



PASSEPORT POUR LES
DEUX INFINIS

VERS L'INFINIMENT GRAND

DUNOD

Cet ouvrage a été réalisé en partenariat avec le CNRS, le CEA,
l'université Paris Diderot, l'Observatoire de Paris et le GIS P2i.

Des compléments sont disponibles sur le site www.passeport2i.fr

Composition : Yves Tremblay à partir d'une maquette d'Hélène Kerrec
Maquette de couverture : Raphaël Tardif

© Dunod, Paris, 2010, 2013
ISBN 978-2-10-059972-1

Crédit des illustrations

Vers l'infiniment petit

Couverture : DUNOD, CERN et ESA/HFI & LFI Consortia, p. 4 : Benjamin Couprie, p. 5 : T. Westermayer, CNRS - R. Bichac, P. Royole-Degieux d'après A. Drouart, p. 6 : N. Arnaud, p. 8 a) NASA b) Hugo van Tilborg c) Jean-Michel Alibaud – Fotolia.com d) ESA/NASA/SOHO, p. 9 : d'après CERN (traduction CNRS/IN2P3), p. 10 : ESA/NASA/SOHO, p. 11 : CERN/CMS, p. 12 : J.-B. Perrin, p. 13 : B. Mazoyer, p. 14 : George Grantham Bain Collection, Bortzells Esselte, Nobel Foundation, courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives, Weber and Fermi Film Collections, p. 15 : Napy1kenobi, p. 16-17 : M. Hellstrom/A. Drouart, p. 18 : B. Mazoyer, p. 19 : CERN/ATLAS, p. 20 : CERN, p. 21 : Philippe Rosnet, CERN/Henning Weber, p. 22 : Lawrence Berkeley National Laboratory, p. 23 : d'après N. Arnaud, p. 25 : <http://laradioactivite.com>, Fffred p. 26 : Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo, p. 27 : Los Alamos National Laboratory, pp. 29 et 30 CERN, p. 31 : d'après Fermilab Visual Media Services (traduction CNRS/IN2P3), p. 32 : CERN/CMS, p. 33 : Collaboration ATLAS, p. 34 : d'après University of Glasgow (traduction CNRS/IN2P3), p. 35 : d'après Collaboration ATLAS, p. 36 : Rachid Maraï ; Photo de Fergus of Greenock, p. 37 : d'après A. Dugan ; p. 38 : Rachid Maraï, p. 39 : CNRS/IN2P3 d'après <http://universe-review.ca>, p. 40-41 : CERN, p. 42 : CERN/Illustration P. Mouche, p. 43 à 45 : CERN, p. 46 : CERN/ALICE, p. 47 : P. Rosnet d'après CERN/ALICE & CMS, p. 48 : Collaboration CMS, p. 49 : LAL/B. Mazoyer, p. 50 : Collaboration LHCh, p. 51 : CKMfitter, Collaboration LHCh, p. 52 : CEA Imagin'Irfu, p. 53 : CEA Imagin'Irfu + H. de Kerret, p. 54 : Collaboration ATLAS, p. 55 : CERN, p. 56 : Fermilab Visual Media Services, p. 57 : Nobu Toge/KEK, CERN, p. 58 : CERN, p. 59 : LCG-France (<http://lcg.in2p2.fr>), p. 60 : d'après Steffen Kuntoff, p. 61 : CEA – ITER, p. 62 : CNRS Photothèque/ RAJAU Benoît, p. 63 : Yves Tremblay d'après <http://www.centre-etoile.org/>, p. 64-65 : SOLEIL, p. 66 : d'après <http://sfp.in3p3.fr/affiche> (conception graphique École Estienne).

Vers l'infiniment grand

Couverture : DUNOD, CERN et ESA/HFI & LFI Consortia, p. 7 : RMN/René-Gabriel Ojéda, p. 8 : ESO/H. Heyer, p. 9 : J. Murienne, D. Proust, p. 10 : J. Paul, p. 11 J. Lequeux, p. 12 : H. Raab, p. 13 : Collaboration Auger, H. Alloin, p. 15 : A. Bouquet, p. 16 : Union Astronomique Internationale/M. Kornmesser, p. 18 : J. Paul/J.-L. Robert, p. 19 : Astrophysique sur Mesure/Observatoire de Paris/U.F.E., p. 21 : NASA/ESA/P. Challis et R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), image en rayons X, D. Burrows (PSU) ; contours dans le visible NASA/ESA/P. Challis (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), p. 22 : NASA/ESA/HEIC et the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), p. 23 : image en rayons X NASA/CXC/MIT/ D. Dewey et NASA/CXC/SAO/J. DePasquale ; image dans le visible NASA/STScI, p. 24 : Alain Riazuelo, IAP/UPMC/CNRS, p. 25 : ESO, p. 26 : NASA/ESA/M. Kornmesser (ESA/Hubble), p. 27 : NASA/The Hubble Heritage Team (STScI/AURA), p. 28 : J. Paul/J.-L. Robert, p. 29 : J. Paul, p. 30 : Gemini Observatory/GMOS Team, Canada-France-Hawaii Telescope/J.-C. Cuillandre, p. 31 : NASA/ESA/The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration/A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University), p. 32 : M. Blanton/The Sloan Digital Sky Survey, NASA/N. Benitez (JHU)/T. Broadhurst (The Hebrew University)/H. Ford (JHU)/M. Clampin (STScI)/G. Hartig (STScI)/G. Illingworth (UCO/Lick Observatory)/The ACS Science Team/ESA, p.33 : image en rayons X NASA/CXC/IfA/C. Ma et collaborateurs ; image dans le visible NASA/STScI/IfA/C. Ma et collaborateurs, p.34 : d'après P. Brun, p. 35 : image créée par J. Diemand, M. Kublen and P. Madau du projet Via Lactea, p. 37 : ESA, collaboration Planck, p. 41 : NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration, p. 42 : N. Palanque-Delabrouille, p. 43 : NASA/A. Fruchter et collaborateurs/WFPC2/HST, p. 45 : Kowalski et collaborateurs, *The Astrophysical Journal*, volume 686, 749, 2008, p. 47 : Betsy Devine, p. 49 : NASA/WMAP Science Team, p. 50 : NASA, p. 51 : Collaboration AMS, p. 52 : F. Montanet/CNRS/IN2P3/UJF (Antares), p. 53 : L. Fabre/CEA, Collaboration Antares, p. 54-55 : Pierre Auger Observatory, p. 56 : CNES/D. Ducros, p. 57 : ESO/L. Calçada, Aarhus University/S. Frandsen, p. 58 : LSM/J.-J. Bigot (CEA/IRFU), p. 59 : LSM, p. 60 : J. Paul, p. 61 : NASA/J. Grossmann, p. 62 : ESA, p. 63 : V. Minier/CEA-Novae Factory, p. 64 : J. Paul, p. 65 : Collaboration HESS, p. 66 : J. Paul, p. 67 : ESA, p. 68 : ArianeSpace/ESA/NASA-NASA, p. 69 : L. Godart/CEA, p. 70 : I. Thomas, Station de Radioastronomie de Nançay, p. 71 : image dans le visible Sloan Digital Sky Survey, image dans la bande radio F. de Gasperin pour la collaboration LOFAR, p. 72 : Todd Mason, Mason Productions Inc./LSST Corporation, p. 73 : LSST Corporation, H. Lester/LSST Corporation, p. 74 : ESA 2002. Illustration by Medialab, p. 75 : ESA/LFI & HFI Consortia, p. 76 : collaboration Virgo, p. 77 : J. Paul, p. 78 : ESO, p. 79 : ESO/H. Heyer, p. 80 : J. Paul, p. 81 : ESA/D. Ducros, p. 83 : J. Paul, p. 90 : J. Paul.

Ont participé

Éric Armengaud
Nicolas Arnaud
Éric Aubourg
Annie Baglin
Pierre Binétruy
Alain Bouquet
Pierre Brun
Éric Chassande-Mottin
Gabriel Chardin
Athéna Coustenis
Hervé Dole
David Elbaz
Philippe Ferrando
Jean-François Glicenstein
Yannick Giraud-Héraud
Hubert Halloin
Marc Lachièze-Rey
Pierre-Olivier Lagage
Mathieu Langer
François Lebrun
James Lequeux
Héloïse Méheut
Vincent Minier
Marc Moniez
Nathalie Palanque-Delabrouille
Jacques Paul
Dominique Proust
Jean-Luc Robert
Sylvie Rosier-Lees
François Saint-Jalm
Fabian Schussler
David Smith
Thierry Stolarczyk
Tiina Suomijärvi
Michel Tagger
Élisabeth Vangioni-Flam
Sylvie Vauclair
Jean-Claude Vial

SOMMAIRE

L'astronomie	6
Arpenter l'Univers	8
La lumière	10
Les autres messagers	12
Les forces dans l'Univers	14
Les planètes	16
Les étoiles	18
Les supernovæ	20
L'origine des atomes dans l'Univers	22
Les trous noirs	24
La banlieue des trous noirs	26
Les rayons cosmiques	28
Les galaxies	30
Les amas de galaxies	32
Les âges sombres de l'Univers	34
Le rayonnement de fond cosmologique	36
La nucléosynthèse primordiale	38
L'antimatière dans l'Univers	40
La matière noire	42
L'énergie noire	44
L'inflation	46
Le Big-bang	48
AMS	50
ANTARES	52
L'observatoire Pierre Auger	54
COROT	56
EDELWEISS	58
Fermi	60
Herschel	62
HESS	64
INTEGRAL	66
JWST	68
LOFAR	70
LSST	72
Planck	74
Virgo	76
VLT	78
XMM-Newton	80
Le rayonnement électromagnétique	82
Glossaire	86

VERS L'INFINIMENT GRAND

Où commence l'infiniment grand ? Au-delà de notre environnement quotidien, de ce que l'on peut voir à l'œil nu ou avec une lunette astronomique ? Ainsi, la Terre, toujours plus familière grâce au développement des transports, est-elle devenue « petite ». Ses principales caractéristiques sont maintenant bien connues, tout comme celles de la Lune et du Soleil, notre proche banlieue observée depuis l'Antiquité.

L'infiniment grand s'ouvre au niveau des étoiles, si éloignées qu'elles ne sont que de simples points lumineux dans le ciel, apparemment fixes et sans détails visibles. Au-delà, l'observation de l'Univers donne le vertige. Ainsi notre galaxie, la Voie Lactée, est si vaste que la lumière met cent mille ans pour la parcourir à la vitesse indépassable de trois cent mille kilomètres par seconde !

Plus on regarde loin, plus on regarde dans le passé, ce qui permet de découvrir le phénomène fondamental qu'est l'expansion de l'Univers : les galaxies s'éloignent les unes des autres, et ce d'autant plus vite qu'elles sont distantes. En remontant le temps, l'image d'un Univers plus dense, plus chaud et plus petit s'impose. Même si cette période est révolue, on l'observe de manière indirecte en regardant loin dans l'espace, et donc dans le temps. On peut ainsi étudier un rayonnement émis voici 13,8 milliards d'années qui nous renseigne à la fois sur le Big-bang, sur l'histoire de l'Univers jusqu'à nos jours et sur son futur.

Est-ce à dire que tout est terminé, qu'il n'y a plus rien à découvrir ? Certainement pas : à mesure que les moyens d'observation de l'Univers se multiplient et deviennent plus précis, les astronomes observent de nouveaux phénomènes, inexpliqués et inattendus. Ils se rendent également compte que leur connaissance de l'Univers est en fait limitée et que 95 % de son contenu reste mystérieux. Que sont la « matière noire » et l'« énergie noire » aux propriétés déroutantes ?

Vous trouverez toutes ces questions qui concernent l'infiniment grand, et bien d'autres, traitées au fil de ces pages. Pour aller plus loin et répondre à certaines de ces interrogations, les scientifiques devront sans doute établir des passerelles avec l'infiniment petit, le monde des particules élémentaires et des forces fondamentales, ce que vous pourrez également faire en retournant ce livre.

Bon voyage à la découverte de l'infiniment grand !

Jean-Loup PUGET, membre de l'Académie des sciences

L'ASTRONOMIE

À la différence de la plupart des disciplines de la physique, fondées sur la réalisation et l'analyse d'expériences, l'astronomie est une science de collecte qui étudie les messagers que l'Univers nous adresse.

Tributaires de la lumière, les astronomes n'eurent jusqu'au milieu du XX^e siècle qu'une vision du ciel limitée au seul domaine du visible, celui des rayonnements propres à impressionner la rétine de l'œil. Étaient du coup exclus de leur champ d'investigation tous les astres qui émettent très peu, voire pas du tout, dans le visible, mais qui brillent d'un vif éclat dans d'autres registres.

Il faudra attendre la fin des années 1940 pour que les astronomes s'approprient les ondes radio en utilisant les techniques radars développées durant le dernier conflit mondial. Mais l'exploration du ciel dans toute la diversité de ses rayonnements n'a vraiment débuté qu'à la fin du siècle dernier. La rivalité qui faisait rage entre les États-Unis et la défunte Union Soviétique jusqu'à la chute du mur de Berlin a en effet suscité un développement fulgurant des techniques spatiales. Les astronomes en ont profité pour placer loin de la Terre des équipements aptes à collecter les nombreux messagers que l'atmosphère bloque ou altère. Enfin, le tournant du XXI^e siècle a vu les physiciens de l'infiniment petit venir épauler la recherche astronomique en pourchassant particules cosmiques et ondes gravitationnelles.

L'astronomie vit ainsi une révolution majeure, bien plus considérable que celle qu'amorça Galilée quand il décida de braquer une longue-vue vers la voûte céleste. Reconnue à juste titre comme la plus vieille des sciences, l'astronomie est aujourd'hui une discipline furieusement moderne : au cours de ces vingt dernières années, les astronomes ont plus appris sur la nature intime de l'Univers qu'en cinq millénaires. Ce ciel, que leurs lointains ancêtres désespéraient de déchiffrer, perchés sur leur tour de Babel faite d'argile et de briques, les astronomes du XXI^e siècle peuvent enfin en trouver certaines clefs, avec en prime, tous les ingrédients pour bâtir la meilleure théorie du ciel.

Mais que les derniers résultats sont déroutants ! Heureusement que la physique a forgé les esprits des observateurs pour qu'ils donnent un sens à tous les signes qu'ils reçoivent. Les astronomes qui postulaient voici moins d'un siècle que toute la matière de l'Univers était à leur image, faite d'atomes – une vision que confirmaient les étoiles – savent désormais que l'homme n'est plus au centre de rien, ni spatialement, ni même matériellement. Le siècle de l'atome s'est terminé en proclamant l'insignifiance cosmique de la matière atomique.

Et puis, en s'infiltrant toujours plus avant dans l'espace et le temps, les astronomes sont désormais confrontés à la jeunesse chaude de l'Univers, si chaude que les particules possèdent des énergies comparables à celles qu'engendrent les meilleurs accélérateurs de particules. Et c'est ainsi que les physiciens de l'infiniment petit, en s'efforçant de reproduire à la croisée de leurs faisceaux de particules les conditions qui prévalaient aux premiers âges de l'Univers, retrouvent ceux de l'infiniment grand dans une quête désormais commune, celle des origines du tout.



L'astronome

Tableau peint par Johannes Vermeer en 1668, à l'époque de la première révolution astronomique.

ARPENDER L'UNIVERS

Jauger l'Univers, s'en faire une représentation spatiale, est la clé de l'histoire cosmique, même si nos sens ne nous donnent pas accès à la troisième dimension : la distance. Mais il faut connaître la distance d'un astre pour évaluer ses dimensions, son éclat réel, sa dynamique et son évolution.

La voûte céleste

Portion du ciel observée depuis le site du VLT au Chili, ou comment des étoiles situées à des distances très différentes constituent néanmoins la voûte céleste.

Mesurer l'éloignement de la Lune et du Soleil a été l'un des objectifs essentiels de l'astronomie. En 1751, Lalande et Lacaille mesurent la distance de la Lune par la méthode de la parallaxe. La distance Terre-Lune (384 401 km) est aujourd'hui connue avec une précision de quelques millimètres grâce aux tirs laser effectués depuis la Terre sur des réflecteurs déposés à la surface de notre satellite. L'unité astronomique (UA), qui correspond approximativement à la distance moyenne Terre-Soleil, est mesurée aujourd'hui avec une précision de quelques dizaines de kilomètres. Les mesures des distances planétaires, menées d'abord par la méthode de la parallaxe, utilisent des techniques d'échos radar, analogues aux tirs par faisceaux laser vers la Lune. La précision atteinte est de l'ordre de quelques kilomètres.

Les étoiles les plus proches se situent à des distances incomparablement plus grandes que les confins du Système solaire. La méthode de la parallaxe utilisant comme base l'orbite de la Terre et mise en œuvre au moyen du satellite européen Hipparcos, a permis d'obtenir les distances de plus de deux millions d'étoiles. La plus proche, Proxima du Centaure, a une parallaxe de 0,765 seconde d'arc, soit une distance de trente huit mille milliards de kilomètres. Plutôt que les unités classiques de distance, les astronomes préfèrent l'année-lumière ou le parsec (pc). Avec cette échelle, Proxima du Centaure se situe à 1,3 pc.

Au-delà de quelques centaines de parsecs, la méthode de la parallaxe n'est plus assez précise et les astronomes ont recours à d'autres techniques. La plus utilisée est la méthode dite de la chandelle standard. Elle tient au fait que l'éclat d'un objet lumineux est inversement

