parallaxe ajustée négative peut même apparaître à cause du bruit ; elle ne correspond pas à une distance physique négative.

Des méthodes probabilistes utilisent alors une vraisemblance instrumentale et une information préalable explicite sur les distances possibles. Le résultat dépend de ces choix. Écarter automatiquement toutes les parallaxes négatives puis inverser les autres crée un biais de sélection. La bonne méthode dépend de la question et de la précision des données, pas d’un désir de conserver seulement des nombres rassurants.

Une erreur symétrique devient asymétrique

Prenons une parallaxe de 10 ± 1 mas dans une situation où l’inversion est acceptable à titre de démonstration. Le centre donne 100 pc. Les bornes 9 et 11 mas donnent environ 111,1 et 90,9 pc. L’intervalle en distance n’est donc pas symétrique autour de cent, même si l’intervalle en parallaxe l’était.

Lorsque l’erreur relative augmente, cette asymétrie devient plus importante et les queues de distribution demandent un traitement explicite. Une propagation linéaire $\sigma d/d \approx \sigma p/p$ reste utile dans le régime précis, mais perd progressivement son sens comme résumé complet. Il faut aussi distinguer intervalle obtenu par transformation et distribution probabiliste avec une information préalable sur les distances. L’exemple montre une propriété mathématique de l’inversion ; il ne remplace pas une analyse de catalogue lorsque la mesure est faible ou soumise à des sélections complexes.

Exemple Une parallaxe de vingt millisecondes d’arc

Avec $p = 20$ mas, soit 0,020″, on trouve 50 pc. Si l’incertitude vaut 0,2 mas et que les autres corrections sont maîtrisées, l’incertitude relative vaut environ 1 %, donnant environ 0,5 pc sur la distance dans l’approximation linéaire. Pour $p = 1 \pm 1$ mas, ce raisonnement linéaire ne fonctionne plus correctement.

À retenir

La parallaxe est une mesure géométrique fondamentale. L’inversion simple doit être réservée au régime où les incertitudes et les biais restent contrôlés.

Mini-lexique

Parallaxe annuelle : déplacement angulaire périodique dû au changement de position de l’observateur terrestre. Zéro de parallaxe : décalage systématique de la référence astrométrique.

Vérifier sa compréhension

1. Une parallaxe de 5 mas donne quelle distance approximative ?

2. Une parallaxe ajustée négative prouve-t-elle que l’objet n’existe pas ?

Références S06 • S32

33 Chandelles standard et supernovae Ia

Objectifs Construire une distance photométrique et comprendre pourquoi les indicateurs doivent être calibrés et standardisés.

Comparer puissance et éclat

Si la luminosité intrinsèque d’une source est connue, son flux permet d’estimer sa distance par la loi de dilution géométrique. En magnitudes et dans le cadre local, on écrit $m - M = 5 \log_{10}(d/10\ \mathrm{pc})$, avant ajout de l’extinction. La différence $m - M$ est le module de distance. Elle ne doit pas être confondue avec la magnitude d’une source particulière.

Une chandelle standard idéale posséderait toujours la même luminosité. Les objets réels sont plutôt des chandelles standardisables : leurs différences peuvent être partiellement corrigées avec d’autres observables. La qualité de la relation et son étalonnage déterminent la précision obtenue. Une population homogène en apparence peut cacher des effets de composition ou d’environnement.

$$m - M = 5 \log_{10}[d/(10\ pc)] + A$$

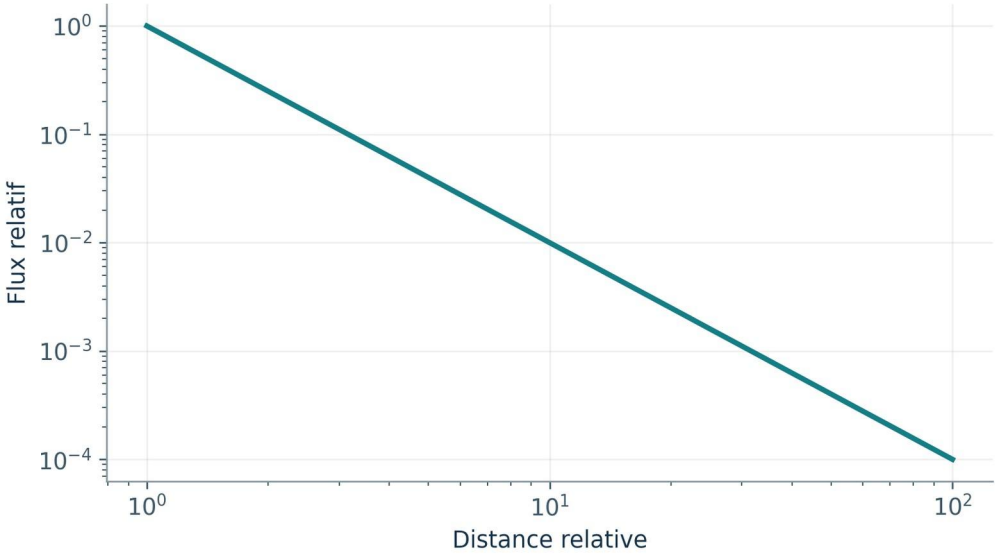


Figure 24 — Dilution du flux pour une luminosité isotrope constante sans extinction. Le graphique utilise des unités relatives et un modèle géométrique local.

Une échelle faite de marches

Les parallaxes calibrent des étoiles proches. Des céphéides ou d’autres indicateurs transfèrent cette calibration à des galaxies plus lointaines. Les galaxies contenant à la fois un indicateur calibré et une supernova permettent d’étalonner cette dernière. Les supernovae observées bien au-delà du voisinage local prolongent ensuite la relation distance–décalage.

Chaque marche ajoute des incertitudes, dont certaines sont communes à plusieurs objets. Une erreur de zéro photométrique peut se propager à toutes les distances. Multiplier le nombre de supernovae ne supprime pas automatiquement ce type d’erreur commune. L’analyse doit donc suivre les corrélations entre calibrations, et pas seulement additionner des mesures supposées indépendantes.

Standardiser les supernovae

Les supernovae la possèdent des courbes de lumière et des spectres caractéristiques. Des relations empiriques relient la

luminosité à la forme et à la couleur de leur évolution lumineuse. Après standardisation, elles deviennent de puissants indicateurs. Les corrections ne signifient pas que chaque explosion possède une luminosité strictement identique avant traitement.

La poussière, la population stellaire de l’hôte, l’échantillonnage temporel et la sélection des découvertes peuvent modifier l’échantillon. Les études testent donc les résidus après ajustement et confrontent plusieurs méthodes. Les spectres servent aussi à éviter de mélanger des événements de nature différente ou des sous-populations atypiques.

Au-delà de la géométrie locale

À grande distance cosmologique, on définit une distance de luminosité telle que $F = L/(4\pi dL^2)$. Elle incorpore les effets de l’expansion sur l’énergie des photons et leur rythme d’arrivée. Elle n’est pas égale à la distance actuelle obtenue sur une tranche cosmologique. L’évolution observée d’une supernova est également étirée d’un facteur $1 + z$.

La relation entre distance de luminosité et décalage dépend du modèle cosmologique. Les observations des supernovae ont contribué à établir une expansion accélérée, en comparaison avec d’autres contraintes. Leur portée vient d’un ensemble statistique et d’une calibration, pas d’une seule explosion lointaine regardée comme une règle lumineuse parfaite.

Vérifier une marche par une autre route

Les céphéides ne sont pas l’unique indicateur des galaxies proches. Le sommet de la branche des géantes rouges peut fournir une autre calibration. Certains systèmes binaires à éclipses donnent des contraintes géométriques ; des masers dans des disques permettent aussi des mesures par dynamique et géométrie. Ces méthodes possèdent des populations et des erreurs différentes.

L’intérêt de leur comparaison n’est pas de moyenner aveuglément tous les nombres. On recherche les points où les chaînes se rejoignent et les erreurs qu’elles partagent. Une même extinction ou une même photométrie peut réintroduire une dépendance commune. Si deux routes indépendantes convergent, la confiance augmente. Si elles divergent, la localisation du désaccord peut indiquer quelle marche examiner. L’échelle des distances ressemble ainsi davantage à un réseau de vérifications croisées qu’à une échelle unique où chaque barreau serait définitivement fixé avant de monter au suivant.

Exemple Un module de distance de quinze

Si $m - M - A = 15$, alors $d = 10\ \text{pc} \times 10^3 = 10\ 000\ \text{pc}$. Un module corrigé plus grand de cinq correspond à une distance dix fois plus grande. Une erreur d’extinction de 0,2 magnitude modifie déjà la distance d’environ 10 %, ce qui rappelle l’importance des corrections même lorsque la photométrie paraît précise.

À retenir

Les distances photométriques reposent sur une calibration et des corrections explicites. À grande distance, la notion de distance utilisée doit être nommée.

Mini-lexique

Module de distance : différence entre magnitudes apparente et absolue, avec traitement explicite de l’extinction. Standardisation : correction empirique permettant de comparer des objets intrinsèquement différents.

Vérifier sa compréhension

1. Un module de distance augmente de dix magnitudes. Par quel facteur la distance augmente-t-elle ?

2. Pourquoi mille objets partageant le même étalon ne suppriment-ils pas l’erreur de cet étalon ?

Références S17 • S21 • S42

34 Les lentilles gravitationnelles

Objectifs Comprendre les images multiples et distinguer lentilles fortes, faibles et microlentilles.

La lumière et la masse intermédiaire

Une masse située entre une source et l’observateur modifie les trajets lumineux. La source peut apparaître déplacée, déformée, amplifiée ou multipliée. Le phénomène dépend de la distribution de masse et de la géométrie des distances. Il ne nécessite pas une surface transparente comparable au verre d’une lentille optique.

Une lentille forte peut produire des arcs et plusieurs images. Un alignement particulièrement favorable donne un anneau d’Einstein, plus ou moins complet. Les images ne correspondent pas à plusieurs galaxies identiques apparues indépendamment : ce sont plusieurs chemins de lumière provenant d’une même source. Leurs temps de parcours peuvent être différents.

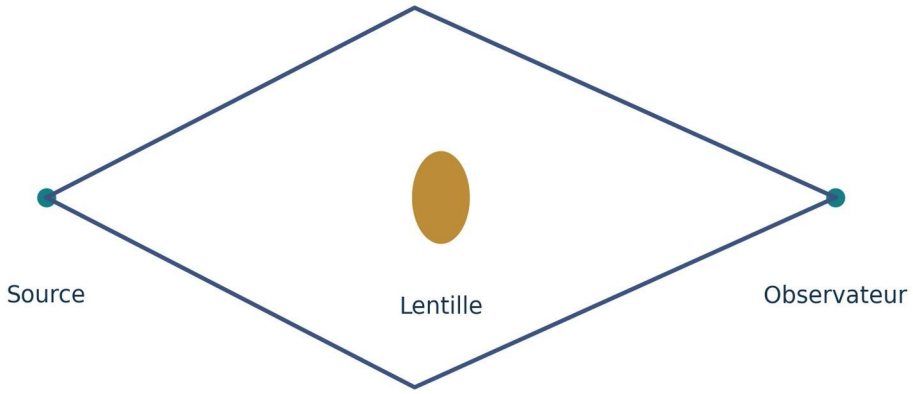


Figure 25 — Deux trajets lumineux possibles autour d’une lentille dans un schéma très simplifié. Angles, distances et courbures sont exagérés ; le dessin n’est pas une intégration de géodésiques.

Mesurer une masse

La déformation renseigne sur le potentiel gravitationnel projeté. Les lentilles permettent ainsi d’étudier de la matière lumineuse et de la matière noire. Une carte de lentille ne sépare toutefois pas automatiquement toutes les composantes. Il faut combiner les données avec des mesures de gaz, d’étoiles et de mouvement.

Des dégénérescences peuvent permettre à plusieurs distributions de masse de reproduire des images proches. Ajouter des sources à plusieurs distances, des vitesses stellaires ou des temps de retard réduit certaines ambiguïtés. Une masse annoncée doit donc être associée au modèle géométrique et aux données utilisées.

Faibles déformations et statistique

Dans le régime faible, l’effet sur une galaxie individuelle est souvent plus petit que sa forme intrinsèque inconnue. On mesure alors des corrélations d’orientation sur de grandes populations. L’optique, l’atmosphère et le détecteur peuvent eux aussi allonger les images ; leur correction devient essentielle.

La lentille faible teste la distribution statistique de la matière et sa croissance. Elle exige des estimations de distance et des sélections soigneuses. Une image allongée isolée n’est pas une preuve de lentille faible : l’information provient d’un signal collectif et de contrôles des effets instrumentaux.

Des microlentilles aux planètes

Lorsqu’une lentille stellaire passe près de la ligne de visée d’une étoile, les images séparées peuvent être trop proches pour être résolues. On détecte alors une variation d’amplification : une microlentille. Un compagnon planétaire modifie parfois la courbe. La méthode révèle des objets qui n’émettent pas eux-mêmes assez de lumière pour être vus.

Les événements ne se répètent pas toujours à une cadence exploitable. Le suivi doit être rapide et coordonné. La masse et la distance de la lentille peuvent rester partiellement dégénérées sans informations complémentaires, comme un effet de parallaxe ou une mesure astrométrique. La découverte d’un signal ne fournit pas nécessairement tous les paramètres du système.

Le temps de retard apporte une autre information

Une lentille peut reproduire correctement les positions des images tout en laissant plusieurs distributions de masse possibles. Les temps de retard d’une source variable ajoutent une information sur les trajets et le potentiel. Ils aident à contraindre certaines dégénérescences et relient le système à des distances cosmologiques, sous un modèle soigneusement défini.

La masse située le long de la ligne de visée peut aussi contribuer. Un groupe voisin, une galaxie intermédiaire ou une densité étendue modifient l’inférence même s’ils ne produisent pas seuls un arc spectaculaire. Les observations de l’environnement font donc partie de la mesure. Le suivi temporel doit reconnaître le même événement dans plusieurs images sans confondre les variations propres de la source avec des effets de microlentille. Positions, formes, vitesses et délais répondent chacun à une partie du problème ; leur combinaison rend la reconstruction plus contraignante.

✦ Exemple Une source variable vue deux fois

Deux images d’un même quasar montrent le même sursaut avec un retard de vingt jours. Ce retard reflète des différences de trajets et de potentiel gravitationnel. En combinant un modèle de lentille et la géométrie cosmologique, il peut contraindre des distances. Diviser simplement c × vingt jours ne donne pas la séparation des deux galaxies ni la distance du quasar.

À retenir

Une lentille mesure l’effet de la masse sur les trajets lumineux. Sa puissance vient de la géométrie ; ses limites viennent notamment des distributions de masse non uniques.

Mini-lexique

Cisaillement gravitationnel : composante de déformation qui étire une image selon certaines directions. Microlentille : amplification où les images multiples ne sont généralement pas résolues.

Vérifier sa compréhension

1. Les arcs d’une lentille forte sont-ils nécessairement des objets étirés physiquement ?

2. Une lentille gravitationnelle permet-elle d’observer uniquement de la masse lumineuse ?

Références S08 • S23 • S31

35 Cartographier l'Univers en profondeur

Objectifs Distinguer plusieurs distances cosmologiques et comprendre la construction d'une carte à partir de décalages spectraux.

Un angle n'est pas une profondeur

Un relevé fournit des directions et des éclats. La spectroscopie ajoute un décalage spectral, utilisé comme indicateur de profondeur sous un modèle cosmologique. À faible décalage, la relation de Hubble–Lemaître s'écrit approximativement $v = H_0 d$, avec $v \approx cz$. Les vitesses particulières introduisent une dispersion, particulièrement importante pour les objets proches.

Le paramètre de Hubble dépend du temps cosmique ; H_0 désigne sa valeur actuelle. Son unité, km/s/Mpc, exprime un taux d'expansion. La relation linéaire ne doit pas être prolongée aveuglément à tout z. À grande distance, il faut intégrer l'histoire de l'expansion et préciser la grandeur de distance calculée.

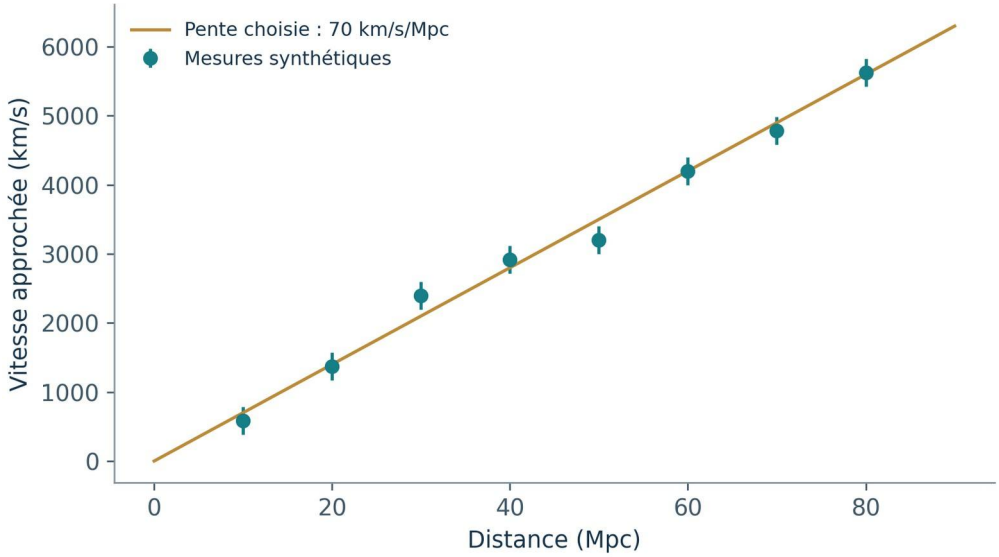


Figure 26 — Relation linéaire construite avec une pente choisie de 70 km/s/Mpc et des dispersions synthétiques. Aucun point ne représente une galaxie observée ; ce tracé illustre une méthode.

Plusieurs distances correctes

La distance comobile retire l’évolution du facteur d’échelle ; la distance propre à une époque donnée la réintroduit. La distance de luminosité est définie par le flux. La distance angulaire relie une dimension transverse à un angle. Le temps de regard en arrière est une durée, obtenue en suivant la propagation lumineuse.

Ces grandeurs peuvent différer considérablement à grand z. Dans une cosmologie homogène usuelle, la distance de luminosité et la distance angulaire sont reliées par $dL = (1 + z)^2 dA$, sous les hypothèses de propagation pertinentes. Deux publications citant des « distances » différentes peuvent donc être cohérentes si leurs définitions diffèrent.

Observer une coquille de temps

Une carte profonde rassemble des objets observés à des époques différentes. Elle ne constitue pas une photographie simultanée du cosmos actuel. Reconstituer l’état d’une région au même temps cosmique demande un modèle de son évolution. Les animations qui montrent toutes les galaxies « maintenant » doivent donc annoncer qu’elles reconstruisent ou simulent cette situation.

L’expansion modifie aussi les durées et les longueurs d’onde reçues. Une source à $z = 2$ possède un facteur $1 + z$ égal à trois. Une émission ultraviolette au repos peut être détectée dans le visible ; une variation de dix jours dans le référentiel de la source s’étale sur trente jours pour nous, dans le cadre cosmologique standard.

Les déformations des cartes

Dans un amas, les galaxies ont des vitesses locales importantes. Leur décalage spectral contient ce mouvement en plus de l’expansion moyenne. Si on convertit tout en distance, l’amas

peut apparaître artificiellement allongé selon la ligne de visée. À d’autres échelles, les mouvements cohérents créent d’autres déformations statistiques.

Les relevés utilisent ces signatures pour étudier la croissance des structures, mais doivent aussi gérer les régions non observées, les limites en éclat et les échecs de mesure. Des catalogues aléatoires simulant la sélection aident à distinguer une structure physique d’un motif produit par le programme d’observation.

Un exemple de deux distances

Dans les modèles cosmologiques usuels où la relation de réciprocité s’applique, une source à z = 1 possède dL = 4dA. Si une analyse fournit une distance angulaire de 1,7 milliard de parsecs, la distance de luminosité correspondante vaut 6,8 milliards de parsecs. Les deux nombres peuvent donc différer d’un facteur quatre sans contradiction.

Cela ne signifie pas que la source ait deux positions physiques différentes. Les définitions répondent à deux expériences : comparer une dimension à un angle et comparer une puissance à un flux. Le facteur 1 + z intervient dans l’énergie des photons et dans le rythme de réception, tandis que la géométrie fixe l’angle. Une publication claire nomme sa distance dès la première utilisation. Pour une activité, on peut écrire les symboles dA, dL et le temps de regard en arrière dans des colonnes séparées avant d’introduire une valeur numérique.

✦ Exemple Une galaxie à 100 Mpc dans le régime proche

Avec H_0 choisi à 70 km/s/Mpc, on obtient v ≈ 7 000 km/s et z ≈ 0,023. Une vitesse particulière de 300 km/s représente déjà environ 4 % de cette tendance. À 10 Mpc, la même vitesse particulière devient une fraction beaucoup plus grande. Les

galaxies les plus proches ne sont donc pas forcément les meilleures règles pour mesurer l’expansion moyenne.

À retenir

Une carte cosmologique associe coordonnées observées, modèle d’expansion et sélection du relevé. Toute distance doit être définie avant d’être comparée.

Mini-lexique

Distance comobile : distance séparant la géométrie du changement du facteur d’échelle. Temps de regard en arrière : intervalle entre émission et réception dans la chronologie cosmologique choisie.

Vérifier sa compréhension

1. Une raie émise à 200 nm par une source de z = 2 est reçue à quelle longueur d’onde ?

2. Pourquoi une carte en décalage spectral peut-elle allonger un amas ?

Références S02 • S21 • S22

36 Incertitudes statistiques et désaccords

Objectifs Propager une incertitude simple, reconnaître une erreur commune et interpréter une tension entre méthodes.

Un résultat est une distribution

Une valeur mesurée n'est pas un point absolument exact. On lui associe une incertitude qui résume une dispersion ou un intervalle selon une méthode définie. Un écart type ne possède pas la même interprétation pour toutes les distributions. Une borne supérieure et une détection ne doivent pas être présentées de la même manière.

Pour un bruit gaussien idéal, environ 68 % des résultats se situent à moins d'un écart type de la moyenne. Cette propriété ne garantit pas que tous les défauts instrumentaux suivent une loi normale. Une mauvaise calibration peut déplacer tout l'échantillon sans produire une grande dispersion interne.

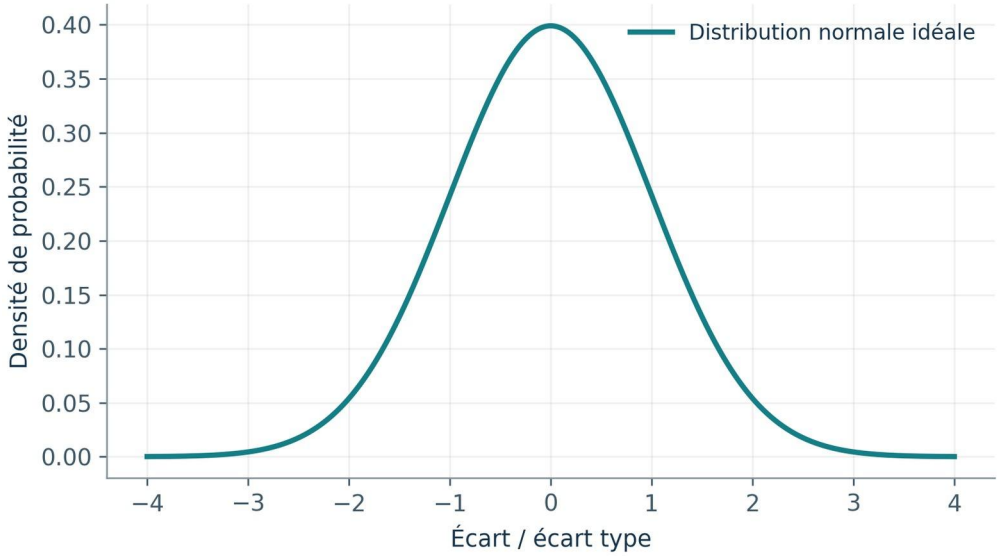


Figure 27 — Distribution normale idéale en unités d'écart type. Elle illustre une convention statistique ; les erreurs astronomiques réelles peuvent être asymétriques ou corrélées.

Répéter ne résout pas tout

Des erreurs aléatoires indépendantes diminuent souvent comme $1/\sqrt{N}$ lorsque l’on moyenne N mesures comparables. Les erreurs communes ne suivent pas cette règle. Si toutes les températures utilisent un étalon mal calibré, leur moyenne devient très précise autour d’une valeur décalée. Il faut tester l’étalon ou utiliser une méthode indépendante.

La corrélation apparaît aussi entre paramètres. Dans un ajustement de spectre, température et extinction peuvent se compenser partiellement. Annoncer deux incertitudes séparées sans leur relation peut rendre la combinaison avec d’autres données incorrecte. Les matrices de covariance et les échantillons de distributions conjointes servent à conserver cette information.

Comparer deux résultats

Pour deux mesures indépendantes gaussiennes d’une même grandeur, l’incertitude de leur différence vaut $\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$. Le rapport de la différence à cette quantité donne une première échelle de tension. Si les mesures partagent des données ou des calibrations, l’indépendance n’est plus assurée et une covariance doit être incluse.

Une tension persistante peut révéler une erreur sous-estimée, un modèle incomplet ou une nouvelle physique. Le nombre de « sigma » ne choisit pas automatiquement l’explication. Il faut tester les populations, les sélections et les méthodes alternatives. Un seuil statistique ne remplace ni la reproduction ni l’examen des hypothèses.

Le cas de l’expansion

Les paramètres déduits du fond cosmologique sous un modèle ΛCDM peuvent être comparés aux mesures locales de l’échelle des distances. Le résultat de Planck 2018 donnant $H_0 \approx 67{,}4 \pm 0{,}5$ km/s/Mpc reste une référence précisément identifiée, dépendante du modèle. D’autres méthodes peuvent donner des valeurs plus élevées ; les chiffres et les tensions évoluent avec les analyses.

Ce livre utilise des valeurs arrondies pour les exercices et cite les jeux de données lorsqu’il présente une mesure. Il faut distinguer l’enseignement du mécanisme et la compétition entre dernières estimations. L’objectif scientifique est de comprendre si un ensemble cohérent de données et d’hypothèses rend compte des observations, pas de choisir le nombre le plus récent sans lire sa méthode.

Un bon ajustement peut cacher de mauvais résidus

Après avoir ajusté un modèle, tracer les résidus selon le temps, l’éclat ou la position peut révéler une structure oubliée. Une moyenne proche de zéro n’exclut pas une dérive alternée ni une dépendance de couleur. Un nombre global comme le χ^2 résume une partie de l’accord, mais ses conditions supposent notamment un modèle d’erreurs défini.

Des valeurs extrêmes peuvent venir d’un défaut ou d’un phénomène réel. Les supprimer exige un critère annoncé ; les garder sans examen peut également biaiser le résultat. Des méthodes robustes et des comparaisons de sous-échantillons aident à tester la sensibilité des conclusions. Le contrôle porte donc autant sur les formes des écarts que sur la proximité des paramètres. Si la conclusion change complètement après le retrait d’un seul point mal compris, cette fragilité doit être décrite et une observation supplémentaire devient prioritaire.

Exemple Deux mesures synthétiques

Deux équipes fictives trouvent 70 ± 2 et 74 ± 2 pour la même grandeur, avec erreurs indépendantes. La différence de quatre divisée par √8 donne environ 1,4 écart type. Si leurs incertitudes étaient de 0,5 chacune, la tension atteindrait environ 5,7 écarts types. La même différence absolue peut donc avoir des significations très différentes.

À retenir

Précision interne et exactitude ne sont pas synonymes. Une tension n’est interprétable qu’avec les distributions, les corrélations et les hypothèses.

Mini-lexique

Covariance : mesure d’une variation conjointe de deux grandeurs. Erreur systématique : effet qui déplace ou déforme les résultats de manière organisée, souvent commune.

Vérifier sa compréhension

1. Pour diminuer par deux une incertitude aléatoire idéale sur une moyenne, combien de mesures indépendantes supplémentaires au total faut-il ?

2. Un résultat à cinq écarts types établit-il automatiquement le mécanisme proposé pour l’expliquer ?

Références S02 • S06 • S21

PARTIE VII

VII

L’histoire de l’Univers

Expansion, rayonnement fossile et composantes invisibles.

DANS CETTE PARTIE

37 L’expansion et la géométrie cosmique

38 Le Big Bang et l’Univers primordial

39 Le fond diffus cosmologique

40 La matière noire

41 L’énergie noire et les futurs possibles

42 Inflation et limites du modèle cosmologique

37 L’expansion et la géométrie cosmique

Objectifs Comprendre le facteur d’échelle et séparer expansion moyenne, mouvements locaux et géométrie globale.

Une description à grande échelle

La cosmologie standard décrit l’Univers comme statistiquement homogène et isotrope à des échelles suffisamment grandes. Homogène signifie qu’aucune région n’est privilégiée en moyenne ; isotrope signifie qu’aucune direction ne l’est. Les galaxies, les amas et les vides montrent des écarts locaux importants. L’hypothèse porte donc sur une description moyennée, pas sur une matière parfaitement uniforme partout.

Le facteur d’échelle a(t) mesure l’évolution des distances entre observateurs suivant l’expansion moyenne. On choisit habituellement a = 1 aujourd’hui. Pour un signal cosmologique, 1 + z = 1/a à l’émission avec cette convention. Les galaxies liées entre elles ne sont pas obligées de suivre cette évolution moyenne à toutes les échelles.

$$1 + z = a_{aujourd'hui} / a_{émission}$$

Sans centre dans l’espace

Dans un modèle homogène, chaque observateur comobile voit les grandes distances évoluer selon la même loi. Il n’est pas nécessaire d’identifier une galaxie centrale d’où les autres seraient parties. L’analogie d’une pâte qui gonfle aide à comprendre des séparations croissantes, mais elle possède un extérieur et une cuisine qui n’appartiennent pas au modèle cosmologique.

Le modèle ne demande pas que les atomes, la Terre et les systèmes planétaires s’étirent selon le facteur d’échelle. Leurs interactions locales dominent. Une variation de distance

cosmologique à un taux supérieur à c ne décrit pas le passage local d’une galaxie devant un observateur à cette vitesse. La causalité se traite dans l’espace-temps complet.

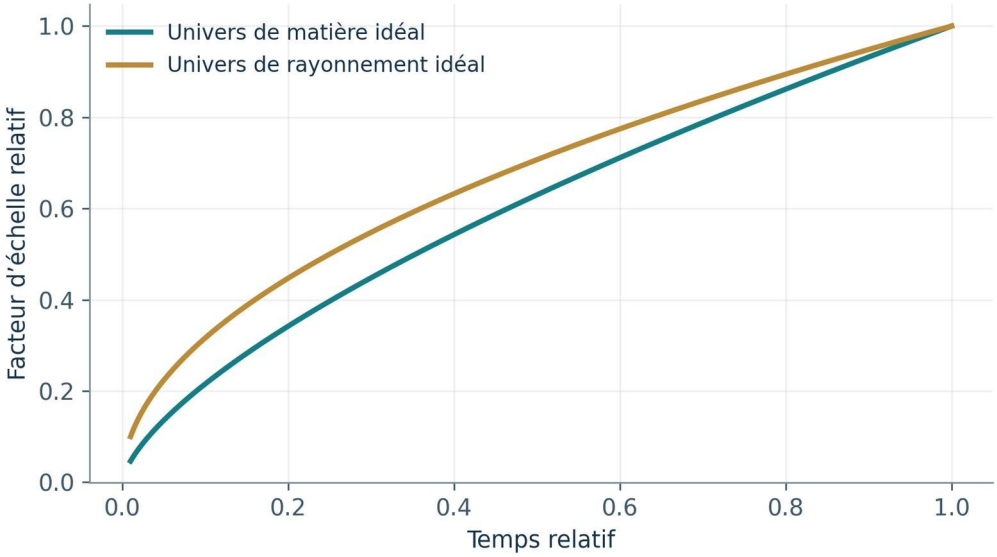


Figure 28 — Deux solutions idéales du facteur d’échelle : univers dominé par la matière ou par le rayonnement, sans courbure ni énergie noire. Elles sont normalisées pour comparer les tendances et ne représentent pas toute l’histoire réelle.

Courbure et topologie

Les géométries spatiales peuvent présenter une courbure positive, nulle ou négative dans les modèles homogènes simples. La somme des angles d’un grand triangle géodésique et les relations entre distances y diffèrent. Les observations contraignent une courbure proche de zéro dans le cadre des modèles testés, avec une précision dépendant des données associées.

Une géométrie localement plate n’impose pas que l’espace entier soit infini. La topologie, qui décrit les connexions globales, constitue une question distincte. De même, une région observable finie n’établit pas que tout l’Univers soit fini. Les données disponibles portent sur notre domaine accessible et ne

déterminent pas automatiquement toutes les propriétés globales.

Ce qui règle l’expansion

Les équations de Friedmann relient l’évolution du facteur d’échelle au contenu en énergie, à la pression et à la courbure. La matière, le rayonnement et une constante cosmologique ne se diluent pas de la même manière. Leur importance relative change donc au cours du temps, même sans création arbitraire de nouvelles composantes.

La pression intervient dans la gravitation relativiste. Une accélération cosmique ne se décrit pas simplement comme une explosion initiale continuant par inertie. Les observations de distances et de croissance des structures testent l’histoire de l’expansion ; elles ne photographient pas directement une force répulsive entre deux galaxies choisies.

Le temps de Hubble et l’âge

L’inverse de H_0 fournit une durée caractéristique. Pour 70 km/s/Mpc, convertir le mégaparsec en kilomètres donne $1/H_0 \approx$ 14 milliards d’années. Cette durée n’est égale à l’âge de l’Univers que dans certaines histoires d’expansion particulières. La valeur actuelle du taux ne décrit pas ce qu’il a été à toutes les époques.

Calculer l’âge demande d’intégrer l’évolution du facteur d’échelle depuis les phases initiales du modèle. La matière, le rayonnement, la courbure et l’énergie noire influencent cette intégrale. Un âge voisin de 13,8 milliards d’années dans ΛCDM n’est donc pas obtenu en lisant simplement la vitesse d’une galaxie et en divisant sa distance par cette vitesse actuelle. Le temps de Hubble reste un contrôle d’ordre de grandeur précieux. Il aide à repérer une unité incorrecte tout en rappelant que la

chronologie dépend d’une dynamique, pas seulement d’un instantané.

Exemple Un facteur d’échelle de un quart

Pour une source émettant lorsque a = 0,25, on obtient 1 + z = 4, donc z = 3. Une raie émise à 150 nm est reçue à 600 nm. Cet étirement spectral est cohérent avec une période observée quatre fois plus longue pour une variation intrinsèque donnée. Le calcul ne donne pas encore une distance : l’histoire de a(t) doit être précisée.

À retenir

L’expansion est une évolution géométrique moyenne. Courbure, taille totale, horizon observable et dynamique locale sont des notions distinctes.

Mini-lexique

Comobile : suivant l’expansion moyenne après séparation des mouvements locaux.
Facteur d’échelle : fonction décrivant l’évolution relative des distances cosmologiques.

Vérifier sa compréhension

1. Quelle valeur de a correspond à z = 1 si a vaut un aujourd’hui ?

2. Une mesure de courbure proche de zéro prouve-t-elle que l’Univers entier est infini ?

Références S02 • S08 • S22

38 Le Big Bang et l’Univers primordial

Objectifs Identifier les observations qui soutiennent une phase ancienne chaude et dense et reconnaître les limites des extrapolations.

Un modèle d’évolution

Le modèle du Big Bang chaud décrit un Univers ayant connu des états plus denses et plus chauds. Il relie l’expansion, le fond cosmologique et les abondances des éléments légers. Le mot n’impose pas une explosion de matière dans un espace préexistant vide. La théorie porte sur l’évolution de l’espace-temps et de son contenu.

Remonter les équations classiques vers une densité extrême conduit à des limites où la gravitation quantique pourrait être nécessaire. L’instant mathématique de singularité n’est pas une observation directe de la création de tout ce qui existe. Le succès de la description chaude sur de longues périodes ne valide pas automatiquement une extrapolation jusqu’à une origine absolue.

Refroidir et changer de régime

Dans les phases précoces, des réactions rapides maintiennent de nombreuses espèces en équilibre. L’expansion réduit les densités et modifie les températures ; certaines réactions deviennent trop lentes pour suivre. Des abondances se figent, des particules se découplent et les espèces dominantes changent. Comparer vitesse de réaction et vitesse d’expansion devient un outil essentiel.

Les quarks s’organisent en hadrons lors du refroidissement. Des protons et neutrons participent ensuite à la nucléosynthèse primordiale. Les détails les plus précoces dépendent de la

physique des particules extrapolée à haute énergie. Il faut distinguer les phases bien reliées aux expériences et aux observations des propositions plus spéculatives sur des énergies encore inaccessibles.

Figure 29 — Repères de l’histoire cosmique. Les intervalles graphiques ne sont pas proportionnels aux durées ; les premières phases non établies ne sont pas dessinées comme des faits observés.

Les éléments légers

Durant les premières minutes, des réactions forment surtout de l’hélium, avec du deutérium et des traces d’autres noyaux légers. L’hydrogène reste majoritaire en nombre de noyaux. Les abondances dépendent notamment de la densité de matière ordinaire et des conditions d’expansion. Le deutérium est particulièrement utile comme test de cette densité.

Le lithium présente un désaccord connu entre certaines prédictions et les abondances déduites d’étoiles anciennes. Son interprétation peut faire intervenir des processus stellaires, des erreurs de détermination ou une physique supplémentaire. Un problème sur un indicateur ne doit être ni caché ni transformé en annulation automatique de toutes les autres contraintes du modèle.

De l’opacité à la transparence

Pendant longtemps, les photons diffusent fréquemment sur les électrons libres. Lorsque le plasma refroidit suffisamment pour former des atomes neutres en abondance, les photons se propagent beaucoup plus librement. Le fond cosmologique porte l’information de cette époque, environ 380 000 ans après le début de la phase d’expansion décrite par le modèle.

Les premières étoiles apparaissent plus tard et participent à la réionisation du gaz. Leur formation ne se déroule pas au même instant partout. Les galaxies primitives et les signatures du gaz permettent d’étudier cette transition. L’histoire cosmique est donc une succession de processus avec des durées et des distributions, pas une liste de commutateurs universels instantanés.

Une température pour chaque composante

Le rayonnement électromagnétique, les neutrinos et la matière ne gardent pas nécessairement une température commune pendant toute l’expansion. Lorsqu’une espèce se découple, les échanges ne maintiennent plus le même équilibre. Des transformations d’autres espèces peuvent ensuite chauffer une composante plus qu’une autre. La température d’un fond ne résume donc pas automatiquement tout le contenu cosmique.

Dans le scénario thermique standard simplifié, les neutrinos relictes possèdent aujourd’hui une température caractéristique attendue d’environ 1,95 K, inférieure à celle des photons. Cette valeur est une conséquence de l’histoire de découplage et de redistribution d’entropie, avec des corrections dans les calculs précis. Elle ne décrit pas les neutrinos de haute énergie détectés par IceCube ni ceux produits actuellement par le Soleil. Le même nom de particule peut recouvrir des populations d’origines et d’énergies extrêmement différentes, qu’il faut séparer avant de comparer des nombres.

Exemple La température avant l’émission du fond

Pour un rayonnement thermique évoluant adiabatiquement, T varie approximativement comme 1/a. Avec $T_0 \approx 2{,}725$ K et $z \approx 1\,100$, on obtient environ 3 000 K. Ce calcul restitue un ordre de grandeur associé au découplage. La formation des atomes dépend aussi de la densité et de la distribution des photons, pas seulement d’un seuil d’énergie isolé.

À retenir

Le Big Bang chaud explique une évolution ancienne testée par plusieurs observations. La nature d’une origine ultime demeure une question différente.

Mini-lexique

Nucléosynthèse primordiale : formation des premiers noyaux légers dans l’Univers chaud. Découplage : époque où une interaction devient trop rare pour maintenir deux composantes en équilibre.

Vérifier sa compréhension

1. Les premiers atomes neutres se sont-ils formés au même moment que les premiers noyaux d’hélium ?

2. Le modèle du Big Bang chaud décrit-il nécessairement ce qui se passait « avant » toute expansion ?

Références S02 • S22 • S43 • S59

39 Le fond diffus cosmologique

Objectifs Comprendre le spectre et les anisotropies du fond cosmologique et distinguer une carte traitée d'une photographie en couleurs visibles.

Une lumière ancienne refroidie

Le fond diffus cosmologique est un rayonnement presque thermique reçu de toutes les directions. Sa température moyenne vaut environ 2,725 K. L'expansion a étiré les longueurs d'onde depuis l'époque où le plasma est devenu transparent. Les photons ne sont pas devenus vieux parce qu'ils auraient perdu une vitesse : ils se déplacent toujours à c dans le vide.

Le spectre de corps noir constitue une contrainte forte sur l'histoire thermique. Une simple addition de lumières stellaires voisines ne reproduit pas naturellement cet ensemble de propriétés. Les missions COBE, WMAP et Planck ont mesuré différents aspects du rayonnement, avec des instruments et des objectifs complémentaires.

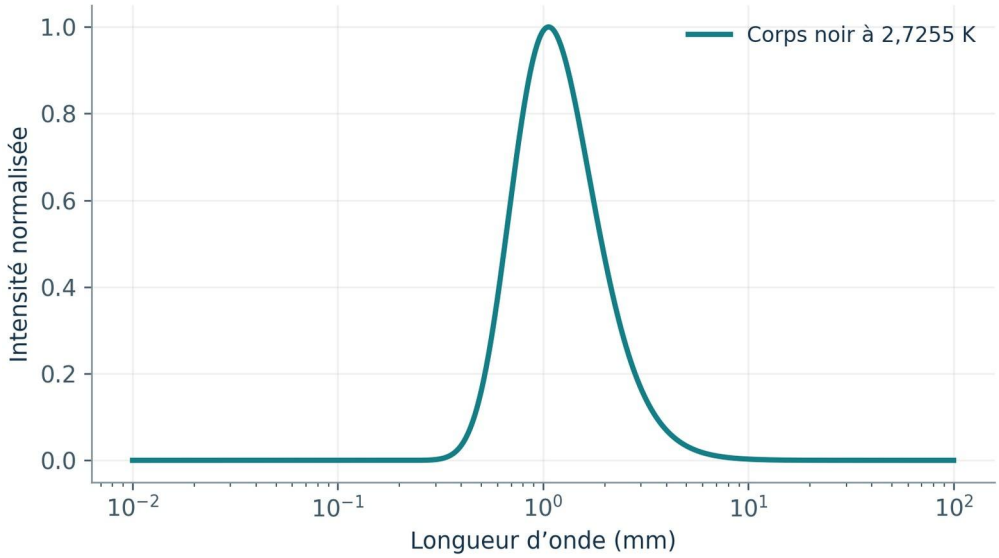


Figure 30 — Spectre de Planck calculé à 2,7255 K, normalisé à son maximum. Ce graphique est une courbe théorique de référence et non la reproduction de mesures instrumentales.

Lire les petites variations

Les cartes usuelles montrent des écarts minuscules après retrait de la moyenne et de certaines grandes contributions. Le contraste des couleurs est amplifié pour rendre les variations visibles. Le rouge d’une carte signifie souvent une température légèrement supérieure à la moyenne, pas une zone rouge à l’œil ni une galaxie brûlante.

Le mouvement de l’observateur produit notamment un dipôle. Notre Galaxie ajoute des émissions de poussières, de gaz et de particules. Il faut séparer ces avant-plans grâce à plusieurs fréquences et à des modèles. Les masques, les faisceaux instrumentaux et les méthodes de séparation contribuent à l’incertitude finale.

Des oscillations avant la transparence

Avant le découplage, photons et matière ordinaire se comportent comme un fluide couplé à grande échelle. La gravitation favorise les concentrations ; la pression du rayonnement s’y oppose et crée des oscillations. Les tailles angulaires et les amplitudes statistiques de ces motifs gardent la trace du contenu et de la géométrie de l’Univers.

Le spectre de puissance angulaire résume la force des fluctuations selon leur taille. Ses pics ne correspondent pas à des montagnes matérielles sur une surface solide. Ils expriment des corrélations sur le ciel. Ajuster un modèle à ces données contraint plusieurs paramètres ensemble, ce qui explique les dépendances et les dégénérescences entre paramètres cosmologiques.

Polarisation et lentillage

La diffusion du rayonnement produit une polarisation liée aux conditions locales. Certaines structures de polarisation sont étudiées pour rechercher des signatures de phénomènes

primordiaux, tout en contrôlant les poussières galactiques. Une signature compatible avec une hypothèse ne doit pas être annoncée comme une détection établie avant les contrôles nécessaires.

La matière rencontrée après l’émission dévie légèrement les trajets et lentille le fond cosmologique. Cet effet apporte une information sur les structures intermédiaires. Le fond n’est donc pas seulement un message figé d’une époque : sa propagation traverse un Univers qui continue d’évoluer, et plusieurs processus modifient ce que nous recevons.

Une limite due à un seul ciel

Même un instrument idéal ne disposerait que d’une réalisation observable du ciel. Pour certaines grandes échelles, le nombre de modes indépendants est petit. L’incertitude statistique appelée variance cosmique ne disparaît donc pas simplement en construisant un détecteur plus sensible. Elle reflète l’information disponible dans le domaine observé.

Dans le cas idéal d’un champ gaussien sur tout le ciel, une incertitude relative de puissance est de l’ordre de $\sqrt{[2/(2\ell + 1)]}$ pour un multipôle ℓ. Elle vaut environ 63 % pour $\ell = 2$, contre environ 7 % pour $\ell = 200$. Masques, bruit et avant-plans compliquent le cas réel. Ce repère explique pourquoi un motif inhabituel à très grande échelle doit être évalué avec prudence. Le fait qu’une carte ait des millions de pixels ne crée pas des millions d’informations indépendantes sur chaque grande structure.

✦ Exemple Une variation relative de dix pour cent de millième

Une fluctuation de 10^{-5} de la température moyenne correspond à environ 27 microkelvins. Elle est minuscule par rapport à 2,725 K, mais porte une information cosmologique mesurable. La

représentation en couleurs doit amplifier cet écart ; elle ne doit pas être utilisée pour affirmer que deux régions de la carte ont des températures absolues radicalement différentes.

À retenir

Le fond cosmologique associe un spectre thermique et de petites corrélations spatiales. Les paramètres déduits dépendent d’une séparation des avant-plans et d’un modèle physique.

Mini-lexique

Anisotropie : variation d’une propriété selon la direction. Spectre de puissance angulaire : description statistique des amplitudes selon les tailles apparentes.

Vérifier sa compréhension

1. Une zone rouge d’une carte du fond est-elle une étoile rouge géante ?

2. Pourquoi observer plusieurs fréquences aide-t-il à isoler le fond cosmologique ?

Références S02 • S22 • S44 • S59

40 La matière noire

Objectifs Identifier les indices gravitationnels d’une composante invisible et distinguer sa mise en évidence de l’identification de sa nature.

Une masse qui ne suit pas la lumière

Les mouvements dans de nombreuses galaxies et dans les amas ne s’expliquent pas par la seule matière lumineuse recensée sous les lois gravitationnelles usuelles. Les courbes de rotation, les dispersions de vitesse, les lentilles et la cosmologie conduisent à une composante supplémentaire. Le terme « matière noire » désigne cette composante qui ne rayonne pas comme les étoiles et le gaz ordinaires.

Une courbe de rotation presque plate implique, dans une approximation sphérique, une masse enfermée qui augmente encore avec le rayon. Elle ne ressemble pas à une masse totalement concentrée au centre. Mais une seule courbe ne suffit pas à identifier une particule : il faut modéliser le disque, le gaz, les mouvements et la géométrie.

Des observations indépendantes

Les lentilles cartographient l’effet gravitationnel de la masse projetée. Dans certains amas en collision, la distribution gravitationnelle ne suit pas exactement le gaz chaud, qui a subi des interactions hydrodynamiques. Le fond cosmologique et la croissance des structures ajoutent des contraintes à l’échelle de l’Univers.

L’intérêt vient de la combinaison. Une explication proposée doit rendre compte de plusieurs régimes et non seulement d’une galaxie choisie. Des théories modifiant la gravitation sont également étudiées ; elles doivent affronter les mêmes ensembles d’observations et leurs extensions relativistes.

Opposer une caricature de matière invisible à une caricature de gravitation modifiée n’aide pas à évaluer les modèles.

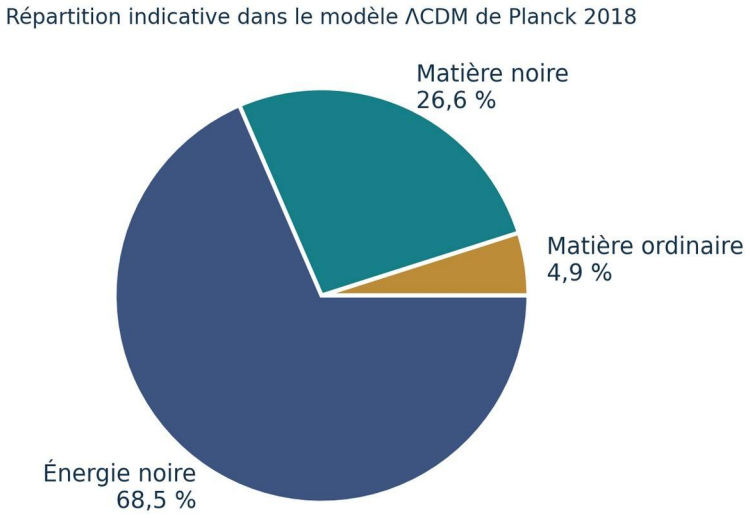


Figure 31 — Répartition indicative de la densité d’énergie actuelle dans le modèle ΛCDM associé aux paramètres de Planck 2018. Les proportions sont arrondies et dépendantes du modèle ; elles ne donnent pas la composition locale du Système solaire.

Ce qu’elle pourrait être

La matière noire froide du modèle standard désigne une composante se déplaçant assez lentement lors de la formation des structures pertinentes. « Froide » décrit ici un régime dynamique, pas nécessairement un thermomètre ordinaire. De nombreuses particules candidates sont envisagées, ainsi que des scénarios plus complexes.

Les neutrinos connus contribuent à la densité cosmique, mais ne peuvent fournir à eux seuls toute la matière noire froide demandée par les observations. La matière ordinaire sombre — planètes, gaz peu lumineux ou résidus — existe aussi, mais les contraintes cosmologiques limitent sa part totale. Une composante invisible en lumière visible n’est donc pas automatiquement la matière noire non baryonique recherchée.

Chercher une interaction

Les recherches directes tentent de mesurer de rares interactions dans des détecteurs protégés des fonds parasites. Les recherches indirectes cherchent des produits possibles d’annihilation ou de désintégration. Les accélérateurs testent des productions de particules nouvelles via des bilans et des signatures. Chaque stratégie couvre des masses et des interactions déterminées.

Une non-détection exclut une région de paramètres pour un modèle donné ; elle ne supprime pas toutes les formes possibles de matière noire. Un excès inexpliqué n’établit pas non plus automatiquement son origine exotique. La nature microscopique de la composante reste à confirmer, alors que les raisons gravitationnelles de la rechercher sont multiples.

Une fraction cosmique n’est pas une fraction locale

Avec des fractions indicatives $\Omega b \approx 0{,}049$ et $\Omega m \approx 0{,}315$ dans le modèle de référence, la matière ordinaire représente environ $0{,}049/0{,}315 \approx 15{,}6$ % de toute la matière. Le reste de la matière est alors principalement la composante noire. Ces proportions diffèrent de celles du diagramme incluant aussi l’énergie noire dans le total de densité d’énergie.

Elles ne donnent pas la composition d’une étoile ni de notre pièce. La matière ordinaire refroidit, se concentre et forme des objets denses ; la composante noire froide se distribue autrement dans les halos. Une région locale peut donc être très dominée par les baryons, même si leur fraction cosmique moyenne est faible. Il faut annoncer le dénominateur d’un pourcentage : matière seule, énergie totale du modèle, masse d’un halo ou masse d’un objet. Sans cette définition, deux chiffres corrects peuvent paraître incompatibles.

Exemple Une masse dynamique approchée

Pour une vitesse circulaire de 200 km/s à 20 kpc, l’estimation sphérique $M(<r) \approx v^2 r/G$ donne environ $1{,}9 \times 10^{11}$ masses solaires. Ce calcul ne sépare pas étoiles, gaz et matière noire, et la forme réelle du disque demande un traitement plus fin. Il montre comment un mouvement devient une contrainte sur une masse totale.

À retenir

La matière noire est motivée par plusieurs observations convergentes. Sa nature n’est pas établie par le seul succès d’un modèle gravitationnel global.

Mini-lexique

Matière baryonique : matière ordinaire dont la masse provient principalement des protons et neutrons. Recherche directe : tentative de détection des interactions d’une composante candidate dans un instrument.

Vérifier sa compréhension

1. Toute matière qui n’émet pas de lumière visible appartient-elle à la composante noire non baryonique ?

2. Une non-détection dans un détecteur exclut-elle tous les candidats imaginables ?

Références S02 • S23 • S09

41 L’énergie noire et les futurs possibles

Objectifs Comprendre le sens d’une expansion accélérée et distinguer constante cosmologique et modèles dynamiques.

Une accélération reconstruite

Les relations entre distances et décalages spectraux indiquent que l’expansion récente ne suit pas l’histoire attendue d’un Univers rempli seulement de matière ordinaire et noire sous les hypothèses usuelles. Les supernovae, les oscillations acoustiques baryoniques et le fond cosmologique contribuent à cette reconstruction. Le terme « énergie noire » regroupe les descriptions proposées de la composante ou du mécanisme associé.

Il ne désigne pas un nuage de matière noire particulièrement énergétique. Matière noire et énergie noire jouent des rôles différents dans le modèle. La première se regroupe et favorise la formation des structures ; une constante cosmologique conserve une densité uniforme dans la description homogène. Les deux inconnues ne doivent pas être fusionnées en une seule substance.

La constante cosmologique

Une constante cosmologique Λ constitue l’option la plus simple du modèle ΛCDM. Son équation d’état correspond à une pression $p = -\rho c^2$, soit $w = -1$. Dans la relativité générale, cette pression et cette densité conduisent à un comportement cosmologique particulier. Le vocabulaire de « pression négative » ne décrit pas une pompe à vide ordinaire.

Associer Λ à une énergie du vide quantique soulève un problème théorique majeur : les estimations naïves et la valeur cosmologique ne s’accordent pas naturellement. Ce désaccord

ne se résout pas en déclarant que le vide est simplement vide. Il motive des recherches sur les champs, la gravitation et la manière de relier les descriptions.

Modèle	Hypothèse simplifiée	Conséquence à tester
Constante cosmologique	$w = -1$, densité constante	Histoire d’expansion déterminée
Champ dynamique	w peut évoluer	Distances et croissance modifiées
Gravitation modifiée	Équations différentes	Lien entre expansion, lumière et structures

Les indices d’une évolution

Des analyses de DESI combinées à d’autres données ont signalé des préférences pour certains modèles d’énergie noire variable. En juillet 2026, de nouvelles analyses de la forêt Lyman-alpha ont affiné les contraintes. Le niveau de préférence dépend des jeux associés, des modèles et du traitement statistique ; il ne constitue pas une découverte définitive d’une nouvelle substance.

La méthode correcte consiste à confronter les mêmes hypothèses à plusieurs observables et à annoncer la dépendance aux données. Une préférence statistique dans une extension de modèle ne garantit pas que cette extension décrive un champ physique réalisable. Les mesures futures et les validations indépendantes doivent déterminer si le signal persiste.

Prévoir sous condition

Si une constante cosmologique positive domine durablement, l’expansion accélérée se poursuit et les régions non liées deviennent de plus en plus isolées causalement. Les systèmes gravitationnellement liés ne se désassemblent pas automatiquement. D’autres évolutions de w peuvent conduire à

des futurs différents, mais leur possibilité dépend du modèle physique choisi.

Le Big Rip, la recontraction ou d’autres scénarios ne sont pas des destins établis. Les données contraignent le passé et le présent accessibles ; extrapoler sur des durées immenses suppose la stabilité des lois et des composantes. Un chapitre sur le futur doit donc formuler des conditions plutôt qu’annoncer une chronologie inévitable.

La dilution du rayonnement ajoute un facteur

La matière non relativiste conservée se dilue comme a^{-3} parce que le volume augmente. Le rayonnement se dilue comme a^{-4} dans le cadre homogène adiabatique : le nombre de photons par volume diminue comme a^{-3} et l’énergie de chaque photon diminue comme a^{-1} avec l’étirement des longueurs d’onde. Ce facteur supplémentaire explique pourquoi le rayonnement dominait davantage dans le passé.

Demander « où va l’énergie perdue par chaque photon ? » suppose parfois une énergie globale conservée définie comme dans un laboratoire statique. Dans un espace-temps cosmologique général, cette notion n’existe pas toujours sous la même forme. Les équations locales de conservation restent respectées ; c’est la symétrie nécessaire à un bilan global simple qui peut manquer. Il est donc préférable de décrire l’évolution des densités avec le cadre relativiste que d’inventer un réservoir invisible recevant automatiquement toute l’énergie rougeoyante des photons.

Exemple Diluer la matière

Si le facteur d’échelle double, la densité de matière non relativiste est divisée par huit dans le modèle homogène, car le volume augmente comme a^3. La densité d’une constante cosmologique reste, par définition, constante. Sa proportion

relative augmente alors. Ce raisonnement explique une domination tardive sans supposer un regroupement de Λ dans les galaxies.

À retenir

L’accélération est une propriété de l’histoire d’expansion reconstruite. La constante cosmologique est un modèle simple et performant ; la nature de l’énergie noire et son éventuelle évolution restent ouvertes.

Mini-lexique

Équation d’état : relation entre pression et densité d’énergie. Oscillations acoustiques baryoniques : empreinte statistique d’une échelle issue du plasma primordial dans la distribution de matière.

Vérifier sa compréhension

1. Si le facteur d’échelle triple, par quel facteur la densité de matière ordinaire homogène diminue-t-elle ?

2. Une préférence statistique pour w variable établit-elle à elle seule un mécanisme microscopique ?

Références S02 • S21 • S24

42 Inflation et limites du modèle cosmologique

Objectifs Comprendre les motivations de l'inflation et distinguer les éléments testés d'un scénario de ses extrapolations.

Pourquoi proposer une phase supplémentaire

Le modèle du Big Bang chaud décrit bien de nombreuses observations, mais laisse des questions sur ses conditions initiales. Pourquoi des régions très éloignées possèdent-elles des propriétés si proches ? Pourquoi la courbure observée est-elle faible ? Quelle est l'origine des petites fluctuations qui ont grandi pour former les structures ?

L'inflation propose une phase précoce d'expansion accélérée capable de traiter ces questions dans de nombreux scénarios. Une région initialement causale peut être étirée jusqu'à dépasser notre domaine observable. Des fluctuations quantiques d'un champ peuvent être transformées en perturbations cosmologiques. Cette idée générale se décline en modèles aux mécanismes et aux prédictions différents.

Ce que l'on compare aux données

Les modèles prédisent notamment des propriétés statistiques des fluctuations : amplitude, dépendance d'échelle, déviations éventuelles à la gaussianité et parfois un fond d'ondes gravitationnelles. Le fond cosmologique et la distribution des structures les contraignent. Les observations favorisent certaines classes et en excluent d'autres, sans identifier automatiquement un unique champ responsable.

L'absence d'une signature particulière, comme une amplitude donnée d'ondes primordiales, élimine un domaine de modèles plutôt que toute l'idée inflationnaire. Inversement, l'accord de

plusieurs tendances générales ne prouve pas tous les détails d’un potentiel. Il faut rechercher les prédictions qui distinguent réellement les propositions encore compatibles.

Question	Réponse apportée par certains scénarios	Statut à annoncer
Homogénéité apparente	Étirement d’une petite région	Motivation théorique
Fluctuations initiales	Origine dans des champs quantiques	Prédictions statistiques testées
Champ responsable	Potentiel et couplages particuliers	Identification non établie
Autres régions univers	Inflation éternelle dans certains modèles	Extrapolation dépendante du scénario

Un commencement qui reste discuté

L’inflation ne fournit pas automatiquement une théorie complète de l’origine. Il faut expliquer son déclenchement, sa fin et le passage à un plasma chaud. Cette phase de réchauffement dépend des couplages du champ. D’autres modèles, dont des scénarios de rebond, tentent d’aborder certaines mêmes questions sous d’autres hypothèses.

Les expressions « avant le Big Bang » et « création à partir de rien » n’ont pas un sens unique sans cadre précis. Le temps peut être défini différemment ou la description classique peut perdre son domaine de validité. Un récit accessible doit exposer cette limite sans prétendre que l’absence de réponse autorise n’importe quelle histoire.

Un modèle de référence ouvert aux tests

ΛCDM combine une relativité générale à grande échelle, des conditions initiales et plusieurs composantes. Il réussit à décrire un ensemble étendu de données avec peu de paramètres de base. Ses succès ne démontrent pas que chaque composante

possède déjà une explication fondamentale complète. Les tensions peuvent venir des données, des hypothèses ou d’une physique manquante.

La démarche consiste à maintenir un registre clair : observation, paramètre ajusté, hypothèse et extrapolation. Cette discipline permet de comprendre pourquoi on peut être très confiant dans une phase ancienne chaude tout en restant prudent sur le mécanisme inflationnaire, la particule de matière noire ou l’existence d’autres univers.

Un modèle doit préciser ses risques

Une famille de scénarios très flexible peut s’adapter à beaucoup de données sans fournir une prédiction fortement discriminante. Pour évaluer l’inflation, on cherche quelles relations entre fluctuations, polarisation, non-gaussianité et dépendance d’échelle sont imposées par une réalisation donnée. Une exclusion utile vise ces relations et les paramètres autorisés, plutôt qu’une image générale d’expansion rapide.

Les prédictions peuvent aussi dépendre de la phase de réchauffement, qui relie l’inflation à l’histoire thermique ultérieure. Deux modèles proches dans leur potentiel peuvent donc demander des hypothèses différentes avant d’être comparés au même spectre observé. La transparence sur ces choix évite de présenter une courbe ajustée comme une prédiction unique formulée sans liberté. Un programme reste scientifique lorsqu’il expose ses conditions et recherche les observations capables de le distinguer, même si certaines de ses régions demeurent pour l’instant hors d’atteinte expérimentale.

✦ Exemple Des multiplications rapides

Une augmentation du facteur d’échelle de e^{60} représente environ 10^{26}. Une petite longueur devient alors immense dans la description du modèle. Ce calcul illustre la puissance d’une

croissance exponentielle ; il ne mesure pas directement une durée inflationnaire et ne démontre pas que exactement soixante expansions de facteur e aient eu lieu.

À retenir

L’inflation est une famille de scénarios testés par leurs conséquences statistiques. Son mécanisme précis et ses extrapolations les plus lointaines restent à établir.

Mini-lexique

Inflation : phase proposée d’expansion accélérée très précoce. Réchauffement : transfert d’énergie du secteur inflationnaire vers les particules et le rayonnement du plasma chaud.

Vérifier sa compréhension

1. L’accord d’un modèle inflationnaire avec quelques paramètres du fond identifie-t-il son champ fondamental ?

2. Tous les scénarios inflationnaires impliquent-ils nécessairement le même multivers ?

Références S02 • S25 • S35

PARTIE VIII

VIII

Des mondes et de la vie

Systèmes planétaires, atmosphères et recherche de traces biologiques.

DANS CETTE PARTIE

43 La formation des systèmes planétaires

44 Mondes rocheux géantes et petits corps

45 Détecter et caractériser les exoplanètes

46 Atmosphères climat et habitabilité

47 Astrobiologie et biosignatures

43 La formation des systèmes planétaires

Objectifs Relier les planètes aux disques jeunes et comprendre les rôles de l’accrétion, du gaz et des migrations.

Un disque qui évolue

La formation d’une étoile laisse souvent un disque de gaz et de poussières. Les grains s’y rencontrent, adhèrent parfois, se fragmentent ou dérivent. Leur croissance n’est pas un simple assemblage toujours efficace : selon la taille et la vitesse, les collisions peuvent détruire ce qui vient de se former. Les modèles cherchent à expliquer comment franchir ces étapes difficiles.

Des concentrations de solides et des instabilités peuvent favoriser la formation de planétésimaux. Ces corps attirent ensuite d’autres matériaux et interagissent gravitationnellement. La durée de présence du gaz impose une contrainte : une planète géante doit acquérir une grande enveloppe avant que le disque se disperse, dans les scénarios d’accrétion de cœur.

Des compositions liées au lieu et au temps

La température du disque varie avec la distance, l’irradiation et l’évolution. Certaines espèces se condensent en solides là où elles seraient gazeuses plus près de l’étoile. Les lignes de condensation, dont celle de l’eau, influencent la réserve de matériaux. Elles se déplacent au cours du temps et ne constituent pas des frontières immuables gravées dans un disque.

Une planète peut recevoir des matériaux provenant de régions différentes. Les migrations des grains et des corps, les rencontres et les impacts mélangent les réservoirs. La composition finale ne se déduit donc pas uniquement de sa

distance actuelle. La présence de volatils sur un monde rocheux demande de reconstruire les apports et les pertes.

Processus	Effet possible	Limite de la description simple
Collisions de grains	Croissance ou fragmentation	Dépend des vitesses et matériaux
Accrétion gravitationnelle	Assemblage de corps plus gros	Rencontres et éjections possibles
Capture de gaz	Enveloppe massive	Dépend du refroidissement et du disque
Migration	Déplacement de l’orbite	Peut changer de sens ou s’arrêter

Des planètes qui se déplacent

Une planète échange du moment cinétique avec le disque et avec les autres corps. Son orbite peut migrer. Des géantes très proches de leur étoile montrent que la position actuelle ne représente pas nécessairement le lieu d’assemblage initial. Plusieurs voies peuvent conduire à un même type de système observé, avec des indices dans l’excentricité et l’orientation des orbites.

Après la dispersion du gaz, les interactions gravitationnelles continuent. Des résonances, des instabilités et des collisions géantes façonnent les architectures. Certains objets sont éjectés ; d’autres se rapprochent de l’étoile. Le Système solaire est un exemple instructif, mais il ne constitue pas la seule architecture permise par les lois physiques.

Observer un processus inachevé

Les images de disques montrent des anneaux, des lacunes et parfois des asymétries. Ces structures peuvent être produites par des planètes, mais également par d’autres mécanismes du gaz et des poussières. Une lacune n’est donc pas

automatiquement la photographie d’une planète cachée. Des observations à plusieurs longueurs d’onde et des vitesses du gaz aident à distinguer les explications.

Les populations d’exoplanètes permettent de tester les résultats finaux des modèles. Il faut tenir compte des biais de détection avant de comparer les nombres. Une théorie qui produit de nombreuses petites planètes lointaines ne peut être rejetée simplement parce qu’un relevé sensible surtout aux grandes planètes proches ne les voit pas.

Le domaine d’influence d’une planète

Une planète n’est pas isolée de la gravitation de son étoile. Le rayon de Hill fournit un repère approximatif de la région où sa gravitation peut permettre des orbites de compagnons face aux marées stellaires. Pour une orbite presque circulaire et une planète peu massive, $r_H \approx a[m/(3M)]^{1/3}$. Il ne définit pas à lui seul une sphère de stabilité absolue pour tous les satellites.

Avec une masse terrestre environ trois millionièmes de masse solaire et a = 1 ua, on obtient $r_H \approx 0{,}01$ ua, soit environ 1,5 million de kilomètres. Les orbites stables dépendent ensuite de l’excentricité, du sens du mouvement et des autres perturbations. Cette comparaison aide à comprendre pourquoi un système de satellites possède une extension limitée. Durant la formation, les domaines d’influence et les échanges avec le disque participent aussi à la manière dont une planète capture ou perturbe la matière voisine.

Exemple La limite d’un réservoir

Un disque hypothétique de 0,01 masse solaire contient environ 3 330 masses terrestres de matière totale. Si 1 % de cette masse est sous forme de solides, le réservoir initial est d’environ 33 masses terrestres de solides. Les deux fractions sont choisies pour le calcul. Elles montrent pourquoi le rendement

d’assemblage et les transferts de matière comptent autant que la masse totale du disque.

À retenir

Les planètes résultent d’un milieu en mouvement et de plusieurs étapes d’assemblage. Leur orbite actuelle ne révèle pas à elle seule leur lieu de naissance.

Mini-lexique

Planétésimal : corps solide participant à l’assemblage planétaire. Migration : évolution de l’orbite par échanges avec le disque ou d’autres corps.

Vérifier sa compréhension

1. Une lacune dans un disque prouve-t-elle à elle seule la présence d’une planète ?

2. Pourquoi une géante gazeuse doit-elle se former assez tôt dans certains scénarios ?

Références S07 • S28 • S37

44 Mondes rocheux géantes et petits corps

Objectifs Comparer les structures planétaires et relier densité, différenciation, atmosphère et évolution thermique.

Des catégories physiques utiles

Les planètes telluriques possèdent une importante fraction de roches et de métaux. Les géantes Jupiter et Saturne sont dominées en masse par l’hydrogène et l’hélium. Uranus et Neptune contiennent proportionnellement davantage d’éléments lourds, souvent regroupés dans le vocabulaire de « glaces », sans impliquer que leur intérieur soit un congélateur de glace ordinaire.

La Terre doit figurer dans toute comparaison du Système solaire : elle fournit les mesures les plus détaillées et un point de départ pour les autres mondes. Sa diversité de surface ne résume toutefois pas sa structure profonde. Un noyau métallique, un manteau et une croûte résultent d’une histoire de fusion, de séparation des matériaux et de refroidissement.

La densité ne donne pas tout

La masse et le rayon fournissent une densité moyenne. Des compositions différentes peuvent néanmoins produire des valeurs proches, surtout lorsque la compression et les enveloppes gazeuses comptent. Une planète massive comprime davantage son intérieur ; comparer sa densité à celle d’un matériau à pression terrestre peut être trompeur.

La mesure du champ gravitationnel, des marées, de la rotation et des oscillations apporte des contraintes supplémentaires. Les sondes planétaires utilisent ces méthodes pour reconstruire la répartition interne des masses. Les modèles gardent des

incertitudes, car plusieurs structures peuvent être compatibles avec une partie des données.

Famille	Composants importants	Exemple de question physique
Telluriques	Roches et métaux	Noyau, volcanisme et perte thermique
Géantes gazeuses	Hydrogène et hélium	Compression et chaleur interne
Géantes riches en éléments lourds	Mélanges denses et enveloppes	État des matériaux en profondeur
Petits corps	Roches, glaces et porosité	Assemblage, collisions et volatils

Conserver une atmosphère

La gravitation aide à retenir les gaz, tandis que la température et les processus d'échappement favorisent leur perte. Les molécules légères se déplacent plus vite en moyenne à température égale. Mais l'échappement ne se limite pas à une seule vitesse thermique : le rayonnement ultraviolet, les interactions avec le vent stellaire, les impacts et la chimie interviennent.

Une atmosphère peut être alimentée par le dégazage et les apports de petits corps. Elle évolue ensuite avec la surface, l'intérieur et l'étoile. Le faible champ magnétique actuel d'une planète ne suffit pas à prédire une atmosphère absente ; Vénus rappelle l'importance de plusieurs mécanismes et de l'histoire complète.

Les petits corps gardent des archives

Astéroïdes et comètes conservent des matériaux anciens, remaniés à des degrés variables. Certains objets sont différenciés ; d'autres sont des assemblages poreux ou des agrégats de fragments. Une forme irrégulière peut résulter d'une faible gravitation, de collisions ou d'une activité, sans raconter une histoire unique.

Les météorites permettent des mesures de laboratoire. Les datations radiométriques comparent des isotopes et leurs produits, sous des hypothèses sur l’histoire du système étudié. Les missions de retour d’échantillons apportent un contexte géologique précieux, car une roche isolée trouvée au sol ne conserve pas toujours une origine aussi précisément documentée.

Taille et refroidissement intérieur

À composition et température comparables, l’énergie thermique disponible varie grossièrement comme le volume, donc R^3, tandis que la surface par laquelle l’énergie peut s’échapper varie comme R^2. Les petits corps possèdent un plus grand rapport surface/volume et peuvent se refroidir plus rapidement. Ce raisonnement géométrique explique une tendance, sans calculer à lui seul un âge géologique.

La radioactivité, la convection du manteau, les marées et l’isolation par les couches externes modifient le bilan. Un petit satellite chauffé par des marées peut rester actif alors qu’un raisonnement basé sur sa seule taille le déclarerait éteint. Les matériaux et leurs transitions jouent également un rôle. Pour comparer deux mondes, il faut donc écrire les sources, les réservoirs et les voies de perte d’énergie. La diversité géologique des satellites rappelle que masse et distance au Soleil ne sont pas les deux seules variables utiles.

Exemple Deux rayons pour une même masse

À masse identique, doubler le rayon multiplie le volume par huit et divise la densité moyenne par huit. Le champ de surface GM/R^2 est divisé par quatre. Une enveloppe étendue peut donc modifier fortement les grandeurs observables sans que la masse change dans la même proportion. Cette comparaison géométrique ne remplace pas un modèle de structure interne.

À retenir

Masse et rayon sont des contraintes essentielles, mais ne déterminent pas toujours une composition unique. L’atmosphère et l’intérieur portent la trace d’une évolution.

Mini-lexique

Différenciation : séparation des matériaux selon leurs propriétés au cours de l’évolution d’un corps. Volatil : espèce facilement mobilisée sous forme gazeuse dans les conditions considérées.

Vérifier sa compréhension

1. Le terme « géante de glace » implique-t-il une surface solide gelée accessible ?

2. Une densité moyenne fournit-elle une photographie complète de l’intérieur ?

Références S04 • S37 • S45

45 Détecter et caractériser les exoplanètes

Objectifs Comparer transits, vitesses radiales, imagerie et microlentilles en tenant compte de leurs biais.

Un transit et un rayon

Lorsqu’une planète passe devant son étoile dans notre ligne de visée, le flux total diminue. Dans un modèle simple de disque uniforme et de planète opaque, la profondeur vaut approximativement $(R_p/R_*)^2$. Le résultat dépend du rayon stellaire et de la géométrie. L’assombrissement vers le bord, les taches et la lumière d’autres étoiles modifient l’analyse réelle.

Les transits révèlent surtout des systèmes dont l’orientation est favorable. Ils sont plus fréquents pour des planètes proches de leur étoile. Une longue période demande une surveillance longue pour confirmer plusieurs passages. Un catalogue de transits ne représente donc pas spontanément la distribution réelle de toutes les orbites.

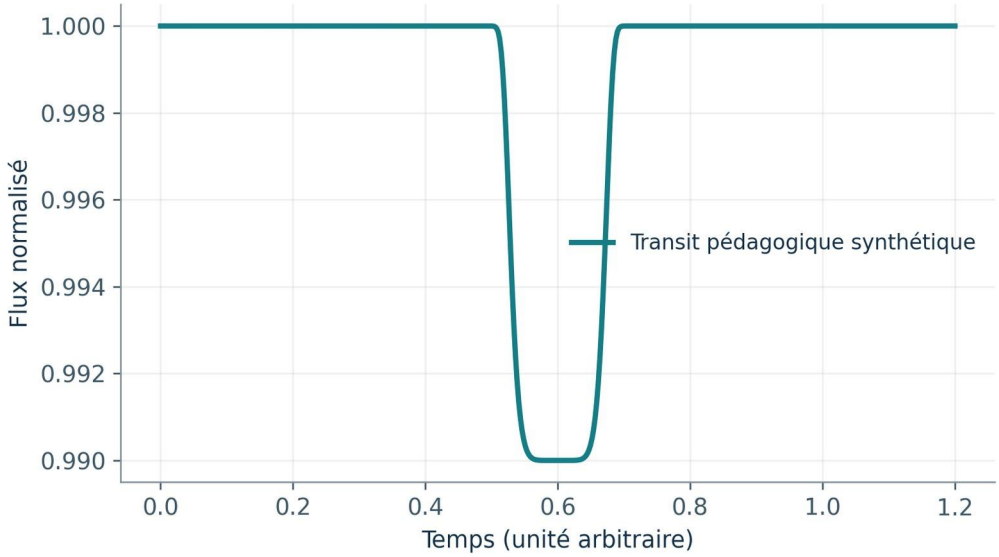


Figure 32 — Baisse de flux synthétique d’environ 1 %. Le profil simplifié sert à illustrer une profondeur ; il n’inclut pas tous les effets géométriques ni l’assombrissement du bord stellaire.

Une étoile qui oscille

Une planète fait bouger son étoile autour du barycentre. Les vitesses radiales détectent la composante de ce mouvement selon la ligne de visée. L’amplitude dépend de la masse, de la période, de l’excentricité et de l’inclinaison. Sans information d’inclinaison, on obtient souvent une masse minimale plutôt que la masse exacte.

Une planète détectée à la fois par transit et par vitesses radiales peut posséder un rayon et une masse bien contraints. Leur combinaison fournit une densité moyenne. Il reste des ambiguïtés sur les proportions de roche, de métal, d’eau et de gaz. Une densité compatible avec une planète rocheuse ne démontre pas une copie de la Terre.

Photographier ou amplifier

L’imagerie directe cherche la faible lumière de la planète près d’une étoile beaucoup plus brillante. Les coronographes et l’optique adaptative améliorent le contraste. La méthode favorise souvent des planètes jeunes, chaudes ou assez éloignées angulairement de leur étoile. L’interprétation de leur éclat dépend de modèles de refroidissement et d’atmosphère.

Les microlentilles explorent d’autres masses et séparations, parfois autour d’étoiles très lointaines. L’astrométrie mesure un déplacement angulaire de l’étoile. Les variations de dates de transit révèlent des interactions entre planètes. Ces méthodes complémentaires réduisent les angles morts d’une seule stratégie, sans supprimer tous les biais.

Confirmer et caractériser

Une baisse d’éclat peut aussi provenir d’une binaire à éclipses mélangée à la lumière d’une autre étoile. Des validations statistiques et des observations complémentaires testent les faux positifs. Les archives distinguent des objets confirmés, des

candidats et des paramètres issus de publications différentes. Il faut conserver le statut et la référence associés à chaque valeur.

La spectroscopie de transmission étudie la lumière filtrée par une atmosphère pendant le transit. La spectroscopie d’émission et les courbes de phase sondent d’autres aspects. Les signaux sont faibles et dépendent des nuages, de l’étoile et des méthodes de réduction. Une molécule proposée demande des tests contre les alternatives et les effets instrumentaux.

Une géométrie qui favorise les orbites proches

Pour une orbite circulaire d’orientation aléatoire et une petite planète, la probabilité de transit est approximativement R^*/a, en négligeant ici le rayon planétaire. Pour une étoile solaire, $R_\odot$ vaut environ 0,00465 ua. Une planète à 1 ua possède donc une probabilité géométrique proche de 0,47 %, contre environ 9,3 % à 0,05 ua.

La surveillance ajoute un autre biais : une planète proche accomplit plus de passages pendant une mission de durée fixée. Les transits répétés améliorent le signal et la confirmation. Une abondance apparente de courtes périodes dans un catalogue reflète donc à la fois la population réelle et ces avantages de détection. Pour estimer la fréquence des systèmes, les équipes injectent des signaux simulés et mesurent leur récupération. Il faut ensuite corriger la géométrie, la sensibilité et les critères de validation, avec une incertitude sur chaque étape.

✦ Exemple La profondeur d’un transit terrestre

Avec $R_\oplus/R_\odot \approx 0{,}00916$, le carré donne environ $8{,}4 \times 10^{-5}$, soit 84 parties par million. Un transit central d’une planète de rayon jovien autour d’une étoile solaire atteint environ 1 %. La différence explique pourquoi la stabilité photométrique et le nombre de passages deviennent déterminants pour les petites planètes.

À retenir

Chaque méthode explore une population privilégiée. La combinaison des techniques fournit masse, rayon et atmosphère avec des incertitudes qui doivent rester visibles.

Mini-lexique

Profondeur de transit : diminution relative du flux durant un passage. Contraste : rapport d’éclat entre la planète et son étoile dans une bande.

Vérifier sa compréhension

1. Une profondeur de 0,25 % correspond à quel rapport de rayons dans le modèle simple ?

2. Une masse minimale de 2 masses terrestres implique-t-elle une masse réelle exactement égale à deux ?

Références S07 • S26 • S31

46 Atmosphères climat et habitabilité

Objectifs Calculer une température d'équilibre et distinguer énergie reçue, effet de serre et conditions de surface.

L'énergie disponible

Une planète intercepte une fraction de la lumière de son étoile sur sa section πR^2. Une partie est réfléchie, le reste est absorbé. L'albédo de Bond décrit la fraction totale réfléchie, intégrée sur les directions et le spectre incident. Une surface claire dans une photographie ne suffit pas à déterminer cet albédo global.

Dans un modèle uniforme qui redistribue la chaleur sur toute la sphère et rayonne comme un corps noir, la température d'équilibre dépend du flux stellaire et de l'albédo. Le rayon disparaît du bilan simplifié, car surface interceptée et surface émettrice varient toutes deux comme R^2. Une chaleur interne importante ou une redistribution différente modifie le résultat.

$$T_{éq} = [S(1 - A)/(4\sigma)]^{1/4}$$

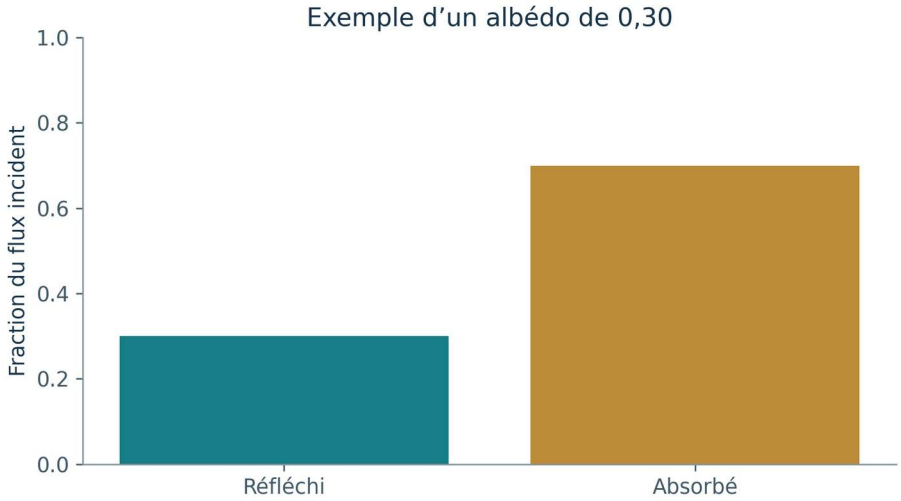


Figure 33 — Bilan illustratif pour un albédo de 0,30 : 30 % du flux incident est réfléchi et 70 % absorbé. Les flux réels dépendent du spectre et de la géométrie.

Une surface sous une atmosphère

La température d’équilibre n’est pas nécessairement la température de surface. Une atmosphère absorbe et émet du rayonnement, transporte de l’énergie et possède une structure verticale. Les gaz à effet de serre limitent l’évacuation directe de certaines bandes infrarouges et modifient l’équilibre des couches. Les nuages peuvent réfléchir la lumière et interagir avec l’infrarouge.

La pression détermine aussi les états possibles de l’eau. Une température seule ne suffit pas à conclure à un océan. La circulation, les saisons, la rotation et la topographie redistribuent les conditions. Une planète possède un climat spatialement variable, même lorsqu’une seule température moyenne est annoncée dans un tableau.

La zone habitable

La zone habitable classique désigne une gamme de distances où un modèle de planète et d’atmosphère permettrait de l’eau liquide de surface. Ses limites dépendent notamment du spectre stellaire et des hypothèses climatiques. Une planète située dans cette zone n’est pas automatiquement habitable, et encore moins habitée.

Des océans souterrains peuvent exister hors de cette zone grâce à la chaleur interne et aux marées. Inversement, un monde dans la zone peut avoir perdu son eau ou posséder une atmosphère incompatible avec un océan de surface. Le mot doit donc être accompagné de la définition précise utilisée, surtout lorsqu’on compare des catalogues.

Une histoire plutôt qu’une position

Les étoiles évoluent en luminosité et en activité. Les petites étoiles peuvent exposer des planètes proches à des rayonnements énergétiques et à des phases précoces différentes

de celles du Soleil. L’échappement atmosphérique, les réservoirs d’eau et la géologie doivent être étudiés sur la durée. L’orbite actuelle ne résume pas toute cette histoire.

La Terre fournit un cas observé de vie et d’interactions entre atmosphère, océans, roches et biosphère. Elle n’établit pas une recette universelle dont chaque ingrédient serait nécessaire dans tout environnement. Pour les exoplanètes, le défi consiste à convertir des signaux limités en contraintes, en annonçant les alternatives encore compatibles.

Répartir ou concentrer la chaleur

Le facteur quatre du bilan uniforme vient du rapport entre la surface d’une sphère et son disque interceptant la lumière. Si l’énergie n’était pas redistribuée et si l’on étudiait le point directement sous l’étoile, le bilan local utiliserait le flux incident sans cette division par quatre. La température idéale de ce point serait alors multipliée par $4^{1/4}$, soit $\sqrt{2}$, par rapport au modèle uniforme.

Il ne faut pas attribuer ce résultat à toute la face éclairée : l’incidence diminue vers le terminateur et la température varie sur la surface. Une atmosphère ou un océan transportent ensuite l’énergie. Les courbes de phase infrarouges cherchent justement à contraindre cette redistribution. Elles peuvent montrer un maximum décalé par rapport au point sous-stellaire, compatible avec une circulation. Le modèle à température unique reste un premier contrôle, tandis que l’observation peut réclamer une carte thermique et une dynamique.

Exemple La Terre sans effet de serre dans un modèle simple

Avec $S = 1\,361$ W/m², $A = 0{,}30$ et $\sigma \approx 5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m²/K⁴, on obtient environ 255 K. La température moyenne de surface terrestre est plus élevée. L’écart ne doit pas être traité comme une simple couverture à température unique : le système réel implique absorption, émission, convection, vapeur d’eau et nuages.

À retenir

Une température d’équilibre est un bilan simplifié. L’habitabilité demande une atmosphère, une histoire et une définition des conditions recherchées.

Mini-lexique

Albédo de Bond : fraction totale de puissance incidente réfléchie. Zone habitable : domaine défini par un modèle permettant certaines conditions d’eau liquide de surface.

Vérifier sa compréhension

1. Une planète dans la zone habitable possède-t-elle nécessairement de l’eau ?

2. À albédo constant, si le flux reçu est multiplié par seize, que devient la température d’équilibre ?

Références S04 • S26 • S27

47 Astrobiologie et biosignatures

Objectifs Distinguer chimie prébiotique, habitabilité et vie et comprendre pourquoi une biosignature exige plusieurs contrôles.

Une question accessible par étapes

L’astrobiologie étudie l’origine, l’évolution et la distribution possible de la vie dans l’Univers. Elle combine géologie, chimie, biologie et astronomie. Détecter une molécule organique ne revient pas à détecter un organisme. De nombreux composés carbonés se forment par des processus abiotiques dans des nuages, des disques et des petits corps.

Une approche progressive cherche d’abord les environnements, les sources d’énergie et les matériaux. Elle examine ensuite ce que des processus vivants pourraient modifier dans le milieu. Le cas terrestre guide les recherches parce qu’il est le seul exemple de biosphère détaillée dont nous disposons, mais il ne couvre pas nécessairement toutes les formes de vie concevables.

Une trace et ses alternatives

Une biosignature est une propriété pouvant résulter d’une activité biologique et servir d’indice dans son contexte. L’oxygène, le méthane ou certains déséquilibres chimiques sont étudiés. Chaque signal doit être confronté à des sources non biologiques, à la destruction chimique et aux conditions de l’atmosphère et de la surface.

La photolyse de l’eau et des pertes d’hydrogène peuvent, dans certains scénarios, laisser de l’oxygène sans photosynthèse. Du méthane peut être produit par des processus géologiques. Une combinaison d’espèces, de flux et de contexte peut être plus informative qu’une molécule isolée. Même cette combinaison demande une mesure robuste et un modèle fiable.

Niveau d’information	Ce qu’il établit	Ce qu’il n’établit pas seul
Molécule organique	Chimie carbonée	Organisme présent
Eau ou environnement favorable	Possibilité de certains processus	Habitation effective
Signal atmosphérique proposé	Contrainte spectrale sous un modèle	Origine biologique unique
Indices convergents	Argument renforcé	Absence automatique de toute alternative

Des faux positifs et des faux négatifs

Un faux positif survient lorsqu’un processus abiotique ressemble à une signature de vie. Un faux négatif survient lorsqu’une vie présente ne produit pas de signature détectable. La Terre ancienne rappelle qu’une biosphère peut exister sans atmosphère identique à celle d’aujourd’hui. Une absence d’oxygène ne prouve donc pas une stérilité universelle.

Les nuages, la résolution, les bandes accessibles et l’activité de l’étoile limitent les mesures. Une raie faible peut être confondue avec une autre molécule ou avec une structure du bruit. Les analyses doivent publier les données, tester plusieurs réductions et annoncer comment le modèle choisit parmi les alternatives. La répétition indépendante constitue une étape décisive.

Chercher dans le Système solaire et au-delà

Les missions planétaires peuvent analyser des surfaces et parfois des échantillons avec un contexte détaillé. Les exoplanètes offrent une diversité beaucoup plus grande, mais des signaux intégrés et très faibles. Les deux approches se complètent : proximité et précision d’un côté, diversité de populations de l’autre.

Les technosignatures recherchent des traces possibles d’activité technologique. Un signal radio inhabituel doit d’abord être testé contre les interférences humaines et les sources naturelles. Une absence de signal sur une fréquence et une durée données ne signifie pas que toute vie technologique est absente. Les conclusions doivent rester proportionnées au domaine réellement exploré.

Quand les événements sont rares

Prenons cent mille mondes fictifs dont seulement cent sont habités. Un test qui reconnaît 90 % des mondes habités produit 90 vraies alertes. S’il déclenche aussi une alerte sur 1 % des 99 900 mondes sans vie, il ajoute environ 999 fausses alertes. Parmi les 1 089 alertes, seulement environ 8 % correspondent alors à la vie dans cet exemple.

Les nombres choisis ne constituent pas une estimation de la fréquence réelle de la vie. Ils montrent pourquoi une bonne sensibilité seule ne garantit pas une conclusion fiable quand l’événement recherché est rare. Une seconde observation indépendante et un contrôle des faux positifs peuvent transformer la situation. La fréquence préalable demeure inconnue pour les exoplanètes, ce qui rend les conclusions probabilistes dépendantes d’hypothèses annoncées. Présenter une détection atmosphérique avec son contexte est donc une exigence du raisonnement, pas une simple précaution de vocabulaire.

Exemple Une probabilité de fausse alerte

Un test hypothétique produit une fausse alerte dans 1 % des cas sans vie. Si les mondes habités sont très rares dans l’échantillon, de nombreuses alertes peuvent néanmoins être fausses. Ce raisonnement ne fournit pas la fréquence réelle de la vie ; il montre pourquoi la fréquence préalable, la qualité du test et les

confirmations indépendantes influencent la force d’une détection annoncée.

À retenir

Une biosignature est un argument contextualisé. Habitabilité, chimie organique et vie détectée correspondent à des niveaux de conclusion différents.

Mini-lexique

Abiotique : produit sans activité biologique. Biosignature : trace potentiellement liée au vivant, à évaluer face aux processus alternatifs.

Vérifier sa compréhension

1. Détecter du méthane suffit-il à établir une origine biologique ?

2. Une planète sans biosignature mesurable est-elle nécessairement sans vie ?

Références S26 • S27 • S46

PARTIE IX

IX

Les instruments de la découverte

Observer depuis le sol, l’espace et avec de nouveaux messagers.

DANS CETTE PARTIE

48 Comment travaille un observatoire

49 Miroirs détecteurs et spectrographes

50 Optique active adaptative et interférométrie

51 Radioastronomie et Univers froid

52 Le Soleil et la météo spatiale

53 Télescopes spatiaux satellites et sondes

54 Ondes gravitationnelles neutrinos et rayons cosmiques

48 Comment travaille un observatoire

Objectifs Suivre un programme scientifique depuis sa question initiale jusqu’à ses données et comparer les rôles de plusieurs installations.

Une question avant un instrument

Un programme commence par une question mesurable : déterminer une composition, suivre une variation ou tester une orbite. Les astronomes choisissent ensuite les longueurs d’onde, la résolution, le champ et la cadence nécessaires. Le plus grand diamètre ne répond pas toujours le mieux à la question. Un relevé vaste et fréquent peut être plus utile qu’une image très profonde d’un seul objet.

Les propositions décrivent le temps demandé, les performances attendues et la manière d’exploiter les observations. La météo, les phases de la Lune, la visibilité et la disponibilité des instruments influencent la programmation. Certaines observations sont préparées à l’avance ; d’autres répondent rapidement à une alerte, par exemple après une explosion ou une détection gravitationnelle.

Des sites et des architectures

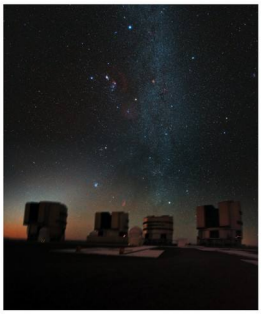
Un site sec réduit l’absorption infrarouge ; une atmosphère stable améliore la finesse d’image. L’altitude, le vent, la lumière artificielle et les infrastructures comptent également. Une coupole protège l’installation, mais doit éviter de créer sa propre turbulence thermique. La température des miroirs et la circulation de l’air sont suivies avant et pendant la nuit.

Les grands miroirs peuvent être monolithiques ou segmentés. La surface, le contrôle de forme et la stabilité servent ensemble la performance. L’ELT de l’ESO possède un miroir primaire prévu de

39 mètres et reste un projet en construction à la date de cette édition. Une dimension de conception doit être distinguée d’une performance déjà démontrée en exploitation.

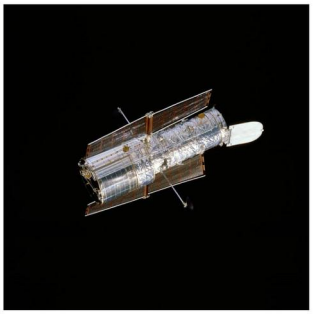
Trois façons d’observer l’Univers

Du sol à l’orbite : des instruments adaptés à différentes observations.



Coupoles du VLT

Les enceintes abritent les télescopes optiques et infrarouges.



Hubble en orbite

Le télescope observe au-dessus de l’atmosphère terrestre.

Le réseau ALMA

Des antennes combinent leurs signaux en millimétrique et submillimétrique.

VLT : ESO/ Y. Beletsky ; ALMA : Y. Beletsky/ESO (CC BY 4.0). Hubble : NASA, STS082-746-040.

Figure 34 — Installations complémentaires conservées dans la série : VLT, Hubble et ALMA. Montage documentaire d’origine ; crédits photographiques ESO et NASA/ESA, détaillés dans les crédits. Les dimensions apparentes du montage ne sont pas comparables.

Observer une diversité de phénomènes

Le VLT associe quatre télescopes principaux de 8,2 m, utilisables séparément et dans certains modes interférométriques. Keck emploie deux miroirs segmentés de 10 m ; le Gran Telescopio

Canarias possède un primaire de 10,4 m. Ces chiffres décrivent des ouvertures, sans résumer les instruments, le champ et les bandes accessibles.

ALMA réunit 66 antennes pour le millimétrique et le submillimétrique. Rubin utilise un système de grand champ de 8,4 m pour suivre le ciel variable ; son relevé LSST a commencé en juin 2026 selon l’observatoire. Ces installations ne sont pas interchangeables. Leur complémentarité permet de passer d’une découverte à une caractérisation spectrale ou temporelle.

Des données accompagnées de preuves

Une observation exploitable conserve ses calibrations, ses métadonnées et les conditions de mesure. Les produits publics peuvent proposer plusieurs niveaux : signaux bruts, images calibrées, catalogues et paramètres interprétés. Choisir le produit adapté évite de refaire une correction déjà appliquée ou d’en oublier une essentielle.

Les archives permettent de poser de nouvelles questions sans demander immédiatement de nouvelles poses. Leur usage exige de citer le programme, la version du traitement et les publications associées. Une réutilisation peut découvrir des défauts ou améliorer une calibration ; la provenance permet alors de corriger la chaîne sans perdre l’histoire du résultat.

Surface collectrice et champ ne sont pas la même ressource

Un grand miroir reçoit davantage de photons d’une source, tandis qu’un grand champ mesure davantage de directions à la fois. Pour un relevé, leur combinaison, les temps de lecture et la cadence déterminent l’efficacité. Deux instruments ayant un même diamètre peuvent donc couvrir le ciel à des rythmes très différents. Une optique et un détecteur doivent être conçus ensemble pour conserver la qualité sur tout le champ.

Une observation très profonde d’une petite région et une surveillance répétée d’une vaste région répondent à des questions différentes. La première révèle des objets faibles ; la seconde découvre des événements rares ou brefs sur un grand volume. L’alerte issue du relevé peut ensuite demander un spectre avec une autre installation. Cette chaîne de découverte et de suivi explique pourquoi les grands projets réservent du temps à des observations déclenchées rapidement, et pourquoi une archive temporelle possède une valeur différente d’une seule image spectaculaire.

Exemple Quel instrument pour quelle question

Pour suivre chaque nuit des milliers de sources variables, un grand champ et une cadence régulière deviennent prioritaires. Pour mesurer la vitesse d’une seule étoile très précisément, un spectrographe stable et une calibration fine dominent. Pour observer le gaz froid dans un disque masqué, une installation millimétrique répond à une autre physique. Le choix se fait sur les observables attendues, puis sur leur précision.

À retenir

Un observatoire est une chaîne complète de mesure et d’analyse. Diamètre, site, instrument, cadence et archives contribuent chacun au résultat.

Mini-lexique

Cadence : rythme de répétition des observations. Métadonnées : informations décrivant les conditions, l’instrument et le traitement d’un jeu de données.

Vérifier sa compréhension

1. Pourquoi un grand miroir seul ne suffit-il pas pour suivre tout le ciel chaque nuit ?

2. Quel intérêt scientifique possède une archive ancienne bien calibrée ?

Références S28 • S29 • S30 • S47

49 Miroirs détecteurs et spectrographes

Objectifs Relier ouverture, résolution et signal et comprendre les limites d’un détecteur réel.

Collecter et séparer

La surface collectrice d’un miroir circulaire varie comme le carré du diamètre. Doubler le diamètre recueille idéalement quatre fois plus de photons d’une source dans les mêmes conditions, avant prise en compte des obstructions et des rendements. Cette augmentation aide à observer des sources faibles ou à réduire les temps de pose.

La résolution angulaire de diffraction dépend approximativement de λ/D. Pour une ouverture circulaire, le critère de Rayleigh utilise un facteur d’environ 1,22. Une plus grande ouverture améliore donc la séparation théorique à longueur d’onde donnée. L’atmosphère et les défauts optiques peuvent cependant limiter les images avant que cette valeur soit atteinte.

$$\theta \approx 1{,}22\,\lambda / D$$

Convertir les photons en données

Les détecteurs produisent un signal numérique avec un rendement dépendant de la longueur d’onde. Ils possèdent un bruit de lecture, un courant d’obscurité et une capacité limitée avant saturation. Les pixels peuvent avoir des réponses différentes. Les corrections de biais, de noir et de champ uniforme traitent des effets distincts et doivent être adaptées au matériel.

Un pixel n’est pas un détail physique minimal universel. L’échantillonnage doit correspondre à la largeur de l’image instrumentale. Des pixels trop grands perdent de l’information ; des pixels très petits répartissent le flux et peuvent augmenter

l’importance relative du bruit de lecture. La finesse apparente obtenue par interpolation ne crée pas automatiquement de nouveaux détails mesurés.

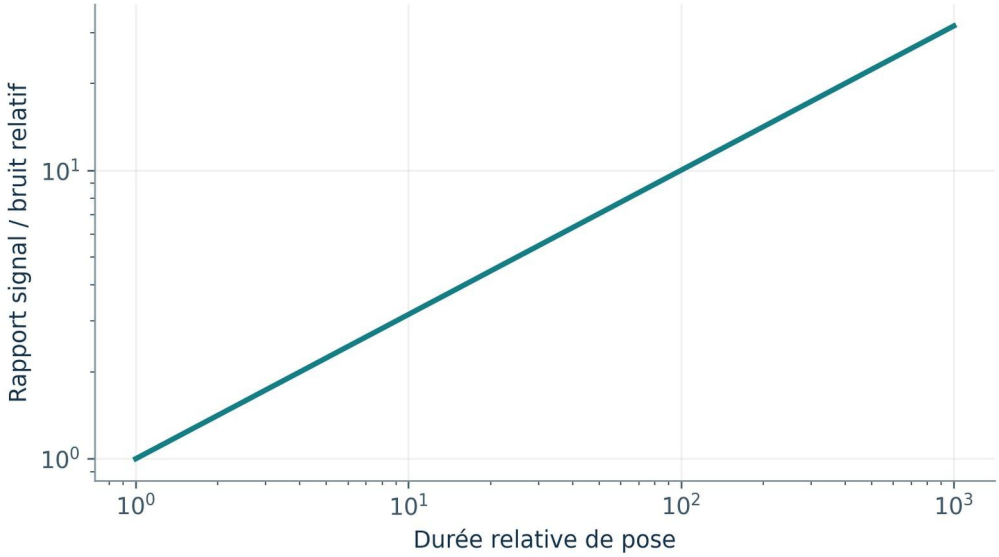


Figure 35 — Croissance idéale du rapport signal sur bruit comme la racine carrée du temps lorsque le bruit de comptage domine. Les erreurs systématiques peuvent empêcher cette amélioration indéfinie.

Décomposer les longueurs d’onde

Un spectrographe disperse la lumière à l’aide d’un réseau ou d’un autre élément optique. Le pouvoir de résolution $R = \lambda/\Delta\lambda$ indique la capacité à séparer des détails spectraux proches. Une haute résolution répartit les photons sur davantage d’éléments de mesure, ce qui demande un flux ou un temps de pose suffisant.

La stabilité de la position des raies compte autant que leur finesse pour mesurer de petites vitesses. Des étalons de longueur d’onde et une maîtrise thermique limitent les dérives. La forme de l’image d’une raie, appelée fonction instrumentale, doit être connue pour séparer l’élargissement astrophysique de celui de l’appareil.

Compter le signal et ses bruits

Pour N photons indépendants dans un régime de Poisson, la dispersion de comptage vaut environ $\sqrt{N}$. Un fond de ciel contribue aussi à la variance même après soustraction de sa moyenne. Retirer un fond ne retire donc pas le bruit associé aux photons qu’il a apportés. Cette distinction explique pourquoi un ciel clair ou lumineux dégrade une mesure.

Additionner des poses peut améliorer le rapport signal sur bruit si elles sont correctement calibrées et alignées. Une saturation ne se répare pas simplement en ajoutant d’autres images saturées. Des poses plus courtes, une dynamique adaptée et une sélection des conditions deviennent alors nécessaires. Les mesures doivent préserver les données brutes pour permettre un contrôle ultérieur.

Additionner les variances

Un modèle simple de rapport signal sur bruit combine le nombre de photoélectrons de la source S, ceux du fond B et le bruit de lecture de N pixels de dispersion σr chacun : $S/\text{Bruit} \approx S/\sqrt{(S + B + N\sigma r^2)}$, en omettant ici d’autres termes. Les contributions s’ajoutent en variance, sous l’hypothèse d’indépendance.

Avec $S = 1\,000$, $B = 400$, $N = 10$ et $\sigma r = 5$ électrons, le dénominateur vaut $\sqrt{1\,650} \approx 40{,}6$, donc le rapport environ 24,6. Ignorer le bruit de lecture donnerait une estimation trop optimiste. Multiplier les poses très courtes ajoute plusieurs lectures ; une pose plus longue réduit cette contribution relative, mais augmente les risques de saturation, de suivi imparfait ou d’événement parasite. Le choix de pose résulte d’un bilan concret, et non d’une règle unique « toujours le plus long » ou « toujours le plus court ».

Exemple Une résolution théorique

Pour D = 0,20 m et λ = 550 nm, 1,22λ/D vaut environ 3,36 × 10^{-6} rad, soit 0,69 seconde d’arc. Une turbulence de deux secondes d’arc domine cette limite pour une pose longue ordinaire. Passer à un miroir plus grand n’améliore pas automatiquement la netteté sans traiter également l’atmosphère et l’échantillonnage.

À retenir

Surface, diffraction, stabilité et bruit décrivent des performances différentes. Une image nette et une mesure précise demandent une chaîne cohérente.

Mini-lexique

Bruit de Poisson : fluctuation associée au comptage indépendant d’événements. Pouvoir de résolution spectral : rapport entre une longueur d’onde et le plus petit intervalle spectral résolu.

Vérifier sa compréhension

1. Si le nombre de photons passe de 100 à 400, que devient le rapport signal sur bruit idéal de comptage ?

2. Soustraire le fond moyen supprime-t-il les fluctuations de ses photons ?

Références S03 • S29 • S48

50 Optique active adaptative et interférométrie

Objectifs Distinguer trois techniques de correction ou de combinaison et comprendre la différence entre surface collectrice et base interférométrique.

Garder le miroir dans la bonne forme

Un grand miroir se déforme sous son poids, les changements de pointage et les variations thermiques. L’optique active agit relativement lentement sur ses supports ou sur l’alignement pour maintenir une forme globale correcte. Elle ne suit pas chaque fluctuation rapide de l’atmosphère. Son objectif est de conserver la performance de l’ensemble optomécanique.

Les miroirs segmentés exigent aussi un contrôle des positions relatives. Des différences de piston ou d’orientation entre segments dégradent la qualité du front d’onde. La mesure et l’action se font avec des capteurs et des modèles de contrôle ; « miroir de grand diamètre » implique ainsi une infrastructure de métrologie autant qu’une surface réfléchissante.

Corriger l’atmosphère rapidement

L’optique adaptative mesure les perturbations du front d’onde et pilote un miroir déformable à haute cadence. Une étoile guide ou une source artificielle fournit l’information. La correction dépend de la direction, de la longueur d’onde, de la luminosité de la référence et de la structure de la turbulence.

Un laser guide excite une région de l’atmosphère ; il ne crée pas une étoile réelle à distance cosmique. Certaines composantes du mouvement demandent encore une référence naturelle. Les systèmes à plusieurs guides ou miroirs cherchent à corriger un champ plus large. Aucune correction ne rend toute l’atmosphère parfaitement absente dans toutes les directions.

Technique	Échelle du problème	Action principale
Optique active	Déformations lentes de l’instrument	Supports et alignement
Optique adaptative	Fluctuations rapides du front d’onde	Miroir déformable et boucle de contrôle
Interférométrie	Combinaison de signaux séparés	Différences de marche et corrélations

Une grande base sans miroir plein

L’interférométrie combine les signaux de plusieurs ouvertures. L’échelle angulaire accessible dépend de λ/B, où B désigne une base projetée entre ouvertures. Une grande base améliore la finesse des contraintes, mais ne donne pas la surface collectrice d’un miroir rempli de diamètre B. La sensibilité dépend toujours des ouvertures réellement présentes et du système de mesure.

Chaque paire échantillonne une partie de l’information spatiale. La rotation terrestre et la multiplication des bases améliorent la couverture. Une image peut être reconstruite à partir de ces mesures, avec des choix et des incertitudes. Un petit nombre de bases ne fournit pas une photographie complète aussi directement qu’un capteur derrière un miroir plein.

Phase et stabilité

Dans le visible et l’infrarouge, les différences de trajet doivent être compensées avec une grande précision. Les lignes à retard ajustent les chemins. En radio, les signaux peuvent être enregistrés avec des horloges de référence puis corrélés. Les différences techniques reflètent les fréquences et les détecteurs disponibles, tout en partageant les mêmes principes de cohérence.

Les observations de disques stellaires, de régions de formation et de trous noirs exploitent ces techniques à des échelles très différentes. La puissance d’une reconstruction se vérifie sur les

données de visibilité et les tests entre méthodes. Il faut éviter de confondre une image présentée au public avec l’unique solution mathématique imposée sans hypothèses.

Reconstruire ce que les bases ont mesuré

Chaque base projetée d’un interféromètre est sensible à une organisation particulière de variations angulaires. Un ensemble de bases courtes favorise la mesure des grandes structures, tandis que de longues bases apportent des détails plus fins. L’orientation compte également : mesurer dans une seule direction ne donne pas la même information que plusieurs directions.

La rotation terrestre change les projections et améliore la couverture au cours du temps. Pour une source qui varie rapidement, on ne peut cependant pas supposer une image parfaitement fixe pendant toute la synthèse. Des modèles temporels ou des traitements spécifiques deviennent nécessaires. C’est un enjeu particulier pour certains environnements de trous noirs. La reconstruction doit annoncer comment elle traite l’information manquante et la variabilité. Comparer plusieurs méthodes sur les mêmes mesures teste la robustesse de certains traits, sans faire disparaître les limites de la couverture instrumentale.

Exemple Une base de cent mètres

À $\lambda = 2$ micromètres et $B = 100$ m, λ/B vaut 2×10^{-8} rad, soit environ quatre millisecondes d’arc. Cette finesse n’implique pas la collecte lumineuse d’un miroir de cent mètres. Deux télescopes de petit diamètre gardent une aire collectrice limitée, même si leur séparation est grande.

À retenir

L’optique active préserve l’instrument, l’adaptative corrige des perturbations rapides et l’interférométrie combine des mesures. Résolution et collecte doivent être distinguées.

Mini-lexique

Front d’onde : ensemble des points présentant une même phase. Visibilité interférométrique : mesure de corrélation portant une information sur la structure de la source.

Vérifier sa compréhension

1. Une base deux fois plus grande améliore-t-elle l’échelle angulaire λ/B ?

2. L’optique active corrige-t-elle seule la turbulence rapide d’une nuit ?

Références S20 • S28 • S29

51 Radioastronomie et Univers froid

Objectifs Identifier les émissions radio et millimétriques et comprendre pourquoi de grandes antennes ou réseaux sont nécessaires.

Des rayonnements de plusieurs origines

Le domaine radio révèle des phénomènes thermiques et non thermiques. Le gaz ionisé produit du rayonnement libre–libre ; des électrons relativistes dans un champ magnétique émettent du synchrotron. Les molécules possèdent des transitions rotationnelles utiles pour sonder les nuages. Les poussières froides rayonnent dans l’infrarouge lointain et le millimétrique.

L’hydrogène atomique neutre possède une transition à environ 21 cm. Elle permet de suivre des réservoirs de gaz et des vitesses dans les galaxies. Les raies moléculaires ne donnent pas automatiquement toute la masse d’hydrogène moléculaire : certains traceurs sont plus faciles à observer et demandent une conversion dépendant de l’environnement.

Froid ne signifie pas sans activité

Un nuage à quelques dizaines de kelvins peut être le siège de turbulence, de champs et de réactions chimiques. Le gaz et les poussières ne partagent pas toujours exactement la même température. Les raies sondent des densités et des états d’excitation différents ; leur comparaison permet de séparer des régions qui se superposent sur une image.

L’observation millimétrique de disques fournit des distributions de poussières et des vitesses du gaz. Les mouvements peuvent contraindre la masse de l’étoile centrale ou révéler des perturbations. Une intensité de continuum dépend à la fois de la

température, de l’opacité et de la quantité de poussière. Elle n’est donc pas une balance directe sans modèle.

Signal	Milieu ou mécanisme	Information recherchée
Raie à 21 cm	Hydrogène atomique	Distribution et vitesses
Raies moléculaires	Nuages et disques	Excitation, chimie et mouvements
Continu millimétrique	Poussières et autres composantes	Structure et bilan thermique
Synchrotron	Particules accélérées	Champs et populations énergétiques

Résoudre de longues ondes

À diamètre identique, une longueur d’onde plus grande donne une moins bonne résolution de diffraction. Cela motive de grandes antennes et des réseaux. ALMA comprend cinquante-quatre antennes de 12 m et douze de 7 m, pour un total de 66. Les configurations combinent des bases adaptées aux détails fins et aux structures plus étendues.

Un interféromètre peut manquer une partie de l’émission très étendue si les petites fréquences spatiales ne sont pas échantillonnées. Les observations avec des bases courtes et des antennes seules complètent alors l’information. Une image montrant une structure fragmentée ne doit pas être interprétée sans vérifier ce filtrage instrumental.

Un environnement à protéger

Les signaux cosmiques peuvent être extrêmement faibles devant les émissions humaines. Les bandes protégées, les sites calmes et les méthodes de détection d’interférences soutiennent la qualité des observations. Une émission étroite ou inhabituelle doit être testée contre l’électronique, les satellites et les sources terrestres avant toute interprétation astrophysique.

La vapeur d’eau absorbe plusieurs bandes millimétriques et submillimétriques. Les sites secs en altitude améliorent les conditions, sans les rendre constantes. Les observations enregistrent donc aussi l’état atmosphérique et utilisent des calibrateurs de flux et de phase. Le traitement doit préserver les informations nécessaires à leur contrôle.

La température de brillance n’est pas toujours thermique

En radio, on exprime souvent une intensité par une température de brillance : la température qu’aurait un corps noir produisant cette intensité selon une convention définie, souvent dans l’approximation de Rayleigh–Jeans. Cette grandeur peut être très utile même lorsque le mécanisme n’est pas un rayonnement thermique à l’équilibre.

Une forte température de brillance ne prouve donc pas que tout le gaz possède cette température cinétique. Un rayonnement synchrotron ou une émission cohérente peuvent produire des valeurs élevées sous cette définition. Il faut examiner le spectre, la polarisation, les dimensions et la variabilité. La même prudence s’applique aux cartes de raies, où l’opacité et le remplissage du faisceau influencent l’intensité. Une petite région intense diluée dans une grande résolution peut apparaître peu brillante. Le vocabulaire de température facilite le calcul, à condition de conserver la distinction entre une unité d’intensité et un état thermique du milieu.

✦ Exemple Une antenne de vingt-cinq mètres

À 21 cm, le critère 1,22λ/D donne pour D = 25 m environ 0,010 rad, soit près de 35 minutes d’arc. Cette valeur est comparable à une grande fraction de degré. Une base interférométrique de plusieurs kilomètres peut fournir une résolution bien plus fine, à condition d’une calibration et d’une couverture adaptées.

À retenir

La radioastronomie étudie le gaz froid, les molécules et les particules énergétiques. Ses images dépendent fortement des bases et des structures effectivement mesurées.

Mini-lexique

Synchrotron : rayonnement de particules relativistes déviées par un champ magnétique.
Fréquence spatiale : échelle de variation angulaire échantillonnée par une mesure interférométrique.

Vérifier sa compréhension

1. Une émission radio provient-elle nécessairement d’un gaz froid ?

2. Pourquoi ajouter des bases courtes à un réseau de grandes bases ?

Références S10 • S28 • S49

52 Le Soleil et la météo spatiale

Objectifs Relier activité magnétique, vent solaire et effets proches de la Terre sans confondre leurs différentes échelles de temps.

Une étoile qui agit sur son environnement

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique et un flux de particules appelé vent solaire. Ces composantes ne voyagent pas toutes à la même vitesse et n’interagissent pas de la même manière avec la Terre. Le rayonnement arrive en environ huit minutes ; une perturbation du plasma peut mettre beaucoup plus longtemps à parcourir la distance.

Les champs magnétiques solaires stockent et redistribuent de l’énergie. Une éruption produit une forte variation de rayonnement et accélère des particules. Une éjection de masse coronale emporte une structure de plasma et de champ. Les deux phénomènes peuvent être associés, mais les observer ensemble ne les rend pas identiques.

Une magnétosphère dynamique

Le champ terrestre dévie une partie du plasma et forme une magnétosphère en interaction avec le vent solaire. Son état dépend notamment de la vitesse, de la densité et de l’orientation du champ interplanétaire. Une perturbation dirigée vers la Terre ne produit donc pas toujours le même niveau d’activité géomagnétique.

Des particules déposent de l’énergie dans la haute atmosphère et produisent les aurores. Les couleurs dépendent des espèces, des transitions et des altitudes. Les photographies longues poses montrent parfois des couleurs plus marquées que la perception visuelle. Une aurore constitue un effet atmosphérique proche, pas une lumière située à la surface solaire.

Messager ou structure	Temps de trajet typique	Ce qui doit être précisé
Lumière et rayons X	Environ 8 min 20 s	Distance Terre–Soleil variable
Particules énergétiques	Variable, parfois très rapide	Énergie et trajet magnétique
Plasma d’une éjection	Souvent de l’ordre de jours	Vitesse, direction et interaction

Observer plusieurs couches

Le visible montre la photosphère ; certaines raies et bandes révèlent la chromosphère ou la couronne. Des coronographes masquent l’éclat central pour étudier les régions externes. Les mesures de champ et les images ultraviolettes complètent les observations. Chaque bande possède une réponse à des températures et des conditions différentes.

Le télescope solaire Daniel K. Inouye, de 4 m, étudie finement la structure et les champs. Les sondes spatiales mesurent le plasma et les champs dans des environnements inaccessibles depuis le sol. Une image seule ne fournit pas toute la direction et la vitesse d’une éjection ; les modèles combinent observations à distance et mesures locales.

Prévoir avec des probabilités

La météo spatiale vise à estimer les perturbations et leurs conséquences sur les communications, la navigation, les satellites et les réseaux. La prévision reste incertaine parce que la géométrie et l’évolution du champ ne sont pas parfaitement connues. Une alerte représente une estimation conditionnelle, pas une certitude de dommage.

Pour une activité pédagogique, les archives publiques permettent de comparer taches, éruptions et indices géomagnétiques. Il faut utiliser des horaires cohérents et tenir compte des trajets. Relier deux pics simplement parce qu’ils ont

lieu le même jour peut produire une association trompeuse. La causalité demande une chronologie et un mécanisme compatibles.

Suivre les références temporelles

Les séries solaires et géomagnétiques doivent préciser leurs horaires : mesure, réception ou diffusion. Chaque messager possède son temps de trajet. Une corrélation trouvée après avoir essayé de nombreux retards peut être trompeuse ; annoncer les fenêtres testées et vérifier vitesse, direction et champ permet de la relier à un mécanisme. Deux perturbations de même vitesse ne produisent pas nécessairement la même réponse terrestre.

Exemple Un plasma à 500 km/s

En divisant une ua par 500 km/s, on obtient environ 299 000 s, soit 3,46 jours. C’est un calcul de trajet à vitesse constante. Une éjection réelle peut accélérer, ralentir, manquer la Terre et suivre une structure magnétique complexe. La valeur explique une échelle de temps, sans constituer une prévision opérationnelle.

À retenir

Rayonnement, particules et plasma transportent des informations différentes. Une prévision exige des mesures complémentaires et une chronologie cohérente.

Mini-lexique

Vent solaire : écoulement de plasma issu de l’atmosphère solaire. Magnétosphère : région où le champ d’un astre organise fortement le mouvement du plasma.

Vérifier sa compréhension

1. Une éjection observée au Soleil atteint-elle toujours la Terre ?

2. Pourquoi la lumière d’une éruption et son plasma n’arrivent-ils pas ensemble ?

Références S13 • S50 • S51

53 Télescopes spatiaux satellites et sondes

Objectifs Comparer les missions selon leurs bandes, leurs orbites et leurs objectifs et distinguer lancement, mise en service et exploitation scientifique.

Sortir de l’atmosphère

Un observatoire spatial évite la turbulence et accède à des bandes absorbées au sol. Il reste soumis à des contraintes : lancement, stabilité, température, alimentation, communications et vieillissement. Un instrument infrarouge doit notamment limiter son propre rayonnement thermique. Un télescope dans l’espace n’est donc pas automatiquement plus performant pour toute mesure qu’une grande installation terrestre.

Hubble possède un miroir de 2,4 m et observe notamment de l’ultraviolet au proche infrarouge. Webb possède un miroir segmenté d’environ 6,5 m, optimisé pour l’infrarouge et protégé thermiquement. Leur différence ne se réduit pas au diamètre : les bandes, le champ, les détecteurs et les environnements orbitaux servent des questions complémentaires.

Choisir une orbite

Une orbite terrestre basse permet une liaison et, dans certains cas historiques, un accès plus direct, mais impose occultations et passages dans des environnements particuliers. Des orbites autour des régions de Lagrange peuvent faciliter la stabilité thermique et la géométrie d’observation. Le point L2 Soleil–Terre se situe à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, dans la direction opposée au Soleil.

Une mission n’est généralement pas immobile exactement sur un point mathématique. Elle suit une orbite autour de la région choisie et réalise des corrections. Le bouclier, le pointage et les

fenêtres d’accès au ciel influencent les observations. Les illustrations du Système solaire dessinent souvent ces distances sans échelle cohérente.

Mission ou famille	Domaine ou objectif	Repère utile
Hubble	UV, visible et proche IR	Miroir de 2,4 m
Webb	Infrarouge	Miroir segmenté de 6,5 m
Chandra et XMM-Newton	Rayons X	Optiques adaptées aux hautes énergies
Euclid	Géométrie et structures cosmiques	Grand relevé visible et infrarouge
Roman	Grand champ infrarouge	Miroir de 2,4 m, lancement en août 2026

Une date n’est pas toute une mission

Le lancement, la mise au point des instruments et le début de l’exploitation scientifique sont des étapes différentes. Roman a été lancé le 30 août 2026, selon la NASA ; la mise en service et les grands programmes suivent leur calendrier propre. Présenter une capacité prévue comme une découverte déjà obtenue brouillerait ces étapes.

Gaia a terminé ses observations scientifiques en janvier 2025 et ses opérations spatiales en mars 2025. Ses données continuent pourtant d’être traitées et exploitées. La fin des observations ne signifie donc pas la fin de la production scientifique. Les catalogues peuvent rester des références longtemps après l’arrêt d’un satellite.

Aller sur place

Une sonde planétaire réalise des survols, se met en orbite, descend dans une atmosphère ou analyse une surface. Elle peut mesurer un champ gravitationnel, une composition ou un échantillon dans un contexte impossible à obtenir de loin. Le retour d’échantillons ajoute les capacités des laboratoires

terrestres, tout en exigeant une documentation et une conservation rigoureuses.

La télémesure transporte les données avec un débit limité et un retard imposé par la distance. Les équipes préparent donc une partie des séquences à l’avance. L’autonomie embarquée et la sélection des données deviennent importantes. Une jolie image envoyée au public représente souvent un produit reconstruit à partir de paquets calibrés et documentés.

L2 n’est pas une cachette dans l’ombre

Un observatoire près de L2 Soleil–Terre ne se trouve pas nécessairement dans une ombre terrestre permanente. Pour Webb, le bouclier protège les instruments tandis que la géométrie maintient Soleil, Terre et Lune approximativement du même côté. Les panneaux reçoivent l’énergie nécessaire. Le refroidissement repose sur l’architecture thermique, et non sur la seule idée d’un éloignement dans le noir.

Une orbite autour de la région de Lagrange évite aussi de traiter le point comme une place de stationnement rigide. Le suivi et les corrections restent nécessaires. Le choix de cette géométrie facilite certaines observations, mais impose des fenêtres de pointage et des contraintes de communication. Les dessins très simplifiés doivent distinguer direction, distance et taille du bouclier. Ce cas montre comment mécanique orbitale, thermique et stratégie scientifique se combinent dans une mission : aucune de ces disciplines ne suffit seule à expliquer la conception.

Exemple Le délai vers Mars

Si Mars se trouve à une distance choisie de 0,8 ua, un signal met environ $0{,}8 \times 499$ s ≈ 399 s, soit 6 min 39 s, dans un seul sens. Un ordre suivi d’une réponse immédiate demanderait au minimum deux fois ce délai. La distance réelle varie fortement ;

une commande interactive instantanée depuis la Terre n’est pas possible.

À retenir

Une mission se définit par sa chaîne de mesure, son environnement et son calendrier réel. Les archives prolongent sa vie scientifique au-delà des opérations spatiales.

Mini-lexique

Télémesure : transmission des mesures et informations d’un engin. Mise en service : vérification et réglage après lancement avant l’exploitation nominale.

Vérifier sa compréhension

1. La fin des observations d’un satellite rend-elle ses données inutiles ?

2. Le point L2 se trouve-t-il à la même distance que la Lune ?

Références S31 • S32 • S47 • S52

54 Ondes gravitationnelles neutrinos et rayons cosmiques

Objectifs Comparer les nouveaux messagers et comprendre ce qu’apporte leur observation conjointe.

Des variations de géométrie

Les ondes gravitationnelles propagent des perturbations de l’espace-temps produites par certaines distributions de masse en mouvement accéléré. Des systèmes compacts en rapprochement peuvent fournir un signal dont fréquence et amplitude augmentent avant la fusion : un chirp. Les détecteurs comparent de très petites variations relatives de longueur, avec de nombreux contrôles des bruits terrestres.

LIGO et Virgo ont ouvert une astronomie des fusions compactes. Plusieurs instruments améliorent la localisation et la discrimination des perturbations. Une forme d’onde théorique dépend des masses, des rotations, de la distance et de l’orientation. L’ajustement fournit donc des distributions de paramètres corrélés, plutôt qu’une lecture directe d’une masse sur un cadran.

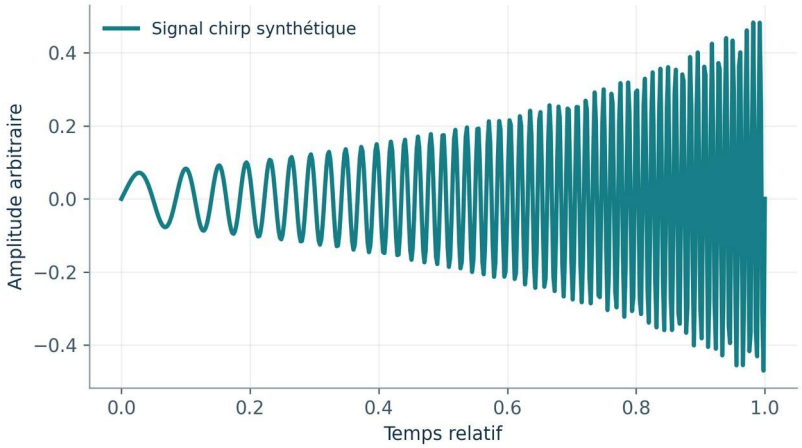


Figure 36 — Chirp synthétique illustrant une fréquence et une amplitude croissantes. Le tracé n’est pas un signal LIGO/Virgo mesuré et n’utilise pas un modèle de fusion complet.

Des particules qui traversent la matière

Les neutrinos interagissent faiblement, ce qui leur permet de quitter des régions denses. Cette qualité rend aussi leur détection difficile. Les grands détecteurs recherchent les produits secondaires d’une rare interaction. Dans IceCube, des particules chargées produisent une lumière Cherenkov dans la glace ; les capteurs ne photographient pas directement le neutrino.

La vitesse d’une particule chargée peut dépasser la vitesse de phase de la lumière dans un milieu tout en restant inférieure à c dans le vide. Le rayonnement Cherenkov ne viole donc pas la relativité. Sa géométrie et son temps d’arrivée aident à reconstruire la direction et l’énergie, avec une précision dépendant du type d’événement.

Des particules chargées déviées

Les rayons cosmiques comprennent surtout des noyaux et d’autres particules énergétiques. Les champs magnétiques dévient leurs trajectoires ; leur direction d’arrivée ne pointe donc pas nécessairement vers leur source. Des cascades atmosphériques permettent d’étudier les plus hautes énergies, au prix d’une reconstruction indirecte.

Les photons gamma et les neutrinos complètent ces contraintes sur les accélérateurs cosmiques. Une association avec une source doit être évaluée statistiquement, en tenant compte du nombre de directions, de périodes et d’énergies testées. Deux événements proches sur une carte ne constituent pas immédiatement une preuve d’origine commune.

Observer ensemble

GW170817, détecté en août 2017, a relié des ondes gravitationnelles à une fusion d’étoiles à neutrons et à des émissions électromagnétiques suivies par de nombreux observatoires. Les messagers ont contraint des aspects

différents : dynamique de la fusion, éjectas, environnement et distance. L’ensemble apporte davantage qu’une simple répétition de la même mesure.

Les alertes rapides coordonnent les observations avant que l’émission ne s’éteigne. Elles contiennent des probabilités de localisation et de classification susceptibles d’être révisées. Une absence de contrepartie peut renseigner, mais dépend de la profondeur, de la couverture et du moment des recherches. Il faut garder les limites des non-détections dans le bilan.

Les masses sont liées dans le chirp

La première évolution de fréquence d’une binaire compacte contraint fortement une combinaison appelée masse de chirp : $Mc = (m_1 m_2)^{3/5}/(m_1 + m_2)^{1/5}$. Pour deux masses égales m, elle vaut environ 0,871 m. Deux étoiles à neutrons de 1,4 masse solaire donnent donc une masse de chirp proche de 1,22 masse solaire.

Cette combinaison peut être mieux contrainte que chacune des deux masses séparément. Les rotations, le rapport de masses et l’orientation introduisent d’autres dépendances. L’amplitude dépend notamment de la distance et de l’inclinaison ; une contrepartie ou un réseau plus riche peut réduire des ambiguïtés. À distance cosmologique, les masses observées dans la forme d’onde sont aussi affectées par le décalage. Il faut donc annoncer si une masse est rapportée au référentiel de la source ou à celui de l’observateur. Un nombre précis reste lié à sa définition physique.

Exemple Une déformation de 10^{-21}

Pour une longueur de 4 km, une variation relative de 10^{-21} correspond à environ 4×10^{-18} m. Ce produit donne un ordre de grandeur du signal géométrique. La détection réelle repose sur l'interférométrie, des références temporelles et un traitement du bruit ; il ne s'agit pas de mesurer au microscope une petite règle déplacée.

À retenir

Chaque messager traverse et révèle le milieu différemment. Leur combinaison permet de tester la dynamique, la matière dense et les mécanismes d'accélération.

Mini-lexique

Astronomie multimessager : étude combinant rayonnement électromagnétique, ondes gravitationnelles et/ou particules. Strain : variation relative de longueur utilisée pour caractériser une onde gravitationnelle.

Vérifier sa compréhension

1. Pourquoi un rayon cosmique chargé ne pointe-t-il pas toujours vers sa source ?

2. IceCube observe-t-il directement des photographies de neutrinos ?

Références S15 • S33 • S34

PARTIE X

X

Aux frontières des théories

Distinguer les modèles testés des propositions encore ouvertes.

DANS CETTE PARTIE

55 Gravitation quantique et échelles de Planck

56 Cordes dimensions supplémentaires et modèles

57 Les multivers et les interprétations quantiques

58 Lire une découverte et évaluer une explication

55 Gravitation quantique et échelles de Planck

Objectifs Comprendre pourquoi une théorie supplémentaire est recherchée et distinguer une échelle théorique d’un seuil expérimental observé.

Deux cadres qui réussissent

La relativité générale décrit la gravitation et la géométrie classique. La théorie quantique des champs décrit les particules et plusieurs interactions avec une grande précision dans les régimes testés. Pour de nombreuses situations, on peut utiliser ces cadres dans des approximations compatibles. Mais leur assemblage complet devient difficile lorsque la géométrie elle-même doit être traitée quantiquement.

Les régions proches des singularités classiques et certaines phases très précoces motivent une théorie de gravitation quantique. Une singularité ne fournit pas une photographie de la nature à densité infinie ; elle indique que la solution classique atteint une limite. Le problème consiste à construire un cadre cohérent qui reproduise les succès connus et produise des conséquences testables.

Des combinaisons de constantes

En combinant G, ħ et c, on construit une longueur, un temps et une énergie de Planck. La longueur vaut environ $1{,}6 \times 10^{-35}$ m, le temps environ $5{,}4 \times 10^{-44}$ s et l’énergie environ $1{,}2 \times 10^{19}$ GeV. Ces nombres signalent un régime où certains arguments dimensionnels suggèrent des effets quantiques gravitationnels importants.

Ils ne prouvent pas que l’espace est composé de cubes de cette taille ni qu’une horloge avance par sauts de temps de Planck. Une théorie particulière peut prédire des structures discrètes,

mais l'analyse dimensionnelle seule ne le fait pas. Il faut séparer une unité naturelle, une hypothèse physique et une mesure.

$$\ell P = \sqrt{(\hbar G / c^3)}$$

Approche	Idée explorée	Question commune
Théories de cordes	Objets étendus et gravitation quantique	Relier les constructions au monde observé
Gravitation quantique à boucles	Quantification de variables géométriques	Retrouver la dynamique et les tests pertinents
Théories effectives	Corrections contrôlées à basse énergie	Définir le domaine de validité
Autres programmes	Causalité, discrétisation ou émergence	Produire des prédictions discriminantes

Une théorie effective reste informative

Une théorie peut être utile sans décrire toutes les énergies. La gravitation traitée comme théorie effective permet de calculer certaines corrections à faible énergie, avec des limites annoncées. L'impossibilité de prolonger naïvement une procédure perturbative jusqu'à toute énergie ne signifie pas que tous les calculs quantiques gravitationnels soient dépourvus de sens.

La situation rappelle d'autres cadres physiques : une théorie des fluides décrit bien l'eau à grande échelle sans résoudre chaque molécule. L'analogie a ses limites, mais montre qu'un domaine de validité n'est pas un échec logique. La question fondamentale est de savoir quel cadre plus complet engendre les descriptions efficaces et dans quelles conditions.

Tester loin d'un accélérateur idéal

Les observations cosmologiques, les trous noirs et les ondes gravitationnelles peuvent contraindre certaines propositions. Les expériences de laboratoire cherchent également des signatures spécifiques. Il faut toutefois éviter d'attribuer toute anomalie à la

gravitation quantique. Un modèle doit annoncer quel effet, à quelle amplitude et sous quelles hypothèses il prévoit.

Une contrainte sur une violation de symétrie ne réfute pas toutes les théories quantiques de gravitation, car toutes ne prédisent pas cette violation. De même, une observation compatible avec la relativité dans un régime donné ne résout pas la question des singularités. Le programme avance par exclusions et tests de familles précises, pas par verdict global sur une idée unique.

L’information des trous noirs

Une question majeure concerne le devenir de l’information quantique lorsqu’un trou noir se forme puis s’évapore dans une description semi-classique. La mécanique quantique usuelle conserve une évolution unitaire pour un système fermé, tandis qu’un rayonnement strictement thermique paraît perdre certains détails de l’état initial. La tension dépend de la manière d’associer les cadres et de définir les régions accessibles.

Des recherches proposent des mécanismes et des descriptions mathématiques permettant de suivre des entropies et des corrélations. Leur portée doit être précisée : un résultat dans un modèle contrôlé n’établit pas nécessairement le mécanisme détaillé d’un trou noir astrophysique réel. Le problème motive des liens entre gravitation, thermodynamique et information. Il montre aussi qu’une absence de mesure directe ne signifie pas absence de question précise : la cohérence entre des principes déjà fructueux peut imposer des contraintes théoriques, puis guider la recherche de conséquences observables.

Exemple Un immense écart d’énergie

Une énergie de collision de l’ordre de 10^4 GeV reste environ quinze ordres de grandeur sous l’énergie de Planck. Ce rapport explique pourquoi atteindre directement ce régime est si difficile. Il ne démontre pas qu’aucun effet indirect ne puisse jamais être

observé, mais impose une grande prudence face aux promesses d’une vérification immédiate sans mécanisme d’amplification explicite.

À retenir

La gravitation quantique est un problème ouvert motivé par des limites précises. Les échelles de Planck sont des repères dimensionnels, pas des observations d’une granularité de l’espace.

Mini-lexique

Théorie effective : description valable sur une gamme d’échelles avec des corrections contrôlées. Quantification : construction d’une description quantique à partir de variables et de règles définies.

Vérifier sa compréhension

1. La longueur de Planck prouve-t-elle à elle seule une taille minimale des pixels de l’espace ?

2. Une théorie limitée à basse énergie peut-elle fournir des prédictions utiles ?

Références S03 • S08 • S56 • S57 • S58

56 Cordes dimensions supplémentaires et modèles

Objectifs Présenter les idées centrales des cordes et identifier les étapes qui séparent une construction mathématique d'une théorie confirmée du monde.

Remplacer le point par un objet étendu

Dans les théories de cordes, les degrés de liberté fondamentaux ne sont pas décrits uniquement comme des particules ponctuelles. Une corde possède une extension unidimensionnelle, et ses états quantiques peuvent apparaître comme différentes particules dans une description effective. L'image de vibrations aide à visualiser cette diversité, sans supposer un fil matériel ordinaire vibrant dans l'air.

Certaines constructions contiennent un état interprété comme un graviton, quantum associé à une interaction gravitationnelle. Cette propriété motive leur étude comme candidates à une description quantique de la gravitation. Elle n'équivaut pas à une détection expérimentale du graviton ni à la démonstration que la nature utilise des cordes.

Des dimensions à rendre compatibles

Les formulations cohérentes de supercordes font intervenir davantage de dimensions que les trois dimensions spatiales et le temps de notre description quotidienne. Dans de nombreux modèles, les dimensions supplémentaires sont compactifiées : leur géométrie est petite ou difficilement accessible aux mesures ordinaires. Les propriétés de cette géométrie influencent la physique effective.

L'analogie d'un tuyau, qui ressemble de loin à une ligne mais possède une circonférence, illustre une dimension cachée à faible résolution. Elle ne démontre pas leur existence. Des

dimensions supplémentaires peuvent aussi apparaître dans d'autres cadres théoriques ; un test expérimental de leur présence ne sélectionnerait donc pas automatiquement une théorie de cordes précise.

Niveau	Ce qui peut être établi	Ce qui reste à relier
Cohérence mathématique	Propriétés d'un modèle défini	Pertinence pour notre Univers
Physique effective	Spectres et interactions possibles	Paramètres effectivement observés
Prédiction testable	Signature conditionnelle	Unicité et amplitude mesurable
Confrontation	Compatibilité ou exclusion d'un domaine	Validation d'un cadre complet

Beaucoup de solutions possibles

Les choix de géométrie, de champs et de conditions conduisent à de nombreuses descriptions effectives. Cet ensemble est souvent appelé paysage. L'existence d'une vaste famille de solutions soulève une difficulté de sélection : pourquoi notre monde correspondrait-il à l'une plutôt qu'à une autre ? Une possibilité mathématique n'est pas encore une prédiction probabiliste.

Les dualités relient parfois des descriptions apparemment différentes d'un même système. Elles ont fourni des outils théoriques importants et des liens avec d'autres domaines. Utiliser avec succès un outil issu des cordes pour un problème mathématique ou physique ne constitue toutefois pas, à lui seul, une observation de cordes fondamentales dans la nature.

Quelles signatures rechercher

Des recherches explorent des dimensions supplémentaires, des particules partenaires ou des signatures cosmologiques sous des hypothèses déterminées. Les limites obtenues aux accélérateurs concernent des modèles et des gammes de paramètres.

Certaines énergies caractéristiques peuvent rester très au-delà des possibilités expérimentales directes.

La présentation honnête doit garder les deux aspects : un programme théorique riche et un lien empirique encore incomplet avec le modèle précis de notre Univers. L’élégance, l’unification et la cohérence sont des motivations légitimes pour chercher. La confirmation scientifique exige aussi des conséquences qui risquent d’être contredites par des observations et qui distinguent le cadre de ses concurrents.

Une équivalence théorique n’est pas une photographie du cosmos

Certaines dualités relient une description gravitationnelle à une théorie sans gravitation définie sur une frontière, dans des conditions mathématiques particulières. Ces correspondances permettent d’explorer des systèmes fortement couplés et des questions sur l’information. Leur utilité ne signifie pas que notre Univers observé possède automatiquement la même géométrie ou les mêmes conditions aux limites.

Le passage d’un laboratoire théorique à une description du monde demande de comparer contenus, symétries, dimensions et observables. Une construction peut résoudre un problème interne ou fournir une méthode de calcul sans prédire directement une nouvelle raie astronomique. Cette distinction protège la valeur réelle du travail : on peut reconnaître une avancée mathématique importante sans lui attribuer une confirmation expérimentale qu’elle n’a pas. Pour le lecteur, demander « quel système est décrit et quelle mesure serait différente ? » demeure le meilleur moyen de relier l’idée générale à sa portée physique.

Exemple Une dimension enroulée

Si un objet hypothétique possède une dimension circulaire de rayon R, une expérience dont la longueur de résolution est beaucoup plus grande que R peut ne pas distinguer cette direction. Réduire la longueur sondée demande généralement une énergie plus élevée. Ce raisonnement qualitatif explique une stratégie de recherche ; il ne fournit ni la valeur de R dans la nature ni une preuve que cette dimension existe.

À retenir

Les cordes constituent une famille de candidates théoriques, avec des résultats mathématiques importants. Le choix du modèle correspondant à notre monde et sa confirmation expérimentale restent des défis.

Mini-lexique

Compactification : description où des dimensions supplémentaires possèdent une structure compacte. Dualité : relation entre deux formulations donnant des descriptions équivalentes dans un cadre défini.

Vérifier sa compréhension

1. Une corde théorique est-elle un filament de matière ordinaire visible avec un microscope suffisamment puissant ?

2. Une recherche négative de dimensions supplémentaires dans un domaine réfute-t-elle toutes les constructions de cordes ?

Références S09 • S35 • S53

57 Les multivers et les interprétations quantiques

Objectifs Distinguer plusieurs sens du mot multivers et comprendre les difficultés de prédiction et de test.

Un mot pour plusieurs propositions

Le terme « multivers » regroupe des idées qui ne reposent pas sur le même mécanisme. Certaines concernent des régions cosmologiques produites par une dynamique inflationnaire ; d'autres un ensemble de solutions de champs et de géométries ; d'autres encore une interprétation de la mécanique quantique. Les réunir dans une image de bulles ne suffit pas à établir leur lien physique.

Une région située au-delà de notre horizon observable peut simplement appartenir au même espace-temps, avec les mêmes lois locales, sans constituer un univers distinct au sens fort. L'impossibilité actuelle de recevoir un signal n'implique pas nécessairement une séparation métaphysique. Chaque discussion doit donc commencer par définir les objets et leurs relations causales.

Inflation et régions multiples

Dans certains modèles d'inflation éternelle, l'expansion inflationnaire se poursuit dans certaines régions pendant que d'autres évoluent vers des états différents. Des domaines peuvent devenir causalement très séparés. La conclusion dépend du potentiel, de la description des fluctuations et de la possibilité de prolonger le modèle dans des régimes encore inconnus.

Si de nombreuses régions possèdent des paramètres différents, il faut définir comment attribuer des probabilités. Compter une infinité de domaines demande une mesure ; des procédures différentes peuvent donner des résultats différents. Le problème

de mesure n’est pas un détail de présentation : il affecte ce que le scénario prédit pour un observateur.

Sens du mot	Cadre proposé	Difficulté principale
Régions lointaines	Cosmologie au-delà de l’horizon	Accès observationnel limité
Domaines inflationnaires	Dynamique de certains champs	Mesure et signatures discriminantes
Paysage	Solutions de théories fondamentales	Sélection et réalisation physique
Branches quantiques	Interprétation de l’état quantique	Statut des branches et probabilités

Les mondes multiples quantiques

L’interprétation d’Everett traite l’évolution quantique sans ajouter un effondrement fondamental unique de l’état. La décohérence explique pourquoi certaines composantes deviennent pratiquement incapables d’interférer dans les conditions usuelles. Les « branches » ne sont pas nécessairement de petites bulles localisées ailleurs dans notre espace ordinaire.

Cette interprétation ne signifie pas qu’une intention humaine fabrique volontairement un univers à chaque choix. Les questions portent sur les états, les interactions, les probabilités et la lecture des résultats. Des interprétations peuvent partager les mêmes prédictions dans les domaines expérimentaux accessibles, tandis que d’autres modèles, comme certains effondrements objectifs, proposent des différences testables.

Argument anthropique et preuve

Un raisonnement anthropique rappelle qu’un observateur ne mesure des conditions que dans un milieu compatible avec son existence. Cela peut introduire un effet de sélection, comme le fait qu’un poisson trouve de l’eau autour de lui. Mais ce constat

ne fournit pas à lui seul la distribution des conditions possibles ni une théorie de leur production.

Pour devenir prédictif, un scénario doit préciser ce qu’il compte, comment il pondère les possibilités et quelles observations pourraient le mettre en difficulté. Une proposition peut rester intéressante sans être actuellement confirmée. Le lecteur peut comprendre ses motivations tout en conservant une distinction nette avec l’expansion, les spectres ou les ondes gravitationnelles déjà observés.

Tout ce que l’on imagine n’est pas une branche permise

Dans une interprétation quantique donnée, les composantes et leurs poids proviennent de l’état et de la dynamique. Affirmer que « tout arrive quelque part » sans restriction ne rend pas compte des amplitudes nulles, des lois de conservation ni des structures de l’espace des états. Les récits populaires peuvent ainsi transformer une proposition précise en permission de n’importe quel scénario.

Le même problème apparaît avec un paysage théorique : l’existence de nombreux modèles ne signifie pas que toutes les lois imaginables soient cohérentes ou réalisées. Les contraintes mathématiques et physiques sélectionnent déjà des possibilités. Il reste ensuite à expliquer leur réalisation et leur pondération. Une hypothèse de multivers n’élimine donc pas le besoin de lois ; elle déplace une partie des questions vers les mécanismes de génération, les distributions et les conditions d’observation. La prudence consiste à exposer ce déplacement, sans annoncer que chaque récit personnel possède une copie cosmique confirmée.

✦ Exemple Une sélection sans théorie complète

Imaginons cent milieux fictifs dont un seul permet des observateurs. Un observateur se trouve nécessairement dans ce dernier. Cela explique un biais de sélection, mais ne prouve pas

que les cent milieux existent réellement. Il faut une théorie indépendante de leur production et un moyen de relier cette théorie aux données pour dépasser l’expérience de pensée.

À retenir

Il existe plusieurs hypothèses de multivers. Leur intérêt théorique ne remplace pas la définition des probabilités, des mécanismes et des tests.

Mini-lexique

Décohérence : perte pratique des interférences accessibles entre certaines composantes à cause des interactions avec l’environnement. Effet de sélection anthropique : conditionnement d’une observation par la possibilité d’existence de l’observateur.

Vérifier sa compréhension

1. Les branches d’une interprétation quantique sont-elles identiques par définition à des bulles d’inflation ?

2. Le fait que nos conditions permettent la vie prouve-t-il l’existence d’une infinité d’univers ?

Références S25 • S35 • S38 • S54

58 Lire une découverte et évaluer une explication

Objectifs Classer les niveaux de conclusion d’un résultat et examiner une annonce sans la rejeter ni l’accepter sur son seul titre.

Commencer par ce qui a été mesuré

Une annonce peut présenter une image, une raie, une variation ou un paramètre déduit. Il faut identifier cette observable avant la conclusion. « Une molécule proposée dans un ajustement spectral » ne possède pas le même statut que « une vie détectée ». « Une valeur de masse sous un modèle » diffère de « une particule de matière noire identifiée ».

Le texte scientifique devrait préciser les données, la calibration, le modèle et l’incertitude. Les résumés publics raccourcissent souvent cette chaîne. Retrouver la publication et sa section de limites permet de comprendre ce qui est nouveau : une observation, une précision améliorée, une méthode ou une interprétation.

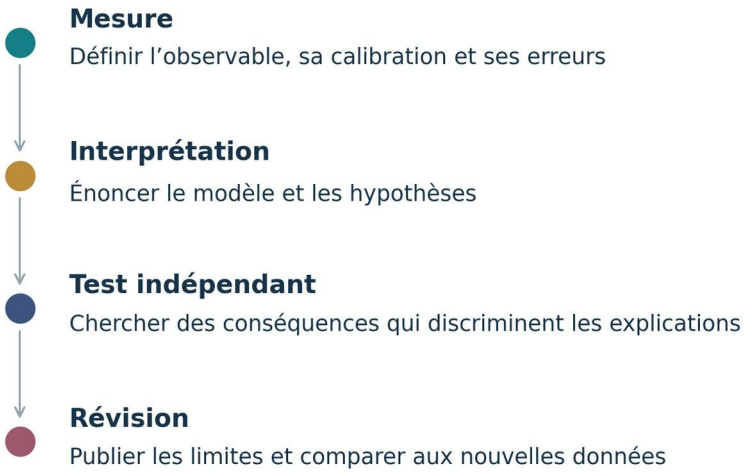


Figure 37 — Chaîne de lecture d’un résultat. Schéma original de méthode ; les allers-retours entre étapes font partie de la recherche.

Établi modèle et conjecture

Un résultat établi résiste à plusieurs tests et s’intègre à un ensemble cohérent d’observations. Un modèle fournit une description calculable avec des hypothèses. Une conjecture propose une relation ou un mécanisme encore non démontré ou non confirmé. Ces catégories ne sont pas des jugements sur l’intelligence de leurs auteurs ; elles décrivent des niveaux d’appui et de portée.

La relativité générale est un cadre fortement testé dans de nombreux domaines, tout en ayant des limites possibles. ΛCDM est un modèle cosmologique de référence dont plusieurs composantes restent fondamentalement mystérieuses. Les cordes et certains multivers sont des programmes théoriques ou des hypothèses dont l’appui empirique doit être présenté avec prudence. Le mot « théorie » change parfois d’usage selon le contexte ; il faut expliquer plutôt qu’étiqueter.

Vérifier l’indépendance

Deux articles ne sont pas nécessairement deux confirmations indépendantes s’ils utilisent les mêmes données et la même calibration. Deux instruments peuvent partager une référence ou une réduction. La reproduction du calcul reste utile, mais ne teste pas toutes les mêmes erreurs que la collecte d’un nouveau jeu de données.

Une prédiction formulée avant l’observation offre un test plus fort qu’une explication ajustée après avoir examiné de nombreuses possibilités. L’ajustement n’est pas interdit : il fait partie de la construction des modèles. Mais le nombre d’essais et la flexibilité influencent la portée d’un bon accord. Des tests sur des données conservées à part ou analysées en aveugle limitent certains biais.

Accepter une correction

La publication ne rend pas une conclusion définitive. Des erreurs, de nouvelles données ou de meilleures méthodes peuvent la modifier. Une révision documentée constitue un progrès lorsque la nouvelle version explique mieux l’ensemble. Inversement, invoquer l’évolution permanente de la science ne justifie pas de traiter toutes les propositions comme également soutenues.

Le lecteur peut garder une fiche simple : question, signal, modèle, incertitudes, alternatives, test indépendant. Cette structure s’applique à une supernova, une exoplanète ou une anomalie cosmologique. Elle permet de discuter précisément le niveau de confiance au lieu de choisir entre enthousiasme sans réserve et rejet général.

Comparer deux explications qui prédisent les mêmes données

Si deux modèles donnent exactement les mêmes probabilités pour toutes les mesures disponibles, ces données ne peuvent pas les départager. Une préférence peut alors dépendre de leur simplicité, de leur cohérence avec d’autres domaines ou d’hypothèses préalables, mais elle doit être présentée comme telle. Il faut chercher une nouvelle observable pour obtenir un test empirique distinctif.

Dans une comparaison probabiliste, un modèle capable de s’ajuster à presque n’importe quel résultat paie généralement sa flexibilité différemment d’un modèle qui prédit une gamme étroite avant la mesure. Le résultat dépend néanmoins des plages de paramètres et des probabilités choisies ; il faut les publier. Le simple fait qu’un modèle possède une courbe passant par les points ne prouve pas qu’il était fortement prédictif. Lire les alternatives testées et le domaine autorisé aide à distinguer réussite d’ajustement, corroboration et identification d’un mécanisme unique.

Exemple Un excès parmi beaucoup de recherches

Une équipe inspecte mille bandes indépendantes avec un seuil de fausse alerte de 1 % par bande. Même en l’absence de signal, elle attend en moyenne dix dépassements. Ce calcul idéal n’affirme pas qu’une découverte donnée est fausse ; il montre pourquoi le nombre de recherches et les corrélations doivent être inclus dans l’évaluation globale.

À retenir

La force d’une découverte dépend de sa chaîne de preuves et des alternatives testées. Un titre impressionnant ne remplace ni la méthode ni la reproduction.

Mini-lexique

Analyse en aveugle : procédure cachant certaines informations pour limiter les ajustements guidés par le résultat attendu. Réplication : nouvelle vérification d’un résultat, avec un degré d’indépendance à préciser.

Vérifier sa compréhension

1. Deux analyses du même catalogue éliminent-elles une erreur de calibration commune ?

2. Pourquoi un seuil valable pour un seul test doit-il être réexaminé quand on en réalise mille ?

Références S06 • S21 • S27

PARTIE XI

XI

Expérimenter et vérifier

Calculs, observations et données pour apprendre en pratiquant.

DANS CETTE PARTIE

59 Mesurer une variation de lumière

60 Calculer un Système solaire à l’échelle

61 Exploiter un catalogue public

62 Relier les lois aux observations

59 Mesurer une variation de lumière

Objectifs Préparer une expérience photométrique simple et séparer les variations de l’objet des effets du ciel et du matériel.

Choisir une question réalisable

Une mesure utile commence par une amplitude et une durée attendues. Pour une première activité, une étoile variable bien documentée et accessible vaut mieux qu’un phénomène minuscule proche des limites de l’appareil. Les cartes et recommandations de l’AAVSO aident à choisir des comparaisons et une cadence. Le tome I complète la préparation du matériel et du terrain.

La question peut être : « l’étoile change-t-elle pendant cette période et à quelle amplitude ? » Elle doit être séparée de l’ambition de mesurer immédiatement une température ou une distance. Une courbe relative propre constitue déjà un résultat. Fixer l’objectif avant d’observer évite de transformer après coup chaque fluctuation en découverte.

Préparer une série comparable

Conserver le filtre, l’orientation et les réglages autant que possible. Noter la date avec sa référence temporelle, le lieu, les poses, l’état du ciel et les traitements. Éviter la saturation et les cibles trop basses. Garder les images brutes, même si certaines sont exclues ensuite, en documentant les raisons du rejet.

Une étoile de comparaison doit être stable dans la bande et sur la durée étudiées. Une étoile de contrôle supplémentaire vérifie cette hypothèse et les défauts du champ. Des couleurs très différentes rendent les variations d’extinction atmosphérique plus difficiles à éliminer. L’activité cherche donc un compromis

entre proximité, éclat et couleur, plutôt qu’un choix fondé seulement sur la beauté du champ.

Compter et retirer le fond

Une ouverture autour de l’étoile recueille son signal et celui du ciel. Une zone voisine estime le fond, en évitant les étoiles et les défauts. On retire la contribution moyenne du fond multipliée par la surface de l’ouverture. Le choix de l’ouverture doit conserver une fraction stable de la lumière malgré les variations de largeur des images.

Le rapport du signal de la cible à celui de la comparaison réduit des variations communes de transparence. Il ne corrige pas tous les effets : gradients, passages de nuages inhomogènes, couleurs et déplacements sur des pixels mal corrigés peuvent subsister. La courbe du contrôle sert à repérer une anomalie collective.

Temps après le début	Rapport cible/comparaison	Nature des données
0 min	0,400	Série synthétique
20 min	0,398	Série synthétique
40 min	0,362	Série synthétique
60 min	0,395	Série synthétique
80 min	0,401	Série synthétique

Tracer avant de conclure

Représenter le flux relatif ou la magnitude différentielle en fonction du temps. Afficher des incertitudes quand elles sont estimées et tracer le contrôle séparément. Une seule baisse ne permet pas de décider entre un transit, une éclipse, un passage nuageux ou un défaut. Rechercher une répétition et des données indépendantes.

Si une période est proposée, calculer les phases puis superposer les cycles. Examiner aussi les données sans repliement : cette transformation peut rendre un bruit trompeusement ordonné si la période a été choisie après de nombreux essais. Documenter la méthode de recherche et les périodes concurrentes. Le résultat doit pouvoir être retrouvé à partir des données conservées.

Restituer une mesure modeste mais vérifiable

Le compte rendu contient la cible, le filtre, les dates, l’étoile de comparaison, la méthode de fond et les critères de rejet. Il distingue la baisse mesurée de son interprétation. Une absence de variation peut être informative si le seuil détectable est annoncé : « aucune variation supérieure à 0,05 magnitude sur deux heures » dit davantage que « l’étoile est stable ».

Pour une contribution scientifique, suivre les formats et contrôles du réseau choisi avant d’envoyer des observations. Cette activité peut aussi rester entièrement pédagogique sur une série publique. Dans les deux cas, l’objectif est de comprendre la chaîne de mesure et de repérer ce qui limite la précision.

Évaluer la stabilité d’une ouverture

Une image stellaire s’élargit lorsque la turbulence ou la mise au point changent. Une ouverture trop petite perd alors une fraction variable de la lumière ; une ouverture très grande ajoute du fond et du bruit. On peut mesurer une courbe de croissance en augmentant progressivement le rayon de l’ouverture pour trouver un compromis et vérifier sa stabilité sur plusieurs images.

Si la cible et la comparaison ont des images ou des voisinages différents, leurs pertes ne se compensent pas exactement. Une étoile proche du bord du capteur ou d’un voisin demande une attention particulière. Tester plusieurs ouvertures raisonnables

permet d’évaluer si la variation annoncée dépend fortement du réglage. Le choix final ne doit pas être celui qui rend la courbe la plus spectaculaire ; il doit être justifié par la qualité des images et appliqué de façon cohérente. Cette expérience relie directement un paramètre de traitement à l’incertitude astrophysique.

Exemple Convertir un rapport en magnitude

Si la comparaison possède une magnitude de 10,0 et que le rapport de flux cible/comparaison vaut 0,400, la cible a une magnitude d’environ $10{,}0 - 2{,}5 \log_{10}(0{,}400) = 10{,}995$. Un rapport de 0,362 donne environ 11,103. La baisse synthétique correspond donc à environ 0,108 magnitude, avant toute conclusion sur sa cause.

À retenir

Une variation doit être comparée à une référence et à un contrôle. Les données brutes, les dates et les traitements rendent le résultat réutilisable.

Mini-lexique

Photométrie différentielle : comparaison de flux entre une cible et des références.
Ouverture photométrique : région utilisée pour additionner le signal d’un objet.

Vérifier sa compréhension

1. Le rapport cible/comparaison passe de 0,50 à 0,25. Quelle est la variation de magnitude ?

2. Si le contrôle baisse au même instant que la cible, quelle vérification devient prioritaire ?

Références S36 • S48

60 Calculer un Système solaire à l’échelle

Objectifs Construire une échelle cohérente pour distances et diamètres et reconnaître les limites d’un parcours linéaire.

Choisir une seule réduction physique

Un modèle cohérent utilise le même facteur pour toutes les longueurs. Si la distance Soleil–Neptune doit tenir dans 500 m, on déduit la réduction à partir d’un demi-grand axe choisi et on applique ce facteur aux diamètres. Agrandir arbitrairement les planètes pour les rendre visibles produit une autre représentation, qui doit être annoncée avec une deuxième échelle.

Les valeurs de cette activité sont des repères pédagogiques fixes, fondés sur des demi-grands axes arrondis : Terre 1 ua et Neptune 30,069 ua. Elles ne représentent pas les positions des planètes au 18 octobre 2026. Une véritable carte à date donnée demande des éphémérides et montre des directions et des distances instantanées différentes.

Calculer les emplacements

Pour une longueur totale L et un demi-grand axe a en ua, l’emplacement vaut $x = L \times a/30{,}069$. La formule maintient les rapports. Les premières planètes se concentrent près du départ ; les géantes externes demandent de longues marches. Cette répartition constitue précisément une leçon du parcours, qu’il ne faut pas gommer pour remplir régulièrement les panneaux.

Le modèle aligne les distances radiales pour faciliter la comparaison. Les planètes ne se trouvent pas réellement toutes sur une droite au même instant. Leurs orbites sont des trajectoires dans l’espace, avec des vitesses et des inclinaisons.

Le parcours enseigne les échelles ; un plan d’orbites ou un logiciel complète la géométrie.

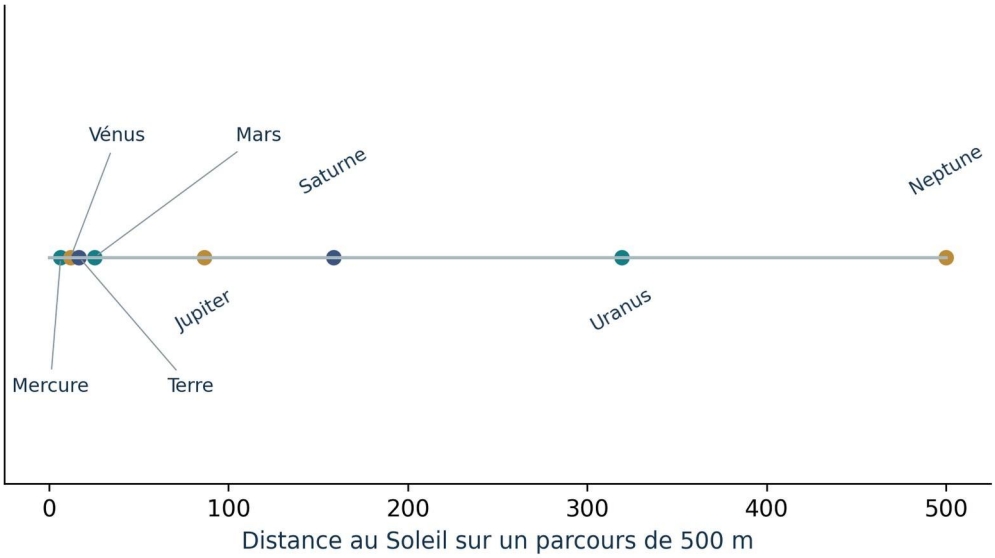


Figure 38 — Emplacements calculés pour le jeu de valeurs pédagogiques adopté et un parcours de 500 m. La ligne est un dispositif de comparaison, pas une configuration réelle des planètes.

Rendre les petits diamètres compréhensibles

À cette échelle, le Soleil mesure environ 15,5 cm et la Terre environ 1,42 mm. Une simple bille terrestre peut être difficile à voir ; on peut ajouter une loupe graphique ou un gros plan, mais la légende doit distinguer la bille à l’échelle de l’agrandissement. Mélanger les deux dans une même illustration sans avertissement fausse la représentation.

Un panneau peut présenter le diamètre, la distance, le temps de lumière et une comparaison simple. Les photographies ne sont pas des disques à l’échelle : elles servent à reconnaître l’objet. Le hors-série sur les parcours solaires développe la réalisation matérielle ; ce chapitre explique les calculs et les choix de représentation.

Passer à cent mètres ou un kilomètre

Tous les emplacements et les diamètres varient proportionnellement à la longueur totale. Réduire 500 m à 100 m divise chaque longueur par cinq. Passer à 1 km les double. Les tableaux de l’annexe donnent les trois versions et les données d’entrée, pour éviter de recopier des nombres issus de conventions différentes.

La mise en place demande de mesurer le chemin réellement praticable et de choisir un départ durablement identifiable. Une distance le long d’une allée sinueuse peut être retenue si cette convention est explicite. Une carte en ligne droite et une mesure au pas le long du sentier ne doivent pas être mélangées dans les mêmes valeurs.

Ouvrir vers les distances stellaires

Le parcours ne doit pas laisser croire que Neptune est le bord absolu du Système solaire. Des populations de petits corps s’étendent au-delà. Une étoile voisine exige ensuite un saut d’échelle immense. À une réduction de 1:10 milliards, Proxima du Centaure se trouverait à environ 4 000 km, alors que Neptune reste à quelques centaines de mètres.

Cette comparaison peut être présentée sur une carte avec une destination repère, en annonçant qu’elle utilise une distance arrondie. Les cartes de villes, de pays et de continents introduisent d’autres projections ; elles servent l’intuition, sans remplacer le calcul. Le changement d’unité reste le meilleur moyen de vérifier le résultat.

Faire marcher un signal lumineux réduit

Sur le parcours de 500 m adopté, le facteur de réduction vaut environ neuf milliards. Si l’on réduit aussi la vitesse de la lumière par ce facteur tout en conservant les secondes, elle devient

environ 3,3 cm/s. Un repère mobile met alors toujours environ 499 secondes pour parcourir les 16,63 m jusqu’à la Terre réduite.

Cette activité permet de ressentir un temps de propagation sans confondre longueur et durée. Un promeneur marche beaucoup plus vite que ce signal réduit ; il ne représente donc pas spontanément un photon à l’échelle choisie. On peut mesurer le temps et déplacer un marqueur avec une vitesse contrôlée plutôt que prétendre que la marche ordinaire respecte toutes les dimensions. Le dispositif doit annoncer quelle échelle est appliquée aux longueurs et quelle convention est retenue pour le temps. Un bon modèle pédagogique choisit ses correspondances au lieu de les laisser implicites.

Exemple La Terre dans un parcours de 500 mètres

x = 500/30,069 donne environ 16,63 m pour la Terre. Le facteur de réduction vaut environ $4{,}498 \times 10^{12}$ m / 500 m, soit 9,0 milliards. En divisant un diamètre terrestre de 12 756 km par ce facteur, on obtient environ 1,42 mm. Les deux calculs utilisent la même échelle ; c’est le contrôle central de l’activité.

À retenir

Un parcours cohérent conserve les mêmes rapports pour toutes les longueurs. Les agrandissements et les dates doivent être explicitement annoncés.

Mini-lexique

Échelle : rapport entre une longueur représentée et la longueur physique correspondante. Demi-grand axe : paramètre décrivant la taille d’une orbite elliptique.

Vérifier sa compréhension

1. Sur un parcours de 1 km, à quelle distance approximative placer la Terre avec le jeu adopté ?

2. Si l’on agrandit toutes les planètes cent fois sans changer les distances, le modèle conserve-t-il une seule échelle ?

Références S04 • S37

61 Exploiter un catalogue public

Objectifs Construire une petite analyse reproductible à partir de données publiques et conserver les unités, les sélections et les références.

Définir un échantillon avant de tracer

Un catalogue n’est pas une liste neutre de tout ce qui existe. Il résulte de limites instrumentales, de choix de traitement et de critères de publication. Une activité simple consiste à construire un diagramme couleur–magnitude pour des étoiles proches. La question doit préciser si l’on cherche une population représentative ou seulement une démonstration de lecture.

Choisir la version du catalogue, l’archive et les colonnes. Pour Gaia, noter les unités de parallaxe, les magnitudes et les indicateurs de qualité. La documentation accompagne les données et décrit les corrections. Copier une table depuis une page secondaire sans conserver sa version rend plus difficile toute vérification ultérieure.

Garder une table de provenance

Conserver le fichier téléchargé et une note contenant la requête, la date, les champs et les critères. Si une colonne calculée est ajoutée, garder son nom, sa formule et ses unités. Ne pas remplacer silencieusement les données d’origine. Un classeur ou un script peut alors être relu sans deviner quelles valeurs ont été corrigées.

Une valeur absente n’est pas égale à zéro. Une incertitude, un indicateur de mauvaise solution et une limite supérieure sont des informations différentes. L’analyse doit décider explicitement comment les traiter. Supprimer des lignes parce qu’elles gênent une courbe attendue crée un risque de sélection a posteriori.

Identifiant fictif	Parallaxe (mas)	Magnitude apparente	Statut
Étoile A	50,0	10,0	Données synthétiques
Étoile B	20,0	8,5	Données synthétiques
Étoile C	10,0	12,0	Données synthétiques

Calculer puis contrôler

Pour des parallaxes de bonne qualité, convertir en distance puis calculer une magnitude absolue avec les conventions annoncées. Examiner les valeurs extrêmes et les incertitudes avant de tracer. Une distance négative issue d’une inversion automatique révèle un traitement inadapté ; elle ne doit pas être masquée en changeant arbitrairement le signe.

Comparer un petit sous-ensemble calculé à la main avec le traitement général. Vérifier quelques conversions, le sens des axes et les valeurs manquantes. Un test d’ordre de grandeur détecte souvent une confusion entre secondes et millisecondes d’arc. Cette étape est plus informative que de multiplier immédiatement les graphiques.

Interpréter la sélection

Une limite de magnitude fait perdre des étoiles faibles à grande distance. Un échantillon choisi pour des parallaxes très précises favorise certains objets et directions. Les doubles non résolues et la poussière déplacent les points. Le diagramme final doit donc être accompagné de sa sélection et de ses limites, surtout si l’on veut en déduire des proportions.

La même démarche s’applique à l’archive des exoplanètes : lire les définitions, conserver les références et distinguer paramètres issus d’une publication unique et valeurs composites. Pour une

activité sur les ondes gravitationnelles, GWOSC fournit des données et des exemples documentés. On commence par un exercice officiel reproductible avant de proposer sa propre recherche de signal.

Présenter ce qui est nouveau

Une figure pédagogique reproduisant une séquence principale connue n’est pas une nouvelle découverte stellaire. Elle démontre une méthode. Une anomalie doit être testée contre les erreurs, les objets connus et les effets de sélection. Le compte rendu peut conclure à une limite ou à un résultat négatif ; il reste utile s’il précise le domaine exploré.

La provenance relie enfin l’activité aux chercheurs qui ont produit l’archive. Citer mission, version, programme et publications respecte leur travail et permet au lecteur de retrouver les définitions. La disponibilité publique ne signifie ni absence de conditions de réutilisation ni dispense de comprendre les données.

Transformer un mouvement propre en vitesse

Une vitesse transverse se déduit du mouvement propre μ et de la distance : $v_t(\mathrm{km/s}) \approx 4{,}74047\ \mu(''/\mathrm{an})\ d(\mathrm{pc})$. Le facteur provient de la conversion entre unité astronomique par an et kilomètres par seconde. Une étoile ayant μ = 20 mas/an, soit 0,020″/an, à 50 pc possède ainsi une vitesse transverse d’environ 4,74 km/s.

Il faut combiner les deux composantes angulaires selon les conventions du catalogue et leurs incertitudes. La vitesse radiale complète ensuite les trois dimensions dans un référentiel défini. Un petit mouvement apparent peut correspondre à une grande vitesse si l’objet est éloigné. Inversement, un objet proche peut se déplacer visiblement sans vitesse exceptionnelle. Cette conversion constitue un contrôle instructif d’une table : oublier le passage de millisecondes à secondes d’arc multiplie la vitesse

par mille, une erreur que l’ordre de grandeur rend souvent immédiatement suspecte.

Exemple La magnitude absolue d’une étoile fictive

Pour A, p = 50 mas donne d = 20 pc. Sans extinction, $M = 10 - 5 \log_{10}(20/10) \approx 8{,}495$. Pour B, d = 50 pc et $M \approx 8{,}5 - 3{,}495 = 5{,}005$. A semble plus faible que B dans le ciel et l’est aussi intrinsèquement dans ce jeu de données, mais ces deux comparaisons reposent sur des opérations distinctes.

À retenir

Une analyse réutilisable conserve la version, les unités, les sélections et les formules. Le graphique ne doit jamais perdre la trace de ses données d’entrée.

Mini-lexique

Provenance : chaîne décrivant l’origine et les transformations d’une donnée. Valeur manquante : absence d’information, à distinguer d’une mesure nulle.

Vérifier sa compréhension

1. Pour C, calculer la distance et la magnitude absolue sans extinction.

2. Pourquoi une limite en éclat change-t-elle les proportions de populations dans un échantillon lointain ?

Références S06 • S07 • S34

62 Relier les lois aux observations

Objectifs Réunir plusieurs méthodes dans un projet cohérent et savoir quelle observation demander pour réduire une ambiguïté.

Projet sur une étoile

Choisir une étoile dont on possède une parallaxe de bonne qualité, une photométrie documentée et un spectre exploitable. Commencer par séparer les mesures et les déductions : parallaxe, flux et raies d’un côté ; distance, luminosité, température et rayon de l’autre. Écrire les hypothèses à côté de chaque flèche du raisonnement.

Une température estimée par couleur peut être comparée à une température spectrale. Un désaccord invite à examiner la poussière, les filtres, la composition et les modèles. Le but n’est pas de forcer les nombres à coïncider, mais d’identifier quelle information manque. Une étoile double non résolue peut notamment fournir trop de lumière pour un modèle d’étoile unique.

Projet sur une galaxie

Réunir une image, un décalage spectral et des mesures de mouvement ou de gaz. Décrire la morphologie sans la transformer immédiatement en scénario d’évolution. Calculer une distance approchée seulement dans le régime où la relation choisie convient. Une image en filtre visible observé ne correspond pas à la même longueur d’onde au repos pour toutes les galaxies.

Comparer ensuite une masse lumineuse estimée et une masse dynamique, en conservant les hypothèses. Une différence peut motiver une composante supplémentaire, mais la géométrie et l’état d’équilibre doivent être examinés. Ce projet relie

photométrie, spectroscopie et gravitation, tout en montrant pourquoi une seule observation suffit rarement à conclure.

Question	Première information	Observation complémentaire utile
Étoile rouge : froide ou rougie ?	Couleur	Spectre et extinction
Couple apparent : lié ou aligné ?	Séparation angulaire	Distances et mouvements
Planète : rocheuse ou enveloppée ?	Rayon	Masse et spectre atmosphérique
Galaxie : masse ou projection ?	Vitesse apparente	Inclinaison et autres traceurs

Un dossier d’enquête

Chaque groupe prépare une page de question, une page de données et une page de raisonnement. Les nombres synthétiques sont clairement marqués ; les données publiques gardent leurs références. Une figure ne doit pas montrer davantage de précision que les mesures. Les axes, les unités et les incertitudes font partie du résultat, pas d’une décoration finale.

Un autre groupe relit le dossier sans explication orale préalable. Il doit pouvoir retrouver les conversions et repérer les hypothèses. Cette relecture teste la reproductibilité et la clarté. Les incompréhensions servent à améliorer le document, tandis que les désaccords physiques demandent de revenir aux données et aux définitions.

Proposer la prochaine mesure

Un bon projet se termine par une demande justifiée : un autre filtre, une série temporelle plus longue, une meilleure parallaxe ou une vitesse radiale. Dire seulement « il faut un télescope plus grand » ne précise pas quelle ambiguïté serait réduite. La

mesure complémentaire doit discriminer au moins deux explications possibles.

La priorité dépend aussi du coût et de la faisabilité. Une observation modeste à un instant décisif peut apporter davantage qu’une longue pose tardive. Les archives offrent parfois déjà l’information manquante. Le projet apprend ainsi à choisir une expérience, plutôt qu’à accumuler des images sans lien avec une question.

Garder un registre de confiance

Pour chaque conclusion, indiquer si elle est directement mesurée, déduite sous un modèle ou proposée comme hypothèse à tester. Ce registre peut évoluer. Une étoile d’abord candidate à la variabilité peut être confirmée après répétition ; une anomalie peut disparaître après recalibration. La méthode doit autoriser les deux issues.

Cette pratique relie les sujets du livre : les photons donnent des données, la dynamique fournit des masses, les populations portent une histoire et la cosmologie compare des modèles. L’astrophysique gagne sa force en reliant ces informations avec des limites explicites. Un projet réussi laisse au lecteur les moyens de vérifier et de poursuivre le raisonnement.

Choisir la mesure qui domine l’incertitude

Pour un rayon déduit de $R \propto L^{1/2}T^{-2}$, une petite erreur relative de luminosité intervient avec un facteur un demi, et celle de température avec un facteur deux. En supposant de petites erreurs indépendantes, on estime $(\sigma R/R)^2 \approx (\sigma L/2L)^2 + (2\sigma T/T)^2$. La température peut donc dominer malgré une erreur relative qui paraît modeste.

Avec 10 % sur L et 5 % sur T, les contributions sont 5 % et 10 %, donnant environ 11,2 % sur R. Réduire seulement l’erreur de luminosité à 2 % laisse encore une incertitude de rayon proche

de 10 %. Une meilleure température apporterait ici davantage. Si les deux paramètres sont corrélés, il faut ajouter la covariance et reprendre le calcul. Ce bilan fournit une justification chiffrée de la prochaine observation : améliorer le paramètre le moins bien connu n’est pas toujours équivalent à améliorer le paramètre le plus influent.

Exemple Un rayon déduit de deux informations

Une étoile fictive possède $L = 25\ L_\odot$ et $T = T_\odot$. Son rayon vaut $5\ R_\odot$. Si une analyse alternative propose $T = 0{,}8\ T_\odot$ à luminosité inchangée, le rayon devient $5/0{,}8^2 \approx 7{,}81\ R_\odot$. Une meilleure mesure de température réduit ici directement l’ambiguïté de rayon. Ajouter seulement une photographie plus détaillée sans résolution du disque n’apporterait pas forcément cette information.

À retenir

Relier plusieurs méthodes permet de tester les ambiguïtés. Une prochaine observation doit être choisie pour la question qu’elle tranche.

Mini-lexique

Observable discriminante : mesure dont les prédictions diffèrent entre plusieurs explications. Registre de confiance : distinction documentée entre mesure, inférence et hypothèse.

Vérifier sa compréhension

1. À température fixée, une luminosité multipliée par neuf implique quel changement de rayon ?

2. Pour distinguer une étoile intrinsèquement froide d’une étoile chaude rougie par la poussière, quelle observation proposer ?

Références S06 • S07 • S36

Constantes et relations utiles

Cette annexe réunit les conventions nécessaires aux exemples. « Exact » indique une définition, et non une précision expérimentale infinie sur tous les objets physiques. Les valeurs nominales facilitent les conversions ; les valeurs mesurées gardent une incertitude. Références S03, S04 et S05.

Grandeur	Valeur utilisée	Statut ou convention
Vitesse de la lumière c	299 792 458 m/s	Exacte, dans le vide
Constante de Planck h	$6{,}626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s	Exacte dans le SI
Constante réduite ħ	h/(2π)	Déduite de h
Constante de Boltzmann k	$1{,}380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K	Exacte dans le SI
Charge élémentaire e	$1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C	Exacte dans le SI
Gravitation G	$6{,}674\ 30 \times 10^{-11}$ m³/kg/s²	Mesurée ; incertitude relative ≈ $2{,}2 \times 10^{-5}$
Unité astronomique	149 597 870 700 m	Exacte par définition
Année julienne	365,25 jours = 31 557 600 s	Convention utilisée
Année-lumière	$9{,}460\ 730\ 472\ 580\ 8 \times 10^{15}$ m	Définie avec l’année julienne
Parsec	≈ $3{,}085\ 677\ 581\ 491 \times 10^{16}$ m	Relation à l’ua et à l’angle
Stefan–Boltzmann σ	≈ $5{,}670\ 374\ 419 \times 10^{-8}$ W/m²/K⁴	Valeur arrondie
Wien bλ	≈ $2{,}897\ 77 \times 10^{-3}$ m K	Maximum du spectre par longueur d’onde

Références solaires et angles

Grandeur	Valeur de référence	Usage
Rayon solaire nominal	$6{,}957 \times 10^{8}$ m	Conversion de rayon
Luminosité solaire nominale	$3{,}828 \times 10^{26}$ W	Conversion de puissance
Température solaire nominale	5 772 K	Comparaison thermique
GM solaire nominal	$1{,}327\ 124\ 4 \times 10^{20}$ m^3/s^2	Orbites et masse dynamique
Masse solaire approchée	$1{,}9885 \times 10^{30}$ kg	Dépend de G pour la conversion
GM terrestre nominal	$3{,}986\ 004 \times 10^{14}$ m^3/s^2	Référence de gravitation
Radian	180/π degrés	Angle sans dimension
Seconde d’arc	1/3 600 degré	Astrométrie et résolution
Milliseconde d’arc	10^{-3} seconde d’arc	Parallaxes fines

Les symboles $R_\odot$, $L_\odot$ et $M_\odot$ désignent respectivement un rayon, une luminosité et une masse solaires. Le paramètre GM est souvent mieux connu que la masse séparée, car une orbite mesure directement la combinaison gravitationnelle. Une valeur nominale n’est pas nécessairement la meilleure mesure instantanée du Soleil.

Relations à utiliser avec leurs conditions

Une formule n'est pas une règle indépendante de ses hypothèses. Les unités doivent rester cohérentes ; les relations ci-dessous résument les domaines employés dans le texte.

Propagation locale

$$d = c \ \Delta t$$

Dans le vide et une géométrie locale adaptée ; ne donne pas la distance actuelle d'une galaxie lointaine.

Onde lumineuse

$$c = \lambda \nu$$

Dans le vide ; λ et ν doivent être associés au même référentiel.

Photon

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

Énergie d'un photon, à distinguer de la puissance d'un ensemble de photons.

Dilution géométrique

$$F = L / \left(4 \pi d^2\right)$$

Source isotrope, distance adaptée et extinction traitée séparément.

Flux et magnitudes

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \ \log_{10}\left(F_1 / F_2\right)$$

Même bande et même système photométrique.

Rayonnement total

$$L = 4 \pi R^2 \sigma T^4$$

Définition de la température effective d'une surface sphérique.

Loi de Wien

$$\lambda max \ T = b\lambda$$

Maximum de la distribution par longueur d'onde, pour un corps noir.

Décalage spectral

$$z = (\lambda obs - \lambda repos) / \lambda repos$$

Définition ; la cause doit encore être identifiée.

Vitesse Doppler approchée

$$v \approx cz$$

Faible vitesse et contribution radiale dominante ; pas un calcul universel à grand z.

Parallaxe

$$d(pc) = 1 / p('')$$

Mesure suffisamment précise ; traiter biais et distributions si nécessaire.

Distance locale en magnitudes

$$m - M = 5 \log_{10}[d / (10\ pc)] + A$$

Extinction A dans la même bande ; régime et définition de distance précisés.

Gravitation newtonienne

$$F = GMm / r^2$$

Deux masses ponctuelles ou corps sphériques vus de l'extérieur.

Orbite circulaire

$$v = \sqrt{(GM / r)}$$

Masse centrale dominante, champ newtonien et orbite circulaire.

Période à deux corps

$$P^2 = 4\pi^2 a^3 / [G(M + m)]$$

a est le demi-grand axe de l'orbite relative.

Libération

$$vlib = \sqrt{(2GM / r)}$$

Système isolé idéal ; ne décrit pas à lui seul une mission de lancement.

Énergie cinétique classique

$$Ec = mv^2/2$$

Vitesse très inférieure à c.

Facteur relativiste

$$\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$$

Mouvement inertiel relatif ; préciser les événements comparés.

Rayon de Schwarzschild

$$rS = 2GM/c^2$$

Trou noir idéal sans rotation ni charge.

Gaz parfait

$$P = nkT$$

Gaz classique idéal ; n compte les particules libres pertinentes.

Transit simple

$$\delta \approx (Rp/R*)^2$$

Disque stellaire uniforme, planète opaque et lumière diluée traitée.

Expansion

$$1 + z = a_0/aémission$$

Décalage cosmologique dans le modèle homogène.

Incertitudes indépendantes

$$\sigma diff = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

Approximation gaussienne ; ajouter les covariances si les mesures sont corrélées.

Tables du parcours solaire

Jeu fixe de valeurs pédagogiques utilisé au chapitre 60. Les demi-grands axes arrondis ne sont pas des distances instantanées ni une éphéméride. Les diamètres sont des repères arrondis, équatoriaux pour les planètes ; la forme réelle des géantes est aplatie. Le Soleil utilise un diamètre nominal de 1 391 400 km. Références S04 et S37.

Planète	Demi-grand axe (ua)	Diamètre adopté (km)	Axe incliné	Orbite inclinée
Mercure	0,387	4 879	0,034°	7,0°
Vénus	0,723	12 104	177,4°	3,4°
Terre	1,000	12 756	23,4°	0,0°
Mars	1,524	6 792	25,2°	1,8°
Jupiter	5,203	142 984	3,1°	1,3°
Saturne	9,537	120 536	26,7°	2,5°
Uranus	19,191	51 118	97,8°	0,8°
Neptune	30,069	49 528	28,3°	1,8°

Emplacements depuis le centre du Soleil

Planète	100 m	500 m	1 000 m
Mercure	1,29 m	6,44 m	12,87 m
Vénus	2,40 m	12,02 m	24,04 m
Terre	3,33 m	16,63 m	33,26 m
Mars	5,07 m	25,34 m	50,68 m
Jupiter	17,30 m	86,52 m	173,04 m
Saturne	31,72 m	158,59 m	317,17 m
Uranus	63,82 m	319,12 m	638,23 m
Neptune	100,00 m	500,00 m	1000,00 m

Axe : angle à la perpendiculaire au plan orbital, de 0 à 180° ; Vénus et Uranus sont rétrogrades. Orbite : angle au plan orbital terrestre, donc 0° pour la Terre. Valeurs arrondies NASA/NSSDCA. Sources : https://go.cimolino.lu/univers136 ; https://go.cimolino.lu/univers255

Diamètres avec la même réduction

Objet	100 m	500 m	1 000 m
Soleil	30,93 mm	154,66 mm	309,32 mm
Mercure	0,11 mm	0,54 mm	1,08 mm
Vénus	0,27 mm	1,35 mm	2,69 mm
Terre	0,28 mm	1,42 mm	2,84 mm
Mars	0,15 mm	0,75 mm	1,51 mm
Jupiter	3,18 mm	15,89 mm	31,79 mm
Saturne	2,68 mm	13,40 mm	26,80 mm
Uranus	1,14 mm	5,68 mm	11,36 mm
Neptune	1,10 mm	5,51 mm	11,01 mm

Les en-têtes 100, 500 et 1 000 m désignent la distance Soleil–Neptune du parcours. Tous les diamètres sont en millimètres. Pour 500 m, le Soleil mesure environ 154,7 mm, soit 15,47 cm. Une planète est parfois trop petite pour une représentation robuste : on peut ajouter une image agrandie, clairement annoncée comme telle.

À la réduction de un pour dix milliards

Repère	Valeur réduite approchée
Diamètre solaire	13,91 cm
Diamètre terrestre	1,276 mm
Distance Terre–Soleil	14,96 m
Demi-grand axe de Neptune	449,83 m
Proxima du Centaure, distance arrondie à 4,25 a.l.	≈ 4 021 km

La comparaison avec Proxima adopte 4,25 années-lumière comme repère arrondi. Elle montre le saut entre distances planétaires et stellaires. La limite dessinée à Neptune ne représente pas la frontière de tous les petits corps du Système solaire.

Réponses aux exercices

Les réponses indiquent le raisonnement attendu et ses principales limites. Les résultats numériques peuvent différer légèrement selon les arrondis. Les questions de contexte admettent parfois plusieurs formulations justes.

1 Notre place dans l'Univers

1. Environ trois siècles plus tard, car l'information doit parcourir la distance qui nous sépare. Le mot « aujourd'hui » suppose ici une convention de simultanéité adaptée à l'exemple.

2. La photographie donne principalement des directions. Une distance et un mouvement compatibles sont nécessaires pour établir une association physique.

2 Mesurer et comparer

1. 2 500 × 3,262 donne environ 8 160 années-lumière.

2. Deux heures valent 7 200 s ; la distance vaut 216 000 km, soit $2{,}16 \times 10^8$ m.

3 De la lumière aux connaissances

1. Non. Des conditions différentes peuvent conduire à des images proches ; il faut rechercher des observables discriminantes.

2. D'autres équipes peuvent contrôler les choix, reproduire les résultats et proposer des tests indépendants.

4 Mouvement forces et énergie

1. Oui. Son vecteur vitesse change de direction ; l'accélération pointe vers le centre dans le modèle circulaire.

2. Elle est multipliée par neuf, dans le domaine non relativiste.

5 Matière température et pression

1. Non. Le noyau conserve huit protons ; il devient un ion oxygène doublement positif.

2. Elle double, à condition que le gaz reste dans le régime classique et que sa composition ne change pas.

6 Ondes et rayonnements

1. Environ 3×10^{11} Hz, soit 300 GHz.

2. L'atmosphère absorbe les rayons X et leur focalisation nécessite une optique adaptée ; le diamètre seul ne résout aucun de ces problèmes.

7 Photons atomes et spectres

1. Elle est divisée par deux dans le vide.

2. La température et l'ionisation modifient les populations des niveaux capables d'absorber. Une faible raie ne constitue pas un dosage direct de l'hydrogène total.

8 Couleur flux et luminosité

1. Dans l'approximation de Stefan–Boltzmann, B est seize fois plus lumineuse.

2. Sa magnitude augmente de cinq unités dans la bande considérée.

9 Doppler et vitesses

1. $z = -0{,}0001$, soit environ -30 km/s : rapprochement selon la convention adoptée.

2. Le décalage contraint surtout la composante radiale. Les deux composantes tangentielles demandent des mesures astrométriques et une distance.

10 Probabilités incertitude et particules

1. Non. Les corrélations ne fournissent pas un canal de communication contrôlé dépassant c.

2. Elle provient de l'occupation quantique des états, pas seulement de l'agitation thermique classique.

11 Réactions nucléaires et origine des éléments

1. Seule une fraction du bilan de masse du combustible devient énergie ; la plupart de la masse reste dans les produits.

2. Non. Le carbone a surtout été produit par des générations stellaires antérieures à la formation du Système solaire.

12 Newton et les orbites

1. Elle est divisée par deux, car elle varie comme $r^{-1/2}$.

2. Non. La gravitation modifie constamment la direction du mouvement.

13 Kepler et les mouvements apparents

1. $P = \sqrt{64} = 8$ ans dans l’approximation indiquée.

2. Mars avance aussi sur son orbite ; la Terre doit gagner un tour relatif, ce qui demande environ 2,14 ans.

14 Marées résonances et collisions

1. Oui, approximativement une fois par révolution sidérale, ce qui conserve la même orientation moyenne vers la Terre.

2. Non. Certaines configurations résonantes protègent les objets de rencontres rapprochées ; d’autres excitent leurs mouvements.

15 Relativité restreinte

1. $\gamma = 1/\sqrt{0,64} = 1,25$.

2. Non. Le retard de propagation peut être corrigé ; les relations relativistes entre intervalles et temps propres subsistent.

16 Relativité générale

1. Non. Elle est en chute libre orbitale ; l’apesanteur ressentie vient de l’absence de soutien, pas de l’absence de champ.

2. Les différences de champ entre ses extrémités produisent des effets de marée mesurables.

17 Trous noirs et horizons

1. Environ 295 km dans le modèle sans rotation.

2. Le jet est alimenté et accéléré à l’extérieur de l’horizon ; il ne transporte pas de matière ressortant de sa région intérieure.

18 La formation des étoiles et des disques

1. Certaines longueurs d’onde infrarouges sont moins atténuées que le visible et les poussières chauffées y rayonnent. L’opacité reste toutefois dépendante de la longueur d’onde.

2. Non. Des écoulements, le rayonnement et la dynamique dispersent une partie du gaz ; l’efficacité dépend de l’environnement.

19 La séquence principale et l’équilibre stellaire

1. Sa luminosité et sa consommation de combustible augmentent plus vite que sa masse disponible.

2. Non. Elle peut évoluer lentement par une succession d’états proches de l’équilibre et subir aussi des oscillations ou des épisodes instables.

20 Le Soleil comme laboratoire

1. Non. C’est une région du plasma photosphérique moins chaude et moins brillante que son environnement, sans surface solide.

2. Leur très faible interaction leur permet de quitter presque directement les régions nucléaires, alors que l’énergie électromagnétique subit de multiples interactions.

21 Le diagramme de Hertzsprung Russell

1. En bas à gauche, dans une région typiquement occupée par les naines blanches, à confirmer par d’autres observations.

2. Leur âge et leur distance comparables permettent de confronter plusieurs masses à une même histoire de formation approximative.

22 Étoiles doubles et systèmes multiples

1. Non. La plus légère se trouve plus loin du barycentre et possède une plus grande amplitude de mouvement.

2. Les éclipses contraignent fortement l’inclinaison, qui intervient dans les vitesses projetées.

23 Variables novae et céphéides

1. Non. L’explosion concerne la couche accumulée et la naine blanche peut survivre.

2. L’échantillonnage est insuffisant pour suivre directement le cycle et favorise les ambiguïtés ; il faut une cadence adaptée.

24 Géantes naines blanches et nébuleuses planétaires

1. Non. C’est une nébuleuse planétaire issue de matière expulsée par une étoile évoluée.

2. Les temps de refroidissement nécessaires dépassent très largement l’âge cosmique actuel.

25 Supernovae étoiles à neutrons et pulsars

1. Non. Sa masse initiale est insuffisante pour ce scénario ; son résidu attendu est une naine blanche.

2. Non. La périodicité principale correspond à la rotation d’un faisceau par rapport à notre ligne de visée.

26 Gaz poussières et nébuleuses

1. Non. Un nuage de poussière peut cacher un fond riche en étoiles.

2. Non. Les filtres, les poses et les palettes peuvent attribuer des couleurs conventionnelles à des raies ou à des bandes invisibles.

27 Amas ouverts et amas globulaires

1. Non. La diversité des masses constitue précisément un intérêt pour tester l’évolution à âge comparable.

2. Non. La distance, les éclats et la résolution de l’instrument peuvent masquer une population très riche.

28 La Voie lactée

1. Non. Sa masse est très importante localement, mais petite devant la masse galactique totale.

2. Ils permettent d’étudier des régions et des composants que la poussière masque fortement dans le visible.

29 Galaxies et évolution

1. Non. La poussière, la proportion des populations et les bandes utilisées doivent être examinées.

2. Non. Les interactions gravitationnelles collectives et les chocs du gaz dominent généralement.

30 Noyaux actifs quasars et jets

1. Non. La disponibilité de matière et le régime d’accrétion déterminent aussi la puissance.

2. Non. La projection et les temps d’arrivée peuvent produire un mouvement apparent superluminal sans vitesse matérielle locale supérieure à c.

31 Amas de galaxies et toile cosmique

1. Non. « Vide » désigne une sous-densité définie relativement à un échantillon ou à la moyenne.

2. Les relations hydrostatiques supposent un soutien et un équilibre approximatifs ; une fusion ou des mouvements non thermiques peuvent modifier l’estimation.

32 Parallaxe et première marche des distances

1. 5 mas = 0,005″, donc environ 200 pc si la mesure est assez précise.

2. Non. Le bruit et le modèle d’ajustement peuvent produire un estimateur négatif pour une très petite parallaxe réelle.

33 Chandelles standard et supernovae Ia

1. Par cent, car dix magnitudes représentent deux intervalles de cinq.

2. L’erreur commune se transmet à tous ; elle ne diminue pas comme un bruit indépendant d’un objet à l’autre.

34 Les lentilles gravitationnelles

1. Non. La déformation peut venir des trajets lumineux ; la forme intrinsèque doit être reconstruite avec un modèle.

2. Non. Toute composante gravitationnelle contribue, ce qui permet notamment d’étudier la matière noire.

35 Cartographier l’Univers en profondeur

1. À 600 nm, car λobservée = (1 + z) λrepos.

2. Les vitesses particulières se traduisent par des décalages que la conversion naïve attribue à la profondeur.

36 Incertitudes statistiques et désaccords

1. Il faut multiplier le nombre total de mesures par quatre, toutes choses égales par ailleurs.

2. Non. Il décrit une incompatibilité dans un cadre statistique précis ; la cause demande des tests et des observations complémentaires.

37 L’expansion et la géométrie cosmique

1. a = 1/(1 + 1) = 0,5.

2. Non. La topologie globale et l’étendue au-delà de l’horizon ne sont pas entièrement déterminées par cette mesure.

38 Le Big Bang et l’Univers primordial

1. Non. Les noyaux légers datent des premières minutes ; les atomes neutres abondants apparaissent bien plus tard, vers 380 000 ans pour l’époque du fond cosmologique.

2. Non. Une extrapolation vers une phase antérieure demande des hypothèses supplémentaires et une physique encore non établie.

39 Le fond diffus cosmologique

1. Non. La palette représente généralement de minuscules écarts de température après traitement.

2. Les avant-plans et le fond possèdent des dépendances spectrales différentes, ce qui permet de les séparer avec des incertitudes contrôlées.

40 La matière noire

1. Non. Gaz froid, planètes ou résidus peuvent être baryoniques et sombres dans le visible.

2. Non. Elle contraint un domaine de masses, d’interactions et d’hypothèses expérimentales.

41 L'énergie noire et les futurs possibles

1. Par vingt-sept pour de la matière non relativiste conservée.

2. Non. Il faut tester la robustesse de l'inférence et identifier un modèle physique compatible avec les autres observations.

42 Inflation et limites du modèle cosmologique

1. Non. Plusieurs mécanismes peuvent donner des signatures proches ; des observables discriminantes sont nécessaires.

2. Non. Les conclusions dépendent du potentiel, de la dynamique et des hypothèses supplémentaires.

43 La formation des systèmes planétaires

1. Non. Plusieurs mécanismes peuvent produire des structures ; des signatures supplémentaires sont nécessaires.

2. Elle doit capter une enveloppe avant la dispersion de la réserve de gaz.

44 Mondes rocheux géantes et petits corps

1. Non. Il renvoie à des proportions de composants et à des modèles de matériaux soumis à de fortes pressions.

2. Non. La répartition et l'état des matériaux demandent des contraintes supplémentaires.

45 Détecter et caractériser les exoplanètes

1. $\sqrt{0{,}0025} = 0{,}05$: le rayon planétaire vaut 5 % du rayon stellaire.

2. Non. Sans inclinaison, la masse réelle peut être plus élevée.

46 Atmosphères climat et habitabilité

1. Non. Les réservoirs, les pertes et l'atmosphère doivent être connus.

2. Elle double dans le modèle radiatif indiqué, car la température dépend de la racine quatrième du flux.

47 Astrobiologie et biosignatures

1. Non. Les mécanismes géologiques, la chimie et le contexte atmosphérique doivent être comparés.

2. Non. La vie peut être peu abondante, cachée, différente ou produire un signal sous le seuil instrumental.

48 Comment travaille un observatoire

1. Le champ, la vitesse de lecture, la programmation et les durées de pose limitent aussi la couverture.

2. Elle permet de tester des variations longues, de rechercher un état antérieur et d’analyser de nouvelles questions avec une provenance vérifiable.

49 Miroirs détecteurs et spectrographes

1. Il passe de dix à vingt : il double, sans autre bruit.

2. Non. La moyenne peut être retirée, mais la variance de comptage reste dans la mesure.

50 Optique active adaptative et interférométrie

1. Elle divise par deux l’échelle angulaire caractéristique, à longueur d’onde identique et sous conditions adaptées.

2. Non. Ce rôle relève de l’optique adaptative et d’autres méthodes de traitement.

51 Radioastronomie et Univers froid

1. Non. Elle peut venir de particules relativistes ou de gaz ionisé, parmi d’autres mécanismes.

2. Elles échantillonnent des structures angulaires plus larges qui peuvent manquer dans les seules grandes bases.

52 Le Soleil et la météo spatiale

1. Non. Sa direction et son étendue peuvent éviter la Terre.

2. La lumière se propage à c ; le plasma possède une vitesse beaucoup plus faible et une dynamique propre.

53 Télescopes spatiaux satellites et sondes

1. Non. Traitements, catalogues et nouvelles analyses peuvent se poursuivre longtemps.

2. Non. L2 Soleil–Terre se situe vers 1,5 million de kilomètres, bien au-delà de la distance lunaire moyenne d’environ 384 000 km.

54 Ondes gravitationnelles neutrinos et rayons cosmiques

1. Les champs magnétiques modifient sa trajectoire.

2. Non. Il mesure la lumière produite par des particules secondaires issues de leurs interactions.

55 Gravitation quantique et échelles de Planck

1. Non. Cette conclusion demande une théorie et des tests supplémentaires.

2. Oui. Sa valeur dépend de la précision obtenue et de la maîtrise de son domaine de validité.

56 Cordes dimensions supplémentaires et modèles

1. Non. Il s’agit d’un degré de liberté d’une théorie quantique, pas d’une fibre classique.

2. Non. Elle contraint les scénarios dont les signatures entrent dans le domaine testé.

57 Les multivers et les interprétations quantiques

1. Non. Les cadres et les objets mathématiques sont distincts ; un lien exige des hypothèses supplémentaires.

2. Non. Il exprime d’abord une condition de sélection, sans établir la réalisation d’autres domaines.

58 Lire une découverte et évaluer une explication

1. Non. Elles peuvent vérifier le traitement tout en conservant l’erreur du catalogue.

2. Le nombre d’occasions de dépasser le seuil augmente ; il faut traiter l’ensemble des essais et leurs corrélations.

59 Mesurer une variation de lumière

1. Le flux est divisé par deux ; la magnitude augmente d’environ 0,753.

2. Examiner la transparence, le fond, l’alignement et les calibrations avant d’attribuer la baisse à la cible seule.

60 Calculer un Système solaire à l’échelle

1. Environ 33,26 m du Soleil.

2. Non. Il utilise une échelle pour les distances et une autre pour les diamètres ; il faut l’indiquer.

61 Exploiter un catalogue public

1. $p = 10$ mas donne 100 pc ; $M = 12 - 5 = 7$.

2. Les objets intrinsèquement faibles passent sous le seuil plus rapidement et deviennent sous-représentés.

62 Relier les lois aux observations

1. Le rayon est multiplié par trois dans le modèle thermique sphérique.

2. Un spectre permettant de contraindre température et état d’ionisation, complété par une estimation de l’extinction et plusieurs bandes photométriques.

Glossaire

Les définitions correspondent aux usages de ce livre. Les renvois précis se trouvent dans l’index thématique. Un même mot, notamment « température », « distance » ou « théorie », peut demander une convention supplémentaire dans un article de recherche.

A

Abondance Proportion d’une espèce chimique par rapport à une référence. Une abondance déduite de raies dépend de l’état du gaz et du modèle spectral.

Accélération Variation du vecteur vitesse par unité de temps. Elle peut modifier la direction du mouvement sans changer la valeur de la vitesse.

Accrétion Capture et accumulation de matière. Dans un disque, la perte d’énergie et le transport du moment cinétique permettent à une partie du gaz de se rapprocher du centre.

Albédo de Bond Fraction de la puissance incidente totale réfléchie par un objet, intégrée sur les directions et le spectre. Il intervient dans un bilan énergétique global.

Alias Périodicité apparente liée à l’échantillonnage des données. Des observations espacées peuvent transformer ou mélanger les fréquences présentes dans un signal.

Amas de galaxies Système de galaxies, de gaz chaud et d’autres composantes gravitationnelles. Sa masse ne se réduit pas à la lumière de ses étoiles.

Amas globulaire Amas stellaire généralement riche, dense et ancien. Ses populations peuvent posséder une histoire chimique plus complexe qu’une formation unique parfaitement homogène.

Amas ouvert Groupe stellaire physique généralement moins concentré qu’un amas globulaire. Il peut évoluer et se disperser sous l’effet des rencontres et du champ galactique.

Anisotropie Variation d’une propriété selon la direction. Les anisotropies du fond cosmologique sont de très faibles écarts à une température presque uniforme.

Année-lumière Longueur parcourue par la lumière dans le vide en une année julienne de 365,25 jours, soit environ $9{,}461 \times 10^{15}$ mètres.

Antimatière Ensemble des antiparticules associées aux particules ordinaires. Elle ne doit pas être confondue avec la matière noire, dont la nature reste non identifiée.

Aphélie Point d’une orbite le plus éloigné du Soleil. Pour une autre masse centrale, on emploie notamment le terme général d’apoastre.

Astérisme Dessin apparent formé par des étoiles sur le ciel. Ses membres ne sont pas nécessairement proches dans l’espace ni liés gravitationnellement.

Astrométrie Mesure des positions et mouvements angulaires. Elle fournit notamment parallaxes, mouvements propres et contraintes sur des compagnons lorsqu’une précision suffisante est atteinte.

Atmosphère stellaire Couches externes d’une étoile où se forme une grande partie du spectre observé. Température, pression et composition influencent les raies.

B

Barycentre Centre de masse d’un système. Les composants d’une binaire tournent autour de ce point dans la description à deux corps isolés.

Baryonique Qualifie la matière ordinaire dont la masse provient principalement des protons et neutrons. Cette catégorie cosmologique inclut aussi les électrons associés.

Big Bang chaud Modèle d’une évolution depuis des états anciens plus chauds et plus denses. Il ne démontre pas à lui seul une création absolue à partir de rien.

Binaire Système de deux objets liés gravitationnellement. Les catégories visuelle, spectroscopique et à éclipses indiquent des méthodes d’observation qui peuvent se combiner.

Biosignature Trace pouvant témoigner d’une activité biologique, à évaluer avec le contexte et les mécanismes abiotiques capables de produire un signal similaire.

Blazar Noyau actif dont le jet est dirigé près de notre ligne de visée. Les effets relativistes peuvent renforcer son éclat et modifier ses variations apparentes.

Boson Particule à spin entier pouvant partager un état quantique avec des particules identiques. Les photons appartiennent à cette famille statistique.

C

Calibration Opération reliant le signal instrumental à une mesure définie. Elle corrige ou caractérise notamment réponse, géométrie, fond, stabilité et références d’un appareil.

Céphéide Étoile pulsante dont la période est liée à la luminosité selon des relations calibrées. Les populations et les bandes doivent être distinguées.

Chandelle standardisable Objet dont la luminosité peut être comparée après corrections fondées sur d’autres observables. Les supernovae Ia sont utilisées de cette manière.

Cherenkov Rayonnement produit lorsqu’une particule chargée se déplace plus vite que la vitesse de phase de la lumière dans un milieu, sans dépasser nécessairement c.

Chirp Signal dont la fréquence évolue, souvent croissante. Dans une fusion compacte, son évolution permet de contraindre les masses et la dynamique sous un modèle.

Classe spectrale Catégorie décrivant surtout la température d’une étoile dans la séquence O B A F G K M. Une classe de luminosité apporte une information complémentaire.

Comobile Qualifie un observateur ou une coordonnée suivant l’expansion moyenne après séparation des mouvements locaux. La définition dépend du modèle cosmologique.

Compactification Description dans laquelle des dimensions supplémentaires possèdent une géométrie compacte. Leurs propriétés influencent les interactions et particules de la théorie effective.

Conservation de l’énergie Bilan où les transformations et échanges sont comptabilisés. Dans un espace-temps cosmologique général, une énergie globale unique demande des précautions supplémentaires.

Constante cosmologique Terme Λ des équations gravitationnelles. Dans le modèle homogène usuel, il se comporte comme une densité d’énergie constante avec une pression négative.

Convection Transport d’énergie par mouvements collectifs de matière. Sa présence dépend de la structure thermique, de l’opacité et de la stabilité des couches.

Corps noir Objet idéal absorbant tout rayonnement incident et émettant un spectre thermique déterminé par sa température. Une étoile réelle s’en écarte notamment par ses raies.

Courbe de lumière Évolution d’un éclat ou d’un flux en fonction du temps. Sa forme et ses couleurs permettent de tester plusieurs mécanismes de variabilité.

Courbe de rotation Vitesse orbitale caractéristique en fonction du rayon dans un système. Sa lecture dépend de la géométrie et de la répartition des composants gravitationnels.

Courbure Propriété géométrique révélée notamment par les écarts relatifs entre trajectoires libres. Elle ne nécessite pas un espace extérieur dans lequel notre espace serait plié.

Covariance Mesure de la variation conjointe de deux paramètres. Elle permet de traiter des incertitudes corrélées lors d’un ajustement ou d’une combinaison de mesures.

D

Décalage spectral Déplacement d’une signature en longueur d’onde ou en fréquence. Mouvement, gravitation et expansion peuvent contribuer, avec des relations physiques différentes.

Décohérence Perte pratique d’interférences accessibles entre certaines composantes d’un état à cause de leurs interactions avec l’environnement. Son interprétation demande un cadre quantique précis.

Découplage Époque où les interactions deviennent trop rares pour maintenir des composantes en équilibre. Le découplage des photons est lié à la transparence cosmologique.

Dégénérescence de modèles Situation où plusieurs paramètres ou explications produisent des observables similaires. Une nouvelle bande ou méthode peut fournir une contrainte discriminante.

Dégénérescence quantique Régime où l'occupation des états suit fortement les statistiques quantiques. Dans une naine blanche, elle contribue au soutien contre la gravitation.

Demi-grand axe Moitié du plus grand diamètre d'une ellipse. Il fixe l'échelle de l'orbite et intervient dans la relation entre période et masse.

Densité moyenne Masse totale divisée par le volume choisi. Elle ne donne pas la répartition locale des matériaux ni une composition intérieure unique.

Différenciation Séparation de matériaux au sein d'un corps, notamment lorsque les conditions permettent leur mobilité. Elle contribue à former noyaux, manteaux et couches distinctes.

Diffraction Étalement et interférence d'une onde à travers une ouverture. Elle impose une échelle de résolution dépendant de la longueur d'onde et du diamètre.

Disque d'accrétion Distribution aplatie de matière en mouvement autour d'un objet. Les transferts de moment cinétique permettent à une partie de cette matière de s'accumuler.

Distance angulaire Distance définie pour relier une dimension transverse et un angle observé. Elle diffère des autres distances cosmologiques à grand décalage spectral.

Distance de luminosité Distance définie par $F = L/(4\pi dL^2)$. À grande distance, elle intègre les effets cosmologiques sur l'énergie et le rythme d'arrivée des photons.

Distance propre cosmologique Séparation définie sur une tranche de temps cosmique. Elle dépend de l'époque et ne représente pas automatiquement un trajet directement mesuré.

Doppler Modification de fréquence liée au mouvement relatif d'une source et d'un observateur. Pour la lumière, les grandes vitesses demandent une relation relativiste.

Dualité Relation entre formulations théoriques apparemment différentes qui décrivent un même système dans un cadre précis. Elle constitue un outil, sans confirmer seule leur réalisation naturelle.

E

Écart type Mesure d'une dispersion autour d'une moyenne. Son interprétation probabiliste dépend de la distribution et ne couvre pas automatiquement toutes les erreurs systématiques.

Effet de sélection Modification d'un échantillon par les conditions de détection ou de publication. Il doit être pris en compte avant de déduire des proportions de populations.

Effet tunnel Processus quantique permettant une transition à travers une barrière classiquement infranchissable à l'énergie considérée. Il contribue aux taux de réactions stellaires.

Électronvolt Unité d'énergie égale à $1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ J. Le keV, MeV et GeV correspondent respectivement à mille, un million et un milliard d'eV.

Énergie cinétique Énergie associée au mouvement. L'expression $mv^2/2$ convient lorsque v est très inférieur à c ; la relativité impose une relation différente aux grandes vitesses.

Énergie noire Nom regroupant les descriptions de l'accélération cosmique récente. Une constante cosmologique est le modèle le plus simple, sans identification microscopique complète établie.

Énergie potentielle Énergie associée à une configuration dans un modèle. Son zéro peut être conventionnel ; les différences et le bilan total déterminent les évolutions possibles.

Équation d'état Relation entre grandeurs telles que pression, densité et température. Elle dépend de la composition et du régime physique, notamment dans la matière dense.

Équilibre hydrostatique Compensation locale entre la gravitation et le gradient de pression. Il peut être approximativement maintenu pendant qu'un objet évolue thermiquement ou chimiquement.

Étoile à neutrons Résidu compact d’environ quelques masses solaires au maximum dans un rayon de l’ordre de dix kilomètres. Sa structure dépend de la matière dense.

Excentricité Paramètre de forme d’une orbite. Une ellipse liée possède une excentricité comprise entre zéro, le cercle, et un exclu.

Exoplanète Planète située hors du Système solaire. Son statut et ses paramètres doivent être distingués des candidats et des estimations encore en cours de validation.

Extinction Atténuation du rayonnement par absorption et diffusion. Elle dépend de la longueur d’onde et peut modifier éclat, couleur et distance déduite.

F

Facteur de Lorentz Grandeur $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$, décrivant les relations relativistes entre certaines mesures. Elle tend vers un aux faibles vitesses.

Facteur d’échelle Fonction a(t) décrivant l’évolution relative des distances dans un modèle cosmologique homogène. On fixe souvent sa valeur actuelle à un.

Faux positif Signal interprété à tort comme l’effet recherché. En astrobiologie, un processus non biologique peut imiter un indice de vie dans certaines conditions.

Fermion Particule à spin demi-entier soumise au principe d’exclusion de Pauli. Électrons, protons et neutrons possèdent cette statistique dans leurs descriptions usuelles.

Filament cosmique Structure allongée de la distribution à grande échelle. Ses contours dépendent du relevé, du traceur et de la méthode de définition.

Flux Puissance reçue par unité de surface. La bande et les conventions doivent être précisées ; il diffère de la luminosité intrinsèque de la source.

Fonction instrumentale Réponse d’un instrument à un signal idéal étroit ou ponctuel. Sa connaissance permet de séparer structure astrophysique et élargissement ou déformation instrumental.

Fond diffus cosmologique Rayonnement presque thermique provenant de l’époque où le plasma cosmique est devenu transparent. Ses petites anisotropies portent des informations sur les conditions anciennes.

Fréquence Nombre d’oscillations par seconde pour un signal périodique. Dans le vide, elle est reliée à la longueur d’onde par $c = \lambda\nu$.

Fusion nucléaire Assemblage de noyaux dont le bilan peut libérer de l’énergie selon les masses et liaisons impliquées. Ce n’est pas une réaction chimique.

G

Galaxie Système d’étoiles, de gaz, de poussières et d’autres composantes gravitationnelles. Ses limites et son histoire ne se résument pas à son aspect visible.

Géodésique Trajectoire libre déterminée par la géométrie de l’espace-temps. Les géodésiques lumineuses et massives répondent à des conditions physiques distinctes.

Gravitation quantique Ensemble de recherches visant un traitement quantique cohérent de la gravitation. Les différentes approches doivent retrouver les régimes déjà testés et proposer des contraintes nouvelles.

H

Halo Composante étendue entourant les régions denses d’une galaxie. Les distributions des étoiles, des amas et de la matière noire ne sont pas nécessairement identiques.

Héliosismologie Étude de l’intérieur solaire à partir des oscillations mesurées. Les fréquences sont comparées aux modèles de structure et de rotation.

Horizon cosmologique Limite de communication définie par une histoire d’espace-temps. Horizon des particules, horizon des événements et rayon de Hubble ne sont pas toujours identiques.

Horizon d’un trou noir Frontière causale d’une région qui ne peut envoyer de signaux vers l’extérieur lointain. Elle n’est pas une paroi matérielle solide.

I

Incertitude Description quantitative de la connaissance limitée d’une valeur. Elle doit préciser distribution, intervalle, méthode et contributions communes lorsqu’elles sont importantes.

Inflation Famille de scénarios d’expansion accélérée très précoce. Leurs conséquences statistiques sont testées, mais le mécanisme fondamental n’est pas identifié de manière unique.

Interférométrie Combinaison cohérente de signaux reçus par plusieurs ouvertures. Les bases échantillonnent des informations spatiales ; leur longueur ne remplace pas une surface collectrice remplie.

Intrication État quantique commun donnant des corrélations non décrites par des états indépendants des composants. Elle ne permet pas une communication contrôlée plus rapide que c.

Ionisation Modification de l’état électrique d’un atome ou d’une molécule par changement du nombre d’électrons liés. Elle ne change pas le nombre de protons du noyau.

Isotope Espèce d’un même élément possédant un nombre différent de neutrons. Les isotopes peuvent avoir des stabilités nucléaires et des abondances différentes.

J

Jet Écoulement collimaté observé dans plusieurs environnements astrophysiques. Pour les trous noirs, il est produit à l’extérieur de l’horizon et dépend de la dynamique magnétisée.

K

Kilonova Émission transitoire liée à des éjectas riches en neutrons, notamment après certaines fusions compactes. La radioactivité contribue au rayonnement observé.

L

Lentille faible Régime de petites déformations gravitationnelles mesurées statistiquement sur des populations. Les formes intrinsèques et la réponse instrumentale doivent être traitées.

Lentille forte Régime où la géométrie peut produire arcs et images multiples d’une source. Le modèle de masse sert à reconstruire la source et les distances.

Longueur d’onde Distance entre deux états de phase identiques d’une onde périodique. Sa relation à la fréquence dépend de la vitesse de propagation dans le milieu.

Luminosité Puissance intrinsèque émise par une source, dans une bande ou sur tout le spectre selon la définition. Elle ne correspond pas à son éclat reçu.

M

Magnitude absolue Magnitude qu’un objet aurait à dix parsecs selon une bande et des conventions définies. L’extinction doit être explicitement traitée.

Magnitude apparente Mesure logarithmique de l’éclat reçu dans un système photométrique. Les valeurs faibles ou négatives correspondent aux objets les plus brillants.

Marée Effet des différences de gravitation entre plusieurs points d’un objet. Elle peut déformer, chauffer et échanger du moment cinétique entre rotation et orbite.

Masse dynamique Masse déduite de mouvements sous un modèle gravitationnel. Elle peut inclure des composantes peu lumineuses et dépend de la géométrie retenue.

Matière noire Composante gravitationnelle motivée par plusieurs observations et non expliquée par la seule matière ordinaire recensée dans le modèle de référence. Sa nature reste recherchée.

Métallicité Proportion d’éléments plus lourds que l’hélium selon une convention astronomique. Le mot « métal » a ici un sens plus large qu’en chimie usuelle.

Microlentille Amplification gravitationnelle variable dont les images ne sont généralement pas résolues. Un compagnon de la lentille peut ajouter une signature sur la courbe.

Migration planétaire Évolution orbitale par échanges de moment cinétique avec un disque ou d’autres corps. Le lieu actuel ne correspond pas toujours au lieu de formation.

Module de distance Différence entre magnitudes apparente et absolue, avec une convention explicite pour l’extinction. Il varie logarithmiquement avec la distance dans le cadre local.

Moment cinétique Grandeur associée à la rotation et au mouvement autour d’un point. Sa redistribution joue un rôle dans les disques, les marées et les rencontres.

Mouvement propre Déplacement angulaire d’une source sur le ciel par unité de temps, après séparation des autres effets. Une distance le convertit en vitesse transverse.

Multivers Mot regroupant plusieurs hypothèses sur des domaines cosmologiques, des solutions théoriques ou des branches quantiques. Le mécanisme et le statut doivent être précisés.

N

Naine blanche Résidu stellaire dense, soutenu principalement par la dégénérescence électronique, qui refroidit sans fusion centrale durable comparable à celle d’une étoile de séquence principale.

Naine brune Objet sous la masse permettant une fusion centrale durable de l’hydrogène. Elle n’est pas une étoile ordinaire arrivée à la fin de sa vie.

Nébuleuse planétaire Gaz expulsé par une étoile évoluée puis éclairé et ionisé par son cœur chaud. Le nom historique n’indique pas la naissance de planètes.

Neutrino Particule de faible interaction pouvant traverser de grandes quantités de matière. Ses propriétés et ses transformations de saveur permettent plusieurs tests stellaires et fondamentaux.

Nova Sursaut thermonucléaire d’une couche accumulée sur une naine blanche dans un système binaire. Le résidu peut survivre et connaître de nouveaux événements.

Noyau actif Région centrale galactique très lumineuse alimentée principalement par une accrétion autour d’un trou noir supermassif. Son apparence dépend aussi de l’orientation.

Nucléosynthèse Production de noyaux par réactions. Ses sites comprennent l’Univers primordial, plusieurs phases stellaires et des phénomènes explosifs ou riches en neutrons.

O

Opacité Mesure de l’interaction d’un milieu avec le rayonnement selon la longueur d’onde. Elle influence le transport d’énergie et les signatures spectrales.

Optique active Correction des déformations lentes de l’instrument, notamment du miroir et de son alignement. Elle diffère de la correction rapide de turbulence.

Optique adaptative Correction rapide de perturbations du front d’onde grâce à des mesures et à un miroir déformable. Son efficacité dépend du champ et de la bande.

P

Parallaxe annuelle Déplacement angulaire apparent lié au changement de position terrestre. Avec p en secondes d’arc, l’inversion usuelle donne d en parsecs lorsque les données conviennent.

Parsec Unité de longueur liée à la parallaxe d’une seconde d’arc, valant environ 3,262 années-lumière. Les kilo- et mégaparsecs servent aux plus grandes échelles.

Périhélie Point d’une orbite le plus proche du Soleil. Une planète sur une ellipse s’y déplace plus vite qu’à l’aphélie dans le problème à deux corps.

Période sidérale Durée d’un cycle mesuré par rapport aux directions stellaires lointaines. Elle diffère du retour d’une configuration relative avec la Terre.

Période synodique Durée de retour d’une configuration relative, comme deux oppositions moyennes. Elle dépend des périodes et du sens des mouvements concernés.

Photon Quantum d’un champ électromagnétique, d’énergie $h\nu$ et de masse au repos nulle. Le flux total dépend aussi du nombre de photons reçus par unité de temps.

Photosphère Région d’où s’échappe l’essentiel du rayonnement visible d’une étoile. Ce n’est pas une croûte solide ni une unique surface géométrique sans épaisseur.

Planétésimal Corps solide impliqué dans l'assemblage planétaire. Sa formation et sa croissance dépendent de concentrations, collisions et interactions dans le disque.

Plasma Milieu contenant une proportion importante de charges libres et répondant collectivement aux champs. Sa neutralité globale n'efface pas les effets électromagnétiques.

Polarisation Organisation des oscillations du champ électrique d'un rayonnement. Elle fournit des informations sur la diffusion, la géométrie et les champs, après calibration.

Pression Grandeur décrivant des échanges de quantité de mouvement par unité de surface. Ses origines thermique, radiative ou quantique dépendent du milieu.

Principe d'exclusion Règle interdisant à deux fermions identiques d'occuper exactement le même état quantique. Elle intervient dans la structure atomique et la matière dense.

Protoétoile Objet central en formation dont l'énergie provient largement de la contraction et de l'accrétion avant une fusion centrale durable de l'hydrogène.

Provenance des données Documentation de l'origine, de la version et des transformations d'un jeu de données. Elle permet de contrôler et de reproduire une analyse.

Pulsar Étoile à neutrons dont une émission directionnelle balaie notre ligne de visée à chaque rotation. Les pulsations ne sont pas une expansion globale du corps.

Q

Quasar Noyau actif extragalactique extrêmement lumineux. Son aspect initialement ponctuel est lié à la compacité du centre et à l'éclat relatif de la galaxie hôte.

R

Raie spectrale Structure localisée du spectre associée à une transition ou un processus. Sa position, sa largeur et son intensité portent des informations différentes.

Rayonnement thermique Rayonnement associé à l'état thermique d'un milieu. Un corps noir fournit une référence idéale, tandis que l'opacité et les états atomiques modifient les spectres réels.

Rayons cosmiques Particules énergétiques, surtout chargées, venant de sources et processus astrophysiques. Les champs peuvent dévier leur trajet avant l'arrivée.

Référentiel Système permettant d'attribuer positions et temps aux événements. Sa définition est indispensable pour comparer des vitesses et des simultanéités.

Résonance orbitale Couplage dynamique associé à des configurations répétées, souvent près de rapports simples de périodes. Une proximité numérique seule ne démontre pas le couplage.

Rétroaction Action de l'énergie ou de la matière émises sur le milieu environnant. Elle peut modifier refroidissement, disponibilité du gaz et formation stellaire.

Rétrogradation Inversion temporaire du déplacement apparent d'une planète sur le ciel par rapport aux étoiles. Elle ne signifie pas une inversion de son orbite solaire.

Rotation synchrone Rotation dont la période correspond à la révolution orbitale, conservant une orientation moyenne vers le compagnon. Elle n'implique pas une absence de rotation.

S

Séquence principale Phase et région du diagramme HR associées à une fusion centrale durable de l'hydrogène. Les durées dépendent fortement de la masse et de la composition.

Signal sur bruit Rapport entre une amplitude de signal définie et sa fluctuation pertinente. Son calcul dépend des sources de bruit et des corrélations.

Singularité classique Limite d'une solution où certaines grandeurs ou descriptions deviennent pathologiques. Elle ne constitue pas une observation directe d'une infinie densité matérielle.

Spectre Répartition du rayonnement selon la longueur d'onde, la fréquence ou l'énergie. Les axes et conventions doivent être précisés avant comparaison.

Supernova Ia Explosion thermonucléaire associée à une naine blanche dans un contexte binaire. Plusieurs voies sont étudiées ; sa luminosité est standardisée pour les distances.

T

Température effective Température d'un corps noir émettant le même flux total par unité de surface qu'une étoile. Elle ne correspond pas à la température centrale.

Temps de regard en arrière Durée séparant émission et réception dans une chronologie cosmologique définie. La multiplier par c ne donne pas automatiquement la distance actuelle.

Temps propre Durée mesurée par une horloge suivant une trajectoire. La comparaison entre trajets permet de formuler précisément les effets relativistes.

Théorie effective Description valide sur une gamme d'échelles avec un contrôle des corrections. Elle peut être très prédictive sans fournir une théorie de toute énergie.

Topologie Description des connexions globales d'un espace. Elle est distincte de sa courbure locale et peut rester indéterminée au-delà du domaine observable.

Transit Passage d'un objet devant une source dans la ligne de visée, produisant une baisse de flux. Sa profondeur dépend notamment du rapport des rayons.

Trou noir Région possédant un horizon causal dans la description relativiste. Son environnement peut être lumineux, et ses effets permettent de contraindre masse et rotation.

U

Unité astronomique Longueur fixée exactement à 149 597 870 700 m. Elle n'est pas une distance Terre–Soleil constamment identique au cours de l'orbite.

V

Vent solaire Écoulement de plasma issu du Soleil. Vitesse, densité et champ magnétique influencent ses interactions avec les environnements planétaires.

Visibilité interférométrique Mesure de corrélation liée à la structure spatiale d’une source. Un ensemble de bases fournit l’information nécessaire à une reconstruction avec des limites.

Vitesse particulière Mouvement local par rapport à l’expansion moyenne ou au référentiel collectif choisi. Elle contribue aux décalages spectraux et aux déformations des cartes.

Vitesse radiale Composante de vitesse selon la ligne de visée. Son interprétation spectroscopique exige une référence, une calibration et l’examen des autres décalages.

Z

Zone habitable Domaine de distances défini par un modèle où certaines conditions d’eau liquide de surface sont possibles. Il ne prouve ni eau présente ni vie.

Bibliographie et crédits

Les identifiants S01 à S59 sont repris à la fin des chapitres. Les pages institutionnelles donnent un accès général ; les articles et archives primaires permettent d’examiner les méthodes. Les références datées restent attachées à leur jeu de données. Les liens ont été consultés ou vérifiés pour cette édition en octobre 2026.

Le texte, les exemples calculés et les nouveaux diagrammes sont originaux. Les sources documentent les données et offrent des approfondissements ; leurs illustrations et leurs textes ne sont pas reproduits sauf lorsqu’un crédit photographique l’indique explicitement. Une référence de recherche spéculative ne transforme pas son hypothèse en résultat établi.

S01 NASA Science — Overview of the Universe.

https://go.cimolino.lu/univers259

Repères sur les structures, l’expansion et l’Univers observable.

S02 Planck Collaboration — Planck 2018 results VI Cosmological parameters, A&A 641, A6, 2020.

https://go.cimolino.lu/univers260

Paramètres du modèle ΛCDM de référence ; les nombres cités restent liés à ces données et hypothèses.

S03 NIST et CODATA — Fundamental Physical Constants, valeurs recommandées 2022.

https://go.cimolino.lu/univers261

Constantes mesurées et valeurs du SI ; consulter les incertitudes et les unités.

S04 Union astronomique internationale — Résolutions sur les unités et les constantes nominales, 2012 et 2015.

https://go.cimolino.lu/univers262

Unité astronomique et références nominales solaires et planétaires ; ne pas confondre convention et mesure actuelle.

S05 Bureau international des poids et mesures — SI defining constants.

https://go.cimolino.lu/univers263

Définitions exactes de c, h, k et des autres constantes définissant le SI.

S06 ESA Gaia — Gaia DR3 contents and documentation.

https://go.cimolino.lu/univers264

Produits astrométriques et photométriques ; lire les références et les corrections propres à la version.

S07 NASA Exoplanet Archive, Caltech IPAC — Planetary data and documentation.

https://go.cimolino.lu/univers265

Statuts des objets, paramètres et provenance des valeurs ; la population du catalogue évolue.

S08 Max Planck Institute for Gravitational Physics — Einstein Online.

https://go.cimolino.lu/univers266

Relativité, horloges, trous noirs et cosmologie ; ressources de chercheurs pour l’approfondissement.

S09 CERN — The Standard Model.

https://go.cimolino.lu/univers267

Constituants et interactions décrits par le modèle standard, avec ses questions ouvertes.

S10 NASA Science — Introduction to the Electromagnetic Spectrum.

https://go.cimolino.lu/univers268

Domaines du spectre et fenêtres d’observation. Les graphiques du présent livre sont originaux.

S11 NIST — Atomic Spectra Database, SRD 78.

https://go.cimolino.lu/univers269

Données évaluées sur niveaux, transitions et ionisation ; vérifier les conventions air ou vide.

S12 NASA Science — Stars and stellar types.

https://go.cimolino.lu/univers270

Panorama des familles stellaires ; les explications et exemples du livre sont rédigés pour cette édition.

S13 NASA Science — Sun Facts et Layers of the Sun.

https://go.cimolino.lu/univers129

Structure, activité et énergie solaire. Complément : https://go.cimolino.lu/univers322.

S14 GRAVITY Collaboration — Detection of the gravitational redshift in the orbit of S2, 2018.

https://go.cimolino.lu/univers271

Test relativiste dans le centre galactique. Complément ESO : https://go.cimolino.lu/univers272 ; précession : https://go.cimolino.lu/univers273.

S15 LIGO Scientific Collaboration et Virgo — GW170817 and multimessenger observations, 2017.

https://go.cimolino.lu/univers274

Détection d’une fusion d’étoiles à neutrons ; publications originales accessibles depuis la collaboration.

S16 NASA Science — How Do We Know There Are Black Holes.

https://go.cimolino.lu/univers275

Méthodes d’identification et environnement des objets compacts.

S17 NASA Hubble — Hubble Constant and Tension.

https://go.cimolino.lu/univers276

Présentation de l’échelle des distances, des céphéides et des calibrations.

S18 NASA Science — Types of Galaxies.

https://go.cimolino.lu/univers277

Morphologies, noyaux actifs et populations ; attention aux effets de bande et de projection.

S19 NASA Hubble — Hubble’s Nebulae.

https://go.cimolino.lu/univers278

Familles de nébuleuses et mécanismes d’émission ou de diffusion.

S20 Event Horizon Telescope Collaboration — First Sagittarius A* results I and III, 2022.

https://go.cimolino.lu/univers279

Anneau reconstruit, modélisation et limites de l’imagerie interférométrique. Publications primaires de la collaboration.

S21 DESI Collaboration — DR2 publications et analyses Lyman-alpha, 2025–2026.

https://go.cimolino.lu/univers280

Distances, expansion et modèles d’énergie noire. Analyse de juillet 2026 : https://go.cimolino.lu/univers323 ; les préférences dépendent des données combinées.

S22 ESA Planck — Planck and the cosmic microwave background.

https://go.cimolino.lu/univers281

Origine et propriétés du rayonnement fossile ; vocabulaire des cartes et des fluctuations.

S23 NASA Science — Dark Matter.

https://go.cimolino.lu/univers282

Indices gravitationnels et recherches sur une nature encore non identifiée.

S24 NASA Science — Dark Energy.

https://go.cimolino.lu/univers283

Expansion accélérée, constante cosmologique et questions ouvertes.

S25 ESA Planck — The cosmic microwave background and inflation.

https://go.cimolino.lu/univers284

Liens entre fluctuations, observations et familles de scénarios primordiaux.

S26 NASA Science — The Habitable Zone.

https://go.cimolino.lu/univers285

Définition et limites d’un domaine compatible avec certains modèles d’eau liquide de surface.

S27 Catling et collaborateurs — Exoplanet Biosignatures A Framework for Their Assessment, 2018.

https://go.cimolino.lu/univers286

Cadre d’évaluation des indices, contexte planétaire et faux positifs. Complément : NASA GISS, Harman et Domagal-Goldman, 2018, https://go.cimolino.lu/univers324.

S28 ALMA Observatory — How ALMA Works et Antennas.

https://go.cimolino.lu/univers287

Interférométrie millimétrique, configuration et calibrations ; composition des antennes dans la rubrique Technologies.

S29 ESO — ELT Telescope Overview.

https://go.cimolino.lu/univers288

Conception du miroir de 39 m, optique adaptative et état du projet à vérifier selon la date.

S30 Rubin Observatory — Legacy Survey of Space and Time.

https://go.cimolino.lu/univers289

L’observatoire indique le début du relevé en juin 2026 ; objectifs et cadence de la surveillance du ciel.

S31 NASA Science — Nancy Grace Roman Space Telescope.

https://go.cimolino.lu/univers290

Lancement le 30 août 2026 ; instruments et calendrier de mise en service distincts de l’exploitation des relevés.

S32 ESA — Farewell Gaia spacecraft operations come to an end, 27 mars 2025.

https://go.cimolino.lu/univers291

Fin des opérations après la clôture des observations scientifiques ; les traitements de données se poursuivent.

S33 IceCube Collaboration — IceCube Science.

https://go.cimolino.lu/univers292

Neutrinos, particules secondaires et lumière Cherenkov ; détection indirecte dans la glace.

S34 Gravitational Wave Open Science Center — Tutorials and Open Data.

https://go.cimolino.lu/univers293

Données publiques et exercices documentés ; conserver les versions et les références des événements.

S35 Arthur Hebecker — Lectures on Naturalness String Landscape and Multiverse, 2020, version 2026.

https://go.cimolino.lu/univers294

Notes avancées de recherche ; motivations et difficultés théoriques du paysage et des multivers.

S36 AAVSO — Manuals and Stellar Photometry.

https://go.cimolino.lu/univers295

Méthodes et formats pour les étoiles variables ; suivre les cartes et les consignes propres au programme.

S37 NASA JPL Solar System Dynamics — Planetary Physical Parameters et Astrodynamic Parameters.

https://go.cimolino.lu/univers296

Masses, rayons et références ; orbites et éphémérides : https://go.cimolino.lu/univers325. Les tableaux de parcours utilisent un jeu arrondi explicitement fixé.

S38 R. Feynman, R. Leighton et M. Sands, Caltech — The Feynman Lectures on Physics, Volume III.

https://go.cimolino.lu/univers297

Lecture complémentaire sur états, amplitudes et incertitude. Aucun texte ou schéma de cette œuvre n’est reproduit ici.

S39 NASA Science — Decoding Nebulae.

https://go.cimolino.lu/univers298

Comparaison des mécanismes d’émission, de réflexion et d’extinction.

S40 NASA Hubble — Hubble’s Star Clusters.

https://go.cimolino.lu/univers299

Amas ouverts, globulaires et complexité des populations stellaires.

S41 NASA Webb — What Are Active Galactic Nuclei.

https://go.cimolino.lu/univers300

Accrétion, galaxies hôtes et composantes d’un noyau actif.

S42 A. Riess et collaborateurs — A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant, 2022.

https://go.cimolino.lu/univers301

Publication primaire sur une échelle des distances ; exemple de calibration et de covariance, sans prétendre résumer toutes les mesures ultérieures.

S43 Particle Data Group — Review of Particle Physics, Big Bang Nucleosynthesis, 2024.

https://go.cimolino.lu/univers302

Noyaux légers, densité baryonique et problème du lithium ; référence technique explicitement datée.

S44 D. J. Fixsen — The Temperature of the Cosmic Microwave Background, ApJ 707, 916, 2009.

https://go.cimolino.lu/univers303

Température de référence 2,72548 K, utilisée arrondie dans les courbes calculées ; données FIRAS : https://go.cimolino.lu/univers326.

S45 NASA Science — Solar System.

https://go.cimolino.lu/univers304

Monographies planétaires et missions ; comparaison à compléter avec les paramètres physiques JPL.

S46 NASA Science — Searching for Signs of Intelligent Life Technosignatures.

https://go.cimolino.lu/univers305

Types de traces étudiées et distinction avec une preuve de vie ou de technologie.

S47 NASA Science — Hubble Observatory et James Webb Space Telescope.

https://go.cimolino.lu/univers306

Miroirs, bandes et objectifs. Webb : https://go.cimolino.lu/univers327 ; Chandra : https://go.cimolino.lu/univers328.

S48 Space Telescope Science Institute — STIS Instrument Handbook, detector and sky backgrounds.

https://go.cimolino.lu/univers307

Bruits, fonds et calculs de performance ; méthodes à adapter au détecteur effectivement utilisé.

S49 NRAO — Radio Astronomy.

https://go.cimolino.lu/univers308

Principes, rayonnements et instruments de radioastronomie.

S50 National Solar Observatory — About the Inouye Solar Telescope.

https://go.cimolino.lu/univers309

Ouverture de 4 m et objectifs de mesure du champ solaire.

S51 NOAA Space Weather Prediction Center — Space Weather Phenomena.

https://go.cimolino.lu/univers310

Éruptions, éjections, vent solaire et phénomènes géomagnétiques ; prévisions opérationnelles à consulter directement.

S52 ESA — Euclid.

https://go.cimolino.lu/univers311

Objectifs, instruments et relevés consacrés à la géométrie et aux structures cosmiques.

S53 F. Marchesano, G. Shiu et T. Weigand — The Standard Model from String Theory What Have We Learned, 2024.

https://go.cimolino.lu/univers312

Revue de recherche sur les compactifications et le lien au modèle standard. Complément CERN : https://go.cimolino.lu/univers329.

S54 Hugh Everett III — Relative State Formulation of Quantum Mechanics, Rev Mod Phys 29, 454, 1957.

https://go.cimolino.lu/univers313

Texte primaire d’une interprétation quantique ; à distinguer des domaines inflationnaires cosmologiques.

S55 SNO Collaboration — Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions, 2002.

https://go.cimolino.lu/univers314

Résultat primaire sur la transformation des neutrinos solaires ; à distinguer des neutrinos cosmiques de très haute énergie.

S56 C. P. Burgess — Quantum Gravity in Everyday Life General Relativity as an Effective Field Theory, 2004.

https://go.cimolino.lu/univers315

Approche effective et limites des calculs gravitationnels à basse énergie.

S57 A. Ashtekar et J. Lewandowski — Background Independent Quantum Gravity A Status Report, 2004.

https://go.cimolino.lu/univers316

Présentation technique d’une approche de quantification géométrique, sans prétendre à une confirmation expérimentale.

S58 A. Almheiri et collaborateurs — The entropy of Hawking radiation, 2020–2021.

https://go.cimolino.lu/univers317

Revue de recherche sur l’information, les entropies et les limites de modèles de trous noirs.

S59 Particle Data Group — Review of Particle Physics, Astrophysics and Cosmology.

https://go.cimolino.lu/univers318

Références techniques sur les composantes cosmologiques, les fonds relictes et les limites statistiques du ciel observé.

Crédits des images conservées de la série

Couverture du tome III et fond des pages de partie : illustrations du projet Comprendre l’univers. Les couvertures de la collection sont des illustrations assistées par intelligence artificielle ; elles ne sont pas des photographies scientifiques. Les fichiers d’origine sont conservés avec le livre. Le logo Les Vieux Livres Éditions est fourni par l’éditeur.

Panorama du ciel de la page de titre : NOIRLab/NSF/AURA/E. Slawik/M. Zamani, licence Creative Commons Attribution 4.0 International. Source : https://go.cimolino.lu/univers087. Reproduction à taille adaptée, sans modification des couleurs. Le panorama conserve une fonction de contexte, sans fournir des distances stellaires.

Nébuleuse du Crabe au chapitre 25 : NASA, ESA, J. Hester et A. Loll, Arizona State University. Mosaïque Hubble publiée en 2005, conservée de l’édition précédente. Source : https://go.cimolino.lu/univers330. Image réduite pour la page ; les couleurs représentent des filtres et ne promettent pas un aspect visuel à l’oculaire.

Montage des observatoires au chapitre 48 : VLT, ESO/Y. Beletsky, https://go.cimolino.lu/univers319 ; ALMA, Y. Beletsky/ESO, https://go.cimolino.lu/univers320 ; Hubble, NASA, STS082-746-040, https://go.cimolino.lu/univers331. Les images ont été réduites et réunies dans une planche dans la série initiale. Les dimensions apparentes du montage ne représentent pas les dimensions physiques relatives.

Les photographies ESO ci-dessus sont diffusées sous Creative Commons Attribution 4.0 International : https://go.cimolino.lu/univers055. Conditions de l’ESO : https://go.cimolino.lu/univers056. Les images NASA sont utilisées selon leurs conditions éditoriales, avec maintien des crédits tiers : https://go.cimolino.lu/univers057. Aucun soutien institutionnel à cet ouvrage n’est impliqué.

Les sept pictogrammes sont des créations graphiques originales de la série. Les 36 nouveaux graphiques et schémas sont calculés ou dessinés pour ce tome ; les courbes synthétiques portent cette mention. Leurs sources de paramètres sont les constantes S03 à S05 et les références indiquées dans les chapitres. Ils ne copient pas les figures des articles cités.

Seules les images effectivement présentes dans cette édition sont créditées ici ; les mentions héritées de planches ou de catalogues absents ont été retirées du livre.

Liens et codes QR

Ouvrez le lien court ou scannez son code. Les identifiants sont communs aux trois tomes.

univers055

Licence Creative Commons CC BY 4.0
go.cimolino.lu/univers055

univers056

ESO — Conditions de réutilisation
go.cimolino.lu/univers056

univers057

NASA — Images et médias : conditions
go.cimolino.lu/univers057

univers087

Ciel entier — NOIRLab / Slawik / Zamani
go.cimolino.lu/univers087

univers129

Le Soleil — NASA
go.cimolino.lu/univers129

univers136

Fiches des planètes — NASA Goddard
go.cimolino.lu/univers136

univers255

Inclinaisons planétaires — notes NASA
go.cimolino.lu/univers255

univers259

S01 · NASA — Présentation de l’Univers
go.cimolino.lu/univers259

univers260

S02 · Planck 2018 — Paramètres cosmologiques
go.cimolino.lu/univers260

univers261

S03 · NIST/CODATA — Constantes physiques
go.cimolino.lu/univers261

univers262

S04 · UAI — Unités et constantes astronomiques
go.cimolino.lu/univers262

univers263

S05 · BIPM — Constantes définissant le SI
go.cimolino.lu/univers263

Liens et codes QR 2

univers264

S06 · Gaia DR3 — Données et documentation
go.cimolino.lu/univers264

univers265

S07 · NASA — Archive des exoplanètes
go.cimolino.lu/univers265

univers266

S08 · Einstein Online — La relativité expliquée
go.cimolino.lu/univers266

univers267

S09 · CERN — Le Modèle standard
go.cimolino.lu/univers267

univers268

S10 · NASA — Le spectre électromagnétique
go.cimolino.lu/univers268

univers269

S11 · NIST — Base des spectres atomiques
go.cimolino.lu/univers269

univers270

S12 · NASA — Les étoiles et leurs types
go.cimolino.lu/univers270

univers271

S14 · GRAVITY — Décalage gravitationnel de S2
go.cimolino.lu/univers271

univers272

ESO — Test de la relativité avec l’étoile S2
go.cimolino.lu/univers272

univers273

GRAVITY — Précession de Schwarzschild de S2
go.cimolino.lu/univers273

univers274

S15 · LIGO/Virgo — GW170817 et ses messagers
go.cimolino.lu/univers274

univers275

S16 · NASA — Comment détecter les trous noirs
go.cimolino.lu/univers275

Liens et codes QR 3

univers276

S17 · Hubble — Constante et tension de Hubble
go.cimolino.lu/univers276

univers277

S18 · NASA — Les types de galaxies
go.cimolino.lu/univers277

univers278

S19 · Hubble — Les nébuleuses
go.cimolino.lu/univers278

univers279

S20 · EHT — L’ombre de Sagittarius A*
go.cimolino.lu/univers279

univers280

S21 · DESI DR2 — Publications scientifiques
go.cimolino.lu/univers280

univers281

S22 · Planck — Le fond cosmologique
go.cimolino.lu/univers281

univers282

S23 · NASA — La matière noire
go.cimolino.lu/univers282

univers283

S24 · NASA — L’énergie noire
go.cimolino.lu/univers283

univers284

S25 · Planck — Fond cosmologique et inflation
go.cimolino.lu/univers284

univers285

S26 · NASA — La zone habitable
go.cimolino.lu/univers285

univers286

S27 · Catling et al. — Évaluer les biosignatures
go.cimolino.lu/univers286

univers287

S28 · ALMA — Fonctionnement de l’observatoire
go.cimolino.lu/univers287

Liens et codes QR 4

univers288

S29 · ESO — Le télescope ELT
go.cimolino.lu/univers288

univers289

S30 · Rubin — Le relevé LSST
go.cimolino.lu/univers289

univers290

S31 · NASA — Le télescope spatial Roman
go.cimolino.lu/univers290

univers291

S32 · ESA — Fin des opérations de Gaia
go.cimolino.lu/univers291

univers292

S33 · IceCube — Science et neutrinos
go.cimolino.lu/univers292

univers293

S34 · GWOSC — Tutoriels sur les ondes gravitationnelles
go.cimolino.lu/univers293

univers294

S35 · Hebecker — Théorie des cordes et multivers
go.cimolino.lu/univers294

univers295

S36 · AAVSO — Manuels d’observation
go.cimolino.lu/univers295

univers296

S37 · JPL — Paramètres physiques des planètes
go.cimolino.lu/univers296

univers297

S38 · Feynman — Cours de physique, volume III
go.cimolino.lu/univers297

univers298

S39 · NASA — Comprendre les nébuleuses
go.cimolino.lu/univers298

univers299

S40 · Hubble — Les amas d’étoiles
go.cimolino.lu/univers299

Liens et codes QR 5

univers300

S41 · Webb — Les noyaux actifs de galaxies
go.cimolino.lu/univers300

univers301

S42 · Riess et al. — Mesurer la constante de Hubble
go.cimolino.lu/univers301

univers302

S43 · PDG — Nucléosynthèse primordiale
go.cimolino.lu/univers302

univers303

S44 · Fixsen — Température du fond cosmologique
go.cimolino.lu/univers303

univers304

S45 · NASA — Le Système solaire
go.cimolino.lu/univers304

univers305

S46 · NASA — La recherche de technosignatures
go.cimolino.lu/univers305

univers306

S47 · NASA — L’observatoire Hubble
go.cimolino.lu/univers306

univers307

S48 · STIS — Signal de fond du détecteur et du ciel
go.cimolino.lu/univers307

univers308

S49 · NRAO — La radioastronomie
go.cimolino.lu/univers308

univers309

S50 · NSO — Le télescope solaire Inouye
go.cimolino.lu/univers309

univers310

S51 · NOAA — Les phénomènes de météo spatiale
go.cimolino.lu/univers310

univers311

S52 · ESA — La mission Euclid
go.cimolino.lu/univers311

Liens et codes QR 6

univers312

S53 · Marchesano et al. — Cordes et Modèle standard
go.cimolino.lu/univers312

univers313

S54 · Everett — États relatifs en mécanique quantique
go.cimolino.lu/univers313

univers314

S55 · SNO — Transformation des saveurs de neutrinos
go.cimolino.lu/univers314

univers315

S56 · Burgess — Gravitation comme théorie effective
go.cimolino.lu/univers315

univers316

S57 · Ashtekar et Lewandowski — Gravitation quantique
go.cimolino.lu/univers316

univers317

S58 · Almheiri et al. — Entropie du rayonnement de Hawking
go.cimolino.lu/univers317

univers318

S59 · PDG — Astrophysique et cosmologie
go.cimolino.lu/univers318

univers319

VLT — Photographie ESO / Y. Beletsky
go.cimolino.lu/univers319

univers320

ALMA — Photographie Y. Beletsky / ESO
go.cimolino.lu/univers320

univers322

NASA — Les couches du Soleil
go.cimolino.lu/univers322

univers323

DESI DR2 — Forêt Lyman alpha et cosmologie
go.cimolino.lu/univers323

univers324

NASA GISS — Faux positifs des biosignatures
go.cimolino.lu/univers324

Liens et codes QR 7

univers325

JPL — Dynamique du Système solaire
go.cimolino.lu/univers325

univers326

COBE/FIRAS — Spectre du fond cosmologique
go.cimolino.lu/univers326

univers327

NASA — Le télescope spatial James Webb
go.cimolino.lu/univers327

univers328

NASA — L’observatoire Chandra
go.cimolino.lu/univers328

univers329

CERN — Dimensions supplémentaires et gravitons
go.cimolino.lu/univers329

univers330

Hubble — Mosaïque de la nébuleuse du Crabe
go.cimolino.lu/univers330

univers331

NASA — Photographie de Hubble, STS-82
go.cimolino.lu/univers331

Index thématique

Les numéros renvoient aux pages de début des chapitres qui développent le terme. Le glossaire donne une définition courte ; le sommaire présente la progression complète.

Abondance 35, 51
Accélération 22, 56
Accrétion 76, 129
Albédo de Bond 195
Alias 101, 249
Amas de galaxies 132
Amas globulaire 118
Amas ouvert 118
Anisotropie 166
Année-lumière 14
Antimatière 47, 170
Aphélie 60
Astérisme 118
Astrométrie 137, 257
Atmosphère stellaire 35, 39
Barycentre 56, 97
Baryonique 170
Big Bang chaud 162
Binaire 97
Biosignature 199
Blazar 129
Boson 47
Calibration 18, 208
Céphéide 101, 141
Chandelle standardisable 141
Cherenkov 227
Chirp 227
Classe spectrale 85
Comobile 149, 158

Compactification 236
Conservation de l'énergie 22, 51
Constante cosmologique 174
Convection 85, 89
Corps noir 39, 166
Courbe de lumière 101, 249
Courbe de rotation 121, 170
Courbure 72, 158
Covariance 153
Décalage spectral 43, 149
Décohérence 240
Découplage 162, 166
Dégénérescence de modèles 18, 145
Dégénérescence quantique 26, 105
Demi-grand axe 60, 253
Densité moyenne 89, 187
Différenciation 187
Diffraction 208
Disque d'accrétion 81, 129
Distance angulaire 149
Distance de luminosité 141, 149
Distance propre cosmologique 149, 158
Doppler 43
Dualité 236
Écart type 153
Effet de sélection 93, 191
Effet tunnel 51
Électronvolt 35
Énergie cinétique 22, 68
Énergie noire 174
Énergie potentielle 22, 56
Équation d'état 26, 109
Équilibre hydrostatique 85
Étoile à neutrons 109

Excentricité 60
Exoplanète 191
Extinction 114, 141
Facteur de Lorentz 68
Facteur d’échelle 158
Faux positif 199
Fermion 47
Filament cosmique 132
Flux 39
Fonction instrumentale 208
Fond diffus cosmologique 166
Fréquence 31
Fusion nucléaire 51
Galaxie 125
Géodésique 72
Gravitation quantique 232
Halo 121
Héliosismologie 89
Horizon cosmologique 10, 158
Horizon d’un trou noir 76
Incertitude 153
Inflation 178
Interférométrie 212
Intrication 47, 240
Ionisation 26, 35
Isotope 26, 51
Jet 81, 129
Kilonova 109, 227
Lentille faible 145
Lentille forte 145
Longueur d’onde 31
Luminosité 39
Magnitude absolue 39, 141
Magnitude apparente 39

Marée 64
Masse dynamique 97, 170
Matière noire 170
Métallicité 35, 93
Microlentille 145, 191
Migration planétaire 183
Module de distance 141
Moment cinétique 22, 81
Mouvement propre 43, 137
Multivers 240
Naine blanche 105
Naine brune 81
Nébuleuse planétaire 105, 114
Neutrino 89, 227
Nova 101
Noyau actif 129
Nucléosynthèse 51, 162
Opacité 35, 85
Optique active 212
Optique adaptative 212
Parallaxe annuelle 137
Parsec 14, 137
Périhélie 60
Période sidérale 60
Période synodique 60
Photon 35
Photosphère 89
Planétésimal 183
Plasma 26
Polarisation 31, 166
Pression 26, 85
Principe d’exclusion 47
Protoétoile 81
Provenance des données 204, 257

Pulsar 109
Quasar 129
Raie spectrale 35, 43
Rayonnement thermique 39
Rayons cosmiques 227
Référentiel 22, 68
Résonance orbitale 64
Rétroaction 125, 132
Rétrogradation 60
Rotation synchrone 64
Séquence principale 85, 93
Signal sur bruit 208
Singularité classique 76, 232
Spectre 31, 35
Supernova Ia 109, 141
Température effective 39, 93
Temps de regard en arrière 10, 149
Temps propre 68, 72
Théorie effective 232
Topologie 158
Transit 191
Trou noir 76
Unité astronomique 14, 253
Vent solaire 220
Visibilité interférométrique 212
Vitesse particulière 132, 149
Vitesse radiale 43, 97
Zone habitable 195

COMPRENDRE L’UNIVERS · CAHIER PRATIQUE

Utiliser le portail avec ce tome

Le portail fournit des exemples concrets pour relier une loi physique, un calcul et une observation. Chaque activité invite à préciser ce que le modèle représente. Les contenus numériques du projet sont gratuits et accessibles sans compte. Le livre conserve les explications nécessaires pour comprendre les exercices.

Lire puis essayer

Repérez le chapitre cité, faites une première estimation sur papier, puis utilisez l’outil indiqué. Notez vos choix, vos unités et les conditions de l’observation. Le résultat obtenu en ligne complète votre raisonnement.

Des liens communs à toute la collection

Les QR codes de ce cahier encodent les adresses courtes du projet sur go.cimolino.lu. Un même identifiant désigne la même ressource dans les trois tomes. Vous pouvez scanner le code ou saisir l’adresse indiquée sous celui-ci.

Portail Comprendre l’Univers

go.cimolino.lu/univers332

Accès en ligne

Collection des livres

go.cimolino.lu/univers333

Accès en ligne

La bibliothèque du portail réunit la présentation des ouvrages et leurs ressources associées. Les crédits et les licences propres aux images et aux contenus restent applicables.

Comprendre ce que calcule la vue lunaire

Chapitres concernés : 13 Kepler et les mouvements apparents ; 14 Marées résonances et collisions ; 36 Incertitudes statistiques et désaccords ; 58 Lire une découverte et évaluer une explication.

Dans le calendrier des phases, choisissez deux dates, puis reportez-les dans l’outil d’éclairage et de libration avec une heure et un fuseau explicites. Relevez la fraction éclairée et décrivez la présentation de la Lune à chaque date.

Reliez vos constatations au chapitre 14 : la rotation synchrone n’immobilise pas la Lune dans l’espace, et la libration modifie la présentation des régions du bord. Distinguez la texture photographique de référence des grandeurs que le logiciel calcule pour la date choisie.

Consultez aussi la page des éclipses. Les phases habituelles dépendent de la géométrie de l’éclairage et de l’observation ; une éclipse lunaire fait intervenir l’ombre terrestre. Le modèle d’éclairage ne simule pas les éclipses ni les ombres fines du relief.

La représentation est géocentrique : elle ne fournit pas exactement la vue propre à votre emplacement terrestre. Un accord numérique sur des références précises ne garantit pas toutes les dates et toutes les situations. Appliquez la méthode des chapitres 36 et 58 : identifier les données, les hypothèses, les tests et les limites.

À essayer

Rédigez une fiche de confiance en trois rubriques : ce que montre la photographie, ce que calcule le modèle et ce que votre comparaison ne permet pas de conclure.

Phases et calendrier lunaires

go.cimolino.lu/univers340
Accès en ligne

Éclairage et libration

go.cimolino.lu/univers341
Accès en ligne

Comprendre les éclipses lunaires

go.cimolino.lu/univers344
Accès en ligne

Comparer champ, pixels et détails

Chapitres concernés : 49 Miroirs détecteurs et spectrographes ; 61 Exploiter un catalogue public.

Choisissez un objet Messier et relevez ses dimensions angulaires lorsqu’elles sont indiquées, avec leur unité et leur source. Cette information permet d’aborder le cadrage sans supposer que toute la structure photographiée sera enregistrée par votre configuration.

Dans le calculateur astrophotographique, gardez la même focale et les mêmes dimensions physiques de capteur. Pour une comparaison théorique, divisez seulement la taille des pixels par deux. Le champ géométrique reste identique ; l’angle représenté par un pixel est divisé par deux.

Dans le calculateur de télescope, comparez ensuite deux oculaires sur le même instrument. Relevez grossissement, pupille et champ estimé. Vous comparez maintenant une observation visuelle : ne remplacez pas les dimensions du capteur par le champ apparent d’un oculaire.

Revenez aux limites du chapitre 49. Une grille plus fine ne suffit pas à démontrer un gain de résolution. Le diamètre, la longueur d’onde, la turbulence, le foyer et le signal interviennent. Conservez les paramètres et les sources pour qu’une autre personne puisse comprendre votre comparaison.

À essayer

Préparez deux comparaisons, l’une photographique et l’autre visuelle. Indiquez pour chacune le paramètre modifié et ce que le résultat permet réellement de prévoir.

Calculateur de télescope

go.cimolino.lu/univers346
Accès en ligne

Calculateur astrophotographique

go.cimolino.lu/univers347
Accès en ligne

Catalogue Messier

go.cimolino.lu/univers335
Accès en ligne

Changer d’échelle en gardant les rapports

Chapitres concernés : 2 Mesurer et comparer ; 13 Kepler et les mouvements apparents ; 44 Mondes rocheux géantes et petits corps ; 60 Calculer un Système solaire à l’échelle.

Choisissez une échelle dans le créateur de parcours solaire. Relevez la position et le diamètre de la Terre puis de Neptune. Comparez les unités, les valeurs de référence et la méthode aux exemples déjà calculés au chapitre 60.

Préparez ensuite un modèle deux fois plus grand. Vérifiez que les emplacements et les diamètres doublent ensemble. Une planète agrandie pour être plus visible relève d’une seconde représentation, qui doit être clairement distinguée du modèle à échelle unique.

Consultez les fiches du Système solaire pour comprendre les grandeurs utilisées. Un demi-grand axe fournit une référence orbitale ; il ne décrit pas la distance instantanée d’une planète à la Terre. Les planètes ne se trouvent pas toutes sur une ligne au même moment.

Si les résultats du créateur diffèrent légèrement des tableaux du livre, vérifiez les données adoptées et leurs arrondis avant de conclure à une erreur. Notez votre échelle et vos références. Le parcours sert à comprendre des proportions ; le guide consacré aux parcours solaires développe leur réalisation sur le terrain.

À essayer

Gardez deux tableaux proportionnels et une légende précisant l’échelle, la définition des distances et les éventuels agrandissements destinés à rendre les objets lisibles.

Catalogue du Système solaire

go.cimolino.lu/univers337

Accès en ligne

Créateur de parcours solaire

go.cimolino.lu/univers351

Accès en ligne

Les outils par chapitre

Le même identifiant désigne la même ressource dans toute la collection. Ce tableau relie les chapitres existants aux activités et aux QR codes de ce cahier.

Identifiant	Ressource	Chapitres
univers332	Portail Comprendre l’Univers	Présentation
univers333	Collection des livres	Présentation
univers335	Catalogue Messier	26, 27, 29, 61
univers337	Catalogue du Système solaire	43, 44, 60
univers338	Découvrir la Lune	14
univers340	Phases et calendrier lunaires	13, 14
univers341	Éclairage et libration	14, 36, 58, 62
univers342	Missions et alunissages	53
univers344	Comprendre les éclipses lunaires	13, 14
univers346	Calculateur de télescope	49
univers347	Calculateur astrophotographique	49
univers348	Carnet d’observation	59
univers349	Projet de parcours solaire et exemple Kirchberg	60
univers350	Portail du parcours solaire	60
univers351	Créateur de parcours solaire	60

Pour compléter une adresse : https://go.cimolino.lu/ suivi de l’identifiant, sans espace. Les données du carnet et du défi lunaire restent locales au navigateur : conservez régulièrement un fichier de sauvegarde.

Autres accès utiles

Ces ressources complètent les ateliers et permettent de poursuivre les explorations proposées dans ce tome.

Découvrir la Lune

go.cimolino.lu/univers338
Accès en ligne

Missions et alunissages

go.cimolino.lu/univers342
Accès en ligne

Carnet d’observation

go.cimolino.lu/univers348
Accès en ligne

Projet de parcours solaire et exemple Kirchberg

go.cimolino.lu/univers349
Accès en ligne

Portail du parcours solaire

go.cimolino.lu/univers350
Accès en ligne

Conserver une copie de son travail

Exportez le carnet et la progression lunaire en JSON pour pouvoir les réimporter. Le CSV sert notamment à relire les informations dans un tableur. Un fichier local au navigateur ne constitue pas une sauvegarde distante et aucune synchronisation entre appareils n’est annoncée.

Sources et limites

Les contenus astronomiques restent rattachés aux sources citées dans les chapitres et sur les pages du portail. Les interfaces peuvent évoluer. Consultez les hypothèses, les unités et les limites précisées dans chaque outil avant d’interpréter un résultat.

Crédits de l’édition

COMPRENDRE L’UNIVERS · TOME III · VERSION 1.0

Comprendre l’astrophysique

Auteur et édition

Steve Cimolino · Les Vieux Livres Éditions
Version 1.0 du 18 octobre 2026 · Édition numérique PDF eBook
ISBN : 978-99987-432-7-4

Création graphique et assistance

Logo du projet fourni par Steve Cimolino. Rédaction, recherche, mise en page et illustrations de couverture réalisées avec l’assistance d’une intelligence artificielle. Les couvertures sont des créations artistiques et ne constituent pas des photographies scientifiques.

Sources et crédits iconographiques

Les sources scientifiques figurent dans « Bibliographie et crédits ». Les auteurs, les sources, les adaptations et les licences des photographies figurent dans « Crédits des images conservées de la série ». Les schémas pédagogiques et les données synthétiques restent identifiés comme tels.

Droits et ressources numériques

© 2026 Steve Cimolino pour les textes et les créations originales. Les droits des éléments tiers restent ceux indiqués dans leurs crédits. Les autorisations de reproduction du volume figurent dans les mentions d’édition. Les contenus numériques du projet sont gratuits et accessibles sans compte.

Portail de la collection : go.cimolino.lu/univers332

TOME III · VERSION 1.0

Comprendre l’astrophysique

Relier la lumière aux lois de l’Univers

Comment connaître la température d’une étoile, mesurer la distance d’une galaxie ou retracer l’histoire de l’Univers ? Ce tome présente les idées physiques et les méthodes qui permettent de transformer les observations en connaissances.

Lumière, gravitation, étoiles, galaxies et cosmologie se découvrent à travers des explications, des exemples et des exercices corrigés. Les activités associées au portail invitent à manipuler les ordres de grandeur, à préciser les hypothèses et à comprendre les limites d’un modèle.

LUMIÈRE · ÉTOILES · GALAXIES · COSMOLOGIE

RESSOURCES EN LIGNE

go.cimolino.lu/univers332

Gratuit · sans compte

TOME III

Steve Cimolino

ÉDITIONS LES VIEUX LIVRES

Collection
Comprendre l’Univers

Version 1.0 · Octobre 2026

ISBN · ÉDITION PDF

ISBN 978-99987-432-7-4

9 789998 743274

TOME III · VERSION 1.0