



**La physique  
pour mieux  
comprendre  
le monde**

**Année mondiale de la physique 2005**

# L'Univers



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

## L'Univers

*Il y a 13,7 milliards d'années, l'univers était extrêmement homogène, dense et chaud.*

*Depuis, il est le lieu d'une lente expansion et de la formation progressive des structures cosmiques. Aussi familière que soit devenue cette vision d'un vaste Univers en évolution, n'oublions pas qu'elle est toute récente.*

*Il y a un siècle, elle aurait bien surpris les astronomes. Car que sait-on de l'Univers en 1905 ? Le système solaire contiendrait huit planètes (Pluton ne sera découverte qu'en 1930) ; planètes dont on décrit très précisément le mouvement par les lois de Newton. On sait également que les étoiles sont des soleils, mais nul ne sait avec certitude d'où provient leur énergie.*

*Le Soleil est localisé dans un ensemble d'étoiles qu'on appelle la Voie lactée, mais personne ne peut dire si le Soleil et son cortège de planètes sont au centre ou à la périphérie de cet ensemble. Quant à la question de savoir s'il existe d'autres galaxies au-delà de la Voie Lactée, le doute prédomine chez les astronomes. Bref, malgré d'évidents succès, en ce début de xx<sup>e</sup> siècle, l'astronomie a quantité de questions fondamentales à résoudre.*

*1/ Sur cette image prise par le télescope spatial Hubble, il n'y a que cinq étoiles. Tous les autres objets visibles sont des galaxies qui s'éloignent toutes de nous ;*  
crédit S. Beckwith & the HUDF working group, HST, ESA, NASA.

## L'UNIVERS A UNE HISTOIRE

L'une des questions alors débattues les plus intrigantes est peut-être celle qui concerne l'histoire de l'Univers. L'Univers est-il figé ? A-t-il un passé et un avenir ? Un début de réponse viendra des observations faites par l'astronome américain Edwin Hubble.



## La physique pour mieux comprendre le monde

Entre 1920 et 1930, Hubble pointe le télescope de 2,5 mètres du mont Wilson vers des dizaines de nébuleuses, ces objets célestes à l'aspect diffus dont on ignore encore la nature. Hubble découvre que certaines nébuleuses sont bien des galaxies, ensembles d'étoiles semblables à la Voie Lactée, situées à des distances considérables. Mieux, il remarque que ces galaxies s'éloignent toutes de nous. Cette fuite des galaxies traduit, selon Hubble, l'expansion de l'Univers : année après année, siècle après siècle, l'Univers se dilate et la distance entre deux galaxies éloignées augmente.

Durant la même période, les astronomes belge Georges Lemaître et russe Alexandre Friedmann appliquent les équations de la gravitation d'Einstein au cas simple d'un Univers homogène et isotrope. Ils montrent que cela conduit à un Univers dynamique, en expansion ou en contraction, issu d'une singularité initiale. Leur travail fonda les futurs modèles de Big Bang.

En 1948, le physicien américain George Gamow réalise que si l'Univers a toujours été en expansion, comme le laissent penser les observations de Hubble et les calculs de Lemaître et Friedmann, il a forcément émergé d'une phase pendant laquelle il était très dense et très chaud. Si chaud en fait qu'aucune liaison atomique ne pouvait résister à la fournaise : l'Univers

était rempli d'un « soupe » de particules, protons, neutrons, électrons, neutrinos... Mais comme un gaz qui se détend, l'Univers en expansion se serait peu à peu refroidi jusqu'à atteindre une température de 3 000 kelvins, à laquelle seraient apparus les premiers atomes d'hydrogène neutre. L'Univers, âgé d'environ 370 000 ans, aurait alors soudainement changé de comportement vis-à-vis de la lumière : d'opaque (on ne voit pas à travers les flammes !), il serait devenu transparent (avant cet instant, le rayonnement était perpétuellement diffusé par des particules chargées ; après cet instant, les atomes neutres laissent voyager librement le rayonnement). Gamow prédit donc qu'à un moment de son enfance, l'Univers aurait lâché une bouffée de rayonnement, qui continuerait aujourd'hui de baigner l'Univers. Seule différence, précise Gamow : l'énergie de ce rayonnement est aujourd'hui plus faible qu'à ses débuts, car cette lumière s'est « refroidie » en même temps que l'Univers se dilatait.

La prédiction de Gamow s'avéra correcte : ce rayonnement primitif – le fond diffus cosmologique dans le jargon des astrophysiciens – fut observé pour la première fois par les astronomes américains Arno Penzias et Robert Wilson en 1965. Ils obtinrent le prix Nobel de physique pour cette découverte capitale qui





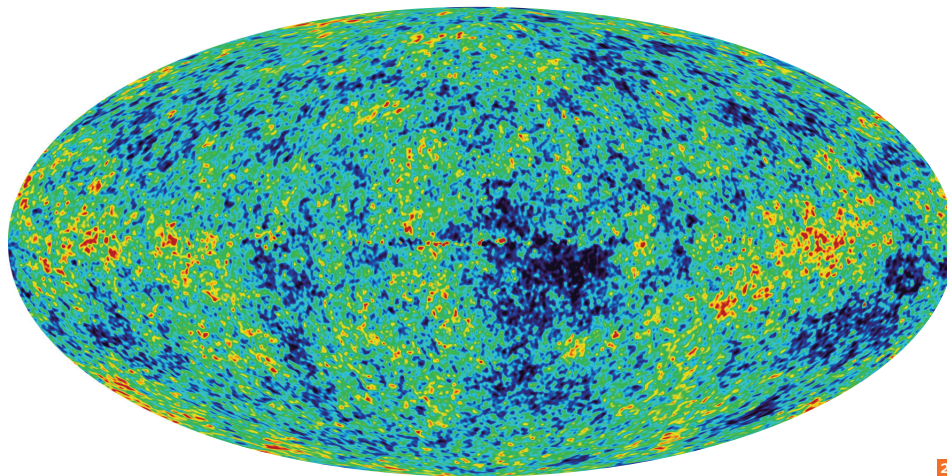
## La physique pour mieux comprendre le monde

renforçait la cohérence des modèles de Big Bang. Le rayonnement est aujourd'hui perceptible dans la gamme des micro-ondes, à une température qui ne vaut plus que 2,73 kelvins. Il nous donne la plus ancienne image de notre Univers (*image 2*).

Expansion de l'Univers, rayonnement diffus cosmologique: deux des plus grandes découvertes de l'astronomie militent en faveur des modèles de Big Bang. Mais ce n'est pas tout. Un autre argument de poids allait renforcer la crédibilité du modèle : les proportions relatives des éléments chimiques.

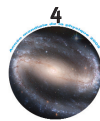
**LA MATIÈRE A UNE HISTOIRE**

Les atomes, pièces élémentaires du mécano de la nature, sont au cœur de la matière. L'immense variété de densités, de propriétés chimiques, de couleurs ou de textures des choses qui nous entourent peut être expliquée avec un petit nombre d'atomes, 92 très exactement. Comme les pièces de mécano, ils sont rangés dans une boîte, construite par le chimiste russe Dmitri Mendeleïev à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, nommée « classification périodique ». Les atomes, formés d'un noyau de protons et de neutrons autour duquel se meuvent des électrons, y sont rangés en fonction



2

2/ Image du fond diffus cosmologique observé en 2002 par le satellite WMAP ; crédit WMAP Science Team & NASA.





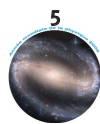
## La physique pour mieux comprendre le monde

croissante du nombre de leurs électrons. La démographie atomique a aussi son importance : dans la nature, tous les atomes ne sont pas présents dans les mêmes proportions. Si les métaux précieux, comme l'or, l'argent ou le platine, sont plutôt rares, les éléments vitaux, comme le carbone, l'azote et l'oxygène sont en revanche très abondants. La répartition terrestre n'est cependant pas représentative de celle qui prévaut dans l'Univers. Ainsi, dans le Soleil, les atomes autres que l'hydrogène et l'hélium ne représentent que 2 % de la masse de l'étoile. De sorte que dans tout l'Univers, l'hydrogène représente 90 % du nombre total des noyaux, l'hélium 9 % et tous les autres éléments réunis représentent moins de 1 % de tous les noyaux.

On pense que les éléments légers (hydrogène, hélium, lithium) se sont formés immédiatement après le Big Bang, il y a environ 13,7 milliards d'années. Il n'y avait alors guère que des photons, des protons, des neutrons, des électrons et des neutrinos. L'expansion de l'Univers refroidit ce gaz très chaud autorisant la combinaison stable de protons et de neutrons : les premiers noyaux atomiques, deutérium et hélium, apparaissent. Mais cette période de nucléosynthèse cesse rapidement car elle s'effectue dans un intervalle de température étroit : à haute

température (supérieure à 10 milliards de degrés) les noyaux formés sont immédiatement détruits, à température plus basse, les réactions nucléaires ne se produisent pas. La construction des noyaux s'est donc arrêtée quelques minutes après le Big Bang, quand l'Univers était devenu trop froid pour l'entretenir. Les abondances relatives des éléments légers prédites par le modèle sont en remarquable accord avec les observations sur plus de dix ordres de grandeurs faites aujourd'hui, même s'il reste des incertitudes (quelle est la quantité de deutérium dans l'Univers ? Combien les étoiles en ont-elles détruit ? Quelle est la vitesse de certaines réactions nucléaires ?).

Si les éléments légers ont été créés juste après le Big Bang, les noyaux plus lourds (c'est-à-dire ayant un plus grand nombre de protons et de neutrons) ont dû attendre que se recréent des conditions favorables et durables. C'est au cœur des étoiles massives que se situe ce creuset. Là, la compression due à la gravité chauffe le gaz à des températures suffisamment élevées pour que les atomes légers fusionnent et engendrent des atomes plus lourds. Ce mécanisme produira les atomes plus légers que le fer. Les atomes plus lourds seront, eux, engendrés dans les étoiles extrêmement massives ou dans des supernovæ, ces étoiles massives en

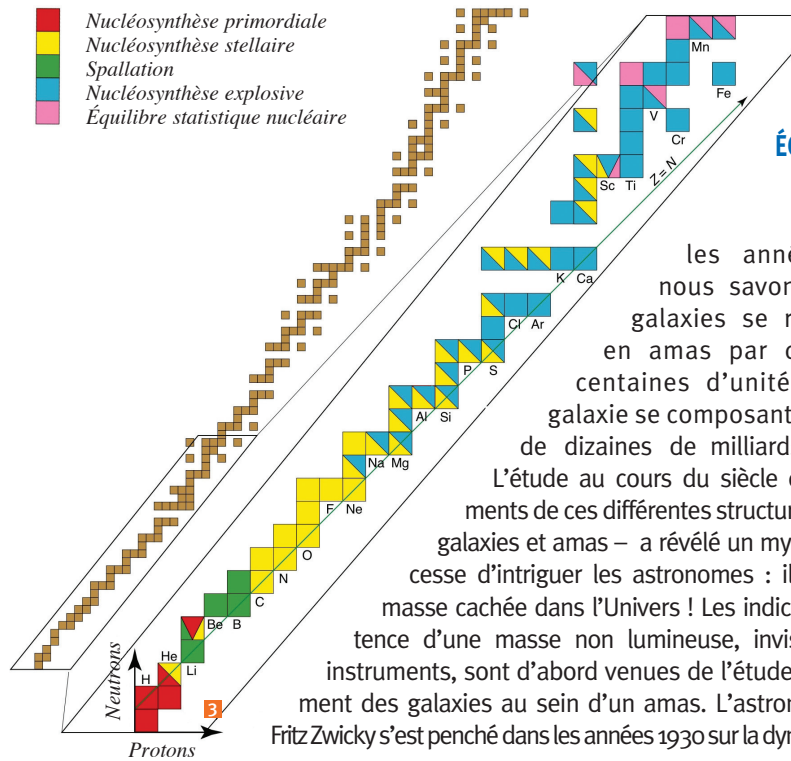


La physique pour mieux comprendre le monde

phase finale d'évolution qui, en explosant violemment, dégagent une énergie colossale (image 3). Et ce sont ces mêmes supernovæ qui ensementeront ensuite l'Univers en éléments lourds : leurs explosions éjectent à grande vitesse leurs produits de nucléosynthèse (image 4). Petit à petit,

elles enrichissent ainsi le milieu inter-stellaire en noyaux nouveaux qui entreront dans la composition des futures étoiles et de leurs éventuelles planètes. Absents au début de l'Univers, ils ne représentent que 1 % des atomes : du point de vue de son évolution nucléaire, notre Univers est encore très jeune.

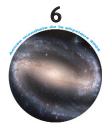
- Nucléosynthèse primordiale
- Nucléosynthèse stellaire
- Spallation
- Nucléosynthèse explosive
- Équilibre statistique nucléaire



L'ATOME, ÉCUME DE LA MATIÈRE

Depuis les années 1920, nous savons que les galaxies se regroupent en amas par dizaines à centaines d'unités, chaque galaxie se composant elle-même de dizaines de milliards d'étoiles. L'étude au cours du siècle des mouvements de ces différentes structures – étoiles, galaxies et amas – a révélé un mystère qui ne cesse d'intriguer les astronomes : il existe une masse cachée dans l'Univers ! Les indices de l'existence d'une masse non lumineuse, invisible à nos instruments, sont d'abord venues de l'étude du mouvement des galaxies au sein d'un amas. L'astronome suisse Fritz Zwicky s'est penché dans les années 1930 sur la dynamique des

3/ Sur ce diagramme on a placé les noyaux stables en fonction de leur nombre de neutrons et de protons. Un code de couleur indique leur origine.



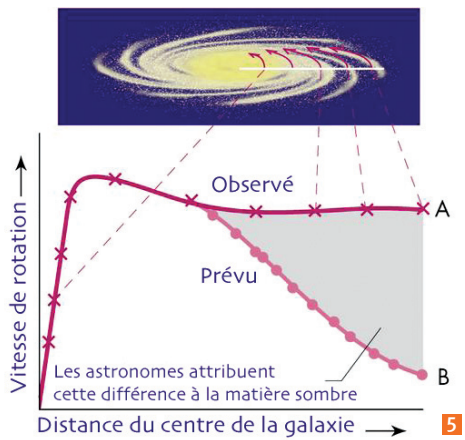
La physique pour mieux comprendre le monde

deux amas les plus proches, celui de Coma et celui de Virgo. Zwicky a montré que l'attraction gravitationnelle exercée par le contenu visible de l'amas ne suffit pas à retenir les galaxies : sans la masse cachée, les amas se désagrègeraient ! Autre preuve : l'étude des galaxies spirales, des galaxies où les étoiles tournent autour d'un centre commun. En mesurant la vitesse de révolution de milliers d'étoiles et de nuages interstellaires autour de leur centre, les astrophysiciens ont pu tracer une courbe représentant la vitesse des étoiles en fonction de leur distance à ce centre. Cette courbe, d'abord croissante, devient remarquablement constante à mesure que l'on s'éloigne du centre. À elle seule,

la matière lumineuse, étoiles et gaz, est incapable de rendre compte de cette observation. Pour expliquer cette courbe, il faut invoquer l'effet gravitationnel d'une masse invisible dix fois supérieure à celle de la galaxie, et considérer que cette masse baigne la galaxie uniformément (image 5). Autrement dit, quatre-vingt-dix pour cent de la masse de l'Univers semble nous être cachée ! Les astrophysiciens ont enfoncé le clou dans les années 1990 grâce aux mirages gravitationnels. De quoi s'agit-il ? Selon la relativité générale, théorie de la gravitation proposée par Albert Einstein, les astres massifs engendrent une déformation de l'espace qui provoque la déviation des rayons lumineux passant dans leur voisinage.



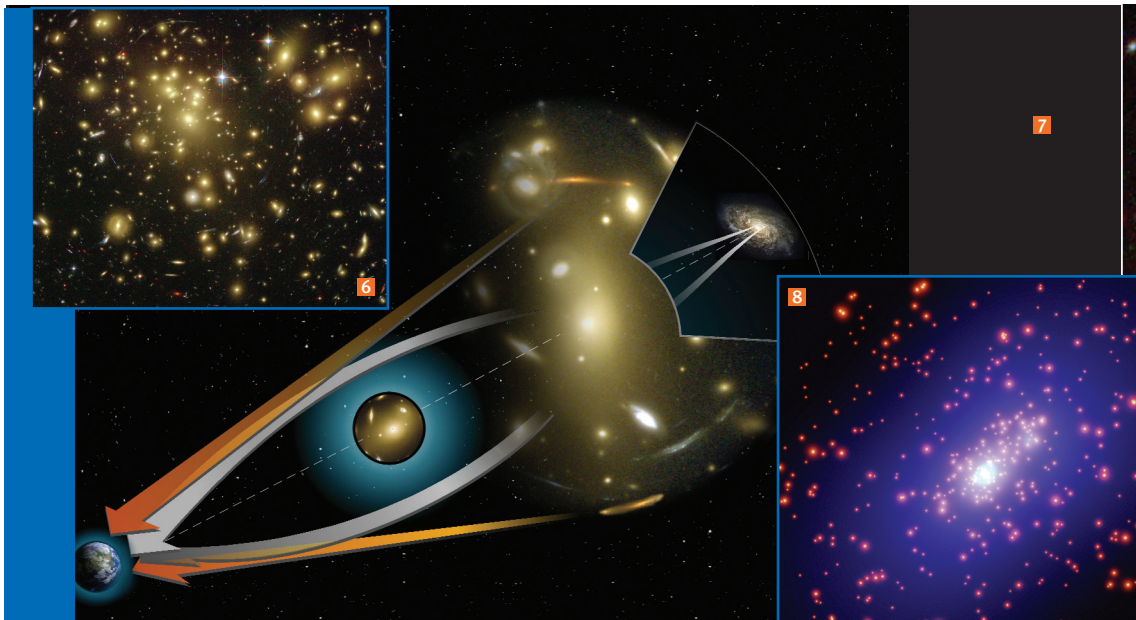
4/ La nébuleuse du Crabe, reste d'une supernova dont l'explosion fut remarquée par les astronomes chinois en 1054 ; crédit FORS team, VLT, ESO.



5/ La courbe de rotation des galaxies suggère qu'elles contiennent une importante quantité de matière obscure.







Ainsi, il arrive que l'image d'une source lumineuse située à l'arrière-plan d'un amas de galaxies soit déformée, voire démultipliée : c'est l'effet de lentille gravitationnelle (images 6 et 7). Pour certaines régions du ciel, on a pu reconstituer la répartition de masse de l'amas déflecteur en étudiant ces mirages. Le résultat a confirmé la présence d'une grande quantité de matière invisible (image 8).

Force est donc d'admettre qu'une partie importante de la masse de l'Univers se compose d'une matière non visible, appelée, faute de mieux, « matière noire ». Les astrophysiciens supputent qu'elle forme les grumeaux où s'ancrent les

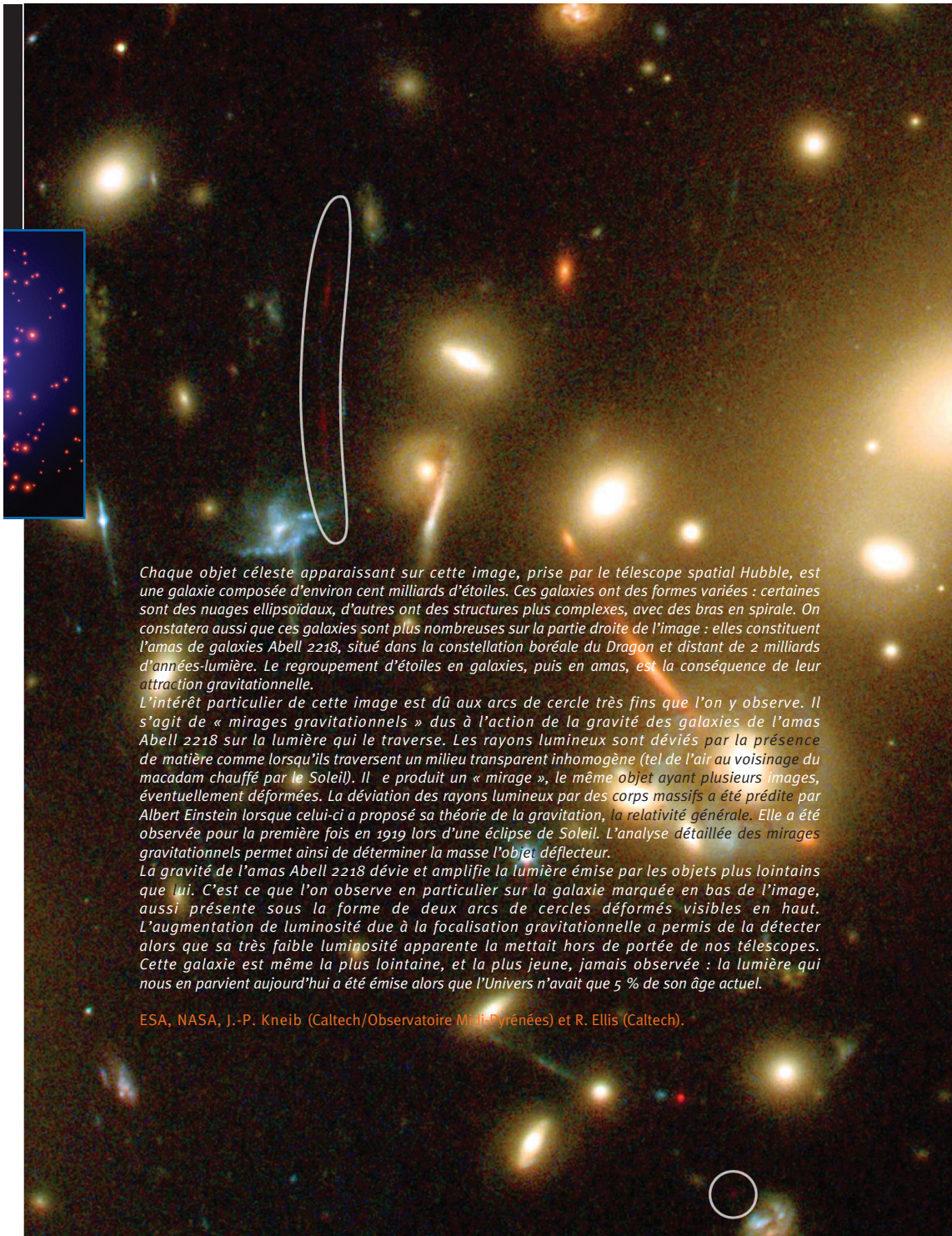
galaxies et les grandes structures du cosmos, mais qu'elle ne saurait se condenser en astres plus compacts. Mais de quoi est constituée cette matière noire ? Pas de matière ordinaire (protons et neutrons), car sinon elle serait sujette aux interactions électromagnétique et nucléaire et aurait déjà fait parler d'elle, par exemple en participant aux réactions de fusions nucléaires à l'origine des premiers éléments chimiques. Or, les quantités d'hélium, de deutérium et de lithium qui ont été produites de cette façon sont connues assez précisément : elles indiquent de façon indubitable qu'il n'y a jamais eu suffisamment de

6/ Effet de mirage gravitationnel dans l'amas Abell 1689 ; crédit ACS Science Team, ESA, NASA.

7/ Un mirage gravitationnel résulte de la déviation de la lumière dans un espace déformé par la présence d'une importante masse ; crédit NASA, ESA, Andrew Fruchter and the ERO team.

8/ Sur cette image d'un amas de galaxies (représentées en orange) on a superposé la distribution de matière noire (en bleu) déduite de mirages gravitationnels ; crédit J.-P. Kneib, observatoire Midi-Pyrénées, ESA, NASA.





Chaque objet céleste apparaissant sur cette image, prise par le télescope spatial Hubble, est une galaxie composée d'environ cent milliards d'étoiles. Ces galaxies ont des formes variées : certaines sont des nuages ellipsoïdaux, d'autres ont des structures plus complexes, avec des bras en spirale. On constatera aussi que ces galaxies sont plus nombreuses sur la partie droite de l'image : elles constituent l'amas de galaxies Abell 2218, situé dans la constellation boréale du Dragon et distant de 2 milliards d'années-lumière. Le regroupement d'étoiles en galaxies, puis en amas, est la conséquence de leur attraction gravitationnelle.

L'intérêt particulier de cette image est dû aux arcs de cercle très fins que l'on y observe. Il s'agit de « mirages gravitationnels » dus à l'action de la gravité des galaxies de l'amas Abell 2218 sur la lumière qui le traverse. Les rayons lumineux sont déviés par la présence de matière comme lorsqu'ils traversent un milieu transparent inhomogène (tel de l'air au voisinage du macadam chauffé par le Soleil). Il en résulte un « mirage », le même objet ayant plusieurs images, éventuellement déformées. La déviation des rayons lumineux par des corps massifs a été prédite par Albert Einstein lorsque celui-ci a proposé sa théorie de la gravitation, la relativité générale. Elle a été observée pour la première fois en 1919 lors d'une éclipse de Soleil. L'analyse détaillée des mirages gravitationnels permet ainsi de déterminer la masse l'objet défecteur.

La gravité de l'amas Abell 2218 dévie et amplifie la lumière émise par les objets plus lointains que lui. C'est ce que l'on observe en particulier sur la galaxie marquée en bas de l'image, aussi présente sous la forme de deux arcs de cercles déformés visibles en haut. L'augmentation de luminosité due à la focalisation gravitationnelle a permis de la détecter alors que sa très faible luminosité apparente la mettait hors de portée de nos télescopes. Cette galaxie est même la plus lointaine, et la plus jeune, jamais observée : la lumière qui nous en parvient aujourd'hui a été émise alors que l'Univers n'avait que 5 % de son âge actuel.

ESA, NASA, J.-P. Kneib (Caltech/Observatoire Midi-Pyrénées) et R. Ellis (Caltech).



## La physique pour mieux comprendre le monde

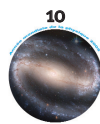
matière ordinaire pour constituer toute la masse de l'Univers.

La matière noire est donc constituée pour partie de particules d'un type encore inconnu et, naturellement, la physique des particules a rejoint l'astrophysique pour traquer cette mystérieuse matière sur Terre, en laboratoire. Un candidat prometteur est le neutralino, une particule prédite par l'une des extensions du modèle standard de physique des particules, la supersymétrie. Cette hypothèse est attrayante car chaque particule est pourvue d'une « superpartenaire » fournissant ainsi toute une liste de particules inédites. Pour observer ces particules en laboratoire, les physiciens sont confrontés à deux difficultés. D'abord il faut détecter une interaction très faible avec la matière ordinaire. Ensuite, il faut supprimer le bruit de fond assourdissant, causé par la radioactivité naturelle terrestre et cosmique, qui en masque la signature. Deux expériences progressent dans la traque de la matière noire : l'expérience américaine CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) et sa concurrente franco-allemande, Edelweiss, située sous le tunnel du Mont Fréjus, au laboratoire souterrain de Modane. Toutes deux sont conçues pour mesurer la minuscule élévation de température causée par la collision d'un neutralino avec les atomes du détecteur.

Constituées de matière ultra-pure, elles fonctionnent à une température d'environ 20 millikelvins (soit près de  $-273$  degrés Celsius) et peuvent enregistrer l'augmentation de cette température avec une précision de l'ordre d'un millionième de kelvin. Pour le moment, aucune particule de matière noire n'a été détectée mais la sensibilité des expériences devrait être multipliée par 100 dans les prochaines années. Si les détecteurs ne trouvent rien, il faudra se résoudre à élaborer un autre modèle et d'autres expériences. En revanche, la découverte du neutralino résoudrait le plus grand mystère de l'astrophysique moderne et serait le départ d'une fabuleuse aventure scientifique.

### À LA DÉCOUVERTE DE NOUVEAUX MONDES

Existe-t-il des systèmes solaires analogues au nôtre dans l'Univers ? La question est longtemps restée théorique même si les chances d'en trouver un paraissaient plutôt bonnes, compte tenu du nombre incommensurable d'étoiles : on estime à 50 milliards le nombre de galaxies à portée de nos télescopes, chacune contenant une bonne centaine de milliards d'étoiles ! Depuis 1996 et la découverte de la première planète extra-solaire, le problème a été tranché : il existe effectivement d'autres systèmes solaires,





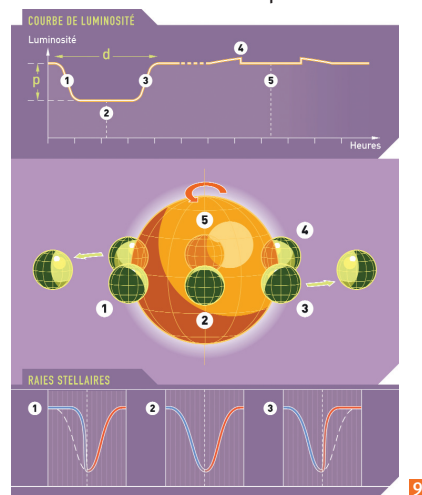
## La physique pour mieux comprendre le monde

plutôt nombreux même. Les considérables efforts de recherche menés à ce jour ont permis de découvrir plus de 160 planètes extra-solaires.

Comment les astronomes ont-ils procédé ? Selon deux méthodes. La première se fonde sur le fait qu'un corps massif en orbite autour d'une étoile affecte le mouvement propre de celle-ci : au lieu de se déplacer en ligne droite dans le ciel, l'étoile suit une courbe ondulante. La situation est similaire à celle du lanceur de marteau s'élançant vers la zone d'envoi en faisant tourner son projectile. Or ce mouvement d'ondulation peut être détecté par les effets qu'il induit sur le spectre de l'étoile : quand l'étoile

s'approche de nous, le spectre est décalé vers le bleu ; quand elle s'éloigne, il est décalé vers le rouge. En mesurant simultanément ce décalage périodique et la période du mouvement, il est possible de calculer la masse et les paramètres orbitaux de la planète qui en sont à l'origine (image 9, en bas). La difficulté de la mesure réside dans la faible valeur de la vitesse radiale induite par la présence de la planète : elle vaut 12 mètres par seconde pour une planète comparable à Jupiter en orbite autour d'une étoile de type solaire et moins de 0,1 mètre par seconde pour une planète terrestre. C'est grâce à cette méthode, utilisant des spectromètres spécialisés, que la plupart des exo-planètes ont été découvertes. La seconde méthode est fondée sur la photométrie. Une planète qui passe devant le disque de son étoile produit une mini-éclipse qui fait temporairement baisser la luminosité de l'astre d'environ 1 %. L'observation continue de la luminosité d'une étoile permet de repérer la période et l'intensité de cette baisse de luminosité et de remonter aux paramètres de la planète (image 9, en haut).

La plupart des planètes détectées jusqu'à présent sont au moins aussi



9/ Il est possible de détecter la présence d'une planète autour d'une étoile par la photométrie ou par la spectroscopie ; crédit Ciel et Espace.



## La physique pour mieux comprendre le monde

grosses que Jupiter (la plus grosse planète du système solaire). Le but ultime de ces recherches systématiques est bien sûr de détecter d'éventuelles planètes dont la masse est voisine de celle de la Terre. L'étape suivante, déjà en cours de réflexion, sera d'analyser l'atmosphère de la planète pour y détecter d'éventuelles traces de vie. La découverte d'une vie extraterrestre est peut-être pour demain !

### LES COULEURS DU CIEL

Pendant plus de quatre mille ans, l'Homme a observé le ciel à l'œil nu. En braquant sa lunette vers le ciel, il y a près de quatre cents ans, Galilée ouvrait l'ère de l'observation instrumentale du ciel. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'astronome allemand Fraunhofer inventait la spectroscopie, donnant naissance à l'astrophysique, la physique des astres. Au XX<sup>e</sup> siècle, l'observation du ciel a encore connu une série de révolutions instrumentales. La première a été l'usage de la photographie, qui a permis de garder une trace du ciel profond, c'est-à-dire des objets invisibles à l'œil nu, car trop peu lumineux. On a ainsi pu dénombrer les étoiles et les galaxies, les comparer, les classifier...

Ensuite, il y a environ quarante ans, les astrophysiciens se sont vus dotés

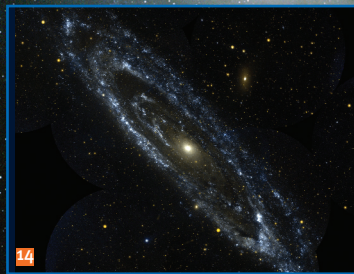
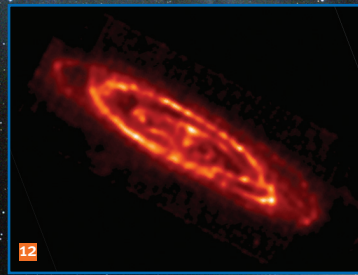
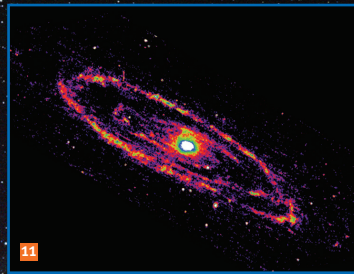
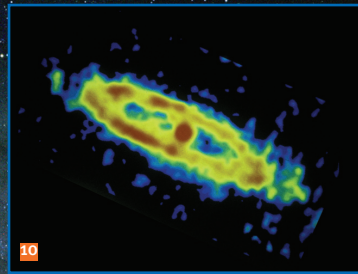
d'instruments capables de capter le rayonnement émis par les astres en dehors du spectre visible. C'est ainsi qu'il est devenu courant d'observer le ciel en infrarouge, en ultraviolet, en radio, en rayons X et gamma. L'exploitation de ces nouvelles longueurs d'onde a ouvert des fenêtres sur de nouveaux objets ou montré des objets déjà connus sous un jour nouveau. Cette capacité à observer le ciel dans toutes les longueurs d'onde doit beaucoup à la mise en orbite de satellites voués à l'observation des astres, grâce auxquels on s'est affranchi de l'absorption atmosphérique. Aujourd'hui, tous les domaines de longueurs d'onde sont exploités en permanence et corrélés entre eux afin de mieux cerner les mécanismes physiques mis en jeu dans les objets observés (images 10 à 14).

L'optique instrumentale a aussi vécu une révolution avec la construction de télescopes géants. Successeurs des télescopes du Mont Palomar (5 mètres de diamètre, mis en service en 1948), et de Zelenchuk (6 mètres de diamètre, mis en service en 1976), plus d'une dizaine de télescopes ont aujourd'hui un diamètre qui dépasse les 8 mètres (image 15). Mais ce n'est pas tant par la taille que ces nouveaux télescopes se distinguent, mais par l'emploi de techniques innovantes qui ont fait



12

La physique pour mieux comprendre le monde



La galaxie d'Andromède (M31) vue en différentes longueurs d'onde

- 10/ En radio on observe les concentrations d'hydrogène neutre, les électrons libres accélérés par le champ magnétique galactique (image obtenue par le radiotélescope d'Effelsberg).
- 11/12 L'infrarouge est idéal pour détecter les poussières interstellaires et les étoiles en formation (images obtenues en infrarouge moyen par le satellite MSX et en infrarouge lointain par le satellite ISO).
- 13/ En lumière visible on voit surtout les étoiles, le gaz mais aussi les poussières absorbantes (image prise par le National Optical Astronomical Observatory).
- 14/ Grâce au rayonnement ultra-violet on remarque surtout les étoiles chaudes et le gaz qu'elles ionisent (image prise par le satellite GALEX).



## La physique pour mieux comprendre le monde

faire un bond en avant à la qualité se images astronomiques : l'optique active (capacité à déformer la surface du miroir en temps réel) et l'optique adaptative (correction des altérations de l'image dues à l'atmosphère, obtenue par déformation du miroir).

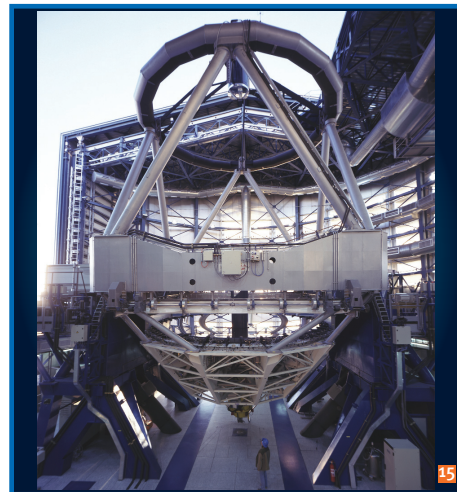
Enfin, l'astronomie instrumentale s'est découverte une nouvelle source d'inspiration lorsqu'on a cessé de ne considérer que la lumière comme unique vecteur des messages célestes. Depuis leur découverte en 1912, les particules de hautes énergies sont maintenant une source d'information précieuse. Qu'elles soient issues du Soleil (vent et neutrinos solaires), des supernovæ (neutrinos et particules accélérés) ou de phénomènes cosmiques de très grande intensité (particules de ultra-haute énergie) les particules font maintenant partie du paysage de l'astrophysique.

On l'aura compris, l'obtention et l'analyse d'image ou d'information est une partie essentielle du travail des astrophysiciens. Les gigantesques progrès réalisés en astrophysique observationnelle ont bien sûr été supportés par l'amélioration des moyens d'observation du ciel mais aussi par la spectaculaire augmentation des moyens de traitements et de

stockage des données. Ainsi, il est courant qu'une nuit d'observation se solde par la production de plusieurs dizaines de CD-ROM de données !

### LES INSTRUMENTS DU FUTUR

La fin du xx<sup>e</sup> siècle a inauguré les ères des télescopes géants et spatiaux. Le xxi<sup>e</sup> siècle devrait aussi être riche en matière d'instrumentation. D'abord, l'occupation de l'espace se poursuivra activement. Ainsi, le successeur du télescope spatial Hubble, lancé en 1990, sera le James Webb Space Telescope, mis au point conjointement par la NASA, l'ESA et l'agence spatiale canadienne. Il devrait



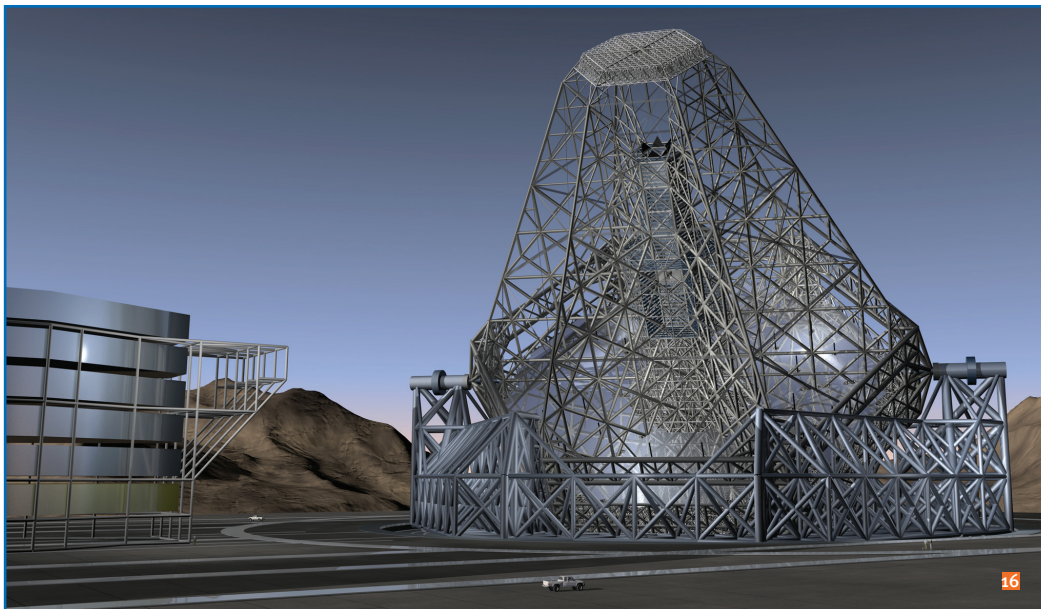
15 / Le télescope Kueyen dont le diamètre est de 8,2 mètres est l'un des quatre instruments du Very Large Telescope installé au Chili ; crédit ESO, VLT.



## La physique pour mieux comprendre le monde

rentré en service en 2010. Ce télescope spatial aura un diamètre de 6 mètres de diamètres formés de 18 segments hexagonaux. Il sera optimisé pour avoir une grande sensibilité dans l'infrarouge proche afin d'observer les objets les plus lointains, dont la lumière est fortement décalée vers le rouge par l'expansion de l'Univers. Une armada de télescopes spécialisés dans divers domaines de longueurs d'onde sera également mise en orbite. Citons le télescope Herschel, de 3,5 mètres de diamètre, qui observera

la formation des étoiles et des galaxies dans l'infrarouge, et la mission Planck, qui étudiera le fond diffus cosmologique. Tous deux seront lancés simultanément par l'agence spatiale européenne en 2007. Au sol, le gigantisme sera de mise. Plusieurs projets de télescopes de diamètres supérieurs à 20 mètres sont à l'étude, dont l'incroyable projet OWL de l'observatoire européen austral au 100 mètres de diamètre ! (image 16) Le domaine des ondes radios ne sera pas oublié. Le radiotélescope géant



16/ Vue d'artiste du grand télescope OWL dont le diamètre atteindra 100 mètres ; crédit ESO.

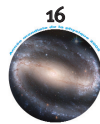


## La physique pour mieux comprendre le monde

ALMA (Atacama large Millimeter Array) sera constitué de 64 antennes de 12 mètres de diamètre. Les signaux captés par ces antennes seront combinés de sorte à disposer de la résolution équivalente à une unique antenne de 14 kilomètres de diamètre ! La construction de cet instrument s'achèvera en 2012, mais il sera partiellement mis en service dès 2007. Les astrophysiciens attendent aussi avec impatience l'ouverture d'un nouveau domaine d'observation : les ondes gravitationnelles. Leur existence a été prédite par la théorie de la gravitation d'Einstein mais elles n'ont jamais été observées directement. Les instruments américain LIGO et européen VIRGO devraient combler ce manque dès 2006. Les ondes gravitationnelles arrivant sur Terre proviennent par exemple de l'explosion d'une supernovæ ou de coalescences d'étoiles binaires situées à des milliers d'années-lumière. Elles courbent l'espace-temps et créent dans les instruments des modifications de distance de l'ordre du millièème de la taille d'un noyau d'atome ! Pour atteindre une telle précision, ces instruments utilisent

un grand interféromètre optique de plusieurs kilomètres de long. L'agence spatiale européenne caresse le projet d'envoyer un interféromètre dans l'espace pour y observer les ondes gravitationnelles ; les trois satellites de la mission seront distants de plus de 5 millions de kilomètres et mesureront leur distance en permanence avec une infinie précision.

La recherche de planètes extra-solaires ne sera pas en reste. La mission Corot, lancée en 2006, sera la première capable de détecter des planètes de la taille d'à peu près la Terre, orbitant autour d'étoiles proches. Elle aura aussi pour but d'étudier les vibrations des étoiles (astérosismologie). Le projet européen Darwin sera constitué d'une flottille de 6 télescopes dont la lumière sera combinée sur un septième afin d'obtenir une résolution équivalente à celle d'un unique très grand miroir. Darwin cherchera des planètes telluriques autour des 1000 étoiles les plus proches et sera capable d'analyser leur atmosphère pour y détecter des éventuelles traces de vie (image 17).





La physique pour mieux comprendre le monde



171 Vue d'artiste du projet Darwin ; crédit ESA.

La physique pour mieux comprendre le monde

S O M M A I R E

L'Univers a une histoire .....	2
La matière a une histoire .....	4
L'atome, écume de la matière .....	6
À la découverte de nouveaux mondes .....	10
Les couleurs du ciel .....	12
Les instruments du futur .....	14

# Au service de l'éducation

▶▶▶ Le SCÉRÉN s'engage dans

## l'année mondiale de la physique

▶▶▶ **La révolution Einstein, 1905-2005**

100 ans plus tard, retour sur les textes fondateurs  
qui ont bouleversé notre perception de l'univers.  
*Revue Textes et documents pour la classe,*  
n° 886 décembre 2004, 4 €  
Abonnement : 03 44 03 32 37

▶▶▶ **1905, les trois percées d'Albert Einstein**

Une approche historique des travaux fondateurs d'Einstein,  
donnant à l'activité scientifique toute sa dimension humaine.  
Dossier en ligne sur [www.sceren.fr](http://www.sceren.fr), rubrique Thém@doc

▶▶▶ **Physique-chimie : programmes,  
accompagnement et autres ressources**

Compilation de textes officiels, documents,  
vidéos et animations, ce cédérom facilite le travail  
des enseignants et futurs enseignants.  
49 € licence établissement, 15 € licence monoposte

Consultez, commandez sur [www.sceren.fr](http://www.sceren.fr)  
dans les librairies des CRDP et CDDP  
à la librairie de l'éducation, 13 rue du Four 75006 Paris

**SCÉRÉN**

SERVICES CULTURE ÉDITIONS  
RESSOURCES POUR  
L'ÉDUCATION NATIONALE  
[CNDP-CRDP]





### La physique pour mieux comprendre le monde

L'année 2005 a été déclarée « Année mondiale de la physique » par l'UNESCO pour célébrer les sciences physiques dans le monde entier, exactement cent ans après la parution des travaux révolutionnaires d'Albert Einstein qui ont ouvert la voie à de nombreux développements de la physique du vingtième siècle. Les transistors, les ordinateurs, les lasers ou l'imagerie médicale sont de purs produits des dernières décennies de recherche fondamentale dans les laboratoires de physique, là où s'élaborent aujourd'hui les matériaux et les technologies de demain. Au-delà de la commémoration d'un grand personnage de la physique du vingtième siècle, l'objectif de cette action est aussi de faire connaître à un public le plus large possible les progrès, l'importance et les enjeux de ce grand domaine de la science qu'est la physique. Aux physiciens de montrer qu'il est possible de s'instruire et de se faire plaisir en apprenant de la physique. Pour l'occasion, la Société Française de Physique a décidé de publier quatre brochures dont les thèmes sont l'Univers, la Terre et son environnement, la physique et le vivant, la lumière. Vous tenez l'une d'entre elle entre vos mains. Bonne lecture !

Cette brochure a été conçue sous la responsabilité de Roland Lehoucq, astrophysicien au CEA Saclay. Elle a été réalisée et éditée par EDP Sciences avec le soutien de la Société Française de Physique, du ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et du Centre National de Documentation Pédagogique. Elle est aussi disponible au format PDF sur le site de la SFP <http://sfp.in2p3.fr>