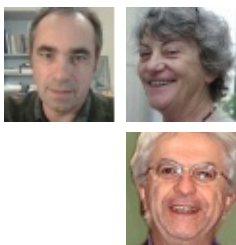


LES AUTEURS



Éric MICHEL est astronome au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris, et responsable du programme de sismologie stellaire du projet CoRoT.

Annie BAGLIN est directrice de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique principal du projet CoRoT.

Michel AUVERGNE est directeur de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique de l'instrumentation du projet CoRoT.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Deheuvels *et al.*, Constraints on the structure of the core of subgiants via mixed modes : the case of HD49385, *Astronomy & Astrophysics*, à paraître.

T. Bedding *et al.*, Gravity modes as a way to distinguish between hydrogen- and helium-burning red giant stars, *Nature*, vol. 471, pp. 608-611, 2011.

B. Mosser *et al.*, The universal red-giant oscillation pattern, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 525, L9, 2011.

P. Degroote *et al.*, Deviations from a uniform period spacing of gravity modes in a massive star, *Nature*, vol. 464, pp. 259-261, 2010.

R. Samadi *et al.*, The CoRoT target HD 49933. II. Comparison of theoretical mode amplitudes with observations, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 509, L16, 2010.

R. A. Garcia *et al.*, CoRoT reveals a magnetic activity cycle in a Sun-like star, *Science*, vol. 329, p. 1032, 2010.

A. Miglio *et al.*, Probing populations of red giants in the galactic disk with CoRoT, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 503, L21, 2009.

amplitude résulte du bilan énergétique entre l'amortissement et l'excitation par la pression de convection.

Les premières mesures effectuées sur les étoiles HD49933, HD181420 et HD181906, plus chaudes que le Soleil (6300 à 6800 kelvins en surface), ont confirmé que l'amplitude des modes augmente avec la température. Elle est environ 1,5 fois supérieure à celle observée pour le Soleil, soit 25 pour cent de moins que ne le prévoyaient les modèles.

Cette différence peut être en partie expliquée par la teneur en éléments plus lourds que l'hélium (la « métallicité ») de ces étoiles. Par ailleurs, la largeur des modes – inversement proportionnelle à leur durée de vie – est trois fois plus grande que celle estimée, écart qui reste à expliquer. Ces résultats nous renseignent sur la distribution des vitesses caractéristiques de la convection et apportent des tests pour les modélisations numériques en trois dimensions.

L'activité magnétique dévoilée par sismologie

Ce travail est actuellement étendu aux étoiles géantes rouges. Les modélisations les plus avancées sous-estiment l'amplitude des modes observés d'un facteur trois, comme le montrent les travaux de Reza Samadi, de l'Observatoire de Paris, et ses collègues. C'est le signe que les échanges d'énergie entre les oscillations et les couches superficielles de l'étoile doivent encore être précisés.

Les petites cellules brillantes séparées par des parois plus sombres qui tapissent la surface du Soleil, ou granules, sont une autre manifestation de la convection. Les dimensions et la durée de vie des granules sont liées à des grandeurs caractéristiques du processus convectif. Les données de CoRoT nous ont permis, avec nos collègues, de mesurer pour la première fois le spectre de la granulation dans différentes étoiles. Pour les étoiles de classe F, plus chaudes que le Soleil, les granules se révèlent être trois fois plus grands que ceux du Soleil, et leur durée de vie 30 pour cent plus élevée. Les simulations, qui reproduisent bien ces phénomènes dans le cas du Soleil, échouent pour l'instant à reproduire la granulation de ces étoiles.

L'astérosismologie apporte également un regard neuf sur l'activité magnétique des étoiles. Le champ magnétique est un ingrédient encore très mal connu de la physique stellaire. Depuis quelques années, une nouvelle génération de spectromètres (ou spectropolarimètres) permet d'établir des cartographies de plus en plus précises du champ magnétique à la surface des étoiles. Les données de CoRoT ont pour leur part mis en évidence pour la première fois en 2010 les variations de fréquence et d'amplitude des oscillations induites par un cycle d'activité magnétique dans une autre étoile de type solaire, HD49933.

Raphael Garcia, du Service d'astrophysique du CEA, à Saclay, et ses collègues ont constaté en particulier que l'amplitude des modes décroît lorsque leur fréquence augmente, de la même façon que pour le Soleil au cours de son cycle magnétique. Ces variations résulteraient de l'évolution de l'activité magnétique de l'étoile, qui modifie sa structure. Le cycle magnétique de cette étoile 20 pour cent plus massive que le Soleil serait ainsi de 120 jours, contre 11 ans pour le Soleil. La rotation, huit fois plus rapide que celle du Soleil, pourrait être à l'origine de cette différence.

Alors que la mission CoRoT a été prolongée jusqu'en 2013, l'échantillon d'étoiles observé couvre une large gamme de masses et de stades évolutifs, des étoiles comparables au Soleil jusqu'à d'autres 40 fois plus massives, et des étoiles de moins de un million d'années à plus de dix milliards d'années, comme certaines géantes rouges. Les données livrées par *Kepler* depuis 2009 sont en train d'élargir cet échantillon de façon spectaculaire et donneront accès à des durées d'observation de plusieurs années, hors de portée de CoRoT.

D'autres projets sont en préparation, tel BRITTE, une flottille de nanosatellites dédiée à la photométrie des étoiles les plus brillantes (le lancement des deux premiers est prévu en 2012), ou PLATO, en cours d'évaluation par l'Agence spatiale européenne, qui propose d'étudier les systèmes stellaires dans leur ensemble, en réalisant l'étude sismique des étoiles autour desquelles il aura détecté des planètes.

La moisson de résultats récents confirme d'ores et déjà que l'astérosismologie apporte bien le regard nouveau sur la physique stellaire que les astrophysiciens attendaient. Gageons que les années à venir seront tout aussi riches en découvertes, sinon plus!



ÉDITIONS JACQUES GABAY

151 bis, rue Saint-Jacques - 75005 Paris (France)
Tél. : +33 (0)1 43 54 64 64 - Fax : +33 (0)1 43 54 87 00
E-mail : infos@gabay.com

www.gabay.com

TARIF 2012

ACADÉMIE FRANÇAISE
GRAND PRIX DU RAYONNEMENT
DE LA LANGUE FRANÇAISE
JACQUES GABAY
MÉDAILLE DE VERMEIL



Louis BACHELIER
1870-1946



Émile BOREL
1871-1956



Élie CARTAN
1869-1951

Préfixe ISBN
978-2-87647

- 073-6 ABEL : Œuvres complètes
+ BJERKNES : Abel. Sa vie et son action scientifique
(2 titres en 2 vol.) 167 €
- 064-4 d'ALEMBERT : Traité de Dynamique 39 €
- 336-2 N d'ALEMBERT : Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides. 82 €
- 068-2 AMPÈRE : Théorie mathématique des phénomènes
électro-dynamiques. 35 €
- 326-3 AMPÈRE : Considérations sur la théorie mathématique du jeu. 25 €
- 310-2 N ANDRADE : Leçons de Mécanique physique. 72 €
- 010-1 o APPELL : Traité de Mécanique rationnelle (6 vol. en 3) 197 €
- 089-7 ARTIN : Algèbre géométrique 35 €
- 129-0 BACHELIER : Théorie de la spéculation
+ Théorie mathématique du jeu (2 titres en 1 vol.) 27 €
- 090-3 BACHELIER : Calcul des probabilités 74 €
- 147-4 BACHELIER : Le jeu, la chance et le hasard 34 €
- 124-5 BAIRE : Leçons sur les fonctions discontinues 17 €
- 099-6 BAIRE : Théorie des nombres irrationnels,
des limites et de la continuité 13 €
- 228-0 BALL : Histoire des mathématiques (2 vol.) 116 €
- 140-5 o BALL : Récréations mathématiques (3 vol. en 1) 93 €
- 148-1 o BANACH : Théorie des opérations linéaires 30 €
- 067-5 BARBARIN : La géométrie non euclidienne 28 €
- 040-8 BAUER : Théorie des groupes et ses applications
à la physique quantique 28 €
- 279-2 BECKER : Théorie des électrons 69 €
- 331-7 N BERNOULLI Jacques : L'Art de conjecturer, Partie I
contient
HUYGENS : Traité de la manière de raisonner
dans les jeux de hasard 40 €
- 128-3 BERTRAND : Calcul des probabilités 60 €
- 290-7 BERTRAND : Traité de calcul différentiel et de calcul intégral
(2 vol.) 195 €
- 153-5 BOHR : La théorie atomique et la description
des phénomènes 21 €
- 044-6 o BOLL : La chance et les jeux de hasard 37 €
- 004-0 BOLTZMANN : Leçons sur la théorie des gaz (2 vol. en 1) ... 49 €
- 086-6 BOREL : Leçons sur la théorie des fonctions 54 €
- 009-5 BOREL : Leçons sur les séries divergentes 32 €
- 340-9 BOREL : Valeur pratique et philosophie des probabilités 39 €
- 337-9 BOREL - CHÉRON : Théorie mathématique du bridge 69 €
- 339-3 BOREL - VILLE : Applications de la théorie des probabilités
aux jeux de hasard. 33 €
- 149-8 o BOREVITCH - CHAFAREVITCH : Théorie des nombres 50 €
- 230-3 BORN : La Théorie de la Relativité d'Einstein
et ses bases physiques 60 €

N = Nouveauté

- 084-2 o BOUTROUX : L'idéal scientifique des mathématiciens 34 €
- 317-1 N BOUTROUX : Les principes de l'analyse mathématique
(2 vol.) 164 €
- 150-4 o BRAHY : Exercices méthodiques de calcul différentiel
et intégral (2 vol. en 1) 58 €
- 003-3 BRILLOUIN : Les tenseurs en mécanique et en élasticité 37 €
- 036-1 BRILLOUIN : La science et la théorie de l'information 38 €
- 229-7 de BROGLIE : Éléments de théorie des quanta
et de mécanique ondulatoire 54 €
- 041-5 de BROGLIE : Ondes et mouvements 24 €
- 062-0 CANTOR : Sur les fondements de la théorie des ensembles
transfinis 24 €
- 284-6 CARNOT Lazare : Réflexions sur la métaphysique
du calcul infinitésimal 45 €
- 069-9 CARNOT Sadi : Réflexions sur la puissance motrice du feu .. 25 €
- 008-8 CARTAN : Leçons sur la géométrie des espaces de Riemann .. 60 €
- 015-6 o CARTAN : Leçons sur la géométrie projective complexe
+ La théorie des groupes finis et continus
et la géométrie différentielle
+ Leçons sur la théorie des espaces à connexion projective
(3 titres en 1 vol.) 69 €
- 289-1 CATALAN : Traité élémentaire des séries 36 €
- 319-5 N CATALAN : Mélanges mathématiques (3 vol.) 180 €
- 053-8 CAUCHY : Analyse algébrique 68 €
- 057-6 CHASLES : Aperçu historique des méthodes en géométrie ... 68 €
- 058-3 CHASLES : La dualité et l'homographie 42 €
- 257-0 CHASLES : Traité de Géométrie supérieure 96 €
- 282-2 CHASLES : Traité des sections coniques 78 €
- 258-7 CHASLES : Les trois livres de Porismes d'Euclide 63 €
- 259-4 CHASLES : Rapport sur les Progrès de la Géométrie 69 €
- 260-0 CHAZY : La Théorie de la Relativité et la Mécanique céleste
(2 vol.) 99 €
- 273-0 CLAIRAUT : Éléments de géométrie 54 €
- 283-9 CLAPEYRON : Mémoire sur la puissance motrice
de la chaleur 18 €
- 079-8 o CLAUDIUS : Théorie mécanique de la chaleur (2 vol. en 1) .. 53 €
- COMMISSAIRE - CAGNAC : Cours de Mathématiques
Spéciales
- 201-3 t. I, Éléments d'algèbre et de géométrie analytique 72 €
- 202-0 t. II, Éléments d'analyse. Applications géométriques 58 €
- 203-7 t. III, Calcul intégral. Courbes et surfaces du second ordre ... 71 €
- 081-1 CORIOLIS : Théorie mathématique des effets du jeu de billard
+ Sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs
des machines
+ Sur les équations du mouvement relatif des systèmes
de corps (3 titres en 1 vol.) 60 €

o = oblong



Jean DIEUDONNÉ
1906-1992



Albert EINSTEIN
1879-1955



Évariste GALOIS
1811-1832

301-0	COSSERAT E. et F. : Théorie des corps déformables	40 €	275-4	EINSTEIN : Lettres à Maurice Solovine	45 €
134-4	COXETER - GREITZER : Redécouvrons la géométrie	35 €	155-9	o EINSTEIN : Sur l'Électrodynamique des corps en mouvement + L'Éther et la Théorie de la Relativité + La Géométrie et l'Expérience + Quatre conférences sur la Théorie de la Relativité + Sur le Problème cosmologique + Théorie relativiste du champ non symétrique + Théorie de la Gravitation généralisée (7 titres en 1 vol.)	34 €
016-3	o DARBOUX : Leçons sur la théorie générale des surfaces + Leçons sur les systèmes orthogonaux et les coordonnées curvilignes + Principes de géométrie analytique (3 titres en 3 vol.)	227 €	151-1	o ENRIQUES : Leçons de géométrie projective	43 €
222-8	DAUMAS : Les instruments scientifiques aux XVII ^e et XVIII ^e siècles	102 €	256-3	EUCLIDE : Les Œuvres d'Euclide, en grec, en latin et en français (F. Peyrard) (3 vol.)	261 €
	DELAMBRE : Histoire de l'Astronomie		291-4	EULER : Introduction à l'Analyse infinitésimale (2 vol.)	144 €
250-1	Histoire de l'Astronomie ancienne (2 vol.)	190 €	335-5	F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Éléments de géométrie	80 €
251-8	Histoire de l'Astronomie du moyen âge	110 €	083-5	o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Exercices de géométrie	89 €
252-5	Histoire de l'Astronomie moderne (2 vol.)	235 €	170-2	o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Géométrie descriptive - Éléments + Exercices (2 vol.)	133 €
253-2	Histoire de l'Astronomie au XVIII ^e siècle	125 €	168-9	o F. G.-M. (Frère Gabriel-Marie) : Trigonométrie - Éléments + Exercices (2 vol. en 1)	90 €
346-1	N DELTHEIL - CAIRE : Géométrie	54 €	280-8	FERMAT : Précis des Œuvres mathématiques et de l'Arithmétique de Diophante	36 €
347-8	N DELTHEIL - CAIRE : Compléments de géométrie	72 €	167-2	o FITZ-PATRICK : Exercices d'arithmétique	65 €
324-9	N DEMARTRES : Cours de géométrie infinitésimale	69 €	046-0	FOURIER : Théorie analytique de la chaleur	75 €
307-2	DENJOY : Mémoire sur la dérivation et son calcul inverse	69 €	056-9	FRÉCHET : Les espaces abstraits	43 €
019-4	DESCARTES : La Géométrie	20 €	304-1	FRÉCHET - Ky FAN : Introduction à la topologie combinatoire	24 €
210-5	DIEUDONNÉ : Panorama des mathématiques pures. Le choix bourbachique	56 €	020-0	GALOIS : Écrits et mémoires mathématiques (Bourgne - Azra)	87 €
	DIEUDONNÉ : Éléments d'analyse		052-1	GALOIS : Œuvres mathématiques (Liouville) + LIE : Influence de Galois (2 titres en 1 vol.)	17 €
211-2	t. I, Fondements de l'analyse moderne	62 €	137-5	GALOIS : Œuvres mathématiques (Picard) + Manuscrits (J. Tannery) (2 titres en 1 vol.)	31 €
212-9	t. II, Éléments d'analyse	65 €	135-1	GAMOW : Trente années qui ébranlèrent la physique	41 €
213-6	t. III, Éléments d'analyse	61 €	035-4	GANTMACHER : Théorie des matrices (2 vol en 1)	82 €
214-3	t. IV, Éléments d'analyse	63 €	054-5	GAUSS : Recherches arithmétiques	64 €
215-0	t. V, Groupes de Lie	46 €	332-4	GAUSS : Méthode des moindres carrés	38 €
216-7	t. VI, Analyse harmonique	45 €	293-8	GAUSS : Recherches générales sur les surfaces courbes + Représentation conforme (2 titres en 1 vol.)	27 €
217-4	t. VII, Équations fonctionnelles linéaires - I : Opérateurs pseudo-différentiels	54 €	327-0	GAUSS : Théorie du mouvement des corps célestes parcourant des sections coniques autour du soleil	72 €
218-1	t. VIII, Équations fonctionnelles linéaires - II : Problèmes aux limites	57 €	206-8	GEORGE : Exercices et problèmes d'intégration	69 €
219-8	t. IX, Topologie algébrique et topologie différentielle élémentaire	61 €	154-2	o GERLL - GIRARD : Les Olympiades internationales de mathématiques	16 €
271-6	DINGELDEY - FABRY : Coniques + Systèmes de coniques	52 €	123-8	GIBBS : Équilibre des systèmes chimiques	46 €
071-2	DIRAC : Les principes de la Mécanique quantique	60 €	146-7	o GODEAUX : Les Géométries	23 €
012-5	DIXMIER : Les algèbres d'opérateurs dans l'espace hilbertien (Algèbres de von Neumann)	54 €	032-3	o GOURSAT : Cours d'Analyse mathématique (3 vol.)	149 €
013-2	DIXMIER : Les C*-algèbres et leurs représentations	57 €	152-8	o GREENHILL : Les fonctions elliptiques et leurs applications	60 €
014-9	DIXMIER : Algèbres enveloppantes	52 €	095-8	o GRIMAUD : Lavoisier, 1743-1794	45 €
158-0	o DU BOIS-REYMOND : Théorie générale des fonctions	23 €	038-5	HADAMARD : Leçons de géométrie élémentaire (2 vol.)	104 €
156-6	DUGAC : Jean Dieudonné, mathématicien complet (Collection "Plus de Lumière")	30 €	292-1	HADAMARD : Leçons sur le calcul des variations	81 €
025-5	DUGAS : Histoire de la Mécanique	87 €	297-6	HADAMARD : Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique + POINCARÉ : L'Invention mathématique (2 titres en 1 vol.)	30 €
254-9	DUHEM : Les Origines de la Statique (2 vol.) (Collection "Plus de Lumière")	135 €	299-0	HADAMARD : Leçons sur la propagation des ondes et les équations de l'hydrodynamique	69 €
200-6	o DUHEM : Traité d'Énergétique ou de Thermodynamique générale (2 vol. en 1)	87 €	300-3	HADAMARD : Le problème de Cauchy et les équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques	84 €
302-7	DU PASQUIER : Léonard Euler et ses amis + CONDORCET : Éloge d'Euler	38 €	126-9	HALMOS : Introduction à la théorie des ensembles	23 €
160-3	o DUPORCQ : Premiers principes de géométrie moderne	19 €	220-4	HALPHEN : Traité des fonctions elliptiques et de leurs applications (3 vol.)	205 €
143-6	DUPUY : La vie d'Évariste Galois	10 €	131-3	HARDY : Divergent Series (en anglais)	58 €
341-6	EDDINGTON : Espace, Temps et Gravitation	69 €			
276-1	EINSTEIN : Sur l'Électrodynamique des corps en mouvement (trad. M. Solovine)	15 €			
249-5	EINSTEIN : La Théorie de la Relativité restreinte et généralisée (trad. J. Rouvière)	33 €			
342-3	EINSTEIN : Les fondements de la Théorie de la Relativité générale + Théorie unitaire de la gravitation et de l'électricité + Sur la structure cosmologique de l'espace (3 titres en 1 vol)	21 €			
277-8	EINSTEIN : Quatre conférences sur la Théorie de la Relativité (trad. M. Solovine)	21 €			



Charles HERMITE
1822-1901



Joseph-Louis LAGRANGE
1736-1813



Pierre-Simon LAPLACE
1749-1827

080-4	HEISENBERG : Les principes physiques de la théorie des quanta	28 €
063-7	HELMHOLTZ : Optique physiologique (2 vol.)	149 €
074-3	HELMHOLTZ : Théorie physiologique de la musique	71 €
343-0	HERMITE : Cours d'Analyse de la Sorbonne	69 €
345-4	HERMITE : Cours d'Analyse de l'École Polytechnique	72 €
338-6	HERMITE - STIELTJES : Correspondance (2 vol.)	150 €
037-8	HILBERT : Sur les problèmes futurs des mathématiques (Les 23 Problèmes)	16 €
043-9	HILBERT : Théorie des corps de nombres algébriques	57 €
127-6	HILBERT : Les fondements de la géométrie	48 €
018-7	JORDAN : Cours d'Analyse de l'École Polytechnique (3 vol.)	135 €
021-7	JORDAN : Traité des substitutions et des équations algébriques	79 €
221-1	JOUFFRET : Traité élémentaire de géométrie à quatre dimensions + Mélanges de géométrie à quatre dimensions (2 titres en 1 vol.)	69 €
248-8	JOUGUET : Lectures de Mécanique (2 vol. en 1)	90 €
145-0	KAMKE : Théorie des ensembles	26 €
005-7	KLEENE : Logique mathématique	60 €
011-8	KLEIN : Le programme d'Erlangen	19 €
262-4	KNESER - ZERMELO - HAHN - LECAT : Calcul des variations	54 €
141-2	KURATOWSKI : Topologie I et II (2 vol. en 1)	90 €
087-3	LADRIÈRE : Les limitations internes des formalismes. Étude sur la signification du théorème de Gödel.	65 €
051-4	LAGRANGE : Mécanique analytique (1 ^{re} éd., 1788)	64 €
	LAGRANGE : Œuvres	
237-2	t. III Mémoires de Berlin (VII à XXII) (2 vol.)	144 €
242-6	t. VIII Traité de la résolution des équations numériques de tous les degrés	72 €
243-3	t. IX Théorie des fonctions analytiques	75 €
244-0	t. X Leçons sur le calcul des fonctions	81 €
245-7	t. XI et XII Mécanique analytique (4 ^e éd.) (J. Bertrand et G. Darboux) (2 vol.)	162 €
246-4	t. XIII Correspondance inédite de Lagrange et d'Alembert	73 €
247-1	t. XIV Correspondance de Lagrange avec Condorcet, Laplace, Euler et divers savants.	72 €
007-1	LALESKO : La géométrie du triangle	30 €
261-7	LAMÉ : Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides	61 €
286-0	LAMÉ : Examen des différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géométrie.	36 €
	LAPLACE : Œuvres	
234-1	t. I à V Traité de Mécanique céleste (5 vol.)	360 €
233-4	t. VI Exposition du Système du Monde	72 €
161-0	t. VII Théorie analytique des probabilités (2 vol.)	120 €
226-6	von LAUE : La Théorie de la Relativité (2 vol.)	113 €
159-7	LA VALLÉE POUSSIN : Intégrales de Lebesgue	21 €
227-3	LA VALLÉE POUSSIN : Cours d'Analyse infinitésimale (2 vol.)	140 €
096-5	LAVOISIER : Traité élémentaire de chimie (2 vol. en 1)	75 €
059-0	LEBESGUE : Leçons sur l'intégration et la recherche des fonctions primitives	49 €
022-4	LEBESGUE : Les coniques	28 €
002-6	LEBESGUE : Leçons sur les constructions géométriques	53 €
077-4	LEBOSSÉ - HÉMERÉ : Géométrie (classe de Mathématiques)	49 €
308-9	LEGENDRE : Théorie des nombres (2 vol.)	150 €
072-9	LEVI-CIVITA : Caractéristiques des systèmes différentiels et propagation des ondes	21 €
091-0	LÉVY : Processus stochastiques et mouvement brownien	43 €
207-5	LÉVY : Théorie de l'addition des variables aléatoires	60 €
231-0	LÉVY : Calcul des probabilités	60 €

039-2	LIAPOUNOFF : Problème général de la stabilité du mouvement	35 €
281-5	LICHNEROWICZ : Éléments de calcul tensoriel	36 €
296-9	LICHNEROWICZ : Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnétisme	60 €
298-3	LICHNEROWICZ : Algèbre et analyse linéaires	60 €
060-6	LINDELÖF : Le calcul des résidus et ses applications à la théorie des fonctions	27 €
130-6	LORENTZ : The Theory of Electrons (en anglais)	31 €
042-2	LUCAS : Théorie des nombres	41 €
125-2	LUSIN : Leçons sur les ensembles analytiques et leurs applications + LEBESGUE : Sur les fonctions représentables analytiquement (2 titres en 1 vol.)	60 €
006-4	MACH : La Mécanique	50 €
138-2	MacLANE - BIRKHOFF : Algèbre + Solutions développées des exercices (5 vol. en 1)	102 €
157-3	MANDEL : Cours de Mécanique des milieux continus (2 vol. en 1)	75 €
045-3	MAXWELL : Traité d'Électricité et de Magnétisme (2 vol.)	150 €
205-1	MAXWELL : La Chaleur	38 €
088-0	MEYERSON : La déduction relativiste	38 €
163-4	MICHEL : Compléments de géométrie moderne + LEMAIRE : Exercices de géométrie moderne + SINGIER : Les correspondances algébriques (3 titres en 1 vol.)	58 €
	MOLK : Encyclopédie des Sciences Mathématiques Pures et Appliquées	
122-1	Collection complète, tomes I à VIII (22 vol.)	768 €
	Volumes séparés - port en sus	
100-9	I-1 Arithmétique	58 €
101-6	I-2 Algèbre	57 €
102-3	I-3 Théorie des nombres	37 €
103-0	I-4 Calcul des probabilités. Théorie des erreurs	67 €
104-7	II-1 Fonctions de variables réelles	30 €
105-4	II-2 Fonctions de variables complexes	21 €
106-1	II-3 Équations différentielles ordinaires	28 €
107-8	II-4 Équations aux dérivées partielles	28 €
108-5	II-5 Développements en séries	37 €
109-2	II-6 Calcul des variations	34 €
110-8	III-1 Fondements de la géométrie. Géométrie générale	31 €
111-5	III-2 Géométrie descriptive. Géométrie élémentaire	24 €
112-2	III-3 Géométrie algébrique plane	35 €
113-9	III-4 Géométrie algébrique dans l'espace	27 €
114-6	IV-1 Mécanique : Généralités. Historique	34 €
115-3	IV-2 Mécanique générale	35 €
116-0	IV-5 Systèmes déformables	31 €
117-7	IV-6 Balistique. Hydraulique	30 €
118-4	V-1 Thermodynamique + V-2 Physique moléculaire + V-3 Principes physiques de l'Électricité + V-4 Principes physiques de l'Optique (4 vol. en 1)	37 €
119-1	VI-1 Géodésie + VI-2 Géophysique (2 vol. en 1)	41 €
120-7	VII-1 Astronomie sphérique	41 €
121-4	VIII Table des matières détaillée + Tribune publique (2 titres en 1 vol.)	41 €
065-1	MONGE : Géométrie descriptive	31 €
287-7	MONGE : Feuilles d'analyse appliquée à la géométrie	45 €
288-4	MONTUCLA : Histoire des mathématiques (4 vol.)	390 €
047-7	von NEUMANN : Les fondements mathématiques de la Mécanique quantique	48 €



Isaac NEWTON
1642-1727



Henri POINCARÉ
1854-1912



Vito VOLTERRA
1860-1940

070-5	NEWTON : Principes mathématiques de la philosophie naturelle (2 vol.)	144 €	082-8	o RÉNYI : Calcul des probabilités	48 €
315-7	NEWTON : Arithmétique universelle (2 vol.)	125 €	076-7	RIEMANN : Œuvres mathématiques	65 €
344-7	N NEWTON : Optique (trad. J.-P. Marat) (2 vol.)	96 €	078-1	RIESZ - SZ.-NAGY : Leçons d'analyse fonctionnelle	65 €
225-9	NIELSEN : Traité élémentaire des nombres de Bernoulli	62 €	133-7	RONCHI : Histoire de la lumière	50 €
144-3	o NOGUÈS : Théorème de Fermat. Son histoire	19 €	136-8	o ROUCHÉ - de COMBEROUSSE : Traité de géométrie (2 vol. en 1)	105 €
164-1	o PAINLEVÉ : Les axiomes de la Mécanique	15 €	048-4	SCHRÖDINGER : Mémoires sur la Mécanique ondulatoire	42 €
085-9	o PAPELIER : Exercices de géométrie moderne (9 vol. en 1)	90 €	031-6	o SERRET : Cours d'Algèbre supérieure (2 vol.)	120 €
305-8	PAPELIER : Éléments de trigonométrie sphérique	36 €	092-7	o SERRET : Traité de Trigonométrie rectiligne et sphérique	35 €
139-9	PARENT : Exercices de théorie des nombres	45 €	208-2	SIERPINSKI : Leçons sur les nombres transfinis	49 €
030-9	PETERSEN : Résolution des problèmes de constructions géométriques	20 €	142-9	SIERPINSKI : 250 problèmes de théorie élémentaire des nombres	43 €
075-0	o PICARD : Traité d'Analyse (3 vol.)	135 €	097-2	o SOURIAU : Calcul linéaire (2 vol. en 1)	42 €
278-5	PLANCK : Électromagnétisme	69 €	318-8	SOURIAU : Géométrie et Relativité	78 €
303-4	PLANCK : Leçons de thermodynamique	60 €	321-8	SOURIAU : Structure des systèmes dynamiques	69 €
093-4	POGGENDORFF : Histoire de la physique	82 €	264-8	STUDY - CARTAN : Nombres complexes	33 €
209-9	POINCARÉ : Leçons de Mécanique céleste (3 vol.)	178 €	306-5	TAIT : Traité élémentaire des quaternions (2 vol.)	120 €
165-8	o POINCARÉ : Théorie mathématique de la lumière (2 vol. en 1)	64 €	316-4	N TANNERY J. : Introduction à la théorie des fonctions d'une variable (2 vol.)	150 €
311-9	POINCARÉ : Leçons sur la théorie de l'élasticité	45 €	034-7	TANNERY P. : La géométrie grecque	27 €
312-6	POINCARÉ : Théorie analytique de la propagation de la chaleur	54 €	033-0	TANNERY P. : Pour l'histoire de la science hellène	63 €
313-3	POINCARÉ : Les oscillations électriques	57 €	182-5	TANNERY P. : Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne	54 €
314-0	POINCARÉ : Cinématique et mécanismes	63 €		TANNERY P. : Mémoires scientifiques	
166-5	o POINCARÉ : Thermodynamique	43 €	183-2	t. I Sciences exactes dans l'antiquité	67 €
028-6	POINCARÉ : Électricité et Optique	86 €	184-9	t. II Sciences exactes dans l'antiquité	78 €
285-3	POINCARÉ : Capillarité	42 €	185-6	t. III Sciences exactes dans l'antiquité	61 €
024-8	POINCARÉ : Théorie du potentiel newtonien	52 €	186-3	t. IV Sciences exactes chez les Byzantins	65 €
001-9	POINCARÉ : Calcul des probabilités	32 €	187-0	t. V Sciences exactes au moyen âge	58 €
023-1	POINCARÉ : La Mécanique nouvelle (Théorie de la Relativité)	25 €	188-7	t. VI Sciences modernes (Siècle de Fermat et Descartes)	87 €
026-2	POINCARÉ : Théorie des tourbillons	37 €	295-2	TARSKI : Introduction à la logique	50 €
027-9	POINCARÉ : Figures d'équilibre d'une masse fluide	37 €	255-6	TCHEBYCHEF : Œuvres (2 vol.)	215 €
098-9	POINCARÉ : Mémoire sur les courbes définies par une équation différentielle + Thèse + Note + BRIOT - BOUQUET : Trois Mémoires (6 titres en 1 vol.)	75 €	162-7	TEIXEIRA : Courbes spéciales remarquables planes et gauches (3 vol.)	181 €
	POINCARÉ : Œuvres		029-3	TISSERAND : Traité de Mécanique céleste (4 vol.)	288 €
171-9	t. I Équations différentielles	80 €	061-3	VALIRON : Cours d'Analyse mathématique. Équations fonctionnelles. Applications	71 €
172-6	t. II Fonctions fuchsienues	93 €	325-6	Van der WAALS : La continuité des états gazeux et liquide	54 €
173-3	t. III Équations différentielles. Théorie des fonctions	90 €	204-4	VERRIEST : Leçons sur la théorie des équations selon Galois + Évariste Galois et la théorie des équations algébriques (2 titres en 1 vol.)	56 €
174-0	t. IV Théorie des fonctions	96 €	224-2	VILLAT : Mécanique des fluides	45 €
175-7	t. V Algèbre. Arithmétique	84 €	320-1	VOLTERRA : Leçons sur les équations intégrales et les équations intégro-différentielles	38 €
176-4	t. VI Géométrie. Analysis situs (Topologie)	75 €	322-5	VOLTERRA : Leçons sur les fonctions de lignes	50 €
177-1	t. VII Masses fluides en rotation. Principes de Mécanique analytique. Problème des trois corps	87 €	066-8	VOLTERRA : Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie	35 €
178-8	t. VIII Mécanique céleste. Astronomie	105 €	323-2	VOLTERRA - PÉRÈS : Leçons sur la composition et les fonctions permutable	42 €
179-5	t. IX Physique mathématique	108 €	263-1	VOSS - E. et F. COSSERAT : Principes de la Mécanique rationnelle	45 €
180-1	t. X Physique mathématique	96 €			
181-8	t. XI Mémoires divers + Le Livre du Centenaire	102 €			
223-5	POISSON : Recherches sur la probabilité des jugements en matière criminelle et en matière civile	64 €			
049-1	POLYA : Comment poser et résoudre un problème	34 €			
294-5	POLYA : Les Mathématiques et le raisonnement "plausible"	60 €			
132-0	PONCELET : Traité des propriétés projectives des figures (2 vol.)	150 €			
169-6	o PRIGOGINE : Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles	20 €			
309-6	REECH : Cours de Mécanique d'après la nature généralement flexible et élastique des corps	60 €			

o = oblong

Envoi dès réception du règlement (chèque ou carte bancaire)

OBSERVATOIRE DE PARIS

FORMATIONS EN ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

Diplômes d'Université en présentiel

<http://duop.obspm.fr/>

Diplôme d'Université ou ECTS. Cours magistraux, conférences, travaux dirigés et observations, assurés par des astronomes de l'Observatoire.

«Explorer et Comprendre l'Univers»
Public et étudiants scientifiques.
Niveau Licence (L1)

Cours magistraux le mardi de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris et stages pratiques : une semaine à l'Observatoire de Meudon et une semaine à l'Observatoire de Haute-Provence. Accès sur le site de la formation aux vidéos des cours filmés.

«Structuration de l'Univers»
Exposés et préparation d'un mémoire.

contact.duop@obspm.fr



Astronomie pour les Enseignants

<http://formation-professeurs.obspm.fr/>

Travaux pratiques, enseignements théoriques pour les enseignants. Observations. Formations aux technologies de l'informatique et de l'Internet pour l'enseignement de l'astrophysique.

contact.formation-professeurs@obspm.fr

Parrainages

<http://parrainages.obspm.fr/>

Professeurs des écoles, collèges et lycées, demandez un «parrain» ou une «marraine» astronome de l'Observatoire pour vous conseiller et participer à votre projet concernant l'astronomie.

contact.parrainages@obspm.fr



Diplômes d'Université à distance

<http://foad.obspm.fr/>

Formations à distance, sur Internet. Diplôme d'Université ou ECTS. Tutorat assuré par des astronomes de l'Observatoire.

«Astronomie et Mécanique Céleste»
Public et étudiants scientifiques.
Niveau Licence (L1)

Du Big Bang aux planètes - Mécanique Céleste, Temps et Calendriers - Phénomènes Soleil, Terre, Lune - Le Soleil - Histoire de l'Astronomie.

contact.amc@obspm.fr

«Fenêtres sur l'Univers»
Public et étudiants scientifiques.

Niveau Licence ou Master (L2, L3, M1) selon les parcours choisis. Mesure de distance et de masse - Instrumentation - Chaîne de mesure et projets.

contact.fsu@obspm.fr

Cours et ressources multimédia En libre accès

<http://ufe.obspm.fr/ressources-multimedia>

Tous niveaux :
élèves, étudiants, professeurs, amateurs, passionnés ...



Ondes gravitationnelles

la bande son de l'Univers

Bernard Schutz et Stefano Vitale

La mission spatiale LISA, prévue pour détecter des ondes gravitationnelles, devrait bientôt jeter un regard neuf sur des phénomènes cosmiques violents, mais jusqu'ici invisibles, tels que la fusion de deux trous noirs ou celle d'autres systèmes binaires.

La fin du muet approche en astronomie. Plusieurs grands instruments, dont la mission spatiale LISA, vont bientôt nous permettre d'écouter les «sons» de l'Univers et d'ouvrir une nouvelle dimension dans l'étude du cosmos. Le concert cosmique auquel nous pouvons nous attendre s'annonce prometteur.

Bien sûr, ces sons cosmiques ne sont pas les sons usuels : l'espace est presque vide et, faute de support, les ondes acoustiques ne peuvent s'y propager. Il s'agit des ondes gravitationnelles, la propagation des vibrations de l'espace-temps lui-même. La théorie de la relativité générale décrit comment les masses déforment l'espace-temps. Ainsi, quand des corps massifs accélèrent, par exemple lorsque deux étoiles tournent l'une autour de l'autre dans un système binaire, des déformations se propagent dans l'espace-temps, un peu comme un navire engendre un train d'ondes dans son sillage. Ces ondes dites gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière.

Comme les ondes mécaniques ou électromagnétiques, les ondes gravitation-

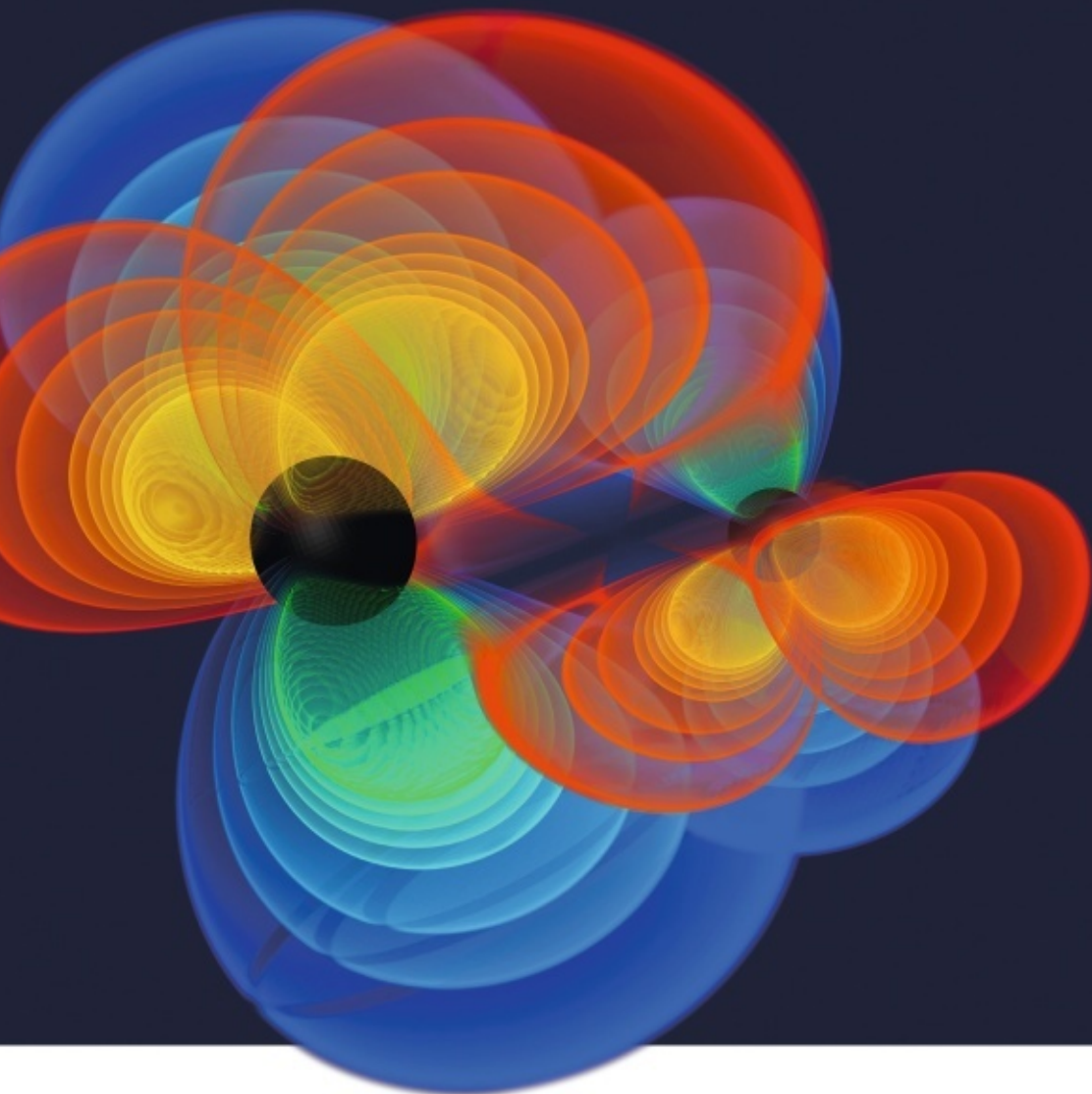
nelles dissipent l'énergie du système qui les produit. Leur existence a ainsi été prouvée indirectement par la mesure du ralentissement de la période de pulsars binaires (des couples d'étoiles à neutrons émettant des faisceaux radio périodiques), qui trahit la perte d'énergie par l'émission d'ondes gravitationnelles, en parfait accord avec les prédictions de la théorie de la relativité.

Notre connaissance de l'Univers provient presque exclusivement de la lumière, autrement dit des ondes électromagnétiques, que nous captons à l'aide d'instruments de plus en plus sensibles dans une vaste gamme de longueurs d'onde, allant des ondes radio aux rayons gamma. Toutefois, de nombreux objets et phénomènes cosmiques, tels les trous noirs supermassifs tapis au centre des galaxies, n'émettent pas de lumière et sont invisibles dans le spectre électromagnétique. Cependant, leurs mouvements provoquent une émission intense d'ondes gravitationnelles, qui traversent toute forme de matière et parviennent jusqu'à nous de partout dans l'Univers. Ainsi, si nous pouvions

écouter les ondes gravitationnelles, le cosmos, qui nous semble aujourd'hui silencieux et inhabité comme un désert, nous apparaîtrait comme une forêt vierge luxuriante remplie de mille cris d'animaux.

Discrète gravité

La gravité est cependant une force difficile à observer. Elle est faible par rapport aux autres interactions fondamentales et, surtout, tous les objets plongés dans un même champ de gravitation subissent la même accélération, comme le mit en évidence Galilée. Ainsi, nous suivons tous avec la Terre la même orbite autour du Soleil, et nous «tombons» tous ensemble dans son champ de gravité. Dans un laboratoire sur Terre, à première vue, on ne peut déceler l'influence de la gravité du Soleil. Mais en y regardant de plus près, on constate que la force exercée par le Soleil est un peu plus forte dans les régions de la Terre les plus proches de l'astre, et plus faible aux points plus éloignés ; et en des points distants sur Terre, elle présente des direc-



L'ESSENTIEL

- ✓ Les ondes gravitationnelles sont des vibrations dans la trame de l'espace-temps, émises par des corps massifs en mouvement, tels les trous noirs supermassifs ou les systèmes binaires compacts.
- ✓ Elles ont jusqu'ici été détectées seulement de façon indirecte.
- ✓ Le projet LISA, un interféromètre large de cinq millions de kilomètres et placé dans l'espace, devrait observer d'ici peu ces « sons de l'Univers » dans une large gamme de fréquences.
- ✓ Leur détection offrirait une vision inédite de l'Univers.

Albert Einstein Institute/Milieu Science

tions légèrement différentes pointant vers le centre du Soleil. En exerçant des forces différentes en des points distants, ces infimes variations de gravité engendrent de petites déformations sur Terre, les marées. Des marées bien plus intenses sont provoquées selon le même mécanisme par la Lune, plus petite mais beaucoup plus proche.

Les forces de marée sont ainsi le seul effet observable de la gravité exercée par les corps célestes dans un dispositif expérimental flottant librement dans l'espace. C'est aussi valable pour les ondes gravitationnelles : leur passage entraîne une modification de la courbure de l'espace-temps, et donc du champ gravitationnel, ce qui engendre des forces de marée accélérant des masses éloignées les unes par rapport aux autres.

Telle est la clef pour construire une « oreille » capable d'entendre les ondes gravitationnelles. Les interféromètres au sol *Virgo* et *LIGO* comportent par exemple deux bras de plusieurs kilomètres, dans lesquels un faisceau laser est envoyé et réfléchi à leur extrémité par un miroir. Ce faisceau permet de mesurer en perma-

nence la longueur des bras, et de détecter une éventuelle variation due au passage d'une onde gravitationnelle.

Le cri des systèmes binaires

Le projet LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) est construit sur le même principe, mais à une échelle plus ambitieuse : la longueur des bras est de cinq millions de kilomètres ! Trois satellites embarquant chacun deux masses d'épreuve, l'une en or et l'autre en platine, tourneront autour du Soleil en formant un triangle équilatéral de cinq millions de kilomètres de côté (voir l'encadré page 87). Un interféromètre à laser mesurera la vitesse relative entre chaque couple de masses situées aux extrémités des bras. Au repos, les masses seront immobiles l'une par rapport à l'autre, et le passage d'une onde gravitationnelle provoquera une variation de distance et de vitesse relative qui seront mesurables. LISA mesurera ainsi des variations de vitesse inférieures à 3×10^{-13} mètre par

seconde, et ce pour des oscillations de période comprise entre dix secondes et trois heures (c'est-à-dire une fréquence allant de 10^{-2} à 10^{-4} hertz).

Développée depuis plus de deux décennies à parts égales par l'Agence spatiale européenne (ESA) et la NASA, la mission LISA devait être opérationnelle vers 2020. Mais son avenir est aujourd'hui incertain : la NASA semble déterminée à se retirer du projet, ce qui forcerait l'ESA à revoir les ambitions de la mission à la baisse. Dans la suite, nous évoquerons cependant les caractéristiques de LISA telles que cette mission a été initialement conçue.

Revenons aux ondes gravitationnelles elles-mêmes. Par quels types d'objets sont-elles émises ? Il existe au centre de nombreuses galaxies, sinon de toutes, des

1. LA FUSION DE DEUX TROUS NOIRS en orbite l'un autour de l'autre n'émet presque aucun signal électromagnétique, mais elle provoque une puissante émission d'ondes gravitationnelles, des déformations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière.

objets invisibles de grande masse, que l'on soupçonne être des trous noirs supermassifs. Les étoiles du centre de la Voie lactée gravitent par exemple autour d'un corps invisible; leurs orbites indiquent que celui-ci a une masse d'un peu plus de quatre millions de fois celle du Soleil.

Lors des collisions de galaxies, les trous noirs supermassifs qu'elles abritent peuvent entrer en orbite l'un autour de l'autre, formant alors un système binaire. C'est une puissante source d'ondes gravitationnelles. Au début, les deux trous noirs gravitent lentement l'un autour de l'autre. Durant cette phase, le système émet déjà un intense flux d'ondes. La perte d'énergie qui en résulte fait tomber progressivement les trous noirs en spirale l'un vers l'autre, chacun tournant de plus en plus vite. La théorie indique que les ondes gravitationnelles émises par un couple de trous noirs ont une période égale à la moitié de la période de révolution du système. Ainsi, à mesure que les deux trous noirs se rapprochent, la période des ondes gravitationnelles diminue et leur fréquence augmente. À la fin, les deux trous noirs fusionnent en libérant une gigantesque bouffée d'ondes gravitationnelles.

La puissance dégagée par la fusion de deux trous noirs supermassifs est telle que LISA devrait détecter ces événements où qu'ils se déroulent dans l'Univers. LISA est conçu pour être sensible aux trous

noirs de masse comprise entre 10 000 et 100 millions de masses solaires; au-delà, la fréquence des ondes émises est trop basse. Mais comme la fréquence des ondes gravitationnelles d'un trou noir binaire augmente au fil du temps, celui-ci va émettre à un moment ou un autre des ondes gravitationnelles dont les fréquences sont détectables par LISA. De ces mesures, les astronomes déduiront la masse et la vitesse de rotation de chacun des trous noirs, et leur période de révolution l'un autour de l'autre.

Le chant du cygne des petits trous noirs

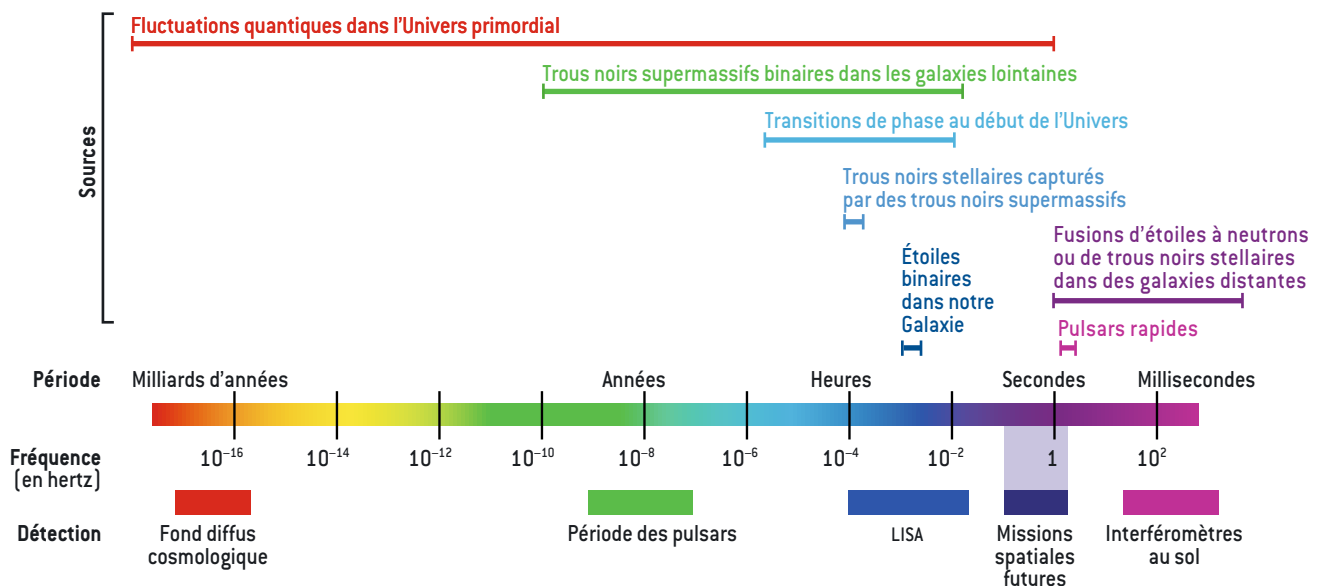
En raison de la vitesse de propagation finie de la lumière et des ondes gravitationnelles, observer des objets lointains revient à remonter dans le temps. Les systèmes binaires que LISA devrait révéler formeront une sorte de « stratigraphie » du cosmos, qui permettra d'en reconstituer en partie l'histoire. Les trous noirs supermassifs et leurs galaxies hôtes se sont-ils formés par la fusion de galaxies plus petites abritant chacune un trou noir plus modeste? Quels sont les progéniteurs des premiers trous noirs, et quand sont-ils apparus? Qu'advient-il des galaxies hôtes lorsque les trous noirs binaires centraux fusionnent?

Le plus souvent, les trous noirs supermassifs ne sont pas en couple. Tapis au cen-

tre des galaxies, ils engloutissent parfois des étoiles qui gravitent à proximité, et sans doute aussi des petits trous noirs de masse comparable à celle du Soleil. Le trou noir supermassif exerce sur les étoiles des forces de marée si intenses qu'elles sont rapidement disloquées. Un petit objet compact tel qu'un trou noir stellaire est moins sujet aux forces de marée, et peut survivre le temps de milliers d'orbites toujours plus serrées, jusqu'à être soudain englouti lorsqu'il traverse l'horizon des événements du trou noir géant (la frontière au-delà de laquelle même la lumière ne peut plus s'échapper).

Durant sa chute, le trou noir stellaire émet un riche « chant du cygne » d'ondes gravitationnelles. On peut déduire de ce signal une carte du champ gravitationnel du trou noir central jusque dans les régions très proches de l'horizon, un peu de la même façon que l'on mesure le champ de gravité de la Terre en suivant la trajectoire de satellites en orbite. L'arrêt brutal du signal gravitationnel montrerait en outre que l'objet supermassif a un horizon des événements, et que c'est donc bien un trou noir.

En effet, la relativité générale n'interdit pas qu'il existe des points où le champ gravitationnel devient infini, mais qui sont dénués d'horizon, les « singularités nues ». L'avis généralement partagé est qu'en pratique, les singularités nues n'existent pas; en d'autres termes, tout effondrement gra-



2. LA FRÉQUENCE DES ONDES GRAVITATIONNELLES dépend de leur source. LISA observera des ondes mettant en jeu des trous noirs supermassifs, et une partie de celles résultant des fluctuations dans l'Univers primordial. Celles-ci devraient par ailleurs laisser leur empreinte dans le

fond diffus cosmologique. Les ondes émises par des événements d'échelle « stellaire », de fréquences plus élevées, seront observées par les interféromètres au sol, tels LIGO et *Virgo*. L'étude de la période des pulsars devrait révéler les ondes dont la période est de l'ordre de l'année.

Une oreille pour écouter les « sons » cosmiques

Dans sa version initiale, la mission LISA comporte trois satellites dont les orbites sont définies avec soin pour qu'ils forment à tout instant un triangle équilatéral de cinq millions de kilomètres de côté. Ce triangle tourne autour du Soleil et sur lui-même en un an, et est incliné de 60 degrés par rapport au plan de l'orbite terrestre.

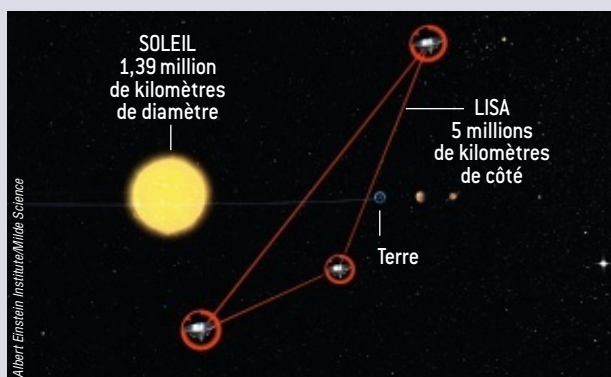
Chaque satellite contient deux masses tests : des cubes d'or et de platine de cinq centimètres de côté. Le principe de la détection des ondes gravitationnelles par LISA est de mesurer la distance entre les masses situées aux sommets du triangle. Le passage d'une onde gravitationnelle exerce une accélération sur chacune

des masses et modifie leur distance et leur vitesse relative.

Pour s'assurer que seule l'onde gravitationnelle influe sur les masses, chacune flotte librement dans son satellite hôte. Leur position est mesurée en continu et des micropropulseurs forcent le satellite à rester centré par rapport à elles.

Pour que LISA atteigne la sensibilité espérée, toute force autre que la gravitation s'exerçant sur les masses doit être 10^{-20} fois plus faible que leur poids sur Terre.

La mesure de la distance entre les masses est fondée sur l'interférométrie laser : un faisceau est envoyé d'une masse à l'autre et réfléchi ; toute variation de distance



LES TROIS SATELLITES DE LA MISSION LISA formeront le plus grand objet du Système solaire.

entraîne par effet Doppler une variation de la fréquence du signal retourné. LISA pourra ainsi mesurer des variations de distance de 10^{-12} mètre, soit une variation relative de 10^{-21} .

vitational ultime d'un objet engendre un trou noir. LISA nous dira si cette hypothèse dite de « censure cosmique » est correcte.

L'observation de la chute de trous noirs stellaires ou d'étoiles compactes sur des trous noirs supermassifs permettra en outre de tirer de nombreux autres enseignements sur la population d'étoiles à proximité du trou noir central ou la dynamique autour du cœur galactique.

Les ondes gravitationnelles ont aussi un rôle à jouer en cosmologie. Les astronomes s'appuient d'habitude sur des étoiles qualifiées de « chandelles standards », dont la luminosité intrinsèque est supposée invariable (des supernovae de type Ia), pour estimer la distance des galaxies dans l'Univers lointain.

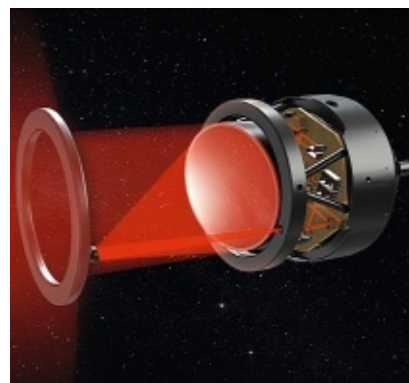
Sirènes standards

Or LISA pourra mesurer la direction des sources d'ondes gravitationnelles les plus intenses avec une précision de 0,05 degré. En outre, à partir de la fréquence de l'onde et de la vitesse de variation de celle-ci, on peut estimer la masse des trous noirs binaires qui constituent la source. En croisant cette information avec l'intensité du signal reçu, on estimera ainsi avec précision la distance de cette source. Les trous noirs supermassifs binaires pourraient ainsi jouer le rôle de « sirènes standards » !

Cette piste est d'un grand intérêt pour la cosmologie. L'une des grandes découvertes de ces 15 dernières années est que l'expansion de l'Univers a accéléré depuis le

début de l'histoire cosmique. On explique aujourd'hui cette accélération par l'existence d'une énergie de nature inconnue qui emplit le cosmos, l'énergie sombre, sujet pour lequel les trois lauréats du prix Nobel de physique 2011 ont été récompensés. C'est aujourd'hui l'un des sujets brûlants de la cosmologie, et plusieurs missions spatiales ont été mises en œuvre pour retracer précisément l'histoire de l'expansion. Son effet le plus visible est la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent de nous en fonction de leur distance. L'observation des ondes gravitationnelles ne permet pas de repérer directement les galaxies hôtes, et donc de mesurer leur vitesse de fuite. Cependant, la précision angulaire de LISA suffira pour limiter à quelques milliers le nombre de galaxies visibles – dont nous connaissons la vitesse de fuite – parmi lesquelles peut se trouver la source du signal gravitationnel. Un traitement statistique devrait permettre d'identifier la bonne. Cette approche offrira une méthode indépendante et d'une précision comparable aux meilleures observations pour mesurer la relation entre la distance et la vitesse de fuite des galaxies.

LISA verra bien d'autres choses, par exemple les ondes gravitationnelles émises par les milliers d'étoiles binaires compactes dans notre Galaxie. De quel type d'astres s'agit-il : naines blanches, étoiles à neutrons ou trous noirs ? Quelle est leur masse ? Échangent-ils de la matière entre eux ? Des dizaines d'objets de ce type ont été observées avec des télescopes classiques ; la détection d'une population 1 000 fois



3. DES TÉLESCOPES focaliseront le faisceau laser (en haut) émis par le satellite placé à l'autre sommet du triangle. Chaque satellite comportera deux télescopes (en bas, dans leur enveloppe) et deux masses d'épreuve (à l'intérieur des parties grises, non visibles).

LISA Pathfinder, la science de l'immobilité

Les masses d'épreuve du détecteur LISA ne doivent subir aucune autre accélération que celle induite par les ondes gravitationnelles. Pour ce faire, il faut éliminer toutes les perturbations autres que gravitationnelles. L'objectif est d'obtenir une « immobilité » telle que si deux des masses aux extrémités d'un bras étaient arrêtées l'une par rapport à l'autre à un moment donné, elles se déplaceraient de moins d'un milliardième de mètre en deux heures.

Des données expérimentales indiquent qu'il est possible d'atteindre

une telle immobilité. Toutefois, en apporter la preuve en laboratoire est impossible en raison de la gravité terrestre. Ce point est si critique que l'ESA a mis sur pied une mission spatiale, LISA Pathfinder, pour le vérifier.

Il s'agit en quelque sorte d'une version réduite de LISA : deux masses d'épreuve seront mises en orbite, non pas à cinq millions de kilomètres l'une de l'autre, mais à moins d'un mètre, à l'intérieur d'un satellite semblable à ceux de LISA (*ci-contre*). Un interféromètre laser mesurera leur vitesse relative.

Des chocs avec les rares molécules de gaz présentes jusqu'aux variations de la gravité dues au satellite lui-même, plusieurs facteurs contribuent à accélérer les masses. Ces perturbations ont été modélisées, et l'un des objectifs de la mission est de vérifier si ces modèles sont corrects et si des perturbations susceptibles de compromettre le succès de la mission principale n'ont pas été négligées.

Quelques composants restent à mettre au point, après quoi LISA Pathfinder sera prêt à être lancé et à tracer la voie à la mission LISA.



LES AUTEURS



Bernard SCHUTZ est directeur de l'Institut Albert Einstein à Potsdam, en Allemagne, et cofondateur du projet LISA.

Stefano VITALE est professeur de physique à l'Université de Trente, en Italie, et rapporteur principal de la mission LISA Pathfinder.

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Hogan, *Les sons de l'espace-temps*, *Pour la Science*, n° 357, juillet 2007.

É. Gourgoulhon, *Des ondes gravitationnelles pour scruter le cosmos*, *Pour la Science*, n° 326, décembre 2004.

Mission LISA Pathfinder sur le site de l'ESA : <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=LISAPATHFINDER>

Site de la mission LISA à la NASA : <http://lisa.nasa.gov/>

plus grande par le biais de la gravitation entraînera sans doute des découvertes inattendues et devrait livrer des informations sur la formation de la Voie lactée.

Ces sources étant très nombreuses, la plupart ne pourront pas être distinguées les unes des autres ; l'ensemble créera un fond diffus d'ondes gravitationnelles, le « murmure » de la Voie lactée. Mais LISA pourrait détecter un autre fond diffus gravitationnel, à l'origine bien plus lointaine.

Le bruit de fond diffus

La découverte et l'étude du fond cosmique de rayonnement micro-ondes ont révolutionné notre compréhension de l'Univers. Il s'agit du fossile de la première lumière, libérée environ 380 000 ans après le Big Bang, lorsque les atomes neutres se sont formés et que le contenu de l'Univers est devenu transparent aux ondes électromagnétiques. C'est une frontière indépassable pour l'observation du cosmos par le biais de la lumière.

En revanche, l'Univers a toujours été transparent aux ondes gravitationnelles. Elles offrent ainsi un moyen de remonter bien plus loin vers le Big Bang. Certains modèles cosmologiques, fondés sur la théorie des cordes (une théorie qui tente d'unifier les interactions fondamentales), prédisent par exemple l'existence d'objets appelés supercordes cosmiques. Les supercordes, créées dans l'Univers primordial et « étirées » par l'expansion cosmique, pourraient émettre un spectre caractéristique d'ondes gravitationnelles de basse fréquence. Plus tôt encore, quelques fractions de seconde après le Big

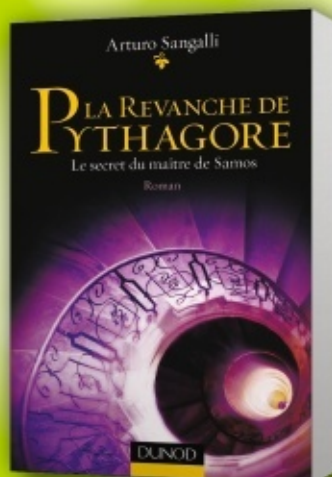
Bang, les fluctuations quantiques ont pu engendrer des ondes gravitationnelles de très basse fréquence.

LISA, dans sa version initiale, pourra observer des ondes de fréquences aussi basses que 10^{-4} hertz. Cela correspond à des ondes émises environ 10^{-18} seconde après le Big Bang, quand l'Univers observable mesurait à peine un millimètre et que sa température était de 10^{15} degrés. Nous ignorons si le bruit de fond gravitationnel primordial est suffisamment intense pour être décelé, mais s'il était mis en évidence, il s'agirait d'une révolution dans la physique des interactions fondamentales.

Enfin, même plus près de nous, la gravité n'est pas silencieuse. Les variations de gravité dues aux oscillations internes du Soleil pourraient être révélées par LISA, et offriraient ainsi un nouvel outil pour explorer l'anatomie de notre étoile. Les astéroïdes passant à proximité du détecteur produiront également des signaux observables.

La mission préliminaire de l'ESA, nommée LISA Pathfinder, démontrera bientôt que les composants fondamentaux de LISA sont opérationnels (*voir l'encadré ci-dessus*). Si le retrait de la NASA devait finalement se confirmer, le projet LISA serait revu à la baisse par l'ESA. Une version réduite, avec des satellites séparés par une distance plus courte et moins de faisceaux laser, a été étudiée. La sensibilité et la résolution seraient inférieures, mais même dans cette configuration, LISA détecterait des milliers de systèmes binaires dans la galaxie et des dizaines de fusions de trous noirs supermassifs. Les astronomes seront alors aux premières loges pour écouter le concert de l'Univers. ■

VARIEZ LES SAVOIRS AVEC DUNOD



A. SANGALLI

9782100565498 • 240 pages • **16,90 €**

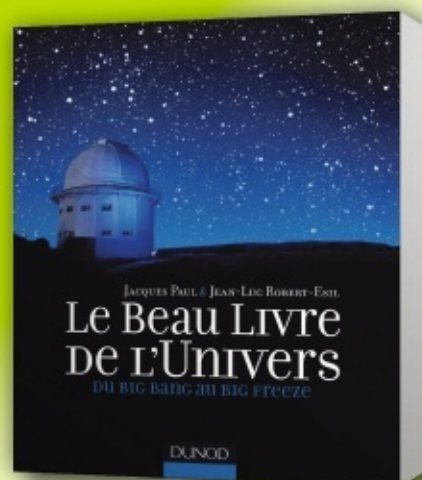
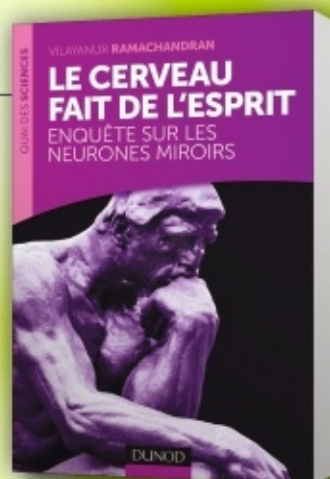
**On affirme que Pythagore n'a laissé aucun écrit.
Et si c'était faux ?**

**Rejoignez les deux héros de ce roman
et partez à la recherche du manuscrit perdu.**

V. RAMACHANDRAN

9782100543939 • 416 pages • **27,50 €**

**Découvrez comment l'un des plus
grands neurobiologistes envisage
ce qui fait le « propre de l'homme ».**



J. PAUL, J.-L. ROBERT-ESIL

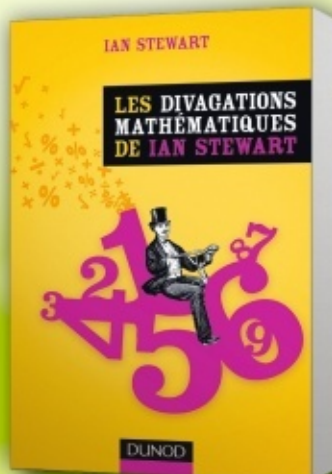
9782100567201 • 420 pages • **25,90 €**

**En 200 étapes magnifiquement
illustrées, déplacez-vous
le long de l'échelle du temps
et admirez les images du ciel
les plus étonnantes.**

DUNOD / LA RECHERCHE

9782100562992 • 176 pages • **16 €**

**Programmer des robots,
modéliser la chevelure humaine...
découvrez 32 situations
où « mathématiques »
rime avec « efficacité ».**



I. STEWART

9782100557967 • 272 pages • **18 €**

**Ian Stewart nous présente,
dans son style inimitable,
20 explorations mathématiques
passionnantes.**

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie