

Texte tiré du site <http://www.astronomes.com> d'Olivier Esslinger
Et plus particulièrement de la page
http://www.astronomes.com/c0_histoire/p032_spectrale.html

Les ondes lumineuses

Avec la mécanique céleste, l'astronomie connut une série de succès éclatants. Cependant, son domaine d'application restait très limité, elle ne décrivait que la position et le mouvement des corps célestes, sans s'intéresser à la nature de ceux-ci. Ce n'est qu'au XIX^e siècle qu'apparut une nouvelle méthode d'investigation, l'analyse spectrale, qui allait permettre l'étude de la nature physique des astres et donner naissance à l'astrophysique. Mais avant d'étudier les applications de cette nouvelle méthode, commençons par nous familiariser un peu avec le phénomène sur lequel elle repose : la lumière.

Découverte

L'origine des différentes couleurs est un problème qui a toujours intéressé les physiciens. Isaac Newton fut le premier à en apporter une interprétation correcte. Il montra que la lumière visible était en fait constituée d'une superposition de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Pour faire apparaître ces diverses couleurs, il suffit de faire passer la lumière dans un prisme. Chaque couleur est alors déviée un peu différemment des autres et apparaît de façon distincte des autres. La lumière blanche peut donc être décomposée en ses diverses composantes et donner lieu à une succession de couleurs appelée un spectre.

La réponse à la question plus fondamentale de la nature de la lumière fut plus lente à venir. Dans la deuxième partie du XIX^e siècle, le physicien écossais James Clerk Maxwell établit l'une des pièces maîtresses de la physique classique : la théorie unifiée des phénomènes électriques et magnétiques, qui est toujours utilisée de nos jours. L'un des résultats les plus importants de cette théorie était la mise en évidence du lien intime entre champs électrique et magnétique. Les physiciens savaient déjà qu'un champ magnétique variable pouvait engendrer un champ électrique, comme dans une dynamo de bicyclette par exemple. Mais Maxwell montra que réciproquement un champ électrique variable pouvait donner naissance à un champ magnétique.

Ce résultat avait une implication très importante. Imaginez qu'un champ électrique oscille en un point. D'après Maxwell, l'oscillation va donner lieu à un champ magnétique autour de ce point. Le champ magnétique ainsi créé est variable et va à son tour donner naissance à un champ électrique. Celui-ci va créer un nouveau champ magnétique et ainsi de suite. Les deux champs peuvent ainsi s'entretenir mutuellement. L'oscillation initiale va donc rapidement se propager dans toutes les directions autour du point de départ, un peu comme une vague se propage à la surface de l'eau, et l'on appelle donc le phénomène une onde électromagnétique.

Maxwell calcula dans les années 1860 qu'une onde électromagnétique devait se propager à une vitesse d'environ 300 000 kilomètres par seconde. Or, Hippolyte Fizeau et Jean Foucault avaient mesuré quelques années auparavant la vitesse de la lumière et obtenait une valeur assez proche de celle-ci. Maxwell tira la conclusion qui s'imposait et avança que la lumière s'expliquait comme une onde électromagnétique, une oscillation simultanée des champs électrique et magnétique qui se propageait à la vitesse fantastique de 300 000 kilomètres par seconde.

L'onde électromagnétique

Pour décrire une onde, le paramètre le plus important est ce que l'on appelle la longueur d'onde. Dans le cas d'ondes qui se propagent à la surface de l'eau, la longueur d'onde est la distance qui sépare deux vagues successives. Dans le cas des ondes lumineuses, la longueur d'onde est la distance qui sépare deux points où les champs atteignent une

intensité maximale au cours de leurs oscillations. Pour la lumière visible, cette longueur d'onde est très petite. Elle s'exprime en micromètres, c'est-à-dire en millièmes de mètre, et varie entre 0,4 à 0,75 micromètre.

La couleur que nous observons en regardant un objet dépend de la longueur d'onde de la lumière qui nous provient de cet objet. Ainsi, un faisceau lumineux de longueur d'onde proche de 0,8 micromètre nous apparaît rouge. Si la longueur d'onde est proche de 0,5 la couleur est jaune, et près de 0,4 micromètre elle est violette. La lumière blanche, celle du Soleil par exemple, est composée d'une multitude de longueurs d'onde différentes, donc de couleurs différentes.

Le spectre des ondes électromagnétiques ne se limite pas à la lumière que nous pouvons voir. Les physiciens ont depuis le XIX^e siècle découvert toute une gamme de rayonnements invisibles à nos yeux. Ainsi, au début du siècle dernier, William Hershell étudiait le spectre de la lumière solaire à l'aide d'un prisme et d'un thermomètre. Ce dernier indiquait une hausse de température lorsqu'il se trouvait dans le spectre visible, ce qui ne constituait pas une surprise, mais également lorsqu'il était placé au-delà de la partie rouge du spectre visible. Hershell venait de découvrir une forme de lumière invisible à nos yeux et pourtant réelle. Ce rayonnement, qualifié d'infrarouge, est bien connu de nos jours. Il est par exemple utilisé dans les télécommandes ou dans les systèmes de détection de chaleur. Il couvre un domaine de longueurs d'onde supérieures à celles de la lumière visible, entre 0,8 micromètre et 1 millimètre.

Pour des longueurs d'onde encore plus grandes, on entre dans le domaine des ondes radio, mis en évidence par Heinrich Hertz en 1888. Ces ondes sont bien connues puisqu'elles permettent la diffusion des programmes de radio et de télévision, les communications avec les satellites et aussi les fours à micro-ondes.

D'autres rayonnements existent aussi à des longueurs d'onde inférieures à celles de la lumière visible. Pour une longueur d'onde comprise entre 0,01 et 0,4 micromètre, c'est le rayonnement ultraviolet, connu pour ses effets sur les cancers de la peau. Au-delà, ce sont les rayons X, utilisés pour observer l'intérieur du corps humain, puis enfin les rayons gamma, très dangereux et produits par exemple lors de réactions nucléaires.

L'analyse spectrale

En étudiant le spectre de la lumière provenant d'un corps céleste, les astronomes sont capables d'apprendre une énorme quantité de choses sur ce corps. En effet, le spectre d'un objet peut être considéré comme une sorte de carte d'identité : en l'analysant avec soin, on peut déterminer de nombreux paramètres de l'objet, comme sa température, sa composition chimique ou sa vitesse.

Spectre et température

Commençons avec le paramètre le plus important, la température. Imaginons par exemple le cas d'un métal qui s'échauffe. Au début, lorsque le métal est à quelques centaines de degrés, rien n'est visible à l'oeil nu. Néanmoins, il est possible de sentir la chaleur du métal en plaçant la main à proximité. Cette sensation traduit le fait que le métal rayonne une lumière infrarouge qui chauffe la main mais n'est pas visible. Lorsque la température continue à augmenter, le métal se met petit à petit à briller et à devenir incandescent. Sa couleur change également peu à peu, passant du rouge à l'orange puis au jaune. La lumière qui provient d'un corps dépend donc de sa température. A quelques centaines de degrés, le métal émet dans l'infrarouge, à 3000 degrés, il rayonne surtout dans le rouge et à 6000 degrés dans le blanc.

L'étude du spectre d'un objet nous permet, comme pour le métal, de déterminer sa température. Ainsi, comme la surface du Soleil nous apparaît blanche, nous pouvons dire que sa température est de l'ordre de 6000 degrés. La relation entre température et longueur d'onde d'émission maximale a été établie en 1893 par Wilhelm Wien. Elle ne s'applique pas à tous les corps, mais uniquement à une classe d'objets théoriques et parfaits appelés les corps noirs. Heureusement pour nous, il se trouve que les étoiles ont un comportement très semblable à celui des corps noirs. L'étude de leur spectre nous permet donc de déterminer leur température.

De manière plus générale, les objets solides, les liquides et les gaz denses émettent un rayonnement continu qui obéit relativement bien à la loi de Wien. Ainsi, par exemple, un nuage interstellaire froid de gaz et de poussières rayonne dans l'infrarouge, le Soleil émet surtout dans la partie jaune du spectre visible et le gaz d'un amas de galaxies, chauffé à plusieurs millions de degrés produit principalement des rayons X. Dans tous les cas, c'est l'observation du spectre de ces objets qui nous a permis de déterminer leur température.

Raies spectrales

La situation est différente lorsque l'objet étudié est un gaz peu dense. La découverte en fut faite en 1814 par Joseph von Fraunhofer qui étudiait le spectre des couches superficielles du Soleil. L'astronome, en observant le spectre avec une très grande précision, se rendit compte que celui-ci n'était pas continu, mais présentait une multitude de petites lignes obscures appelées des raies spectrales. Ces lignes correspondaient à des longueurs d'onde qui, pour une raison inconnue à l'époque, étaient absentes du rayonnement solaire.

L'explication de ce mystère fut le fait de Robert Bunsen et de Gustav Kirchhoff, deux physiciens qui construisirent ensemble un spectroscope, c'est-à-dire un instrument destiné à décomposer la lumière en ses longueurs d'onde et à fortement agrandir le spectre obtenu. Ils utilisèrent leur nouvel appareil pour étudier le rayonnement de différents types d'objet, en particulier des gaz. Ils découvrirent alors un phénomène très étrange. Le spectre d'un gaz chaud était en fait un ensemble de raies brillantes, appelées des raies d'émission, sans aucun fond continu. De façon tout aussi mystérieuse, lorsqu'ils observaient la lumière d'un corps noir après le passage dans un gaz froid, le spectre était continu mais parsemé de raies obscures, des raies d'absorption, comme dans le cas du Soleil.

Bunsen et Kirchhoff conclurent de leurs expériences que les constituants d'un gaz ne pouvaient émettre ou absorber de la lumière que pour quelques longueurs d'onde bien définies, contrairement à un corps noir. Lorsqu'ils observaient un gaz chaud, le spectre était constitué de raies d'émission aux longueurs d'onde que ces constituants étaient capables d'émettre. Lorsqu'ils observaient un gaz froid placé devant un corps noir, les constituants du gaz absorbaient la lumière à ces longueurs d'onde, d'où les raies d'absorption superposées au spectre continu du corps noir.

Bunsen et Kirchhoff firent une découverte encore plus importante lorsqu'ils constatèrent qu'à un gaz donné correspondait un ensemble bien défini de raies. Par exemple, le gaz de sodium se caractérisait par deux raies dans la partie jaune du spectre visible. Cette découverte constituait une avancée majeure car, à partir de l'étude du spectre d'un gaz et de ses raies, il devenait possible de déterminer sa composition. Ainsi par exemple, si le spectre d'un gaz inconnu présentait les deux raies jaunes ci-dessus, ce gaz devait contenir du sodium. Il devenait donc possible, grâce à l'analyse spectrale, de déterminer la composition chimique d'un corps à distance, ce qui constituait une possibilité inespérée pour l'étude des corps célestes.

La température des étoiles

Nous avons vu qu'il est possible de déterminer facilement la température d'une étoile grâce à l'analyse spectrale. Il suffit de trouver la longueur d'onde à laquelle l'intensité lumineuse de l'étoile est maximale et d'appliquer la loi de Wien qui relie cette longueur d'onde à la température. Notons quand même qu'une précaution s'impose. La température ainsi calculée est celle qui règne dans les couches superficielles de l'étoile, puisque c'est de là que provient le rayonnement que nous pouvons analyser. La température à l'intérieur de l'étoile n'est quant à elle pas directement mesurable. Il n'est possible de l'estimer qu'à l'aide de modèles théoriques.

Les observations spectroscopiques ont montré que l'éventail des températures de surface est bien plus réduit que celui des luminosités. Les étoiles les plus froides sont rouges et ont une température de l'ordre de 3000 kelvins. Les plus chaudes sont bleues et atteignent 50000 kelvins. Le rapport des températures maximale et minimale n'est donc que légèrement supérieur à 10.

L'état des différents gaz à la surface de l'étoile est fortement dépendant de la température qui y règne. Ainsi les spectres de deux étoiles de températures différentes présentent des caractéristiques qui permettent de les distinguer facilement. Cette propriété a amené les astronomes de la fin du siècle dernier à classer les étoiles en différentes catégories, suivant l'aspect de leur spectre. Ces groupes, appelés types spectraux, sont désignés par les lettres suivantes : O, B, A, F, G, K et M. Les types O et B correspondent à des températures de surface supérieures à 10000 kelvins et leurs spectres sont dominés par les raies de l'hélium. Le type A, un peu en dessous de 10000 kelvins, présente des raies de l'hydrogène. Les types F, G et K, avec des températures entre 3500 et 7500 kelvins exhibent des raies du calcium. Enfin, le type M, à moins de 3500 kelvins, offre des spectres dominés par des bandes, c'est-à-dire des raies très larges dues à quelques molécules, en particulier l'oxyde de titane.

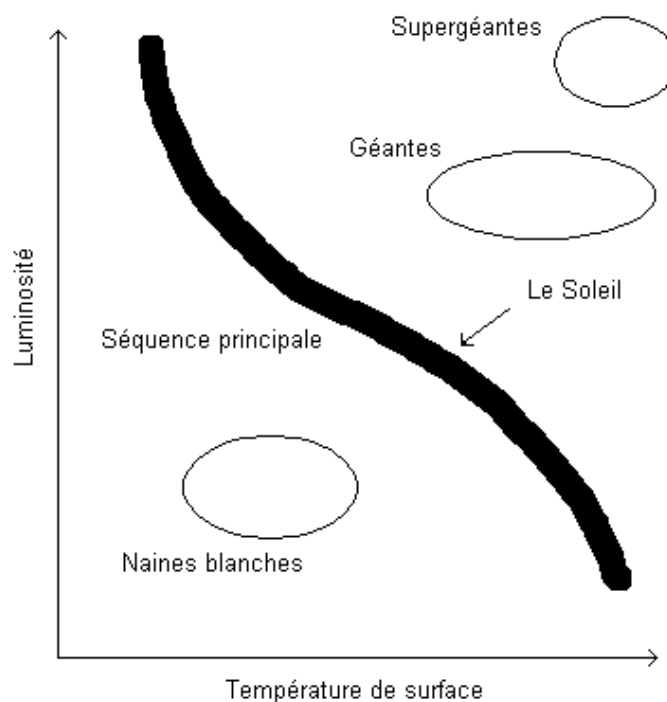


Figure 1 : Le diagramme de Hertzsprung-Russell. En traçant la luminosité absolue en fonction de la température de surface des étoiles connues, quatre catégories d'étoiles apparaissent : la séquence principale (qui contient notre Soleil), les géantes, les supergéantes et les naines blanches.

Avec les deux propriétés que nous avons étudiées, la luminosité absolue et la température de surface, les astronomes tenaient l'une des clefs de la compréhension des étoiles. Au début du siècle, le Danois Ejnar Hertzsprung et l'Américain Henry Russell découvrirent indépendamment qu'il existait une corrélation très forte entre la luminosité absolue et la température de surface des étoiles. Ils utilisèrent les données disponibles à l'époque et eurent la bonne idée de tracer un diagramme indiquant les deux propriétés. Ils se rendirent alors compte que la grande majorité des étoiles se plaçaient sur une grande diagonale, appelée la séquence principale, qui allait des étoiles froides et peu lumineuses aux étoiles chaudes et très lumineuses. En plus de cette bande, trois autres regroupements apparaissaient. Deux groupes se trouvaient au-dessus de la séquence principale, à des luminosités plus fortes, le groupe des géantes et celui des super géantes. Le troisième groupe était placé sous la séquence principale, à des luminosités plus faibles, celui des naines blanches. Nous expliquerons plus tard l'origine de ces quatre catégories et verrons qu'elles correspondent en fait à des étapes bien définies de la vie des étoiles.

La séquence principale

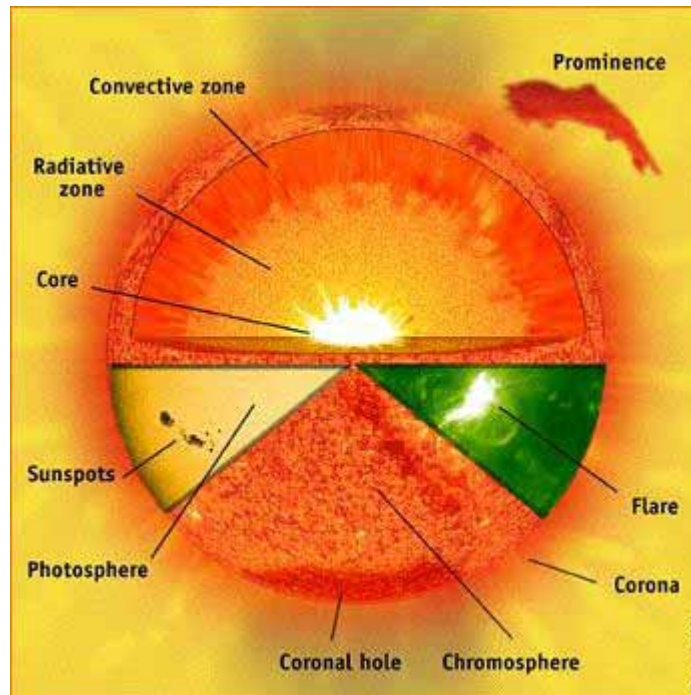
Nous avons vu qu'en traçant le diagramme qui porte leur nom, les astronomes Hertzsprung et Russell mirent en évidence une longue diagonale sur laquelle se trouvaient la majorité des étoiles, la séquence principale. Les études théoriques ont montré que les étoiles de cette séquence sont celles qui utilisent la fusion de l'hydrogène en hélium comme source d'énergie. Le fait que cette phase de la vie d'une étoile soit la plus stable et la plus longue explique que la majorité des étoiles observables se trouvent sur la séquence principale.

La durée de vie d'une étoile sur la séquence principale dépend de deux facteurs : la quantité d'hydrogène disponible en son centre et la vitesse à laquelle elle brûle ce combustible. La première quantité est proportionnelle à la masse de l'étoile. Si vous multipliez celle-ci par deux, vous obtenez deux fois plus de combustible au centre. Le deuxième paramètre est lié à l'énergie produite en un temps donné par l'étoile, donc à sa luminosité. Or, nous avons vu que la luminosité n'est pas simplement proportionnelle à la masse, mais augmente beaucoup plus vite que cela. Par exemple, si vous multipliez par deux la masse d'une étoile, sa luminosité est multipliée par un facteur 10.

Ces considérations ont d'importantes conséquences en ce qui concerne la durée de vie stellaire. Une étoile de deux masses solaires brûle son hydrogène 10 fois plus vite que le Soleil, mais ne possède un stock de combustible que deux fois plus grand. Sa durée de vie sur la séquence principale est donc cinq fois plus courte. Ainsi, les étoiles ont des durées de vie très diverses. Alors que le Soleil peut espérer une vie tranquille de 10 milliards d'années, les étoiles les plus massives n'ont à leur disposition que quelques millions d'années. Les étoiles les moins massives ont quant à elles plus de 100 milliards d'années à vivre. Il y a donc presque un facteur 10000 entre l'espérance de vie la plus longue et la plus courte.

Le soleil

Bien qu'il fallut attendre le XVII^e siècle pour que les astronomes s'en rendent finalement compte, le Soleil n'est pas un astre particulier de l'Univers, mais simplement une étoile comme les autres. La seule chose qui le distingue des autres étoiles est sa proximité à notre planète. Le Soleil est ainsi la seule étoile suffisamment proche de la Terre pour pouvoir être étudiée en détail, la seule dont nous puissions observer la surface et l'environnement proche avec précision. En plus de son intérêt propre, l'étude du Soleil constitue donc également un pas fondamental dans notre compréhension générale des étoiles.



Mosaïque d'images montrant les différentes couches de notre étoile. En-haut, l'intérieur du Soleil avec trois couches, le noyau (core), la zone radiative et la zone convective. En bas, les trois couches externes, la photosphère, que l'on peut considérer comme la surface du Soleil et où apparaissent les taches solaires (sunspots), la chromosphère et la couronne (corona). L'image montre également un trou coronal (coronal hole), une éruption solaire (flare) et une protubérance (prominence). Crédit : SOHO (ESA/NASA)

Le Soleil est un corps relativement simple, une gigantesque boule de gaz de 1,4 millions de kilomètres de diamètre, soit 110 fois la taille de la Terre. Sa masse est de 2000 milliards de milliards de milliards de kilogrammes, soit 330000 fois celle de la Terre. Environ 75 pour cent de cette masse est composée d'hydrogène, 25 pour cent d'hélium et le reste (0.1 pour cent) est constitué d'éléments plus lourds.

L'intérieur du Soleil étant inaccessible à l'observation, il faut recourir à des constructions théoriques pour décrire les phénomènes qui s'y produisent et déterminer sa structure interne. Ces études ont mis en évidence que l'intérieur du Soleil est divisé en trois zones : le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le noyau est la partie dans laquelle l'énergie du Soleil est créée grâce à des réactions nucléaires. La température y est extrêmement élevée, environ 15 millions de kelvins. Cette région représente environ 25 pour cent du diamètre du Soleil et, du fait de sa grande densité, contient près de 60 pour cent de la masse totale de notre étoile.

Autour du noyau vient ensuite la zone radiative qui représente 55 pour cent du rayon du Soleil. Dans cette région, l'énergie créée dans le noyau est transportée vers l'extérieur par les photons. Ce mode de transport est très lent car les photons sont constamment absorbés puis réémis par toutes les particules présentes. On estime ainsi que le temps mis par un photon pour sortir du Soleil est de plusieurs centaines de milliers d'années, alors qu'il suffirait de quelques secondes s'il n'y avait pas d'obstacle en chemin.

Finalement, on arrive à la couche extérieure, la zone convective, qui représente 30 pour cent du diamètre solaire et où la température descend sous le million de kelvins. Dans cette couche, le transport d'énergie se fait par convection, c'est-à-dire par des mouvements d'ensemble de la matière présente. Le gaz chaud des profondeurs remonte ainsi vers la surface, libère de l'énergie en se refroidissant, puis replonge vers l'intérieur et ainsi de suite.

La luminosité des étoiles

Imaginez vous perdu en pleine nuit au milieu du désert. Un point lumineux apparaît soudain au loin. De quoi s'agit-il ? D'une lampe de poche à 100 mètres ou d'un puissant projecteur à 10 kilomètres ? En pleine nuit, sans aucun son ou autre information, il vous est impossible de déterminer la distance ou la nature de ce point lumineux.

Le problème est le même pour les corps célestes. Une étoile peu lumineuse mais proche de la Terre peut dépasser en éclat une étoile très lumineuse mais lointaine. Il faut donc bien distinguer deux concepts : la luminosité apparente, qui mesure l'éclat d'une étoile mesuré depuis la Terre, et la luminosité intrinsèque ou absolue, qui mesure la véritable quantité de lumière émise par l'étoile. La première quantité dépend fortement de la distance de l'astre et n'apporte donc pas directement d'information sur la nature de celui-ci. Au contraire, la deuxième quantité ne dépend que de l'objet lui-même. Elle peut nous renseigner sur la nature du corps considéré et c'est elle qu'il faut chercher à déterminer.

Pour l'astronome, la difficulté réside dans le fait que depuis la Terre nous n'avons accès qu'aux luminosités apparentes des étoiles. Existe-t-il alors un moyen d'obtenir des valeurs absolues qui nous renseigneraient sur la nature des étoiles ? C'est ici qu'interviennent les méthodes de mesure des distances que nous avons vues précédemment. Les physiciens savent depuis longtemps que l'intensité d'un rayonnement suit une loi bien déterminée : elle décroît comme l'inverse du carré de la distance parcourue par la lumière. Cela signifie que si nous mesurons l'éclat apparent d'une ampoule à une certaine distance, puis que nous doublons cette distance, la deuxième mesure donnera un résultat quatre fois plus faible que la première. Connaissant cette loi, il est très simple d'établir le lien qui existe entre la luminosité absolue, la distance et l'éclat apparent d'une étoile. De cette façon, si deux des paramètres peuvent être mesurés, le troisième pourra être calculé facilement. Donc, si l'on peut déterminer la distance à une étoile, il suffit de mesurer son éclat apparent et d'appliquer une relation mathématique pour accéder à sa luminosité absolue.

Des observations de ce type commencèrent dès que les données sur les distances furent disponibles. Elles mirent en évidence un énorme éventail dans les luminosités possibles. Du côté des étoiles les plus faibles apparurent des astres dont la luminosité n'était que d'un dix millième de celle du Soleil. De l'autre côté, l'on découvrit de véritables monstres qui émettaient un million de fois plus d'énergie que notre étoile. La gamme des luminosités se révélait énorme, avec un facteur de 10 milliards entre les luminosités minimale et maximale possibles.