

50

CLÉS POUR COMPRENDRE L'
UNIVERS

GILES
SPARROW

Traduit de l'anglais par Jacques Paul

DUNOD

Table des matières

Introduction 3

- 01** Notre place dans l'Univers **4**
 - 02** Observer les cieux **8**
 - 03** Le royaume du Soleil **12**
 - 04** La formation du Système solaire **16**
 - 05** Les migrations planétaires **20**
 - 06** L'origine de la Lune **24**
 - 07** De l'eau sur Mars **28**
 - 08** Géantes de gaz et géantes de glaces **32**
 - 09** Les lunes-océan **36**
 - 10** Les planètes naines **40**
 - 11** Astéroïdes et comètes **44**
 - 12** De la vie dans le Système solaire ? **48**
 - 13** Notre Soleil, une étoile en gros plan **52**
 - 14** Mesurer les étoiles **56**
 - 15** La chimie stellaire **60**
 - 16** Le diagramme de Hertzsprung-Russell **64**
 - 17** La structure des étoiles **68**
 - 18** La source d'énergie des étoiles **72**
 - 19** Le cycle de vie des étoiles **76**
 - 20** Nébuleuses et amas stellaires **80**
 - 21** La naissance des étoiles **84**
 - 22** Les étoiles naines **88**
 - 23** Les systèmes d'étoiles binaires et multiples **92**
 - 24** La recherche des exoplanètes **96**
 - 25** Les autres systèmes solaires **100**
 - 26** Les zones habitables **104**
 - 27** Les géantes rouges **108**
 - 28** Les étoiles pulsantes **112**
 - 29** Les supergéantes **116**
 - 30** Les supernovæ **120**
 - 31** Les vestiges stellaires **124**
 - 32** Les étoiles binaires extrêmes **128**
 - 33** Les trous noirs **132**
 - 34** La Voie lactée **136**
 - 35** Le cœur de la Voie lactée **140**
 - 36** Les types de galaxies **144**
 - 37** Collisions et évolution de galaxies **148**
 - 38** Quasars et galaxies actives **152**
 - 39** L'Univers à grande échelle **156**
 - 40** L'expansion cosmique **160**
 - 41** Le Big Bang **164**
 - 42** Nucléosynthèse et évolution cosmique **168**
 - 43** Étoiles-monstre et galaxies primordiales **172**
 - 44** Les confins de l'Univers **176**
 - 45** La matière noire **180**
 - 46** L'énergie sombre **184**
 - 47** Relativité et ondes gravitationnelles **188**
 - 48** La vie dans l'Univers **192**
 - 49** Le multivers **196**
 - 50** Le destin de l'Univers **200**
- Glossaire 204**
Index 206

Introduction

Dans la mesure où le comportement des astres sur la voûte céleste n'a que très rarement un impact direct sur les vies humaines, il peut sembler étrange de voir l'astronomie se vanter d'être la plus ancienne des sciences. Et pourtant, les racines de l'astronomie remontent à la Préhistoire – la plus ancienne carte d'étoiles connue a été peinte sur les parois de la grotte de Lascaux, au beau milieu de la dernière glaciation, il y a 17 300 ans. À première vue, il s'agit simplement d'une belle représentation d'un taureau qui charge, mais une inspection plus approfondie révèle un groupe de signes derrière la bosse de l'animal : c'est la représentation sans équivoque de l'amas d'étoiles des Pléiades dans l'actuelle constellation du Taureau.

Pour les anciens, les mouvements du Soleil, de la Lune et des étoiles avaient un lien vital avec les événements sur Terre : la technologie nous a peut-être rendus moins sensibles aux changements des saisons, mais pour nos ancêtres, c'était une question de vie et de mort. Aujourd'hui, l'astronomie exerce son influence sous d'autres formes, souvent à travers l'innovation scientifique qu'elle inspire (comme l'atteste la caméra CCD de votre smartphone). Mais peut-être la vraie fascination pour l'astronomie réside-t-elle, en ces temps confus, dans le fait qu'elle touche les mystères de l'infini et aborde plus que n'importe quelle autre science l'explication de nos origines.

Ce livre est une célébration des plus grandes idées de l'astronomie et des esprits brillants, perspicaces et parfois iconoclastes qui ont contribué à les façonner. Au travers d'une cinquantaine de thèmes, j'espère tout aborder, de la diversité des planètes et des autres mondes au seuil de notre porte céleste, en passant par la vie et la mort des étoiles, jusqu'à la structure et les origines de l'Univers lui-même. Certaines des théories passées en revue remontent à des siècles, d'autres sont étonnamment modernes, et certaines sont encore en cours de mise au point – l'une des grandes beautés de l'astronomie en tant que science est que, comme l'Univers lui-même, elle est en perpétuelle évolution. Ma sélection de sujets est forcément personnelle, façonnée par mes propres intérêts et mes discussions avec de nombreux astronomes en activité, mais j'espère qu'il y a matière ici pour fasciner, voire inspirer tout un chacun.

01 Notre place dans l'Univers

L'astronomie nous aide à comprendre notre place dans l'Univers et progresse à mesure que notre importance au sein du cosmos diminue. Jadis au centre de la création, notre Terre est désormais perçue comme une poussière dans l'immensité du cosmos.

L'humanité a été fascinée par les étoiles tout au long de son histoire, non seulement en racontant des légendes à leur sujet et en leur attribuant des significations, mais aussi en les utilisant à des fins pratiques comme la mesure du temps. Les Égyptiens de l'Antiquité prédisaient l'arrivée de la saison des crues du Nil lorsque Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, se levait peu avant l'aube. Mais un autre volet important de la pensée des anciens, l'astrologie, a produit les premières représentations de notre place dans le cosmos.

À l'époque, les astrologues voyaient les cieux comme un miroir de la Terre : pour eux, les mouvements du Soleil, de la Lune et autres astres errant parmi les figures remarquables que forment les étoiles fixes – les constellations – n'influençaient pas nécessairement les événements sur Terre, mais ils les reflétaient. Ainsi, si une grande famine frappait lorsque Mars et Jupiter étaient en conjonction (proche l'une de l'autre sur le ciel) dans la constellation du Taureau, alors vous pourriez anticiper un événement similaire si ces deux planètes s'approchaient de nouveau dans cette même constellation. Qui plus est, les mouvements des planètes n'étaient pas totalement imprévisibles, donc anticiper leurs déplacements pouvait signifier être en mesure de prédire les événements futurs sur Terre.

L'Univers géocentrique Le grand défi était donc de développer un modèle suffisamment précis des mouvements planétaires. La plupart des astronomes croyaient alors avec bon sens que la Terre était fixe dans l'espace (après tout, nous ne ressentons pas son mouvement). Sans avoir conscience de l'échelle du cosmos, ils supposaient que la Lune, le Soleil, les planètes et

chronologie

– 150

L'*Almageste* de Ptolémée consolide la vue classique d'un Univers géocentrique, centré sur la Terre.

1543

Copernic publie sa vision d'un Univers héliocentrique, centré sur le Soleil.

1608

Kepler modélise les orbites comme des ellipses plutôt que comme des cercles, expliquant enfin les mouvements des planètes.

les étoiles suivaient tous des trajectoires circulaires autour de la Terre à des vitesses variables, de manière à produire les mouvements apparents observés sur la voûte céleste (voir l'encadré page 6).

Malheureusement, ce modèle géocentrique (centré sur la Terre), pourtant d'une séduisante simplicité, ne faisait pas de prédictions correctes. Les planètes s'écartaient rapidement de leurs trajectoires prédites sur le ciel, ce que les astronomes corrigèrent au prix d'artifices variés. Le modèle géocentrique atteignit son apogée au II^e siècle de notre ère grâce aux travaux de l'astronome grec-égyptien Ptolémée d'Alexandrie. Son grand ouvrage, l'*Almageste*, émettait l'idée que chaque planète se déplaçait sur un petit cercle, appelé épicycle, dont le centre tournait lui-même autour de la Terre. Les astronomes de l'Empire romain, comme leurs successeurs chrétiens et musulmans, adoptèrent tous le modèle de Ptolémée qui domina pendant plus d'un millénaire. Ils se consacrèrent, pour la plupart, à affiner les mesures des mouvements planétaires dans l'espoir de mieux estimer les divers paramètres du modèle afin d'en améliorer les prédictions.

Le Soleil au centre À l'aube de la Renaissance européenne, la conviction que la sagesse antique ne pouvait être récusée commença à décliner dans un certain nombre de domaines. Certains astronomes se demandèrent ainsi si les bases du modèle géocentrique de Ptolémée pouvaient être remises en cause. En 1514, le prêtre polonais Nicolas Copernic fit circuler un petit livre arguant que les mouvements des astres observés sur le ciel pourraient être mieux expliqués par un modèle héliocentrique (centré sur le Soleil). Dans cette conception, la Terre n'est qu'une planète parmi d'autres effectuant des trajectoires circulaires autour du Soleil, seule la Lune gravitant autour de la Terre (une théorie qui avait été proposée par plusieurs philosophes de la Grèce antique). L'idée de Copernic commença à gagner du terrain avec la publication posthume de son œuvre maîtresse *Des révolutions des sphères célestes* parue en 1543, mais ses orbites circulaires n'étaient pas sans causer des problèmes lorsqu'il s'agissait de faire des prédictions précises. Ce n'est qu'en 1608, lorsque l'astronome allemand Johannes Kepler présenta un nouveau modèle dans lequel les orbites étaient des ellipses plus ou moins allongées, que le mystère des mouvements planétaires fut finalement résolu. Notre monde fut alors banni de sa position centrale.

« Ce vaste Univers dont nous faisons partie, comme un grain de sable dans un océan cosmique. »

Carl Sagan

1781

William Herschel établit la première carte de la Voie lactée qui montre notre galaxie comme un plan aplati d'étoiles.

1924

Edwin Hubble montre que les nébuleuses à l'allure de spirale sont des galaxies à part entière situées à des millions d'années-lumière de la nôtre.

1929

Hubble démontre que l'Univers est en expansion – c'est le fondement de la théorie du Big Bang.

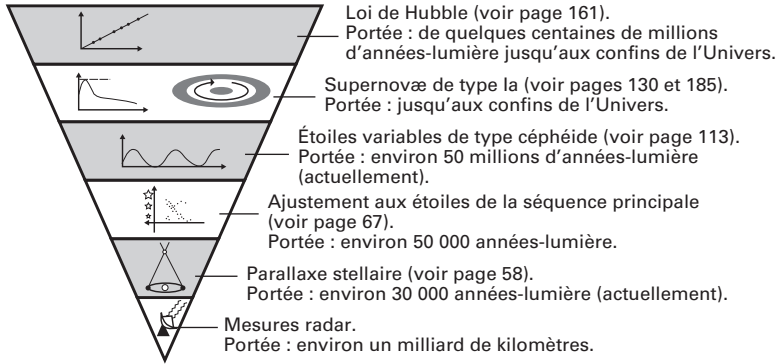
Mouvements planétaires

Sur la voûte céleste, les planètes sont globalement divisées en deux groupes : celles dont l'orbite est plus petite que celle de la Terre (les planètes « inférieures ») et celles dont l'orbite est plus grande (les planètes « supérieures »). Les planètes inférieures – Mercure et Vénus – font des boucles sur la voûte céleste autour de la position du Soleil, sans jamais s'éloigner de lui, et apparaissent donc toujours à l'ouest après le crépuscule, ou à l'est avant l'aube. En revanche, les planètes supérieures – Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune – suivent des trajectoires qui les emmènent tout autour du ciel et peuvent apparaître sur le ciel du côté opposé au Soleil. Mais leur mouve-

ment se complique de boucles rétrogrades, périodes où elles ralentissent et inversent temporairement leur dérive vers l'est par rapport aux étoiles, avant de reprendre leur cours. Le mouvement rétrograde était un défi majeur pour les modèles géocentriques du Système solaire, et pour l'expliquer, Ptolémée introduisit la théorie des épicycles. En revanche, dans un système héliocentrique, le mouvement rétrograde est assez facile à expliquer : les planètes extérieures se déplaçant plus lentement sur leurs orbites que la Terre sur la sienne, notre planète les rattrape puis les dépasse périodiquement, nous donnant l'illusion que ces planètes reculent...

Les astronomes réalisèrent vite que la révolution copernicienne rabaisait plus encore notre place dans l'Univers. La Terre se déplaçant d'un bout à l'autre d'une vaste orbite, l'effet de parallaxe (le déplacement apparent d'objets voisins vus de différents points) ne devrait-il pas affecter la position des étoiles ? Le fait qu'aucun effet de parallaxe ne puisse être détecté, même avec de nouvelles aides à l'observation comme la lunette astronomique (voir page 8), impliquait que les étoiles étaient incroyablement distantes : il ne s'agissait pas de luminaires fixés sur une sphère autour du Système solaire, mais de soleils lointains à part entière. Par ailleurs, les lunettes astronomiques décelèrent d'innombrables étoiles précédemment invisibles et montrèrent que la pâle bande de la Voie lactée était en fait constituée de denses nuages d'étoiles.

L'Univers au sens large À la fin du XVIII^e siècle, les astronomes avaient commencé à cartographier la structure de notre galaxie, le plan aplati d'étoiles (plus tard représenté comme un disque, puis une spirale ; voir page 136) qui était censé contenir toute la création. Au départ, la Terre fut une fois de plus privilégiée en étant placée près du centre de la Galaxie ; ce n'est qu'au XX^e siècle que l'emplacement véritable de notre Système solaire fut confirmé – à près de 26 000 années-lumière du centre, dans une partie assez banale de la Voie lactée. À ce moment-là, des avancées dans notre connaissance des étoiles, y compris les mesures précises de leurs distances (voir page 56), avaient montré



Mesurer les distances des objets célestes proches et éloignés nécessite un vaste éventail de techniques. Tout au long de l'histoire de l'astronomie, établir un nouveau degré sur cette échelle de distance a souvent révélé des indices sur la façon dont les objets du prochain échelon pourraient être trouvés.

que même notre Soleil n'avait rien de spécial. Ce n'est en fait qu'une étoile naine jaune, dont l'éclat, assez faible, est dépassé par celui de beaucoup des quelque 200 milliards d'étoiles de notre galaxie.

Un dernier grand changement dans notre perspective cosmique survint en 1924, lorsque l'astronome américain Edwin Hubble montra que ces « nébuleuses à l'allure de spirale » vues dans diverses régions du ciel étaient en fait des systèmes d'étoiles incroyablement distants. La Voie lactée, dont nous ne sommes qu'une insignifiante partie, n'est elle-même qu'une parmi d'innombrables galaxies (voir page 144) – peut-être aussi nombreuses que les étoiles dans notre galaxie, éparpillées à travers un Univers toujours en expansion (voir page 160). Et ce n'est peut-être même pas la fin de l'histoire : il apparaît de plus en plus clairement que notre Univers lui-même n'est peut-être qu'un parmi une infinité d'autres dans la structure insondable connue sous le nom de multivers (voir page 196).

L'idée clé

Chaque nouvelle découverte
réduit notre place
dans l'Univers

02 Observer les cieux

Lunettes et télescopes ont transformé notre aptitude à comprendre l'Univers. Aujourd'hui, observatoires terrestres et spatiaux peuvent scruter jusqu'aux confins de l'espace et discerner maints détails sur de vastes distances, tandis que d'autres instruments sophistiqués utilisent des rayonnements invisibles pour découvrir des aspects cachés du cosmos.

Avant l'invention des lunettes et télescopes, les principaux outils à la disposition des astronomes étaient les astrolabes, les quadrants et autres dispositifs utilisés pour mesurer la position des objets sur la voûte céleste et les distances angulaires qui les séparent. L'œil nu a placé des limites naturelles à la fois sur la brillance des astres pouvant être perçus et sur la quantité de détails discernables. Mais en 1608, le Néerlandais Hans Lippershey, un fabricant de lunettes, déposa un brevet pour un dispositif ingénieux alliant deux lentilles (un objectif convexe et un oculaire concave) pour obtenir une image agrandie environ trois fois, créant ainsi la première lunette d'approche (ou réfracteur).

Une meilleure vue L'annonce de l'invention hollandaise s'étant rapidement propagée, l'information atteignit Galileo Galilei (dit Galilée) à Venise en juin 1609. En reprenant à son compte le principe de cette invention, Galilée fabriqua diverses lunettes, l'une d'elle offrant un grossissement sans précédent de trente-trois fois. En les braquant vers le ciel, il fit en 1610 plusieurs découvertes importantes, dont les quatre gros satellites de Jupiter, les taches solaires et les phases de Vénus. Il fut alors convaincu de la pertinence du modèle héliocentrique de Copernic et s'attira ainsi les foudres des autorités conservatrices de l'Église catholique.

En 1611, Johannes Kepler expliqua comment, en principe, obtenir un bien meilleur grossissement avec un réfracteur à deux lentilles convexes, un type de lunette qui devint, au milieu du XVII^e siècle, l'instrument le plus répandu,

chronologie

1609

Galilée est l'un des premiers à pointer une lunette d'approche vers le ciel.

1668

Isaac Newton construit le premier télescope réflecteur fonctionnel.

Années 1870

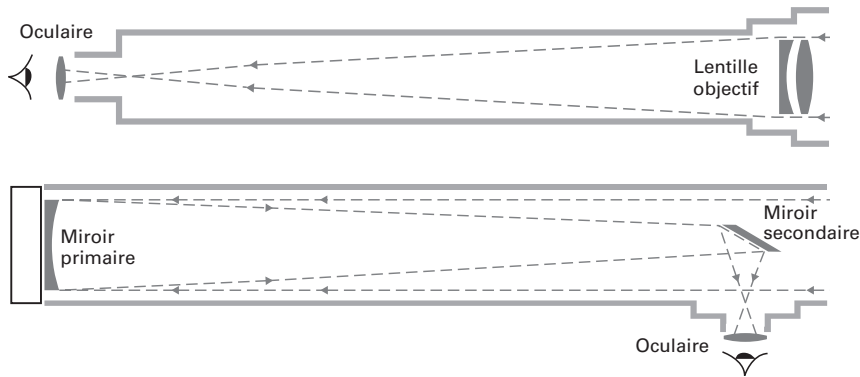
William Huggins commence à utiliser la photographie et la spectroscopie sur lunette et télescope comme outil de recherche.

conduisant à de nombreuses nouvelles découvertes. Le savant hollandais Christiaan Huygens bâtit ainsi des instruments de plus en plus longs avec lesquels il découvrit la lune de Saturne, Titan, et décrivit la véritable morphologie des anneaux de Saturne (que Galilée avait pris pour une étrange déformation).

Cependant, la fin du XVII^e siècle vit émerger un instrument astronomique inédit : le télescope (ou réflecteur). Cet instrument est composé d'un miroir primaire incurvé, qui recueille et focalise la lumière, et d'un plus petit, le miroir secondaire, qui dévie les rayons lumineux vers un oculaire. Le premier télescope de cette conception, réalisé en 1668 par Isaac Newton, a engendré de nombreuses variantes. Les télescopes offrent aux astronomes une meilleure collecte de lumière et une puissance de résolution améliorée. Pour recueillir la faible lueur des étoiles, l'objectif d'un réfracteur ou le miroir primaire d'un réflecteur disposent d'une bien plus grande surface de collection que le petit diamètre d'une pupille humaine ; lunettes et télescopes sont ainsi en mesure de discerner des objets beaucoup plus pâles.

« Notre connaissance des étoiles et de la matière interstellaire doit surtout être basée sur le rayonnement électromagnétique qui nous atteint. »

Lyman Spitzer



Représentation schématique des deux télescopes les plus répandus. Dans une lunette astronomique de type réfracteur (en haut), la lumière collectée par un objectif est déviée vers un foyer où elle forme une image qui est ensuite agrandie par la lentille de l'oculaire. Dans un télescope de type réflecteur newtonien (en bas), un miroir primaire courbé recueille la lumière et la renvoie vers un miroir secondaire qui la défléchit jusqu'à la lentille de l'oculaire.

1957

Bernard Lovell construit à Jodrell Bank, en Angleterre, le premier grand radiotélescope orientable au monde.

1979

Le premier télescope à miroirs multiples est construit au mont Hopkins, en Arizona.

1990

Le télescope spatial Hubble devient le premier grand télescope opérant depuis l'espace dans le domaine visible.

Parallèlement, le grossissement offert par l'oculaire peut permettre de résoudre les détails et de distinguer des objets très proches.

Télescopes modernes Réflecteurs et réfracteurs ont leurs avantages et leurs inconvénients, mais d'une manière générale, les problèmes pratiques de fabrication et de montage de lentilles massives, ainsi que la grande quantité de lumière stellaire qu'elles absorbent, limitent la taille des réfracteurs à environ un mètre. Durant la plus grande partie du xx^e siècle, la taille des réflecteurs plafonnait autour de cinq mètres. Cependant, de nouveaux matériaux (miroirs constitués de segments en nid d'abeilles), et surtout le contrôle informatisé, ont permis à la taille des miroirs d'atteindre dix mètres et plus (voir encadré ci-dessous).

Bien sûr, la plupart des télescopes modernes ne sont pas construits pour l'œil humain, et depuis le milieu du xix^e siècle, la photographie joue un rôle important dans l'astronomie. Elle permet non seulement l'enregistrement d'images pour études ultérieures, mais elle amplifie surtout davantage la capacité d'un télescope à collecter la lumière. À condition que le télescope soit assujéti à une monture lui permettant de pallier les effets de la rotation du globe terrestre, il

Repousser les limites

La dernière génération de grands télescopes astronomiques utilise le contrôle par ordinateur et les matériaux modernes pour créer des surfaces collectrices de lumière plus grandes que jamais auparavant. Les plus grands instruments à un seul miroir sont les monstres jumeaux de 8,4 mètres de diamètre du grand télescope binoculaire (LBT) de l'observatoire international du mont Graham, en Arizona, avec, non loin derrière, les quatre miroirs de 8,2 mètres de diamètre du *Very Large Telescope* (VLT ; très grand télescope) de l'*European Southern Observatory* (ESO ; Observatoire européen austral) au Chili. Les deux instruments utilisent une optique active : le miroir repose sur une série de dispositifs informatisés, les actuateurs, propres à neutraliser les distorsions provoquées par son propre poids. Un autre système, l'optique adaptative, mesure

la distorsion de la lumière que rayonne l'objet cible quand elle traverse l'atmosphère et ajuste en permanence le miroir pour en tenir compte, ce qui entraîne des images dont la netteté peut rivaliser avec celles du télescope spatial Hubble.

Les télescopes à miroirs multiples peuvent s'avérer encore plus grands. Le *Gran Telescopio Canarias* (GTC ; Grand télescope des îles Canaries) sur l'île de La Palma aux Canaries, met en œuvre 36 miroirs emboîtés qui offrent une surface équivalente à un miroir unique de 10,4 mètres de diamètre. Des projets encore plus ambitieux sont prévus, avec la construction en cours, au Chili, de l'*European Extremely Large Telescope* (E-ELT ; ultra-grand télescope européen), dont l'énorme miroir primaire de 39,3 mètres de diamètre est constitué de 798 segments individuels.

peut enregistrer une image à longue exposition qui intègre des heures durant les faibles quantités de lumière que rayonnent les astres distants. La photographie astronomique est désormais dominée par les dispositifs électroniques de type CCD, qui peuvent même suivre le nombre précis de photons frappant un pixel semi-conducteur individuel. La lumière d'un objet éloigné traverse souvent un spectroscopie (un dispositif avec un réseau de diffraction finement gravé qui agit à la manière d'un prisme), qui la décompose en un spectre aux allures d'arc-en-ciel dans lequel on peut mesurer l'intensité de couleurs spécifiques dans le cadre d'une étude spectroscopique (voir page 60).

Rayonnements invisibles La lumière visible qui atteint la surface de la Terre depuis l'espace n'est qu'une petite partie d'un spectre électromagnétique global. Les rayonnements électromagnétiques se composent de paquets d'ondes appelés photons, et nos yeux ont évolué pour s'ajuster à l'une des rares bandes de rayonnement apte à traverser l'atmosphère terrestre. Les autres formes de rayonnement sont l'infrarouge (« rayonnement thermique », avec des longueurs d'ondes légèrement plus longues que celles de la lumière rouge) et la radio (avec des ondes encore plus longues). Les rayonnements infrarouges provenant de l'espace tendent à être submergés par le rayonnement thermique émanant de notre propre atmosphère (voire par celui des instruments utilisés pour les détecter). Ils sont donc généralement observés à l'aide de télescopes spécialement refroidis installés au sommet de montagnes ou à bord d'observatoires spatiaux. Quant aux grandes longueurs d'onde des ondes radio, elles présentent des défis pratiques de détection et sont habituellement recueillies au moyen de grandes structures paraboliques qui agissent de la même manière que les miroirs des télescopes.

Les rayons ultraviolets, à l'inverse, ont des longueurs d'onde plus courtes que la lumière violette et emportent plus d'énergie, tandis que les rayons X et les rayons gamma ont des longueurs d'onde encore plus courtes et emportent encore plus d'énergie. Ces trois types de rayonnement électromagnétique peuvent être nocifs pour les tissus vivants. Heureusement, ils sont pour la plupart bloqués par l'atmosphère terrestre. L'ère de l'astronomie à haute énergie a suivi l'avènement des télescopes spatiaux, et les appareils aptes à collecter et détecter les rayons X et les rayons gamma ne ressemblent guère plus aux schémas familiers des instruments de Galilée et de Newton.

L'idée clé

Les télescopes révèlent les secrets cachés de l'Univers