

Quasar 95

Club d'astronomie de Frouville

Hervé Radureau (Février 2015)

RAYONNEMENTS ET MAGNITUDES

Avant d'arriver aux magnitudes apparentes qui sont la mesure de l'éclat d'un objet céleste reçu à la surface de la Terre, je vais essayer de vous présenter quelques notions sur le rayonnement « lumineux » de ces objets.

En conséquence, je passerai sûrement moins de temps, voire pas de temps du tout, sur la seconde partie consacrée aux magnitudes dont le sujet vous a déjà été exposé à plusieurs reprises depuis la création du club.

VITESSE ET NATURE DE LA LUMIERE

La lumière est ce qui nous permet de voir les objets du ciel et en fait toute chose en astronomie, que celle-ci émette effectivement de la lumière produite en son sein (étoiles et nébuleuses) ou qu'elle reflète la lumière émise par un autre corps (cas des planètes, astéroïdes et comètes).

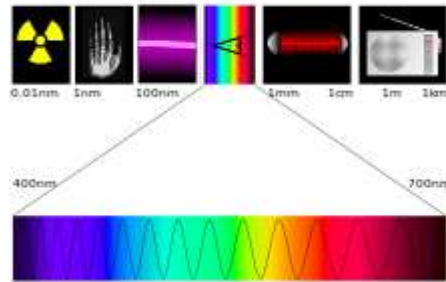
Mais comme le disait Hubert Reeves dans son livre « Patience dans l'azur » sous-titré « L'évolution cosmique » : *Regarder loin, c'est regarder tôt*. En effet, Einstein pour mettre en évidence sa théorie de la relativité restreinte s'est appuyé en 1905 sur le fait que la lumière avec une vitesse dans le vide notée c (évaluée à 300 000 km/s) était un déplacement avec une célérité qu'aucun autre mouvement ne pouvait dépasser. Les dimensions de l'Univers sont telles que l'on parle de milliards d'années-lumière (AL), où l'AL est une distance, c'est-à-dire celle parcourue dans le vide par la lumière pendant un an : un signal électromagnétique émis par le soleil met ainsi 8 mn à nous parvenir (et pour Rosetta il s'agit de 26 mn) alors que ces objets sont finalement très très près de nous, à peine quelque centaines de millions de km !

Il faut noter que la vitesse de la lumière dans un milieu autre que le vide (ou l'air) est donc plus petite que c : par exemple dans une fibre optique, elle est réduite à 200 000 km/s et à 225 000 km/s dans l'eau.

Au stade actuel de nos connaissances, nous sommes obligés de considérer la lumière comme étant en fait de 2 natures qui paraissent contradictoires l'une de l'autre : et c'est la mécanique quantique qui traite le mieux de ces aspects qui viennent bousculer toutes nos façons d'appréhender les choses, si bien que même encore quelques scientifiques se trouvent déboussolés, mis en difficulté pour comprendre ce à quoi ils sont confrontés avec le progrès permanent de ces connaissances.

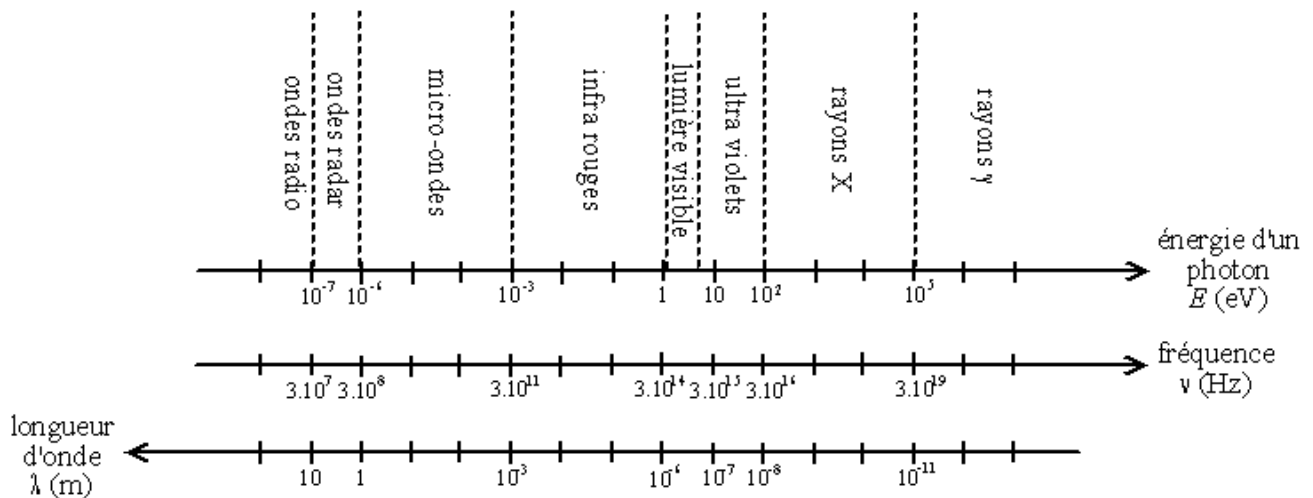
La lumière est donc à la fois de nature corpusculaire – et les particules sont appelées *photons*- et de nature ondulatoire – et on parle alors d'*ondes*, d'*interférences*, de *réflexion* et *diffraction*, etc. En fait, cette dualité s'applique à toute particule comme l'électron en mouvement avec une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide.

La lumière est aussi bien plus que le seul spectre visible à nos yeux (longueurs d'onde de 0,4 à 0,8 μm) et cette situation est tirée à profit par les astronomes depuis quelques dizaines d'années pour élargir le champ des observations en construisant des télescopes qui permettent de récupérer les signaux du spectre complet de la lumière des objets du ciel depuis les rayons Gamma jusqu'aux grandes ondes Radio. Sur ce sujet, Je ne peux que vous recommander la lecture du livre de Yaël Nazé intitulé « *Les couleurs de l'Univers* ».



Le spectre électro-magnétique complet en bandes

Si un photon a une fréquence ν , alors il a une énergie $E=h*\nu$: rappelons au passage que si c est la vitesse de la lumière dans le vide, alors la longueur d'onde λ associée au photon a pour valeur $\lambda = c / \nu$, ce qui permet d'avoir un lien bien utile entre les 2 natures de la lumière.

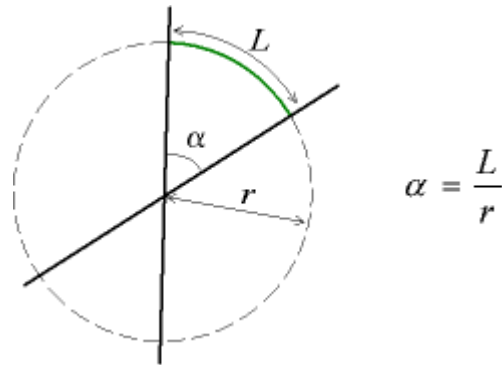


Le spectre électro-magnétique avec des ordres de grandeurs

Dans un milieu autre que le vide d'indice n ($n>1$) comme l'eau ($n=4/3$) pour une longueur d'onde donnée, la vitesse est réduite à $v=c/n$.

UN PEU DE GEOMETRIE CIRCULAIRE ET SPHERIQUE

Dans un plan (espace à 2 dimensions), on a la notion **d'angle plan** qui mesure en grades (ou degrés centigrades), en degrés (ou degrés sexagésimaux) ou en radians l'écartement entre 2 droites sécantes (qui se coupent)



$$\alpha = \frac{L}{r}$$

Angle plan

On a l'équivalence suivante pour un cercle: un tour complet = $400 \text{ gr} = 360^\circ = 2 \pi$ radians

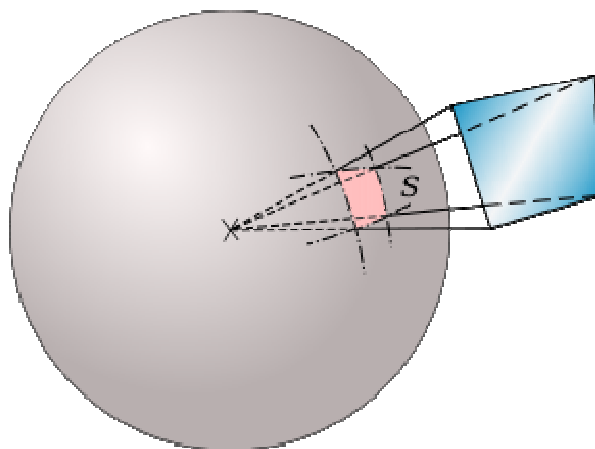
Et ainsi on a appris que la circonférence ou périmètre d'un cercle de rayon R valait $2 \pi R$

De façon plus générale, l'arc de cercle correspondant à un angle α a donc une longueur $L = R \alpha$

Et on a aussi appris que la surface d'un cercle valait $S_c = \pi R^2$

Dans l'espace (à 3 dimensions), au lieu du cercle on s'intéresse plutôt à la sphère de rayon R dont la surface vaut $S_s = 4 \pi R^2$ et le volume $V_s = \frac{4}{3} \pi R^3$

On définit l'**angle solide** de la façon suivante



L'**angle solide** Ω est le rapport entre la surface (en rose) de la projection d'un objet sur une sphère et le carré du rayon R de celle-ci. Ici, l'objet dont est mesuré l'angle solide est une surface quadrilatère (en bleu).

Ainsi on a $\Omega = S/R^2$

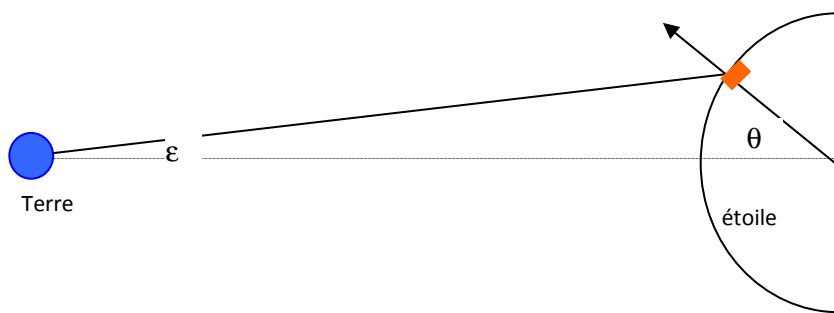
Un angle solide s'exprime en stéradian : 1 stéradian correspond à une surface de 1m^2 sur une sphère de 1 m de rayon.

Si finalement la surface S est celle de la sphère soit $4\pi R^2$, on en déduit que l'angle solide maximal vaut donc 4π stéradians.

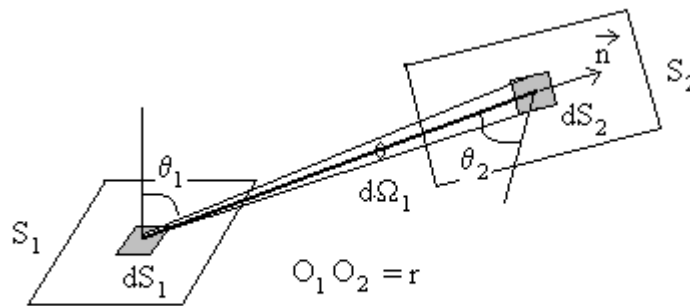
Donc une surface de 1m^2 d'une étoile de rayon R correspondra à un angle solide de valeur $1/R^2$ stéradian.

Et enfin une surface S_{1T} de 1m^2 à la surface de la Terre située à une distance D de l'étoile de rayon R correspondra à un angle solide de valeur $1/D^2$ stéradian : dans ces conditions la surface S_{1e} correspondante sur l'étoile sera tel que $S_{1e}/R^2 = 1/D^2$ soit $S_{1e} = R^2/D^2$

Notez que la surface S_{1T} va recevoir une partie de la lumière de l'ensemble des surfaces S_{1e} composant la demi-sphère de l'étoile faisant face à la Terre.



La contribution d'une surface individuelle



Les données mathématiques de base

Dans notre cas, on pourra dire que S_1 est toujours perpendiculaire à la direction Terre-Etoile et donc θ_1 sera nul. De son côté θ_2 dépendra de la latitude θ du lieu de la surface S_2 ($\theta_2 = \theta + \varepsilon$ soit $\theta_2 = \theta$ puisque ε quasiment nul)

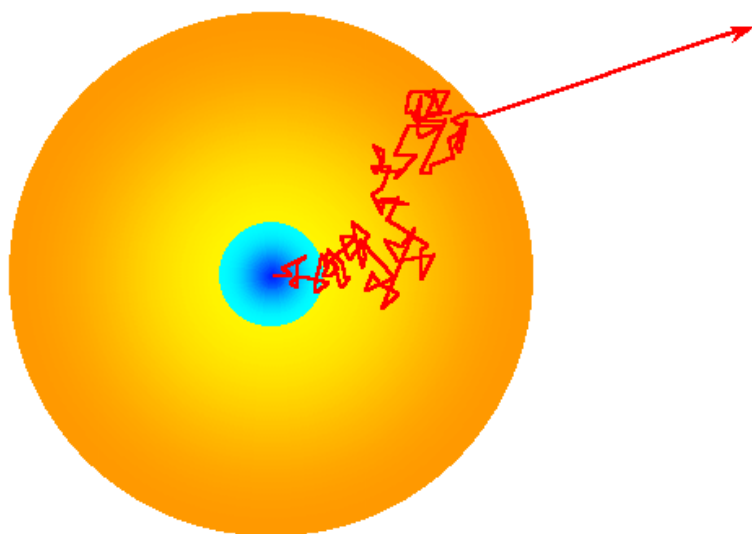
Un concours est lancé pour calculer mathématiquement l'éclat monochromatique $E(\lambda)$ reçu de l'étoile !

RAYONNEMENT DES ETOILES

Production de la lumière

Une étoile, comme notre Soleil, est une gigantesque boule de gaz (100 fois la taille de la Terre), dont le cœur, porté à des températures d'une dizaine de millions de degrés par le poids de l'étoile elle-même, est le site de réactions de **fusion thermonucléaire**.

La pression au centre du Soleil est environ de deux cents milliards de fois la pression sur Terre au niveau de la mer, ce qui l'empêche ainsi de s'effondrer sous son propre poids (on appelle cela l'équilibre hydrostatique). Ces réactions, en convertissant l'hydrogène en hélium, produisent de l'énergie sous forme de rayons gamma (photons très énergétiques) qui diffusent très lentement vers l'extérieur.



Cette énergie finit par sortir de l'étoile (en un million d'années environ) sous forme de rayonnement visible que l'on perçoit avec nos yeux.

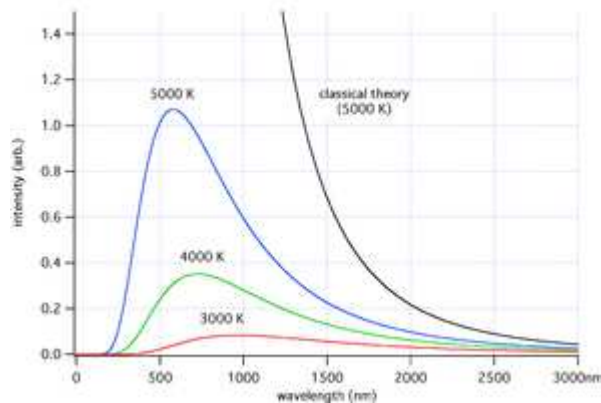
La surface de l'étoile, la photosphère, a une température qui peut varier entre 1700° pour les plus froides et 40000° pour les plus chaudes.

Le spectre émis à la base de la photosphère est celui d'un [corps noir](#).

Les étoiles sont modélisées comme des corps noirs

Les étoiles sont donc considérées comme des corps noirs, c'est-à-dire qu'elles émettent à leur surface un spectre continu d'ondes de lumière de la plus petite (nulle) à la plus grande taille (infinie). Ce spectre dépend en fait essentiellement de la température T de leur surface (plusieurs milliers de degrés K) mais est quelque peu perturbé par leur couronne qui est toujours beaucoup plus chaude.

On fait l'hypothèse que les conditions d'émission du rayonnement sont isotropes, c'est-à-dire identiques pour toutes les directions d'émission possibles.



Courbes de rayonnement d'un corps noir en fonction de sa température T de surface

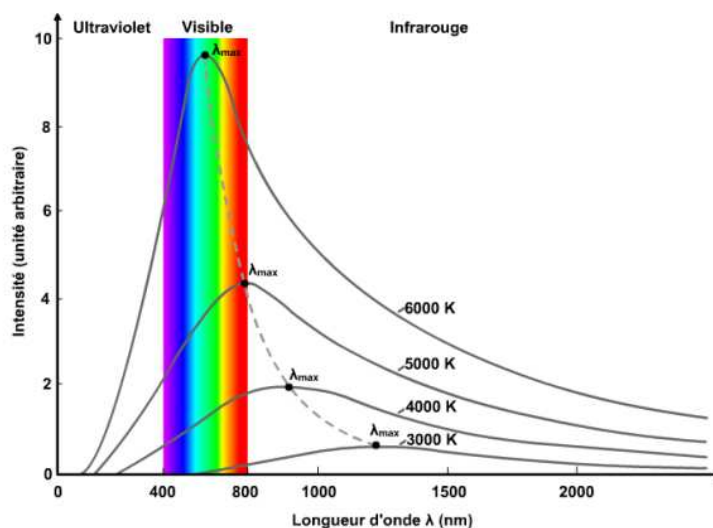
LOI DE PLANCK: La luminance monochromatique (ou spectrale) L_{λ}^{ν} pour une longueur d'onde λ donnée (ou densité spectrale d'émission) du corps noir est donnée par la loi de Planck :

$$L_{\lambda}^{\nu} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} \text{ avec } L_{\lambda}^{\nu} \text{ en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}.$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide, h est la constante de Planck et k_B est la constante de Boltzmann.

Ce flux d'énergie par seconde, donc une puissance, correspond à une surface d'émission unitaire d'un m^2 pour un angle solide unitaire d'un stéradian et une unité de longueur d'onde.

On s'aperçoit que le spectre visible couvre assez bien les parties de maximum d'intensité des courbes de rayonnement des corps noirs



Le point de luminance maximale de chaque courbe suit la loi de Wien (en fait il suffit de rendre nulle la dérivée de la fonction L_{λ}° précédente)

LOI DE WIEN : Le maximum de ce spectre est donné par la loi de Wien :

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965 \cdot k_B T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

avec λ_{max} en mètres et T en kelvins.

Cette dernière loi exprime le fait que pour un corps noir, le produit de la température et de la longueur d'onde du pic de la courbe est toujours égal à une constante. Cette loi très simple permet ainsi de connaître la température d'un corps assimilé à un corps noir par la seule position de son maximum.

Si maintenant on s'intéresse à l'ensemble du spectre et non plus à une seule longueur d'onde l'énergie totale émise par seconde et par m^2 est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann (Intégration de la fonction L_{λ}° précédente de 0 à +l'infini, soit la surface entre le dessous de la courbe et l'axe des abscisses et pour toutes les directions possibles).

LOI DE STEFAN-BOLTZMANN: D'après la loi de Stefan-Boltzmann, la densité de flux d'énergie ou densité de puissance ou émittance énergétique (en $W m^{-2}$) émis par le corps noir varie en fonction de la température absolue T (exprimée en kelvin) selon la formule :

$$M^{\circ}(T) = \sigma T^4$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut environ $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$.

On a la relation suivante entre les émittances et les luminances (respectivement monochromatiques et totales) :

$$M_{\lambda} = \pi L_{\lambda} \text{ et } M = \pi L$$

Ceci résulte de l'intégration sur le demi-espace des angles solides $d\Omega$ dans toutes les directions de la surface unitaire émettrice du rayonnement

De cette loi, on déduit que le flux énergétique total par seconde d'une étoile de rayon R , appelé Luminosité est donné par la formule $L = S_E * M$ ce qui aboutit ici pour une étoile assimilée à une sphère à :

$$L_E = 4 \pi R^2 * \sigma T^4 \text{ (en W)}$$

Dans ces conditions, on va maintenant pouvoir définir l'éclat E d'une étoile à la surface de la Terre (les rayons de l'étoile et de la Terre sont négligeables par rapport à la distance D entre l'étoile et la Terre qui relie leurs centres).

L'éclat E est défini comme la puissance reçue d'une étoile pour une surface S de $1m^2$ sur Terre.

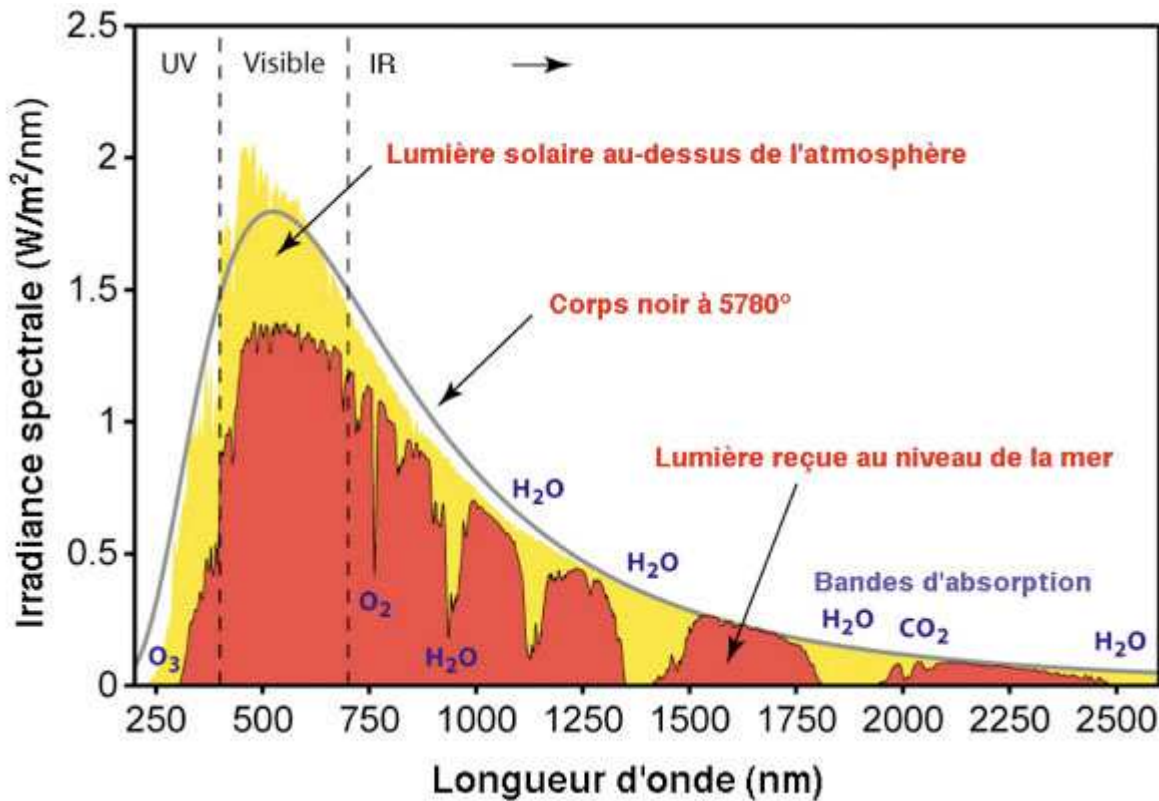
Si L_E est la luminosité totale d'une étoile dans toutes les directions, alors la Terre à la distance D de cette étoile reçoit sur une surface S_{1T} unitaire soit $S_{1T} = 1m^2$ seulement une proportion de celle-ci qui correspond au rapport entre l'angle solide Terre-Etoile pour cette surface unitaire soit $S_{1T} / D^2 = 1/D^2$ et l'angle solide de toutes les directions possibles soit 4π ce qui conduit à :

$$E = L_E / 4\pi D^2 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$$

Et pour simplifier on pourra généraliser cela pour une longueur d'onde donnée soit un éclat monochromatique $E(\lambda) = L_E(\lambda)/4\pi D^2$ ($W.m^{-2}.m^{-1}$)

Cas de notre soleil

Intéressons-nous au cas de notre étoile, le Soleil avec 2 positions d'observation pour recevoir sa lumière, l'une à la surface de la Terre (rouge) et l'autre à la surface de l'atmosphère (jaune), comparées de plus à la courbe théorique du rayonnement d'un corps noir à la température de $T=5780$ K (courbe continue grise).



On voit avec la courbe d'Eclat hors atmosphère que la modélisation du soleil comme un corps noir dont la température de surface est aux alentours de 5780 K est une approche très valable.

La lumière émise par une étoile non cachée doit tout de même traverser le milieu inter-stellaire (MIS) pour nous parvenir et subit ainsi des absorptions beaucoup plus fortes pour les longueurs d'onde courtes.

Comme on le voit ici, on peut corriger le spectre reçu d'une étoile en considérant que les niveaux d'éclat pour les bandes à grandes longueurs d'onde sont corrects et ainsi déterminer à quelle courbe de rayonnement de corps noir on a affaire.

A noter aussi qu'en pratique, le récepteur est soit notre œil, soit le récepteur de notre appareil photographique (cas de vision directe) soit l'objectif de notre instrument d'observation amateur (vision indirecte agrandie) correspondant donc à une surface bien inférieure à la surface unitaire S_{1T}

RAYONNEMENT DES NEBULEUSES

De leur côté les nébuleuses soit n'émettent qu'un spectre de raies qui dépend de leur composition, soit induisent des raies d'absorption importante dans le spectre de l'étoile en arrière-plan qui les éclaire.

Un peu de physique atomique

Les raies absorbées ou émises correspondent principalement à des mouvements d'électrons s'éloignant ou se rapprochant du noyau de l'atome considéré.

Le mouvement d'éloignement d'un électron peut conduire à l'ionisation de l'atome si l'énergie reçue est supérieure au potentiel d'ionisation.

Les changements d'orbite d'un électron nécessitent un quantum de moment cinétique ou un multiple de ce quantum qui vaut $h/2\pi$: l'énergie correspondante est le potentiel d'excitation.

Lorsqu'un électron passe d'un niveau n à un niveau m inférieur dans un atome de numéro atomique Z , un photon est émis avec une longueur d'onde λ telle :

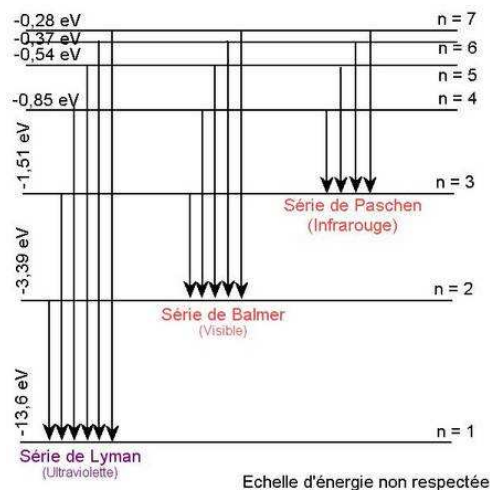
$$1/\lambda = Z^2 R_0 * (1/m^2 - 1/n^2)$$

Où R_0 est la constante de Rydberg valant $109\,677,581\text{ cm}^{-1}$

Pour l'atome d'hydrogène on a $Z=1$ et donc $\lambda = 1/ R_0 * m^2 n^2 / (n^2 - m^2)$ soit $\lambda = 912 * m^2 n^2 / (n^2 - m^2)$ A(ngström)

On obtient ainsi les différentes séries de raies :

- Lyman pour un retour au niveau $m = 1$
- Balmer pour un retour au niveau $m = 2$ (avec les raies connues dans le spectre visible ($H\alpha$, $H\beta$, ...))
- Paschen pour un retour au niveau $m = 3$
- Brackett pour un retour au niveau $m = 4$
- Pfund pour un retour au niveau $m = 5$



On peut aussi avoir l'émission d'un spectre continu juste en dessous de la raie de plus petite longueur d'onde de la série lié à la capture d'électrons par des atomes ionisés (phénomène appelé discontinuité de Balmer)

Les nébuleuses en émission

WIKIPEDIA : Les nébuleuses en émission sont de différents types :

Les régions HII

Régions d'activité intense où se forment les étoiles, la [nébuleuse d'Orion](#) (M42), la [nébuleuse de la Carène](#) (NGC 3372) et la [nébuleuse de la Tarentule](#) (NGC 2070, dans le [Grand Nuage de Magellan](#)) figurent parmi les spécimens les plus remarquables pour un observateur terrestre.

Les nébuleuses planétaires

Parmi les plus célèbres, citons la [nébuleuse de l'Haltère](#) (M27), l'[Anneau de la Lyre](#) (M57) ou encore l'[Œil de Chat](#) (NGC 6543).

Les rémanents de supernova

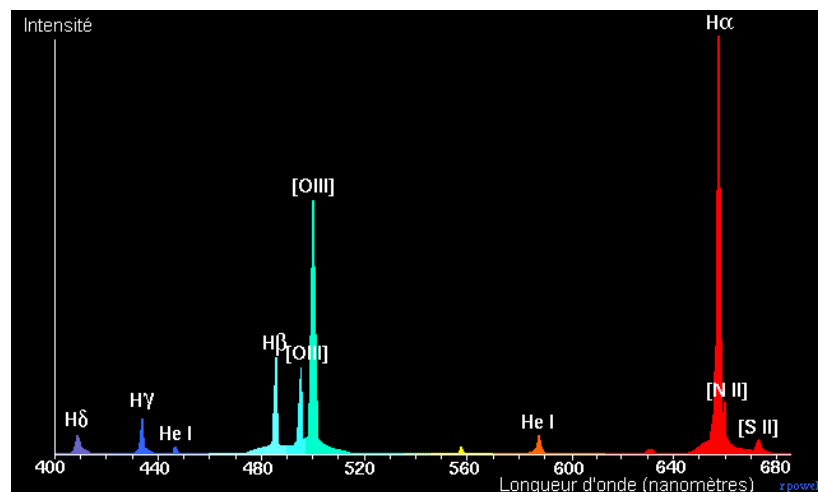
Citons les [Dentelles du Cygne](#) et la [nébuleuse du Crabe](#) (M1).

Les bulles de Wolf-Rayet

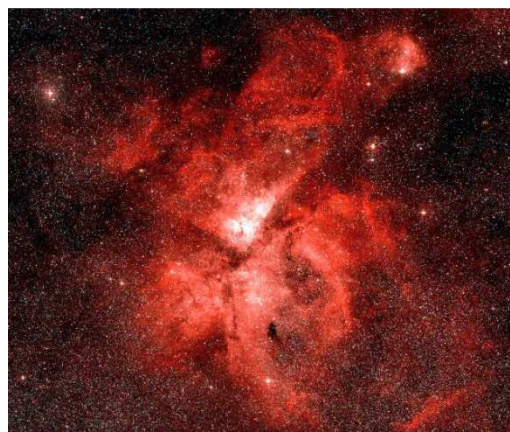
Peu fréquentes, certaines d'entre elles demeurent relativement accessibles, comme [NGC 2359](#) et [NGC 6888](#).

Une autre différence très importante avec les étoiles est la superficie des nébuleuses puisque celles-ci peuvent avoir des dimensions de plusieurs dizaines d'AL alors qu'une étoile n'est finalement qu'un point.

Voici le spectre d'émission dans la bande du visible de la nébuleuse Eta Carina (NGC3372) située à 9000 AL de la Terre dans le Bras du Sagittaire de la Galaxie.



Voici ce que donne une image de cette nébuleuse qui tire donc vers le rouge



Les nébuleuses en absorption

Il y a à l'inverse les nébuleuses en absorption dites sombres ou obscures, très massives car faites à la fois de gaz et de poussières, qui peuvent laisser passer au moins les rayonnements micro-ondes des étoiles qui se trouvent en leur sein car ces nébuleuses sont souvent le siège d'une formation intense d'étoiles.

Voici par exemple une photo de la nébuleuse **de la Tête de Cheval**, officiellement connue sous le nom de **Barnard 33** (IC 434 désigne la nébuleuse émissive à l'arrière-plan), est une nébuleuse obscure dans la constellation d'Orion.



Quelques données tirées du livre déjà cité d'Hubert Reeves :

Voici quelques chiffres et explications sur le nombre estimés de particules dans l'univers.

On aurait les proportions suivantes:

- 1 milliard de photons lumineux par atome de matière
- 90% des atomes de matière sont de l'hydrogène
- 9% des atomes de matière sont de l'hélium
- 1% sont des atomes plus gros

En fait cette répartition provient du tout début de l'univers alors que la matière était en nombre juste un peu plus grand (1 milliardième) que l'antimatière, faisant que leur rencontre a produit des photons lumineux en très grand nombre, des atomes d'hydrogène et 90% des atomes d'hélium.

La vie des étoiles depuis qu'il en existe a finalement peu modifié la répartition initiale même si les étoiles ont créé 10% de la quantité d'hélium et le 1% de matière avec des atomes plus lourds jusqu'au fer.

On comprend donc pourquoi on se focalise beaucoup sur l'hydrogène, comme je l'ai fait ci-dessus, et que de nombreuses nébuleuses font donc apparaître (ou disparaître) les raies des séries associées à cet atome de Lyman à Pfund.

LE RAYONNEMENT FOSSILE

Appelé aussi rayonnement cosmique de fonds diffus, le rayonnement fossile a été émis lorsque l'univers est devenu transparent au bout de 380 000 ans après le big-bang et alors qu'il n'y avait pas encore d'étoiles.

Emis à une température de 3000 K ce rayonnement électro-magnétique est tombé avec la traversée des âges de plus de 14 milliards d'années à une température de 3 K.

On découvre donc ici qu'un rayonnement de photons est émis par un corps ayant une certaine température mais que le rayonnement lui-même a une température semble-t-il égale à sa naissance à celle du corps qui l'a émis.

La diminution de la température du rayonnement coïncide-t-elle avec une multiplication d'absorptions-reémissions au hasard des rencontres dans l'Univers et plus particulièrement dans le vaste milieu inter-stellaire très peu dense et très froid ?

LES RAYONS COSMIQUES

Il ne s'agit plus de lumière à proprement parler puisque ces rayons sont constitués non pas de photons mais de particules massives de base et/ou des atomes qui ont été éjectées en fin de vie par des étoiles qui les ont produites au fur et à mesure des réactions nucléaires intenses en leur cœur.

LES MAGNITUDES

Avec ces 2 derniers sujets, on s'est un peu éloigné de notre préoccupation initiale mais on a trouvé des raisons de prévoir des exposés dans le futur pour ceux d'entre nous qui voudraient se lancer, y compris d'ailleurs aussi sur le sujet du rayonnement des nébuleuses.

Après cette longue introduction sur les rayonnements, nous pouvons continuer en reprenant l'exposé déjà fait à plusieurs reprises par Jean-Pierre M. sur les magnitudes dont le support est archivé sur le site Web du club comme pour chaque exposé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Hormis les nombreuses informations trouvées sur Internet et tout particulièrement dans Wikipedia, voici une liste de documents à notre disposition sur ou proche du sujet pour aller plus loin.

Des exposés du club :

- Lumière : fait la dernière fois en 2010 par Gérard D.
- Ce que nous apprend la Lumière : fait en 2008 par Jean-Pierre M.
- Magnitudes : fait la dernière fois en 2007 par Jean-Pierre M.

Des livres du club :

- Astronomie – Astrophysique – Introduction d’Agnès Acker (4^{ème} édition)

De mes livres :

- Patience dans l’Azur d’Hubert Reeves
- Les couleurs de l’Univers de Yael Naze