

## ABSORPTION DE RAYONNEMENTS PAR L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

### 1. Synthèse : astronomie et atmosphère

Depuis la nuit des temps, l'Homme a toujours observé l'Univers qui l'entoure : d'abord à l'œil nu en contemplant les étoiles et autres points lumineux dans le ciel nocturne, puis à l'aide d'instruments tels les lunettes astronomiques et les télescopes. L'observation par l'Homme de l'immensité du ciel nocturne l'a conduit à s'interroger sur ses origines et à pousser toujours plus loin les techniques de détection de la lumière qui nous parvient, après traversée de l'atmosphère terrestre, de cet ailleurs lointain à la fois dans l'espace et dans le temps.

À l'aide des documents fournis dans les pages suivantes et en utilisant vos connaissances, rédiger, en 30 lignes maximum, une synthèse argumentée répondant à la problématique suivante :

**« Comment les astronomes sont-ils parvenus à s'affranchir des perturbations occasionnées par l'atmosphère sur l'information nous parvenant de l'Univers ? »**

Pour cela, préciser les domaines des ondes électromagnétiques traquées par les astronomes en précisant, pour chaque domaine, quel type d'objet céleste en est la source. Indiquer alors les différents problèmes rencontrés lors de la détection de ces ondes et causés par l'atmosphère terrestre dont on précisera toutefois l'utilité quant à l'existence de la vie sur Terre. Conclure enfin sur la problématique posée en expliquant les solutions mises en œuvre pour pallier à ces problèmes.

### 2. D'autres sources de perturbations dans l'étude de l'information en provenance de l'Univers

Le rayonnement cosmique est constitué de particules de très haute énergie en provenance de l'espace (essentiellement des protons mais aussi des noyaux atomiques, des électrons et des photons gamma). Lors de leur traversée de l'atmosphère, ces particules interagissent avec elle en produisant le phénomène de gerbes (apparition de nombreuses particules secondaires). Ainsi, un seul proton initial peut donner lieu à la formation d'un million de particules secondaires (photons gamma, électrons et muons essentiellement). D'autres phénomènes viennent encore perturber les instruments de détection, qu'il s'agisse d'ondes gravitationnelles, de neutrinos ou de photons.

À l'aide des documents fournis dans les pages suivantes et en utilisant vos connaissances, citer et expliquer brièvement au moins trois causes de perturbation des mesures en astronomie. Tout élément de raisonnement ou toute hypothèse valable sera prise en considération.

Source des documents présentés :

**AUDOUZE, Jean.** *Le ciel à découvert.* CNRS Éditions, 2010. 328 pages. ISBN 978-2-271-06918-4

**AVEC L'AUTORISATION DU C.F.C.  
(CENTRE FRANÇAIS D'EXPLOITATION DU DROIT DE COPIE)**

## Document I : La révolution astronomique de l'espace

L'astronomie spatiale se distingue de l'astronomie au sol en particulier par ses techniques très spécifiques d'observation, mais elle est devenue indissociable de l'astronomie tout court. La réciproque n'est pas vraie, les techniques spatiales servant de multiples autres besoins que la seule observation astronomique.

Quelques 400 ans après que Galilée aura pointé la première lunette vers le ciel et créé la première grande révolution de l'astronomie, l'avènement des techniques spatiales a créé la seconde. [...] Quatre puissances spatiales ont contribué à ce développement historique : les USA, l'URSS, l'Europe et le Japon.

La figure 1 reproduit le spectre solaire tel qu'observé hors de l'atmosphère et sur la surface terrestre. Avant l'ère spatiale, l'observation astronomique était limitée à la lumière visible et à quelques « fenêtres » du spectre électromagnétique infrarouge et radio. Molécules et atomes atmosphériques bloquent en effet totalement l'ultraviolet et le rayonnement X ( $O_3$ ,  $O_2$ , O) au-dessous de 300 nm et partiellement l'infrarouge ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ) à partir de 750 nm et au-delà. L'observation astronomique à ces longueurs d'ondes requiert donc l'utilisation de ballons, fusées et satellites artificiels. Avant l'ère spatiale, les planètes du Système solaire, quant à elles, n'étaient qu'astres brillants parmi les champs d'étoiles et de galaxies.

D'un coup, en quelques minutes, le temps pour les fusées de traverser les couches denses de l'atmosphère, on accédait à l'ultraviolet, aux rayons X et  $\gamma$ , à tout l'infrarouge et au domaine submillimétrique. L'observation n'était plus handicapée par aucun des effets perturbants de l'atmosphère : turbulence et réfraction. On pouvait s'approcher des planètes et de leurs satellites. Au cours des 50 dernières années, nous avons ainsi parcouru presque tout le Système solaire. Nous avons atterri sur la Lune, sur Vénus, Mars, Titan, sur des astéroïdes et bientôt, grâce à la mission Rosetta de l'ESA, nous le ferons sur le noyau d'une comète. Avec les sondes Pioneer et Voyager de la NASA, nous atteignons les limites de l'héliosphère et nous entamons l'exploration des territoires vierges de l'espace profond. Nous explorons les plus extrêmes des extrêmes de distance, de température, de vide, de densité, de gravité et de temps.

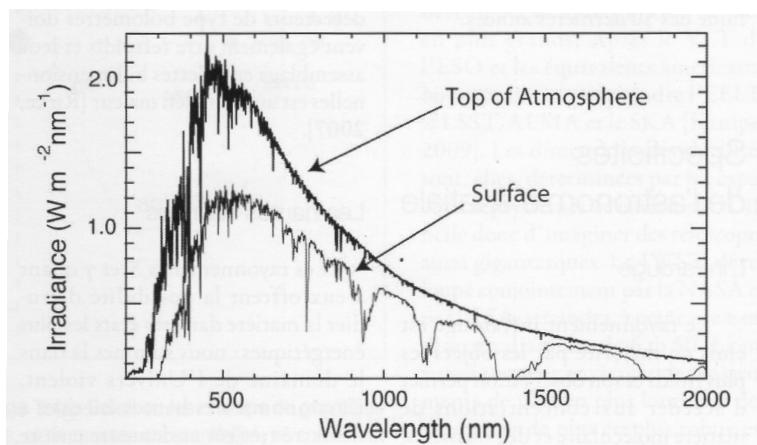


Fig. 1 – Spectre solaire comparé au-dessus de l'atmosphère terrestre et au niveau du sol. (G. Rottman). ■

## Document II : Spécificités de l'astronomie spatiale

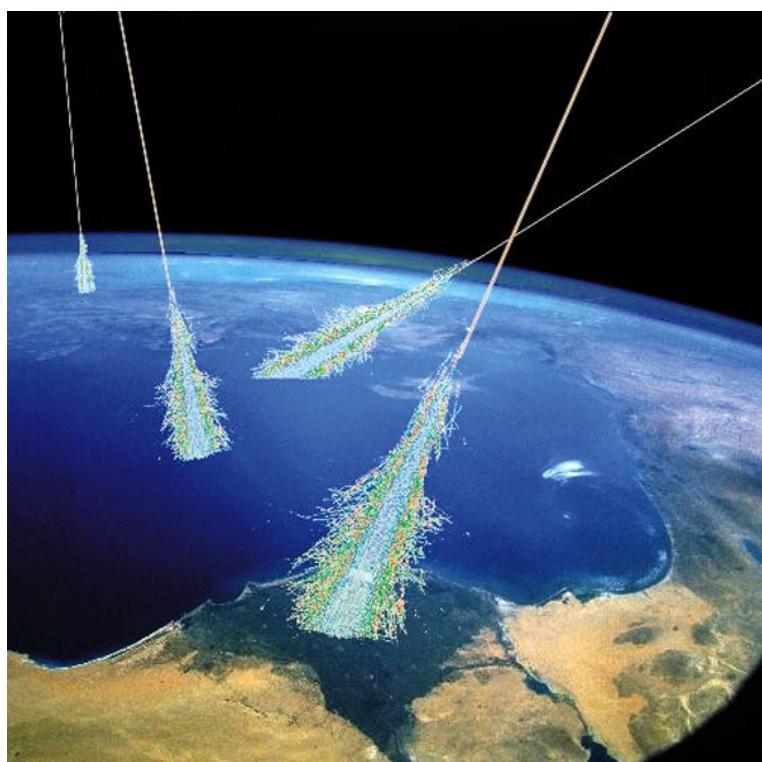
### L'infrarouge

Le rayonnement infrarouge est émis en majorité par les objets les plus froids et son observation permet d'accéder aux concentrations de matière moléculaire et de poussière, c'est-à-dire aux étoiles et aux planètes en formation [...] Six missions ont particulièrement contribué à défricher ce domaine [...] La dernière mission de l'ESA, Herschel avec son télescope de 3,50 m, lancée le 14 mai 2009, devrait prolonger ces résultats vers les longueurs d'onde plus grandes, dans des domaines spectraux encore inexplorés avec une sensibilité et des pouvoirs de résolution accrus de plus d'un ordre de grandeur par rapport aux instruments précédents.

L'enjeu technologique de l'infrarouge est l'élimination du rayonnement propre des télescopes et de leurs instruments focaux, lequel noie les observations dans un bruit plusieurs dizaines de fois plus intense que le signal astronomique. Les techniques cryogéniques utilisant l'hélium superfluide ont été appliquées dans la plupart des satellites infrarouges [...]

### Les hautes énergies

Les rayonnements X et  $\gamma$ , quant à eux, offrent la possibilité d'étudier la matière dans ses états les plus énergétiques : nous sommes là dans le domaine de l'Univers violent. L'astronomie des hautes énergies a démarré très tôt et demeure encore l'une des branches les plus actives de l'astronomie spatiale car elle ne peut se faire qu'à partir de fusées sondes et de satellites. Elle a été marquée dès le démarrage par les physiciens Bruno Rossi et Ricardo Giacconi à qui l'on doit la première détection du rayonnement X des étoiles en 1962 et qui a valu à ce dernier le Prix Nobel de physique en 2002 [...] C'est dans ce domaine que s'observent les températures les plus élevées, en particulier les enveloppes externes des étoiles. C'est aussi le domaine idéal pour l'étude du recyclage de la matière au travers des observations de supernovæ, lors des cataclysmes qui marquent la fin des étoiles massives. C'est également là que s'observent les résidus de ces cataclysmes : sursauts  $\gamma$ , étoiles à neutrons ou trous noirs, ainsi que les phénomènes d'accrétion par ces objets dont la densité ne peut être reproduite dans aucune expérience de laboratoire. C'est encore là que s'observent les phénomènes naturels d'annihilation matière-antimatière [...]



Vue d'artiste de gerbes de particules secondaires engendrées par le rayonnement cosmique

### Document III : L'astronomie du futur – les grands collecteurs de photons non visibles

La lumière électromagnétique, à la fois onde et particule (le photon), restera encore longtemps notre principale « messagère » de l'Univers lointain. Elle transporte jusqu'à nous une information abondante sur la formation des premières galaxies, sur les cortèges planétaires autour des étoiles et même probablement sur l'activité biologique, intelligente ou non, qui pourrait habiter les planètes extra-solaires. Cette information est en effet pratiquement intacte au sein de l'onde électromagnétique avant qu'elle ne pénètre dans l'atmosphère terrestre. Cependant, pour faire une image nette de la voûte céleste, il faut d'une part collecter une assez grande quantité de lumière et d'autre part analyser les « battements » des ondes lumineuses au travers d'une ouverture assez grande en comparaison de la longueur d'onde. Ces deux facteurs concourent à augmenter la taille des instruments : 4 cm pour la lunette de Galilée contre 10 mètres pour les plus grands télescopes optiques d'aujourd'hui et plus de 100 mètres pour les radiotélescopes [...]

ALMA (Atacama Large Millimeter Array) est le nouveau grand observatoire « micro-ondes » construit par l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon sur le plateau désertique du nord Chili [...] Constitué d'une multitude de radiotélescopes de 12 mètres chacun, sa puissance sera équivalente à celle d'un télescope d'un kilomètre de diamètre. Cette puissance sera principalement utilisée pour découvrir et comprendre comment les premières galaxies se sont formées et assemblées pour former les grandes galaxies d'aujourd'hui comme la Voie lactée ou la galaxie d'Andromède. Dans un futur plus lointain, 2025-2030, SKA (Square Kilometer Array), projet mondial à l'étude, va révolutionner la radioastronomie avec des antennes réparties sur un sous-continent entier (Australie ou Afrique du Sud) [...] Il sera dédié aux plus grandes ondes, du centimètre au mètre, et sera donc beaucoup plus grand [...] et pourrait entrer en service au cours des années 2020. La figure 2 montre ce que pourrait être le « cœur » du télescope SKA constitué à la fois d'antennes radio planaires et d'antennes paraboliques rassemblées en très grand nombre sur une zone de 5 km de diamètre [...] SKA sondera le gaz diffus de l'Univers primordial bien avant que les premières galaxies ne se forment. Dans cet Univers âgé de moins d'un milliard d'années, il sera capable de mesurer l'effet des tout premiers objets sur leur environnement. On ne sait pratiquement rien sur cette période si ce n'est qu'elle a probablement été le siège de phénomènes violents dont les quasars et les sursauts gamma sont les seuls signes qui nous parviennent.



Fig. 2 – SKA (Square Kilometer Array) le radiotélescope du futur (image de synthèse). Projet mondial estimé à plus de 2 milliards d'Euros, il aura une surface collectrice d'un kilomètre carré. L'un de ses objectifs phare est de sonder l'Univers primordial dans une période où il n'a pas encore formé les premières galaxies. (SKA) ■

C'est aussi dans l'espace que vont se déployer les grands collecteurs de photons du vingt-et-unième siècle [...] L'Agence Spatiale Européenne (ESA) mène depuis bientôt 16 ans des études approfondies pour déployer dans l'espace une flottille de télescopes de 2 mètres de diamètre : c'est le projet DARWIN [...] La difficulté de ces projets réside dans la nécessité de maintenir la position de chaque satellite avec une précision égale à quelques dizaines de nanomètres.

#### Document IV : L'astronomie du futur – les grands collecteurs de photons visibles

Pour ce qui concerne l'astronomie traditionnelle du domaine des ondes électromagnétiques visibles, l'E-ELT est de loin le projet le plus ambitieux (voir figure 3). Prévu pour succéder dès 2018 aux VLT actuels (Very Large Telescopes, 8 m de diamètre), son optique principale sera un miroir de 42 mètres constitué d'une mosaïque d'un milliers de miroirs hexagonaux d'environ un mètre de diamètre chacun ajustés à une fraction de micron près [...] L'atmosphère terrestre est elle-même un élément perturbant qui brouille l'onde. Il est donc prévu de monter au cœur de l'E-ELT un miroir souple, déformable de façon active au moyen de centaines d'actuateurs afin de neutraliser les perturbations atmosphériques. La construction de l'E-ELT est surtout motivée par l'étude des planètes extra-solaires dont plusieurs centaines sont actuellement répertoriées [...] Le voile qui se lève sur les exo-planètes et les formes de vie qu'elles pourraient héberger nous laissent entrevoir des territoires beaucoup plus vastes que la simple recherche d'une jumelle à la Terre. Au-delà des mondes extraterrestres, la puissance et la finesse de vue de l'E-ELT ouvriront une fenêtre sur l'Univers lointain mais aussi de nombreuses possibilités pour tester certains aspects de la physique fondamentale. Par exemple, en observant au plus près des trous noirs, il sera possible de vérifier la relativité générale dans des conditions de champ de gravité extrême jamais abordées auparavant par l'observation directe. Il sera aussi possible de mesurer à 20 ans d'intervalle l'accélération de l'Univers en expansion et tester ainsi les théories concernant la nature de l'énergie noire.

Fruit d'une collaboration entre les universités américaines et la société Google, le LSST est un autre télescope extrême [...] Il fonctionnera en mode automatique et sera capable de couvrir le ciel entier deux fois par semaine. Son principal objectif sera de réaliser de 2016 à 2025 l'exploration du ciel la plus complète et la plus profonde jamais faite. La figure 4 illustre l'un des objectifs de cette exploration : réaliser un recensement complet de la matière (y compris la matière noire) en utilisant la façon dont elle peut déformer l'image des galaxies situées en arrière-plan.

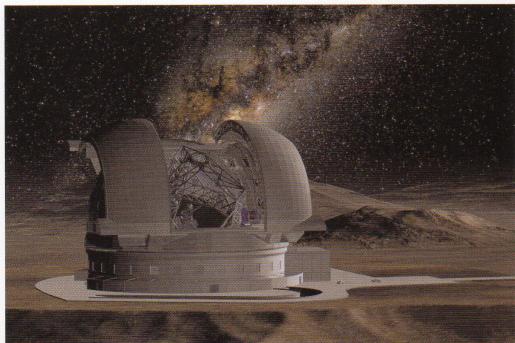


Fig. 3 – Image de synthèse montrant l'E-ELT (European Extremely Large Telescope, 42 mètres de diamètre) sous la voûte céleste avec la Voie lactée en arrière-plan. D'un coût estimé à 900 millions d'euros il verra sa première lumière en 2018. (ESO/H. Zodet) ■

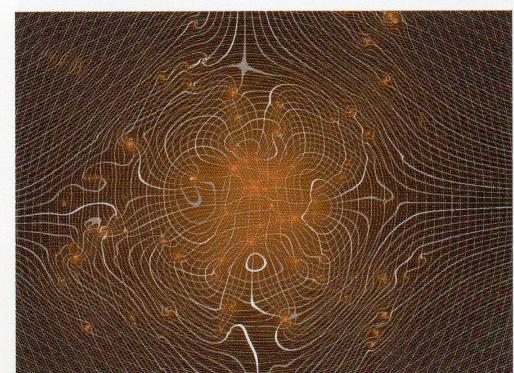


Fig. 4 – Cette figure illustre au moyen d'un calcul numérique comment la matière perturbe la géométrie de l'Univers, rendant toute relative la notion de droite. Ici, le quadrillage régulier d'un papier millimétré est déformé par la répartition des masses observées dans l'amas de galaxies CL0024. ■

## Document V : L'astronomie du futur – les nouveaux messagers

Les nouveaux messagers sont porteurs d'informations nouvelles inaccessibles à l'astronomie classique des ondes lumineuses. L'astronomie du futur verra donc aussi la construction d'observatoires d'un type complètement nouveau.

Étudié à la fois par l'ESA et la NASA, *LISA* (Laser Interferometer Space Antenna) pourrait être déployé dans l'espace au cours des années 2020-2030. À la manière de *DARWIN*, il s'agit de positionner plusieurs satellites en configuration de vol en formation, mais dans ce cas avec une précision équivalente à l'épaisseur d'un atome et pour une distance entre les satellites de l'ordre de 5 millions de kilomètres. Chaque satellite est en fait un point de repère au sommet d'un triangle spatial dont les déformations seront la mesure du passage des ondes de gravitation en provenance de l'Univers lointain : étoiles denses en couple binaire, étoile dense orbitant autour d'un trou noir, trous noirs géants en cours de formation au centre d'une galaxie. L'onde de gravitation est à la gravitation ce que l'onde électromagnétique est à la force électrostatique. Alors que la seconde est produite par les charges électriques en mouvement, la première se manifeste dès lors que des masses importantes bougent [...] Prédites par Einstein en 1916, elles n'ont jamais été observées directement [...] Dans le silence de l'espace, les lasers de *LISA* seront donc capables de déceler les frémissements de la métrique causés par des explosions lointaines : quelques Angströms seulement sur une distance de 5 millions de kilomètres.

Ce sera aussi au fond des mers, ou bien dans les glaces de l'Antarctique, que se jouera l'astronomie du futur avec les grands observatoires à neutrinos. En fait, le flux des neutrinos astrophysiques de haute énergie est aussi riche et abondant que celui des photons mais ils n'interagissent pratiquement pas avec la matière et sont en conséquence difficiles à détecter. Cette faible propension d'interaction est aussi un avantage puisqu'ils nous parviennent en droite ligne de leurs lieux d'émission, portant une information intacte sur leurs sources : Big Bang, explosions d'étoiles ou trous noirs en accrétion au centre des galaxies. Le principe de leur détection tient à ce qu'ils interagissent tout de même un peu avec la matière et produisent des muons dont on peut mesurer la trajectoire dans l'eau ou la glace par la trace de photoluminescence qu'ils y laissent [...] En mesurant précisément la trajectoire et l'énergie du muon, on remonte ainsi à celles du neutrino qui lui a donné naissance.