

Voir l'invisible : petite histoire d'une grande conquête

Pendant plus de 2 000 ans, les astronomes ont été dans l'ignorance des lumières baignant le cosmos, excepté, bien sûr, de la lumière visible. Et pour cause : la plupart des rayonnements ne parviennent pas à franchir la barrière que leur oppose l'atmosphère. Dépasser cet obstacle supposait des instruments adaptés : d'abord des ballons puis des fusées et enfin des satellites.



Découverte du rayonnement gamma des pulsars. Charge et ballon stratosphérique à Aire-sur-l'Adour (juillet 1969).

Le 27 janvier 1959, face à la corniche des Maures, sur l'île du Levant qui appartient à la commune d'Hyères (Var), un événement se prépare qui va compter dans l'histoire de l'astrophysique française. En fin d'après-midi, dans le secret de la base navale, un mince trait lumineux s'élève dans le ciel avant de se perdre rapidement dans les nuages. S'agit-il d'un lancement pour expérimenter une arme destinée à la force de dissuasion nationale? Rien de tel! Mais un missile reconverti qui emporte, à plus de 100 kilomètres d'altitude, la première expérience française d'astrophysique spatiale issue des laboratoires du CEA.

Le CEA pionnier dans l'espace

L'épopée spatiale du CEA commence presque en même temps que la fondation de l'organisme. En effet, le 18 octobre 1945, le gouvernement de la France approuve l'ordonnance, élaborée par le conseiller d'État Jean Toutée, pour fonder le CEA voulu par le général de Gaulle afin « [...] de poursuivre les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans divers domaines de la science, de l'industrie, de la défense nationale ». Nul ne se doute encore que ce nouvel organisme de recherche deviendra un formidable creuset de compétences sur la découverte de l'Univers. Et pourtant...

Le 2 janvier 1946, le général de Gaulle nomme au poste de haut-commissaire du CEA Frédéric Joliot, prix Nobel de chimie, en 1935, avec son épouse Irène Curie, pour leur découverte de la radioactivité artificielle.

Cette nouvelle propriété de la matière se caractérise par la désintégration du **noyau** de l'**atome**, lequel émet alors d'étranges **rayonnements**, jusqu'ici inconnus et baptisés : alpha, bêta et gamma, faute d'imagination. Si les deux premiers sont, en réalité, des particules (noyaux d'**hélium** et **électrons**), en revanche, le troisième d'entre eux va bientôt se révéler comme la plus puissante forme de lumière existante dans la nature. Dès lors, les ingénieurs du CEA mettront toute leur énergie à concevoir des instruments capables de capter et de mesurer ces rayonnements. Pendant plusieurs années, ces études se font en laboratoire, mais la date du 4 octobre 1957 marque une véritable révolution pour ces scientifiques : la mise en orbite de *Sputnik* puis, quelques années plus tard, en 1961, le premier vol dans l'espace du Soviétique Iouri Gagarine qui ouvre l'exploration spatiale. D'où le lancement réalisé, le 27 janvier 1959, sur l'île du Levant, avec une fusée Daniel, initialement conçue par l'**Office national d'étude et de recherches spatiales (Onera)**.

Bien sûr, cette mission, dirigée par le physicien Jacques Labeyrie, doit répondre prioritairement aux interrogations posées par les expérimentations nucléaires



La première expérience spatiale du CEA, le 27 janvier 1959. Un compteur Geiger a été installé à bord d'un missile pour une des premières mesures des rayons gamma du ciel.

aériennes et donc par l'éventuelle dissémination de matières radioactives dans la haute atmosphère. Mais la batterie de compteurs Geiger embarquée sur ce missile se révèle aussi capable de mesurer le rayonnement gamma du ciel. Si l'expérience peut conclure à l'absence de radioactivité dans la haute atmosphère, elle réalise également une avancée mondiale dans le domaine de l'astrophysique : un des tout premiers enregistrements de rayons gamma en provenance du cosmos. Jusque-là, nul chercheur n'avait imaginé que l'Univers produisait de tels rayons. Et pour cause : excepté la lumière visible capable d'atteindre la surface de la Terre, la plupart des autres rayonnements sont arrêtés par l'atmosphère. Donc, depuis les débuts de l'astronomie, il y a plus de 2000 ans, les astronomes n'ont eu aucun moyen de capter les autres lumières cosmiques. C'est à peine si le rayonnement radio de la **galaxie** fut découvert, en 1932, par le physicien américain Karl Jansky et si les Allemands démontraient l'émission de rayon X par le **Soleil** grâce à une fusée V2. Ce résultat propulse le CEA parmi les experts mondiaux de l'astrophysique, une position qu'il ne quittera plus. Cinquante ans plus tard, une autre génération de chercheurs, désormais réunis au sein du SAP, vient de livrer une caméra de très haute technologie destinée au cœur d'Herschel, le plus grand télescope spatial jamais satellisé mais aussi petit bijou de la recherche, sachant capter les plus faibles rayonnements infrarouges de l'Univers. Entre ces deux performances, les astrophysiciens du SAP marqueront de leur empreinte chaque étape d'une des plus excitantes aventures scientifiques de tous les temps : la détection des rayonnements « invisibles » du cosmos, totalement inaccessibles à nos yeux humains seulement adaptés à la lumière de notre **étoile**, le Soleil.

Réussir avec les moyens du bord

En juin 1962, une importante découverte bouleverse, à nouveau, la conception que les astrophysiciens se font alors du ciel. On la doit à une équipe américaine, dirigée par Roberto Giacconi, Prix Nobel en 2002. Celui-ci imagine de placer des détecteurs de rayons X à bord d'une fusée *Aerobee* pour tenter de mesurer les rayons X du Soleil réfléchis par la surface de la Lune. Aucun rayon ne put être capté par la Lune mais, en balayant le ciel, les instruments embarqués reçurent une forte bouffée de rayons X en provenance d'une région de la constellation du Scorpion. Baptisée Scorpius-X1, cette source restera longtemps une énigme pour les astrophysiciens. Il faudra plus de cinq ans pour comprendre que les rayons X de l'Univers proviennent d'étoiles exotiques très denses, de **naines blanches**, d'**étoiles à neutrons** ou même de **trous noirs**. Avec cette découverte s'ouvrait une nouvelle fenêtre d'observation sur le cosmos. À cette époque, la France n'a pas encore développé son programme de fusée, aussi les chercheurs du CEA durent-ils faire preuve d'ingéniosité pour continuer leurs observations. Faute de mieux, l'idée leur vint d'embarquer leurs instruments de mesure sur des ballons stratosphériques pouvant s'élever à 40 kilomètres d'altitude.

Le 21 mai 1965, un vol inaugural se déroule sur la base d'Aire-sur-l'Adour (Landes) avec les moyens du bord. Par exemple, pour protéger les détecteurs du vide et du froid, les astrophysiciens utilisent une



Découverte des rayons X cosmiques : préparation et envoi d'un ballon stratosphérique depuis Aire-sur-l'Adour (mai 1965).

cocotte-minute et du polystyrène ; pour enregistrer leurs données, ils ne disposent que d'un simple magnétophone à bande du commerce. Récupéré après le vol, ce simple enregistreur offrira au CEA l'une de ses premières historiques : la détection de rayons X de haute énergie émanant de plusieurs sources situées dans la constellation du Cygne. Pourtant, les chercheurs n'en sont qu'à leurs premiers étonnements. En 1967, des radioastronomes anglais découvrent des signaux radio rapides et réguliers dans le ciel. Une fois écartée l'hypothèse, brièvement envisagée, de signaux émis par des extraterrestres, une autre supposition voit le jour : ces « pulsations » proviendraient d'étoiles à neutrons, en rotation très rapide, baptisées **pulsars** pour *pulsating stars*.



Charge portée par le ballon : détecteurs protégés du vide dans une cocotte-minute étanche et données enregistrées sur un magnétophone à bande récupéré après le vol (mai 1965).



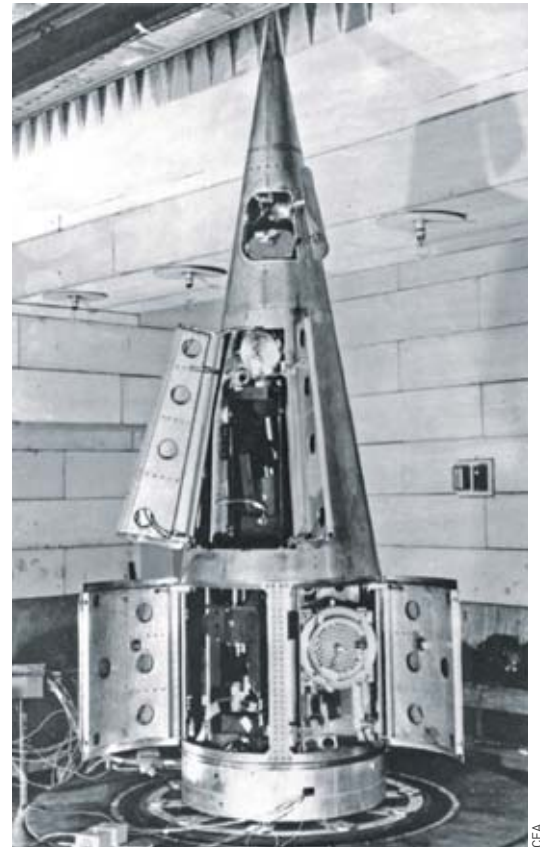
Entre Kourou et Gap

Entre-temps, la France a développé son programme de fusées *Véronique*. Les astrophysiciens ne laissent pas passer l'occasion. En 1967, l'équipe de Robert Rocchia embarque les détecteurs déjà développés par le CEA pour l'étude de la radioactivité. Terrible déception : la tentative échoue car les portes de la fusée ne se sont pas ouvertes. Ce ne sera que partie remise et le succès arrive, tel un cadeau de Noël, le 23 décembre 1968, depuis la nouvelle base spatiale de Kourou (Guyane), tout juste quelques mois après son inauguration. Les résultats de l'expérience s'avèrent probants : pendant les 200 secondes que dure l'observation, environ 25 000 rayons X sont enregistrés en provenance d'un des plus puissants pulsars de la galaxie. Les astrophysiciens du CEA viennent d'établir que les pulsars émettent des rayons X de haute énergie – une première.

Ils n'en resteront pas là puisque, l'année suivante, ils tentent un nouveau défi : utiliser un tout nouveau détecteur dédié aux rayons gamma en provenance de pulsars. Cet instrument complexe a été mis au point par Bruno Parlier, Bernard Agrinier et Yves Koechlin, du CEA, en collaboration avec Giuseppe Occhialini, célèbre physicien de l'université de Milan. En fait, il s'agit d'une chambre à étincelles, autrement dit une enceinte à vide sous tension contenant un empilement de plaques de plomb capables de stopper les rayons gamma puis de les désintégrer en particules chargées produisant des traces d'étincelles. Pour reconstituer la direction du rayon gamma, ces traces sont photographiées grâce à une caméra de film 16 mm. Cette fois, l'opération se déroule à Gap (Hautes-Alpes). Un ballon emporte le détecteur à 40 000 mètres d'altitude. Les résultats sont une nouvelle fois au rendez-vous des chercheurs du CEA qui démontrent, les premiers, que les pulsars émettent aussi des rayons gamma dans l'Univers.

Du ballon au satellite

La poursuite des recherches suppose alors de vaincre une limitation essentielle : la durée de vie trop courte des ballons et des fusées. Pour cela, il faut pouvoir



Première détection des rayons X de haute énergie des pulsars : tête de fusée française Véronique portant les détecteurs de rayons X (décembre 1968).

disposer de satellites scientifiques et accéder ainsi durablement à l'espace. L'Europe devra attendre 1972 pour disposer d'un tel satellite, TD-1. Les astrophysiciens du CEA exploitent cette première opportunité qui leur est offerte en plaçant trois de leurs instruments sur le satellite qui tournera en orbite jusqu'en 1974. Parmi eux, S-133, une toute nouvelle chambre à étincelles de 40 kg, munie cette fois d'une caméra électronique de télévision baptisée VIDICON. Malheureusement, ce vol sera un échec, la proximité d'autres instruments ayant induit un formidable bruit de fond de particules parasites et noyé l'expérience sous de fausses détections. Cet apprentissage profitera au satellite Cos-B, lancé en août 1975, avec une chambre à étincelles de 114 kg, fruit d'une large collaboration européenne. Avec une longévité affichée de sept ans, ce projet volera la vedette à son concurrent américain, SAS-II, programmé pour seulement six mois, mais aussi en raison d'un résultat scientifique majeur : l'obtention de la première image complète de la galaxie en rayons gamma.

L'exploration du domaine des hautes énergies X et gamma se poursuivra jusqu'à aujourd'hui grâce à l'implication du CEA dans les missions SIGMA/Granat (1989), XMM-Newton (1999) et INTEGRAL (2002). Désormais, la vision des astrophysiciens s'ouvre sur des milliers de sources témoignant de cet Univers violent où les températures se chiffrent en millions de degrés. En revanche, du côté du rayonnement infrarouge, les obstacles ne se laisseront pas vaincre facilement : d'abord, l'atmosphère reste un écran à franchir et ensuite, la technologie des détecteurs, issue du domaine militaire, ne suit pas toujours les besoins des



Ensemble de fusée Skylark pour la détection des sources célestes de rayons X (1972).

chercheurs. L'implication du CEA vers ce nouveau domaine résultera d'une circonstance fortuite, à savoir le retard pris par les collaborations internationales sur les hautes énergies à la suite d'un double événement : l'accident de la navette américaine Challenger, en 1986, et la disparition de l'ex-URSS, en 1991.

En attendant la grande symphonie du cosmos...

L'Europe décide alors de relever le défi avec son projet de satellite ISO (pour *Infrared Space Observatory*), conçu pour embarquer la première caméra infrarouge dans l'espace. Il faut dire que le satellite astronomique américain IRAS (pour *Infrared Astronomical Satellite*), lancé en 1983 pour six mois, n'avait donné qu'un premier aperçu du ciel infrarouge. Pourtant, aucun laboratoire européen ne semble en mesure de construire la caméra d'ISO. Seules deux unités du CEA, le SAp et le Laboratoire d'électronique de technologies de l'information (Leti) peuvent s'engager à fournir les détecteurs de l'instrument et assurer leur intégration dans un ensemble optique complexe pesant moins de 10 kg. Sous l'impulsion de Catherine Cesarsky, ISOCAM (la caméra d'ISO) rejoint l'espace, en 1995, pour trois ans. Avec sa batterie de détecteurs semi-conducteurs de seulement 32 x 32 pixels, cette caméra réalisera une mosaïque d'images révélant tout le détail des nébuleuses de gaz et de poussières où naissent les étoiles. Elle n'est surpassée aujourd'hui que par le récent satellite Spitzer.

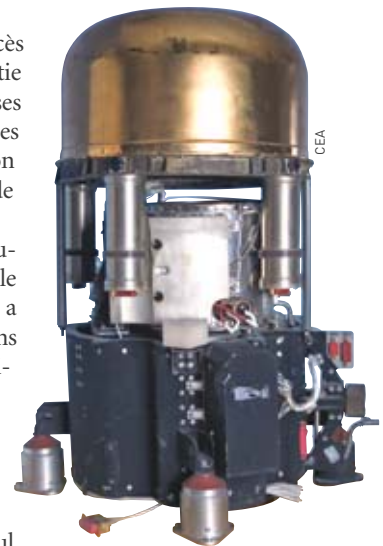
Aujourd'hui, dans le vaste arc-en-ciel de l'invisible, un seul domaine demeure encore inexploré : celui de l'infrarouge lointain, proche des ondes radio. Pour relever ce nouveau défi de l'observation de ce rayonnement de très faible énergie, il faut repousser encore plus loin les limites actuelles de la technologie. La caméra du futur est équipée de détecteurs spécifiques, appelés bolomètres. Le défi consiste à éviter qu'elle ne se fasse aveugler par son environnement. Pour y parvenir, les astrophysiciens doivent obtenir leur refroidissement jusqu'à quelques millidegrés au-dessus du zéro absolu. Certaines de ces caméras fonctionnent déjà depuis le sol à partir d'étroites fenêtres atmosphériques laissant passer une partie de ce rayonnement. Mais la première grande exploration se fait désormais depuis l'espace grâce au satellite Herschel de l'Agence spatiale européenne (ESA) lancé avec succès le 14 mai 2009. À son bord, il emporte PACS (pour *Photoconductor Array Camera and Spectrometer*), caméra dotée de la plus grande matrice de bolomètres jamais construite, un succès majeur pour le CEA. Comme toutes les vraies



Caméra ISOCAM pour l'infrarouge (novembre 1995).

avancées scientifiques, comme tous les succès techniques, PACS incite pourtant à la modestie si l'on compare la taille de cette caméra et ses 2 048 éléments d'image, avec celle des grandes caméras astronomiques dédiées à l'observation de la lumière visible dotées, elles, de centaines de millions d'éléments d'image.

Dans beaucoup de domaines encore, les « lunettes » des chercheurs dépassent à peine celle de Galilée. L'exploration spatiale de l'invisible a toujours dû s'adapter au rythme des innovations technologiques : chaque fois, des outils spécifiques furent inventés et surtout portés au-delà de l'atmosphère. Ainsi, petit à petit, la part inconnue de l'Univers se réduit inexorablement. Pendant longtemps, les astrophysiciens ont donc été dans la position d'un mélomane qui n'entendrait que le son d'un seul instrument dans l'interprétation d'un ensemble musical mais qui, progressivement, élargirait sa perception à l'ensemble de l'orchestre. Aujourd'hui, le vœu des scientifiques serait de pouvoir enfin écouter l'ensemble de la grande symphonie du cosmos.



Première chambre à étincelles satellisée : expérience S 133 embarquée à bord du satellite européen TD-1 (mars 1972).

> Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS).
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Rayonnements cosmiques : les dates clés de leur découverte

Il ne faut pas se fier aux couleurs que nous donne à voir l'arc-en-ciel car il ne s'agit que d'une infime fraction de la palette des couleurs existantes. Notre œil humain ne peut les percevoir étant uniquement adapté à la lumière de notre étoile, le Soleil. C'est donc grâce aux travaux en laboratoire que d'autres rayonnements ont pu être découverts, étape par étape, par les chercheurs :

- 1800 : Le physicien William Herschel, s'aidant d'un simple prisme et de thermomètres, parvient à démontrer qu'en-deçà « du rouge » existe un autre rayonnement capable de chauffer le thermomètre : l'infrarouge. Il s'agit de la première avancée véritablement significative.
- 1800 : Procédant à une expérience similaire, Wilhem Ritter découvre qu'au-delà « du violet » un rayonnement s'avère capable de noircir le papier d'argent : c'est l'ultraviolet.
- 1810 à 1864 : James Maxwell unifie l'électricité et le magnétisme, ce qui lui permet d'avancer que la lumière visible n'est que le cas particulier d'un phénomène plus général : les ondes électromagnétiques.
- 1895 : Wilhelm Röntgen découvre que les décharges électriques dans les tubes à vide produisent des rayons encore inconnus (qu'il baptise donc rayons X) capables de traverser le verre.
- 1896 : Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle : de l'intérieur des noyaux d'atomes d'uranium émanent des rayonnements inconnus qui impressionnent les plaques photographiques.
- 1898 : Pierre et Marie Curie découvrent d'autres matériaux « radioactifs » (le polonium, le thorium, le radium), lesquels émettent des rayonnements baptisés rayons alpha et bêta (en réalité des particules).
- 1900 : Paul Villard découvre un rayonnement radioactif capable de traverser le plomb : le rayonnement gamma.

Pour la plupart, ces rayonnements sont arrêtés à différentes altitudes de l'atmosphère. L'astrophysique spatiale permet seule de les capter et donc de les étudier. Aujourd'hui, cette discipline fête tout juste ces 50 ans.

Sonder l'Univers sur toute la gamme lumineuse

La lumière est une **onde électromagnétique** qui peut être caractérisée par sa **longueur d'onde** ou sa **fréquence**. Les différents types de rayonnements se distribuent le long du **spectre électromagnétique** en fonction de leurs longueurs d'onde, des plus courtes (les rayons gamma) aux plus longues (les ondes radio), en passant par la lumière visible (figure 1). Il est aussi possible de décrire la lumière en termes d'une particule sans masse, le **photon**, dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence.

Les types de rayonnements

Le **rayonnement radio** (ou **ondes radio**) couvre la zone des fréquences inférieures à 1 GHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde supérieures à 30 cm. Le domaine des **micro-ondes** s'étend sur la gamme 30 cm (1 GHz) – 1 mm (300 GHz). Les longueurs d'onde relatives au **rayonnement infrarouge IR** sont comprises entre 780 nm et 1 mm. Ce domaine est subdivisé en **IR proche** (780 nm – 2,5 μm), **IR moyen** (2,5 – 27 μm), **IR lointain** (27 – 100 μm) et **IR submillimétrique** (100 μm – 1 mm). L'infrarouge est souvent relié à la chaleur car, à température ambiante, les objets émettent spontanément ce type de lumière. La **lumière visible** est la partie du spectre électromagnétique à laquelle l'œil humain est sensible. Ce domaine couvre un intervalle de longueurs d'onde allant de 380 nm (violet) à 780 nm (rouge). Les longueurs d'onde du **rayonnement ultraviolet UV** se situent entre 380 nm et 10 nm. Les



NASA, ESA, STScI, J. Hester and P. Scowen (Arizona State University)



ESO

Les trois « Piliers de la création » dans la nébuleuse de l'Aigle, observés par le télescope spatial Hubble en visible (à gauche) et en infrarouge (à droite). Le rayonnement infrarouge permet de voir à travers les nuages.

rayons X sont des ondes électromagnétiques de haute fréquence dont la longueur d'onde est comprise entre quelques fractions de nm (0,01 nm) et 10 nm. On distingue les **rayons X mous** (les plus grandes longueurs d'onde) et les **rayons X durs** (de petite longueur d'onde). L'énergie des photons associés aux rayons X varie entre 100 eV et 100 keV. Les **rayons gamma** (γ) ont une longueur d'onde encore plus courte, inférieure à 0,01 nm et les photons correspondants ont une grande énergie, supérieure à 100 keV. Nos yeux ne perçoivent qu'une partie infime de toute la lumière émise par les objets célestes. L'exploitation de toute la gamme des longueurs d'onde a ouvert des fenêtres sur l'Univers, qui ont permis

de détecter de nouveaux objets ou montré des objets déjà connus sous un autre jour. Cette capacité à scruter 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 il a été possible de s'affranchir 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. De plus, l'optique instrumentale a elle aussi vécu une révolution avec la construction de télescopes géants aptes à collecter la très faible lumière en provenance des astres les plus lointains.

Suite page 32

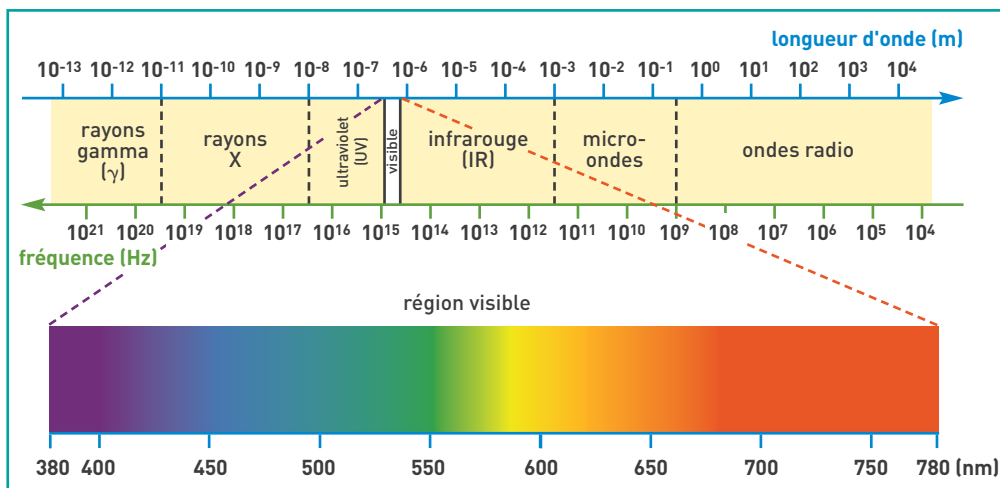


Figure 1. Spectre électromagnétique. Les ondes électromagnétiques se répartissent en familles de fréquences et de longueurs d'onde diverses.

Suite de la page 31

Ces nouveaux télescopes se distinguent également par l'emploi de techniques innovantes qui ont fait accomplir un bond en avant à la qualité des 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).

Des spectres riches d'informations

Toute matière dont la température est supérieure au **zéro absolu** (0 K, soit -273 °C) émet des ondes électromagnétiques qui forment le rayonnement thermique. À elle seule, la température fixe la puissance émise par un corps, proportionnelle à la puissance quatrième de la température. Ainsi, un corps dont la température absolue est 600 K (soit environ 320 °C) rayonne une puissance lumineuse seize fois plus grande qu'un corps à température ambiante (300 K, soit près de 27 °C). Toutes les longueurs d'onde sont présentes dans le rayonnement thermique mais en quantités inégales. C'est encore la température qui établit le **spectre** du rayonnement émis, c'est-à-dire la répartition de l'énergie entre les différentes longueurs d'onde présentes. Le maximum d'émission se fait pour une longueur d'onde inversement proportionnelle à la température. Autrement dit, un corps émet l'essentiel de sa lumière pour une longueur d'onde d'autant plus élevée qu'il est froid. Notre principale source de lumière, le **Soleil**, émet son maximum de puissance pour de la lumière visible jaune dont la longueur d'onde est voisine de 0,5 µm. Ceci correspond à une température de 5 770 K. Par ailleurs, un corps a la capacité d'émettre de la lumière à des longueurs d'onde bien particulières. En effet, un

atome ne peut émettre ou absorber une quantité quelconque d'énergie. Son énergie n'est susceptible de varier que par paliers bien définis, qui dépendent de la façon dont est arrangé son cortège d'**électrons**. Au cours d'une émission ou d'une absorption d'énergie, la répartition électronique de l'atome est modifiée. De la lumière est émise lorsqu'un électron effectue une transition d'un niveau d'énergie élevé vers un niveau d'énergie situé plus bas ; l'absorption de lumière correspond au passage d'un électron d'un niveau d'énergie inférieur vers un niveau supérieur. L'ensemble de ces transitions, qui se manifeste sous forme de **raies** dans le spectre, est caractéristique d'un atome et constitue sa carte d'identité. Ces **raies d'émission** se retrouvent aussi chez les **molécules**, collections d'atomes liés entre eux, seule la gamme de longueurs d'onde concernées étant affectée. Quand un gaz est traversé par de la lumière, il peut absorber celle dont la longueur d'onde correspond à ses raies. Il en résulte un **spectre d'absorption**, ensemble de raies sombres sur un fond lumineux, une sorte de code-barres qui permet d'obtenir des informations sur la source et sur le gaz absorbant. C'est ainsi que le spectre du Soleil est composé d'un spectre continu couvrant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, sur lequel se superposent des raies d'absorption caractéristiques des atomes présents dans l'atmosphère du Soleil.

Si le spectre d'une source permet de déterminer sa température et sa composition, il offre aussi la possibilité de mesurer bien d'autres paramètres importants. Ainsi, un **champ magnétique** sépare une raie spectrale en plusieurs raies proches (**effet Zeeman**). Ce décalage en longueur d'onde est mis à profit pour mesurer l'intensité du champ magnétique de certains objets astronomiques. Le spectre d'une source de lumière est égale-

redshift ou décalage vers le rouge	âge de l'Univers au moment de l'émission de lumière (milliards d'années)
0	13,7
0,5	8,7 (63,5 %)
1	6,0 (43,8 %)
2	3,4 (25 %)
3	2,2 (16 %)
5	1,2 (8,7 %)
7	0,8 (5,8 %)
10	0,5 (3,6 %)

Tableau. Quelques valeurs représentatives de l'âge de l'Univers au moment de l'émission en fonction du redshift de la source observée.

ment affecté par son mouvement relatif à l'observateur selon le même principe qui rend plus aigu le bruit d'un véhicule qui s'approche d'un observateur et plus grave celui de l'engin qui s'en éloigne. La variation apparente de fréquence (d'autant plus élevée que la longueur d'onde est plus courte) est proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source. La fréquence s'accroît lorsque la source lumineuse se rapproche de l'observateur (**décalage vers le bleu** ou **blueshift**) et décroît lorsqu'elle s'en éloigne (**décalage vers le rouge** ou **redshift**). Plus quantitativement, le **décalage spectral z** est égal à la variation relative entre la longueur d'onde observée λ_{obs} et celle prévue dans le référentiel au repos λ_0 . En d'autres termes, $z = \lambda_{obs}/\lambda_0 - 1$. Si z est positif, le décalage est vers le rouge et si z est négatif, il est vers le bleu. Cet effet a été découvert de façon indépendante par le Français Hippolyte Fizeau (1819-1896) et l'Autrichien Christian Doppler (1803-1853). Il est notamment utilisé pour connaître la vitesse de déplacement des **étoiles**. Ce phénomène physique, nommé de façon générale **effet Doppler**, est appelé **effet Doppler-Fizeau** lorsqu'il s'applique aux ondes lumineuses.

Enfin, on constate que les raies du spectre des objets lointains sont systématiquement déplacées vers les grandes longueurs d'onde (vers le rouge pour le spectre visible). Ce décalage vers le rouge est aisément mesurable car les raies spectrales des atomes sont identifiables et leurs caractéristiques bien connues grâce à des mesures en laboratoire (figure 2). Ce phénomène a été interprété

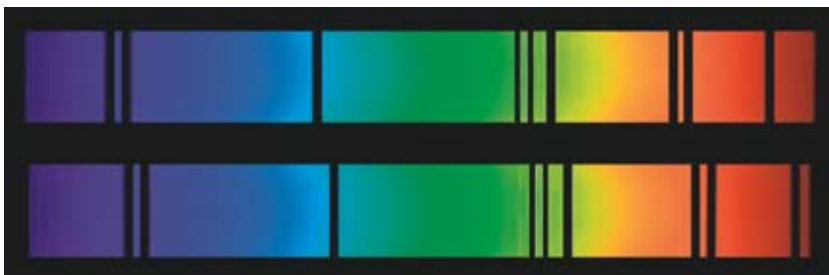


Figure 2. Spectre d'une source lumineuse sans décalage des raies (en haut) et avec décalage vers le rouge (en bas).

comme la preuve de l'*expansion globale de l'Univers*, qui affecte les échelles cosmologiques. Il résulte du fait que lorsqu'un rayonnement est émis, il nous arrive avec un délai temporel au cours duquel l'espace subit un étirement. C'est pour cela que sa longueur d'onde se dilate. Il est à noter que l'expansion cosmologique transforme le spectre des sources lointaines par un effet purement **gravitationnel**, sans rapport avec la vitesse de la source relativement à l'observateur (qui est la cause de l'effet Doppler). Le décalage vers le rouge de la lumière des sources lointaines révèle leur distance spatio-temporelle et permet de les classer par éloignement croissant (tableau).

Les lumières de l'Univers

Dans la quête de la compréhension de l'Univers *via* l'observation, les astrophysiciens exploitent l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma, chaque domaine spectral apportant des informations spécifiques (figure 3).

Le *rayonnement micro-ondes*, de grande longueur d'onde, est peu arrêté par la matière. Il sort sans difficulté des nuages sombres et froids à l'intérieur desquels se forment les étoiles. Ce rayonnement est idéal pour percer les secrets de ces nuages et observer les premiers stades du développement des étoiles. Quand naissent les étoiles, elles sont plongées dans la poussière et ne sont visibles

que par leur *rayonnement infrarouge*. Regroupées dans le ciel en **amas**, les jeunes étoiles se révèlent en *lumière visible*. La source d'énergie qui permet à une étoile de **briller** durablement provient des réactions nucléaires se produisant en son sein tout au long de sa vie. Une étoile ne vit pas éternellement et connaît une fin de vie mouvementée, au cours de laquelle son cœur très chaud et très dense finit par se révéler. Il brille alors d'une intense *lumière ultraviolette*. Les objets très chauds, de température supérieure à 10 000 K, émettent préférentiellement des rayonnements ultraviolets. Ceux de température supérieure au million de degrés émettent des rayons X. La mort spectaculaire des étoiles répand un souffle brûlant visible en rayons X. Certaines étoiles mortes laissent derrière elles un cœur très dense dans l'espace. Dans certains cas, plus extrêmes encore, le cœur de l'étoile se convertit en un astre plus exotique, un **trou noir**, dont la masse est susceptible d'atteindre une dizaine de fois la **masse du Soleil**. Le trou noir n'émet pas de lumière, mais la matière qui tombe sur lui peut être portée à de très fortes températures. Elle émet alors un rayonnement de haute énergie, sous forme de *rayons X* et *gamma*.

Combiner l'ensemble du spectre électromagnétique est donc essentiel pour comprendre la structure et l'évolution de l'Univers, chaque rayonnement révélant un aspect différent.

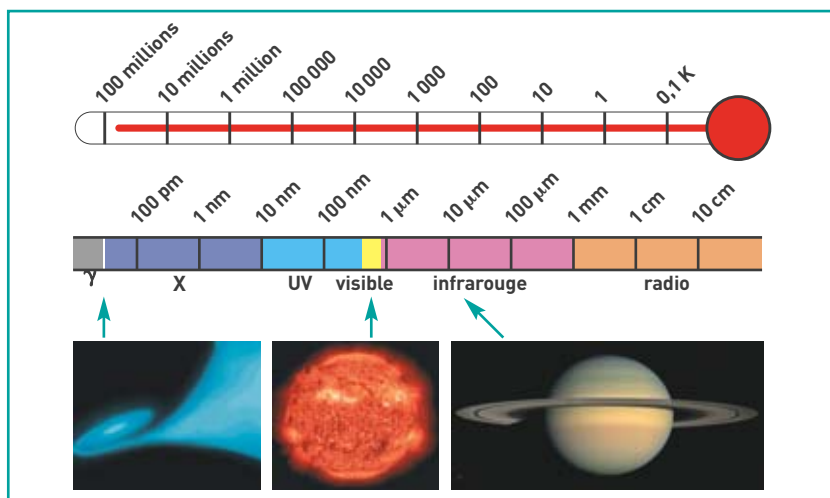
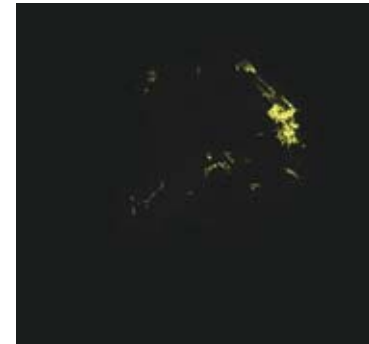
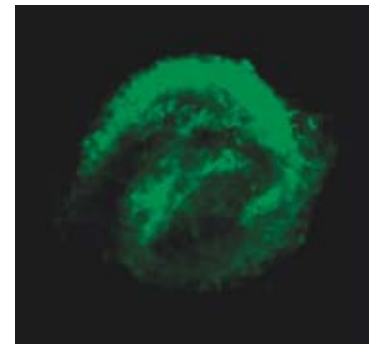


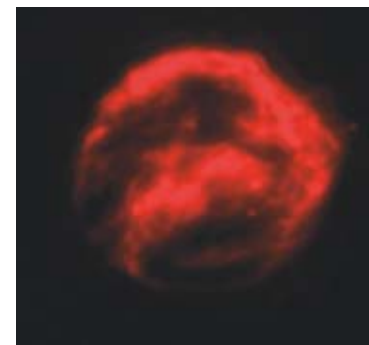
Figure 3. La distribution du rayonnement renseigne sur la température d'un astre et sur ses caractéristiques. Dans deux grandes parties du spectre électromagnétique, l'infrarouge d'une part, les rayons X et gamma de l'autre, les progrès de la détection spatiale permettent, par des mesures de plus en plus fines, d'accéder à des informations majeures sur les premières étoiles et **galaxies**.



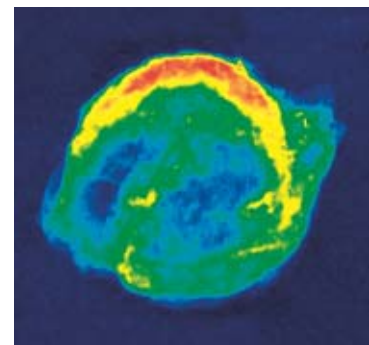
visible



rayons X



infrarouge



ondes radio

Reste de la **supernova** de Kepler (SN 1604), dont l'explosion visible à l'œil nu a été observée en 1604 par l'astronome allemand Johannes Kepler. La bulle de gaz émet aujourd'hui très peu de lumière visible. Elle brille en rayons X, en infrarouge et en ondes radio.