

Le ciel de l'invisible

Philippe Laporte, CNES

Philippe Laporte achève maintenant le voyage commencé dans le numéro précédent. Cette promenade galactique atteint ici les plus courtes longueurs d'onde (ultraviolet, X et γ).

4 - L'ultraviolet.

C'est le domaine des hautes températures (plusieurs dizaines de milliers de kelvins). C'est dans ces longueurs d'ondes là que l'on voit aussi la recombinaison¹ des électrons dans les noyaux légers. Quelles applications pour l'astronomie ?

Grâce à des observations précédentes, on sait que l'espace interstellaire des galaxies contient du gaz chaud et du gaz froid. Cependant, sa distribution est mal connue, de même que le taux d'ionisation et la cinématique.

Le satellite FUSE a été lancé en 1999 pour observer ce milieu galactique dans la bande [91-120 nm], largement inexplorée. Cette lacune est évidente lorsque l'on cherche des cartes du ciel en ultraviolet : c'est une quête peu aisée. L'un des objectifs de cette mission est d'observer le disque et le halo de notre Galaxie pour répertorier et déterminer les structures de gaz chaud. Pour cela, le satellite va traquer en particulier les ions O VI, c'est-à-dire l'oxygène ionisé 5 fois !

Grâce à sa sensibilité élevée, les astronomes devraient pouvoir réaliser des observations dans les deux plus proches galaxies (nuages de Magellan) et comparer les données issues de notre Galaxie.

Un autre enjeu, plus médiatique, est l'origine et l'évolution de l'Univers. La théorie du big bang est un modèle qui per-

met de calculer l'état de l'Univers pour différents âges. Cette théorie est largement acceptée en raison du bon accord entre calculs et observations astronomiques. En résumé, tout commence au temps de Planck, à $T = 10^{-43}$ s (en deçà, nous ne connaissons pas la physique). Ici, les hypothèses sur l'origine de l'Univers se perdent dans divers scénarii quantiques. Jusqu'à 10^{-32} s, particules élémentaires et force unique sont de rigueur. La température est alors de l'ordre de 1027 K. Cependant, la décroissance de cette dernière va autoriser des brisures de symétrie, entraînant successivement l'apparition des quatre forces que nous connaissons aujourd'hui : nucléaire forte (liaison des quarks²), nucléaire faible (responsable de la radioactivité), électromagnétique et la gravitation. C'est aussi à ce moment que seraient apparues les particules élémentaires qui constituent la matière de notre Univers (quark, électron, neutrino). Il faut attendre 10^{-6} s pour que les quarks s'assemblent et forment protons et neutrons. La température n'est plus que d'un milliard de degrés. Une centaine de secondes plus tard, la dilatation de l'Univers a suffisamment fait chuter la température pour l'apparition d'un phénomène essentiel : la nucléosynthèse primordiale. Elle a engendré les noyaux atomiques les plus simples (légers) : deutérium, hélium, lithium, ainsi que leurs isotopes. Au cours de cette période, la température a diminué suffisamment vite pour arrêter prématurément la nucléosynthèse

primordiale, l'empêchant de terminer son travail et de tout transformer en fer. C'est en effet l'élément le plus stable, il ne fournit aucune énergie et les étoiles n'auraient alors jamais pu se former... 99% de la matière visible aujourd'hui provient de ce moment là. Elle est composée à 75% d'hydrogène et 25% d'hélium, la quantité des autres éléments étant dérisoire. C'est pourtant eux qui vont être des indices sur les conditions physiques qui régnaient durant cette période. Car le scénario du big bang est encore un peu flou. Les paramètres physiques sont mal connus alors que la quantité des éléments issus de la nucléosynthèse primordiale dépend fortement de ces mêmes paramètres. C'est pour cette raison que le deutérium peut apporter un début de solution.

Le deutérium est un élément de choix car il est détruit à une température de l'ordre de quelques millions de degrés. Ainsi, le deutérium présent dans les étoiles disparaît de l'Univers. Le big bang étant le seul mode de production connu, la quantité de cet élément doit, par conséquent, diminuer dans le temps. L'UV a ici un rôle à jouer car le deutérium (un proton et un neutron) est visible dans ce domaine de longueur d'onde. En observant des milieux de métallicité variés (milieu interstellaire, le halo, les nuages intergalactiques ou les comètes), on peut chercher dans quelle mesure la formation d'étoiles a modifié l'abondance initiale en deutérium. Par la suite, la confrontation des abondances actuelles de cet élément (formation d'étoiles) et des variations dues aux générations précédentes successives (comètes pour le système solaire par exemple) permettra de calculer l'abondance primordiale et contraindre un peu mieux les paramètres du modèle de notre Univers.

L'atmosphère est évidemment opaque aux rayons ultraviolets grâce à la couche d'ozone en particulier. Il faut donc aller au-dessus pour observer le ciel dans ce domaine. L'expérience FOCA a été réalisée dans ce but. Elle a été embarquée sous un ballon stratosphérique (altitude jusqu'à 40 km) plusieurs fois au cours des dernières années. FOCA est un télescope imageur de 40 cm qui fournit une image du ciel en une seule bande passante centrée à la longueur d'onde de 200 nm environ (largeur de la bande environ 15 nm). La résolution angulaire est de 12 à 20 secondes d'arc respectivement selon la focale de l'optique utilisée. Depuis une décennie, le télescope a fourni environ une dizaine de directions dont la profondeur n'est que marginalement égalée par HST (Hubble Space Telescope) sur quelques petits champs. L'expérience est donc considérée toujours en pointe dans son domaine. Les images obtenues par cette expérience fournissent une grande quantité de détails sur des objets comme les galaxies, les amas de galaxies ou les amas globulaires.

Une autre solution consiste à envoyer des satellites. Ils ont l'avantage de rester plus longtemps en l'air pour réaliser des mesures et permettent une cartographie du ciel. Parmi les satellites lancés pour observer ce domaine de longueur d'onde, citons IUE et EUVE grâce auxquels le ciel ultraviolet a pu être cartographié dans ses grandes lignes d'un bout à l'autre du spectre. L'un des résultats est une carte (fig. 8) des étoiles chaudes (20 000 à 30 000 K).

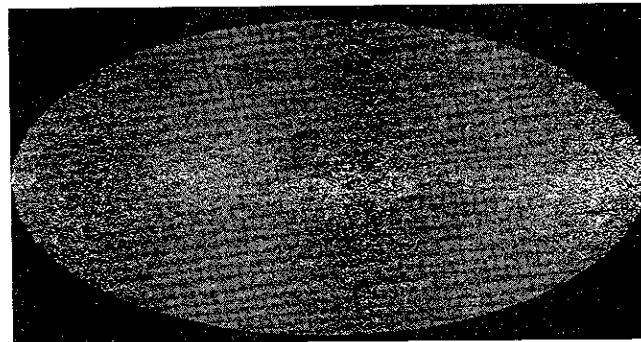


fig. 8 : Carte du ciel dans le proche ultraviolet. Ce sont les étoiles chaudes de type O et B (de 20 000 à 30 000 K) dont une grande partie de l'énergie est émise dans l'ultraviolet.

Dans la vie courante, les émetteurs d'ultraviolet sont assez rares. Il y a les anciennes lampes d'éclairage public et bien sûr le Soleil... Le monde serait donc bien sombre si nous ne voyions que dans ce domaine là !

5 - Les rayons X.

Nous entrons ici dans le domaine des hautes énergies (températures très élevées ou fort champ magnétique par exemple). Les objets concernés sont les disques d'accrétion autour d'objets compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs), les restes de supernovae (la raie du ^{44}Ti dans Cass A, ...), les noyaux actifs de galaxies et le gaz intra - amas que nous avons déjà rencontré avec l'effet SZ.

L'émission X des disques d'accrétion provient de l'échauffement de la matière qui est arrachée à l'atmosphère de l'étoile compagnon et qui spirale autour de l'objet compact. Compte tenu de l'intense attraction gravitationnelle (40 millions de fois celle de la Terre à 1000 km), la matière est fortement accélérée entraînant des frottements visqueux important qui chauffent le disque. Les supernovae, quant à elles, sont le résultat de la fin de la vie d'une étoile de quelques masses solaires. En une gigantesque explosion (environ 10^{42} joules) l'étoile expulse son atmosphère, où une première nucléosynthèse due à la température, l'a enrichie en matériaux légers (jusqu'au fer qui est stable et ne fournit aucune énergie lorsqu'on le fissionne ou le fusionne). L'onde de choc est si forte qu'elle engendre d'autres réactions nucléaires, synthétisant les éléments les plus lourds (du fer jusqu'à l'uranium). C'est d'une mort similaire que proviennent les éléments dont est fabriquée la Terre... et nous ! Les noyaux actifs de galaxies se divisent en 6 catégories dues à leurs caractéristiques observationnelles. On y trouve les quasars, les blazars, les radiogalaxies, les QSO, et les galaxies de Seyfert (de type 1 et 2). Ces appellations nous viennent des astronomes, qui, en analysant les données obtenues avec les télescopes X, ont progressivement découvert de nouveaux objets. Ils ont tenté de les classer en plusieurs catégories, selon leurs capacité lumineuses. Il se trouve que les sources ainsi répertoriées en 6 catégories ne sont en fait

qu'un seul et même type d'objet mais vu sous des angles différents. En effet, la présence de matière (absorption de la lumière) ou de phénomènes relativistes (émission de la lumière selon des directions privilégiées) modifient souvent l'aspect d'une source lumineuse selon l'angle sous lequel on la regarde... Attention aux illusions ! Les modèles actuels proposent un trou noir gigantesque (plusieurs millions de masses solaires !) au centre d'une galaxie, nourri par un anneau dense de matière interstellaire. Le champ gravitationnel de tel objets, associé à la quantité de matière qu'ils engloutissent, produit une quantité d'énergie fabuleuse, grâce à laquelle nous pouvons les détecter, malgré la distance qui nous sépare d'eux.

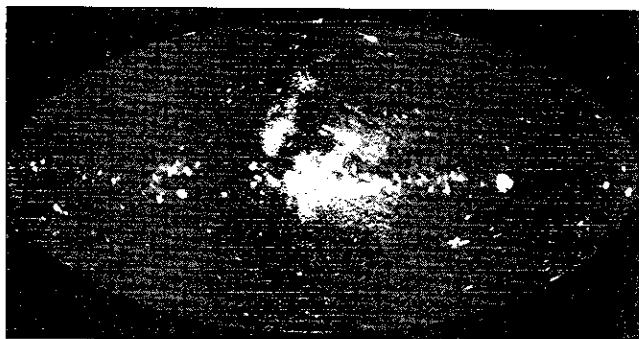


Fig. 9 : Le ciel en rayons X.

ROSAT est le satellite qui a permis de réaliser une cartographie du ciel en rayon X, dévoilant la population d'objets et leur répartition. La figure 9 montre le ciel à une énergie de 1 keV³. On y trouve de nombreux objets ponctuels, mais aussi un rayonnement diffus... Certains astronomes ont tenté d'expliquer son origine, mais leur tentative était vaine. En effet, en 1999, deux satellites pour l'observation des rayons X ont été lancés. Le premier, en juillet 1999 se nomme Chandra (US) et le second, en décembre 1999, se nomme XMM (Europe). Leur particularité tient dans leurs performances nettement meilleures que ROSAT. Leur résolution angulaire (environ 5 secondes d'arc) et leur sensibilité vont transformer notre vision du ciel en rayons X. Les premiers résultats issus de l'analyse des données de Chandra montrent qu'au moins 75 % du rayonnement diffus est en fait constitué de sources ponctuelles non résolues à l'époque ! Ainsi, les galaxies lumineuses (en visible) produisent la partie dure du spectre (haute énergie), les objets faiblement lumineux la partie intermédiaire et les quasars, la composante faible (basse énergie). Les analyses préliminaires des données du satellite XMM, qui dispose d'une meilleure sensibilité, confirmeraient le résultat. A titre d'exemple, une zone du ciel de coordonnées $\alpha = 13^{\text{h}}27$, $\delta = 0^{\circ}$ montre plus de 40 sources X là où il n'y en avait que 12 répertoriées avant le lancement du satellite !

Jusqu'à maintenant, les instruments qui permettaient d'observer les longueurs d'ondes étaient constitués, le plus souvent, par un réflecteur (miroir dans le cas du visible) et un détecteur (en silicium et refroidi à l'hélium liquide pour

l'infrarouge par exemple). Mais le pouvoir de pénétration des photons dans la matière est plus élevé lorsque son énergie augmente. Et nous atteignons une limite avec les rayons X : leur longueur d'onde est de l'ordre du nanomètre, c'est-à-dire à peu près la distance entre deux atomes ! Impossible d'arrêter efficacement les photons dans ces conditions. Notre grillage atomique n'est même plus assez petit...

C'est en 1913 qu'il faut chercher un début de solution. W.H. Bragg, avec l'aide de son fils, vient de développer une formule mathématique qui décrit un comportement particulier des rayons X en présence d'un cristal : la diffraction.

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad \text{où}$$

d est la distance entre deux plans cristallins

θ l'angle d'incidence du faisceau de rayons X

λ la longueur d'onde

n un entier, appelé ordre de la diffraction.

Cette formule géométrique donne une relation entre l'angle d'incidence que doit faire un faisceau de haute énergie et pour que la longueur d'onde λ soit déviée de manière cohérente. Il est ainsi possible d'infléchir la trajectoire des rayons X, un peu comme le ferait une lentille pour le visible. Mais cette équation est très sélective et la réalisation technique d'un anneau capable de répondre aux exigences théoriques n'a pu être effectuée que dans la dernière décennie. Ainsi, dans le cas de XMM, 58 cylindres concentriques, polis à l'angström près, constituent chacun des trois télescopes. C'est à ce prix que l'on peut focaliser le signal reçu sur un petit détecteur et augmenter la sensibilité des télescopes d'un à deux ordres de grandeur.

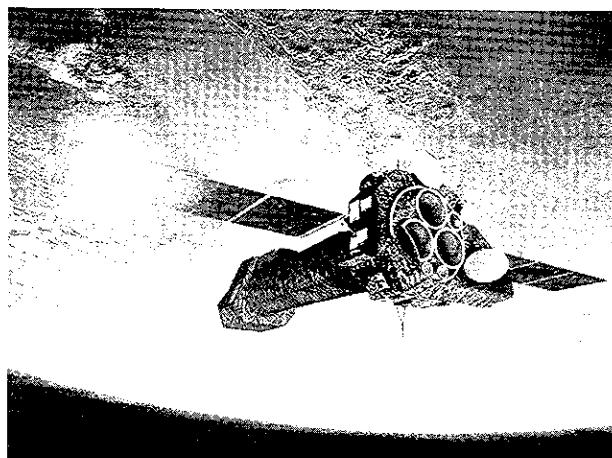


Fig. 10 : Vue d'artiste du satellite XMM en orbite autour de la Terre. Les trois ouvertures constituent l'entrée des trois télescopes.

Mais que verrions-nous avec des yeux regardant dans le X ? Pas grand chose, admettons-le, car il existe heureusement peu de sources de rayons X dans notre vie courante. Mais cela n'a pas toujours été le cas. Signalons que, dans les années 60, c'était le poste de télévision, mal blindé, qui émettait un peu de rayons X. Mais aujourd'hui, nous avons les

radiographies médicales qui comptent pour une part non négligeable dans la dose annuelle de rayonnements ionisants reçus. Cela dit, la majeure partie de la dose reçue est naturelle et provient du sol. Les habitants des régions granitiques sont ainsi plus exposés, en France, que les autres.

6 - Les rayons gamma.

Ce domaine d'énergie est réservé aux phénomènes les plus violents que l'Univers puisse produire. C'est dans cette gamme de longueur d'onde que nous allons voir les explosions nucléaires (novae et supernovae) et les objets exotiques, comme les sursauts gamma, tellement puissants, qu'un seul d'entre eux produit autant d'énergie que l'Univers entier durant une seconde ! Qui sont-ils ? Nul ne le sait. Découverts il y a près de 30 ans, on était sûr de peu de choses il y a encore quelques années. Leur répartition dans le ciel est uniforme, leur durée va de la fraction de seconde à quelques secondes, le spectre gamma présente diverses formes et surtout il n'y a jamais deux sursauts au même endroit. Deux théories s'affrontèrent donc pour expliquer cette répartition homogène :

- L'hypothèse d'objets proches, à l'intérieur de la galaxie. Elle a l'avantage de nécessiter peu d'énergie.
- L'hypothèse cosmologique, devant avancer des phénomènes comme la fusion de deux étoiles à neutrons en un trou noir pour expliquer la quantité phénoménale d'énergie nécessaire pour être si visible d'aussi loin.

En janvier 1999, le télescope spatial Hubble, grâce à une alerte donnée rapidement, pointe en direction d'un sursaut et en prend un spectre. Résultat : ce dernier comporte des raies d'absorption, dues à de la matière présente entre l'observateur et le sursaut, à $z = 1,6$! Cela porte les sursauts à plusieurs milliards de parsecs... rendant caduque la première hypothèse. Mais l'origine des sursauts et de la colossale énergie produite reste un mystère.

Les supernovae sont des objets extrêmement importants dans l'Univers car elles expulsent leur atmosphère riche en éléments lourds (numéro atomique supérieur à 4) et ensementent ainsi le milieu interstellaire de la galaxie hôte. C'est grâce à elles qu'existent tous les matériaux dont nous disposons sur Terre.

L'astronomie gamma constitue un outil formidable pour étudier ces objets et comprendre leur fonctionnement car les raies gamma observables sont les empreintes digitales des noyaux atomiques. De la même manière qu'un atome est reconnaissable aux raies UV et X de la couche électronique, les noyaux sont identifiables grâce aux raies gamma qu'ils émettent lorsqu'ils sont instables, c'est-à-dire radioactifs. Or, tous les noyaux instables ont une demi-vie, soit une durée au bout de laquelle la moitié des atomes se sont déséxcités (en émettant un photon gamma). Certaines demi-vies sont courtes (77 jours pour le ^{56}Ni), d'autres très longues (4.5 milliards d'années pour le ^{238}U). C'est pour l'astronomie gamma un avantage. Car détecter des noyaux radioactifs dont la

demi-vie est courte signifie qu'ils ont été synthétisés depuis peu dans la même zone. Cela permet d'estimer les quantités des divers éléments, leur rapport d'abondance et finalement contraindre fortement les modèles d'explosion.

Ainsi, la supernova SN 1987A, qui a eu lieu dans le nuage de Magellan, à seulement 170 000 années de lumière a permis d'invalider plusieurs de ces modèles. C'est aussi ces mêmes éléments radioactifs qui fournissent l'énergie à l'atmosphère éjectée, lui permettant ainsi de rayonner. La pente de la courbe de luminosité de la supernova en fonction du temps va donc dépendre de la demi-vie des éléments radioactifs et de leur quantité. Le principal apport d'énergie est fourni par le ^{56}Ni , puis la pente présente une cassure lorsque ce dernier a disparu pour moitié. C'est alors le ^{56}Co , de demi-vie plus longue qui prend le relais.

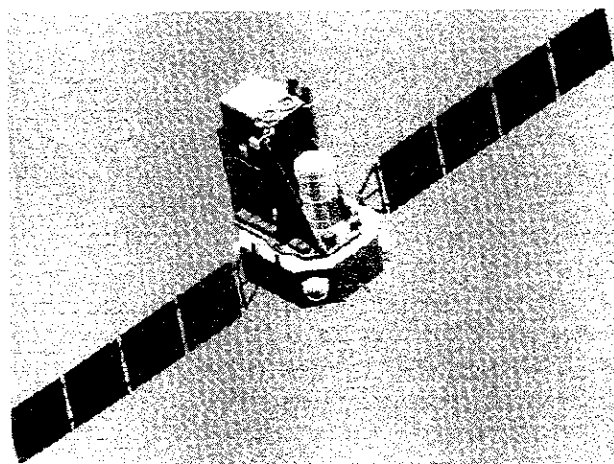


Fig 11 : Dessin du satellite INTEGRAL. Le cylindre en premier plan constitue le spectromètre SPI destiné à l'observation du ciel en gamma.

Le principal instrument d'observation dans ce domaine de longueur d'onde a été le satellite COMPTEL, embarquant à son bord quatre expériences différentes de manière à couvrir le plus large spectre possible. Après neuf années de fonctionnement, ce satellite a été volontairement détruit dans l'atmosphère terrestre avant qu'il ne devienne incontrôlable. Grâce aux centaines d'orbites réalisées, plusieurs cartes du ciel ont pu être réalisées (pour la répartition de ^{26}Al par exemple, figure 12), des milliers de sursauts gamma ont été répertoriés et il revient à CGRO la découverte des blazars.

La suite se nomme INTEGRAL (fig. 11), un observatoire européen disposant lui aussi de plusieurs instruments, permettant cette fois de couvrir des rayons X aux rayons gamma. Doté d'une meilleure sensibilité que CompTEL, les limites de la zone observable devraient reculer, augmentant le nombre d'objets à étudier. A plus long terme, l'avenir se nomme CLAIRE. Car depuis peu, il est aussi possible de focaliser les photons gamma, grâce au même procédé que les rayons X. La difficulté provient de la finesse des réglages angulaires des cristaux. Un premier vol ballon a eu lieu en

juin 2000 pour vérifier le fonctionnement des équipements. Un second vol, prévu pour juin 2001, est nécessaire pour valider l'instrument. Si cela s'avère, plusieurs vols sont déjà prévus par les scientifiques pour élucider par exemple le mystère du grand annihilateur situé au centre de notre galaxie.

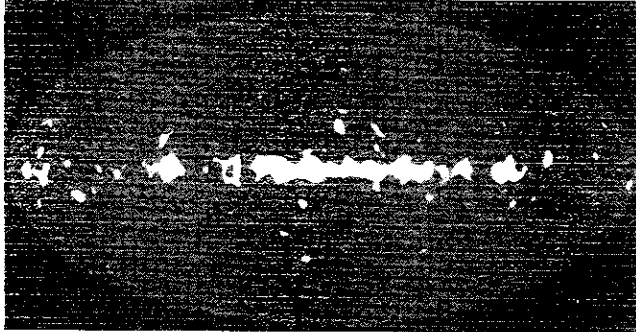


Fig. 12 : Répartition de ^{26}Al dans notre galaxie. C'est un élément radioactif de longue demi-vie (1 million d'années). Il a donc le temps de se disperser dans la galaxie et de se mélanger avec les restes d'explosions d'autres supernovae. Ses progéniteurs sont principalement les étoiles de type spectral O.

Conclusion

Notre voyage à travers les longueurs d'ondes est terminé. Retour dans le visible. Nous n'avons fait que survoler les différentes fenêtres, effleurer les techniques d'observation et les instruments qui existent. Mais on constate déjà qu'excepté le visible, l'exploration des domaines de longueur d'onde n'en est qu'à son début. Le fourmillement d'objets à étudier qui peuplent la voûte céleste va encore certainement nous surprendre et nous émerveiller. Mais nul besoin d'instruments gigantesques pour faire des découvertes sensationnelles. Car peut-être verrons-nous dans peu de temps une supernova exploser ? Alors à votre prochaine sortie nocturne, levez le nez, on ne sait jamais !

Notes

1 - Un atome est constitué d'un noyau (protons et neutrons) autour duquel des électrons forment un nuage électronique. Si l'un d'eux absorbe assez d'énergie, il peut s'éjecter de l'atome. Dans ces conditions, l'atome n'est plus neutre. L'opération inverse qui consiste à récupérer un ou plusieurs électrons s'appellent la recombinaison. L'électron doit alors libérer de l'énergie, sous forme d'un photon (UV ou X).

2 - Les quarks sont les plus petites briques actuellement connues et se classent en trois familles (électronique, muonique et tauique). Chacune est constituée de de 4 membres :

2 quarks, 1 lepton et 1 neutrino. Cependant, la matière que nous connaissons et dont nous sommes fabriqués n'utilise qu'une seule famille (électronique) dans laquelle les quarks se nomment up et down. Ainsi, un proton est fabriqué à partir de deux quark up et un quark down. Ce sont les protons et les neutrons qui forment le noyau d'un atome. Enfin, l'électron et le neutrino électronique sont les autres particules élémentaires de cette famille.

3 - L'eV est l'unité d'énergie utilisée lorsque les quantités sont faibles. 1 eV correspond à l'énergie d'un électron sous une différence de potentiel de 1 volt. $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Dans le domaine des hautes énergies, les photons sont en général caractérisés par l'énergie qu'ils véhiculent et non par leur longueur d'onde. Il existe une relation de passage d'une unité à l'autre. L'énergie E (en joules) est donnée par : $E = h.c / \lambda = 1,988 \times 10^{-25} / \lambda$, où h désigne la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde en mètres.

Note bibliographique :

Pour approfondir les thèmes abordés ici, je ne peux que conseiller ces deux excellents livres. Le premier est axé sur l'astrophysique et les connaissances actuelles. Idéal pour se rappeler des éléments essentiels (exercices à l'appui !) parfait pour rafraîchir ses connaissances en la matière. Le second illustre richement l'évolution du savoir en la matière au cours des âges. C'est un voyage dans le temps qui est proposé ! En vous souhaitant une bonne lecture !

Marc Seguin et Benoît Villeneuve, "Astronomie et Astrophysique", Ed. Masson, 1995.

J.P. Luminet et M. Lachièze-Rey, "Figures du ciel", Ed. Seuil/BNF, 1998.

