MÉMO A

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.

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.

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 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

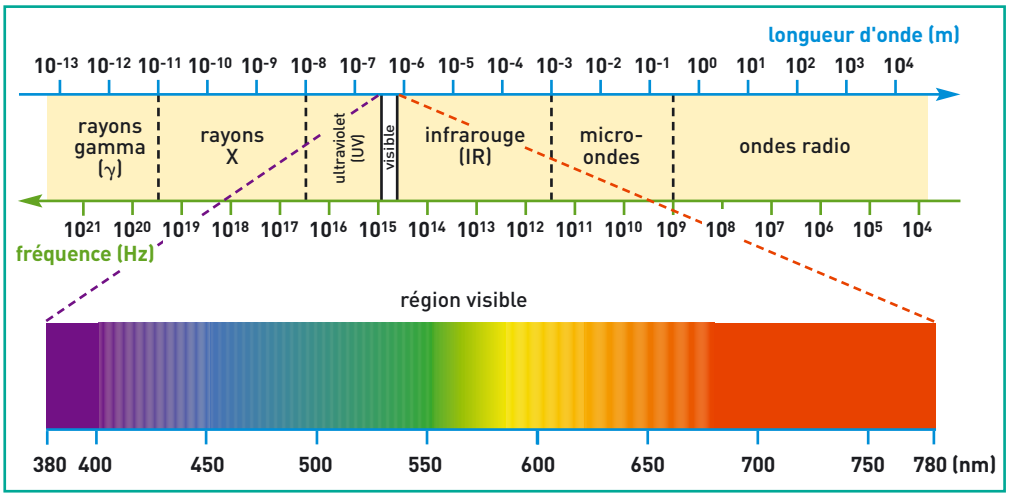


Figure 1.
Spectre électromagnétique.
Les ondes électromagnétiques se répartissent en familles de fréquences et de longueurs d'onde diverses.

MÉMO A

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 également 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

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.

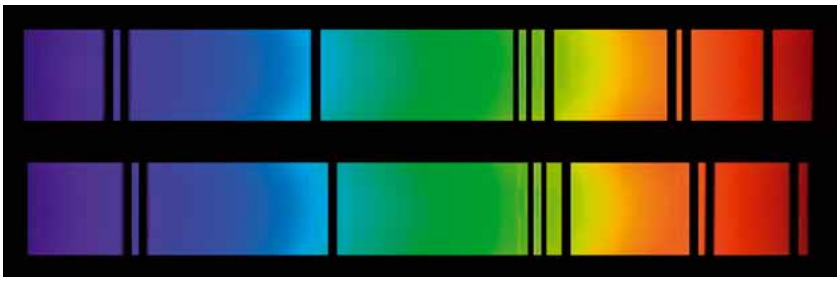


Figure 2.
Spectre d'une source lumineuse sans décalage des raies (en haut) et avec décalage vers le rouge (en bas).

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.

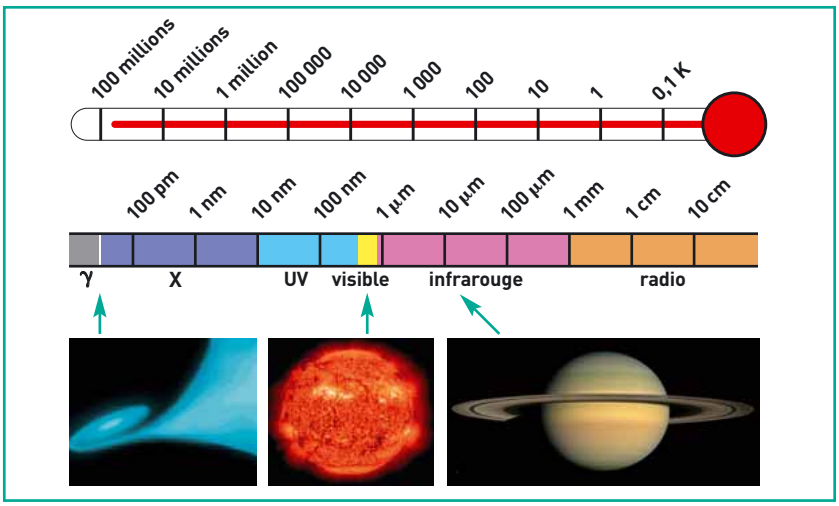
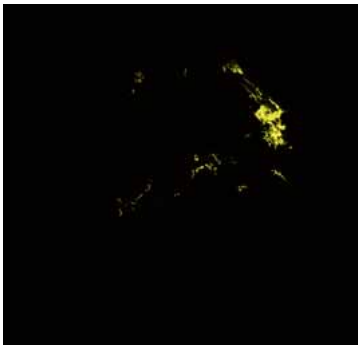
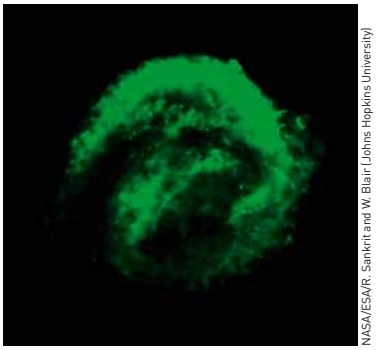


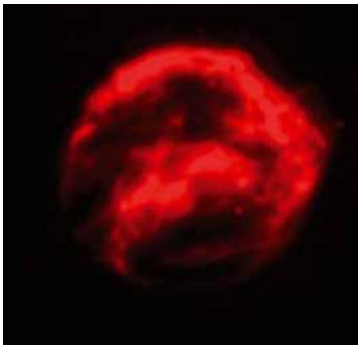
Figure 3.
La distribution du rayonnement renseigne sur la température d'un astre et sur ses caractéristiques. Dans deux grandes parties du spectre électromagnétique, l'infrarouge d'une part, les rayons X et gamma de l'autre, les progrès de la détection spatiale permettent, par des mesures de plus en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


NASA/ESA/R. Sankrit and W. Blair (Johns Hopkins University)

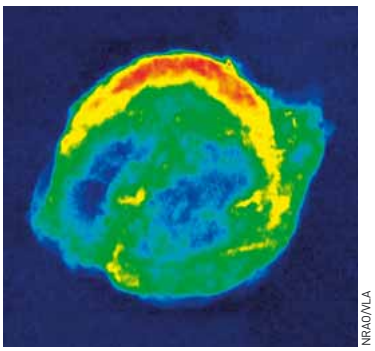
visible


NASA/ESA/R. Sankrit and W. Blair (Johns Hopkins University)

rayons X


NASA/ESA/R. Sankrit and W. Blair (Johns Hopkins University)

infrarouge


NRAO/VLA

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.