

## Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique : VI- L'analyse de la lumière

Georges Patrel, Observatoire de Lyon

**Résumé:** Dans ce nouveau cours nous entrons dans le domaine de l'astrophysique. C'est par l'analyse de la lumière, la spectrographie, qu'a débuté l'aventure. Les physiciens furent confrontés assez tôt au phénomène nouveau des raies spectrales. Comment interpréter cet invraisemblable imbroglio de raies. C'est par une révolution dans les conceptions de la physique qu'a pu émerger la compréhension.

### Introduction

Dans ce nouveau cours nous entrons réellement dans l'astrophysique, car nous allons pouvoir nous intéresser à la physique des astres et plus seulement à leurs positions. Mais comment étudier la physique d'un objet que l'on ne peut pas approcher ? C'est évidemment la lumière qui va nous permettre de réaliser ce que Auguste Comte croyait à jamais impossible. Il écrivait en effet que "... nos connaissances positives par rapport aux astres sont nécessairement limitées à leurs seuls phénomènes géométriques et mécaniques".

Comment extraire de la seule lumière une information aussi riche que la composition chimique d'une étoile, ou que les mouvements à sa surface ? C'est ce que nous allons commencer d'étudier.

### Il nous faut encore parler de Newton

Nous avons vu quel rôle prépondérant a joué Newton dans l'établissement des lois de la mécanique. Ce savant génial ne s'en est pas tenu qu'à cet aspect de la physique. Il a étudié l'optique. Bon expérimentateur, il a su de manière géniale trouver des expériences qui prouvaient que la lumière "ordinaire" était une lumière "composée".

Sa première expérience a consisté à faire entrer la lumière du Soleil dans une pièce obscure par une petite ouverture pratiquée dans les volets. Ce fin pinceau lumineux était envoyé sur un coin de verre, ce qu'on appelle un prisme. La lumière blanche du Soleil se décomposait alors en une multitude de

couleurs, chacune d'elles sortant du prisme dans une direction différente (voir la figure 1). **La lumière blanche contenait donc plusieurs couleurs.** Mais Newton alla plus loin, il collecta ces rayons colorés avec une lentille convergente et envoya tous ces rayons sur un prisme similaire au premier mais inversé (Figure 1). A la sortie de ce deuxième prisme, les différents faisceaux colorés s'étaient recomposés en un seul rayon blanc, semblable au rayon solaire initial. **Plusieurs couleurs pouvaient se recomposer en un rayon blanc.** Newton montra que le nouveau rayon blanc pouvait à son tour se décomposer en divers faisceaux colorés.

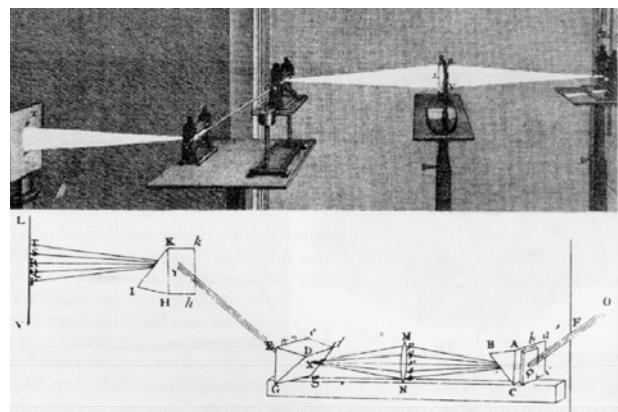


Figure 1 : Décomposition et recombinaison de la lumière par l'expérience de Newton.

### Une expérience géniale de simplicité

Un question se pose alors : combien de couleurs apparaissent lors de la décomposition de la lumière blanche ? Mon instituteur m'avait appris un mot

magique pour retenir ces couleurs : **VIBVJOR**. Nous avons ainsi les initiales des principales couleurs : Violet, Indigo, Bleu, Vert, Jaune, Orangé, Rouge.

On serait conduit à penser qu'il n'y a que sept couleurs fondamentales. En réalité, nous le verrons un peu plus loin, chaque couleur est caractérisée par une longueur, la longueur d'onde. Il y a autant de couleurs qu'il peut y avoir de longueurs, disons une infinité.

Néanmoins, les sept couleurs vues plus haut conduisent à une bonne représentation de la décomposition d'une lumière blanche, comme nous allons le voir. Newton imagina une expérience, merveilleuse de simplicité, pour montrer qu'une combinaison de couleurs pouvait produire du blanc. En dessinant sur un disque en carton des secteurs colorés chacun avec une des sept couleurs, nous allons pouvoir "faire" du blanc. Il suffit de faire tourner le disque à grande vitesse. Les sept couleurs se superposent à notre vue et nous voyons un disque blanc, ou plus exactement, blanchâtre, car nos sept couleurs ne sont qu'une pâle représentation du spectre complet.

Dans la rubrique "remue méninges", nous posons une question embarrassante à propos de la représentation des couleurs. En effet, si, sur le disque de Newton, nous ne faisons figurer que, par exemple, du jaune et du bleu, nous verrons une couleur verte. Bien ! Mais est-ce à dire que le mélange de deux longueurs d'onde (jaune et bleu) fabrique une troisième longueur d'onde (le vert) ? Si nous transposons cela à la musique, en jouant par exemple un do et mi entendrons nous un ré ? Je livre cette question piège à votre sagacité.

### Une idée lumineuse

En 1802, quelques décennies après Newton, William Wollaston eut un jour une idée, a priori, curieuse. Il décomposa la lumière du Soleil avec un prisme, comme l'avait fait Newton, mais au lieu de prendre toute l'image du Soleil, il en isola une mince tranche avec une fente. Quel était son but ? On peut le comprendre : quand on prend toute l'image du Soleil, chaque point de l'ouverture d'entrée, va se décomposer dans les différentes couleurs. Aussi, dans une direction de sortie se mélangeront des rayons de différentes couleurs, entrés sous des angles différents. Il y aura un mélange des couleurs. Avec une fente très fine, il est possible d'éviter ce mélange. On doit avoir des couleurs plus nettes, et qui sait, voir séparément les couleurs qui composent le spectre du Soleil. La Figure 2 montre le schéma du principe de l'appareillage de Wollaston.

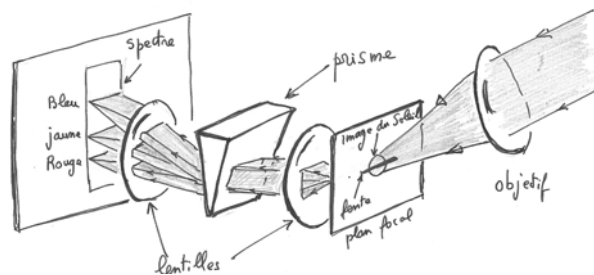


Figure 2 : Spectroscopie à fente

Wollaston ne réussit pas à dénombrer les couleurs qui semblaient toujours apparaître plus nombreuses, dans toutes les nuances "VIBVJOR". Mais il observa une chose étrange : sur le fond coloré se détachaient des lignes sombres, plus ou moins serrées et distribuées apparemment au hasard. Pourtant, ces raies occupaient des positions relatives fixes, toujours les mêmes, quel que soit le dispositif utilisé. Si on élargissait la fente d'entrée, les raies disparaissaient progressivement. Si on resserrait la fente, les raies, qu'on appellera désormais les raies spectrales, réapparaissaient à la même place.

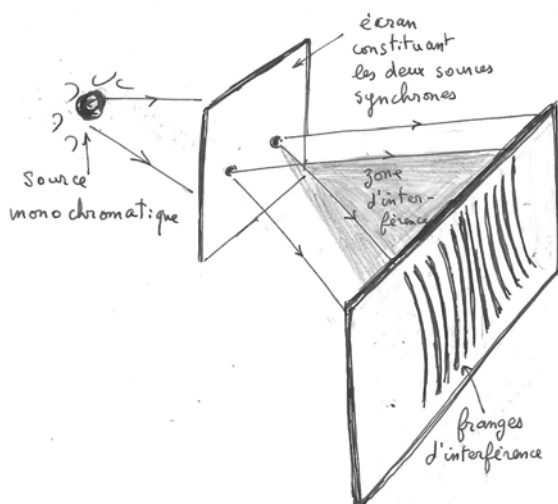
Cette observation qui contenait en germe la nouvelle physique atomique, n'eut pas beaucoup d'écho, jusqu'à ce qu'un opticien allemand, Joseph von Fraunhofer refasse les mêmes observations. Il observa plus de trois cents raies spectrales et il désigna par des lettres les raies les plus intenses. Il observa en particulier ce que les astronomes appellent encore les raies "H" et "K" dans le bleu, le doublet "D", situé lui dans le jaune et bien d'autres. Mais la constatation la plus remarquable de Fraunhofer fut que le doublet "D" pouvait être observé simplement en faisant le spectre d'une flamme dans laquelle brûle du sodium (par exemple un flamme dans laquelle on place du sel ordinaire). Cette constatation montrait qu'il y avait un lien entre la position des raies spectrales et la nature du corps émetteur de lumière. On tenait peut-être la possibilité de connaître la composition des astres. Une révolution se préparait. Mais comment interpréter les positions de ces raies. C'est ce que nous allons découvrir bientôt.

### Une description ondulatoire

Quand il fut admis que les raies spectrales représentaient la signature des corps émetteurs, les astronomes et les physiciens cherchèrent à déchiffrer le code donnant la position des raies spectrales.

Depuis Newton l'idée que les physiciens se faisaient de la lumière avait évolué. En effet, avec Newton la lumière était supposée faite de particules

de différentes couleurs. La propagation rectiligne ou la réflexion sur un miroir obéissaient simplement aux lois de la mécanique newtonienne. Mais bientôt un phénomène bouleversa cette conception si simple : la découverte des interférences. Quand la lumière d'une source passe à travers deux petits trous (et se comportent comme deux sources indépendantes mais "synchronisées") l'image de ces deux sources donne des lignes alternativement claires et sombres (Figure 3). Ce phénomène est difficile, sinon impossible, à expliquer avec une conception corpusculaire de la lumière. Si en revanche on considère que la lumière est faite d'une onde qui vibre à une certaine fréquence, on explique très facilement le phénomène d'interférences. Si en un point de l'écran, les ondes issues des deux sources synchrones présentent un maximum, il y aura un maximum de lumière. Si, au contraire, l'une présente un maximum et l'autre un minimum, les deux ondes vont s'annuler, il n'y aura pas de lumière en ce point. L'étude géométrique de ce phénomène collait parfaitement avec les observations. La lumière devait être une onde.



**Figure 3 :** Les interférences prouvent qu'à la lumière peut être associée une onde.

Il y eut pendant quelque temps une hésitation sur cette conception, car il fallait expliquer la propagation rectiligne de la lumière ainsi que la réflexion sur les miroirs. Mais le génial Augustin Fresnel, réussit à montrer mathématiquement qu'il n'y avait pas d'incompatibilité. La cause était entendue : la lumière était une onde<sup>1</sup> et mieux, à chaque couleur pouvait être associée une longueur d'onde. La longueur d'onde est très fréquemment

<sup>1</sup> Cette conception ondulatoire sera encore révisée plus tard grâce à une analyse d'Einstein sur laquelle nous reviendrons.

notée par la lettre grecque  $\lambda$  (lire lambda) équivalente à notre lettre L.

### Interprétation empirique des spectres

En 1885, le physicien Balmer étudie les raies caractéristiques de l'hydrogène. Les quatre principales raies, que l'on désigne par  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$ , correspondent aux longueurs d'onde 656 nm, 486 nm, 434 nm et 410 nm (rappelons que le nanomètre noté nm, vaut un milliardième de mètre). Balmer montre qu'elles obéissent au principe de Ritz écrit sous la forme :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right);$$

Avec pour n, les valeurs entières, 3, 4, 5 et 6. Plus tard on a trouvé d'autres raies qui correspondaient aux entiers suivants. La constante R appelée la constante de Rydberg avait une valeur expérimentale connue.

L'atome d'hydrogène était un bon exemple à étudier. Mais comment interpréter l'arrivée de nombres entiers dans la physique. Etait-ce un retour aux conceptions ancestrales des grecs ?

Nous allons voir que cette interprétation est arrivée par un chemin détourné, que nous allons emprunter.

### Quantification pour la catastrophe UV

Les physiciens étudiaient le rayonnement d'un corps isotherme, appelé le corps noir. Un tel corps est *totalemt absorbant et totalemt émissif*. Expliquons un peu.

Une surface peinte en noir absorbe la chaleur. Pour vous en convaincre, placez en plein soleil, une plaque métallique peinte en blanc et une plaque identique peinte en noir. Vous constaterez que la plaque peinte en noir s'échauffe beaucoup plus vite. C'est la raison pour laquelle les capteurs solaires sont peints en noir. Si maintenant vous chauffez les deux plaques à la même température, et que vous les placez dans un endroit plus frais, vous constatez que la plaque noircie se refroidit plus vite. C'est la raison pour laquelle, les radiateurs de voiture, par exemple, sont peints en noir. Si les radiateurs d'appartement sont peints de couleur claire, ce n'est que par souci d'esthétique, mais c'est au détriment du rendement. Cette loi qui dit qu'un corps est d'autant plus émissif qu'il est absorbant est la loi de Kirchoff.

Plus précisément, les physiciens étudiaient le spectre d'un tel corps noir : à une température donnée, quelle pouvait en être le spectre.

L'application des lois de l'électrodynamique permettait de décrire correctement les grandes longueurs d'onde, mais pour les petites longueurs d'onde, l'ultraviolet, la relation prédisait une énergie infinie, ce qui n'était pas raisonnable. C'était un échec complet des lois du rayonnement. Une catastrophe, surtout dans l'ultraviolet.

Le physicien Max Planck fit une hypothèse hardie. Il postula que les échanges d'énergie lors d'un rayonnement à la fréquence  $\nu$  (rappelons que la fréquence est reliée à la longueur d'onde par la relation  $\nu=c/\lambda$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière) ne pouvaient se faire que par *quantités finies d'énergie*  $E=h\nu$ . (La constante  $h$  fut naturellement appelée la constante de Planck). Une hypothèse bien étrange, mais qui permettait de retrouver parfaitement le spectre expérimental (Figure 4). Planck hésita à faire cette hypothèse et il semble qu'il ait parfois douté de sa propre théorie. Pourtant cette idée neuve allait déboucher sur une nouvelle mécanique, la mécanique quantique. La relation de Planck permettait aussi de retrouver de manière indépendante le nombre réel d'atomes d'un corps par unité de masse moléculaire (par mole), ce qu'on appelle le nombre d'Avogadro. Ce résultat contribua aussi à valider l'hypothèse nouvelle qui, de surcroît, fut utilisée par Einstein pour interpréter l'émission d'électrons par un corps irradié (c'est l'effet photoélectrique découvert par Hertz). Bref, l'hypothèse fut acceptée et nous allons voir que Bohr en fit un usage intéressant pour le sujet qui nous occupe : l'émission de radiation par un atome.

Les spectres de corps noirs à différentes températures sont donnés à la figure 4. Plus le corps est chaud, plus sa densité spectrale est forte et plus son rayonnement est dominé par les courtes longueurs d'onde : plus un corps est chaud, plus il est "bleu". La position du maximum suit une loi simple :

$$\lambda_{\max_i} T = 0,02897 ,$$

où,  $\lambda_{\max_i}$  est la longueur d'onde du maximum exprimée en mètre et  $T$  est la température en Kelvin<sup>2</sup>. Cette relation, dite relation de Wien sera très utile, comme nous le verrons plus tard.

### En route vers la formule de Balmer

Grâce aux expériences de Rutherford, on savait que les atomes étaient faits essentiellement de vide. Les physiciens imaginaient l'atome comme un système planétaire : un noyau dense au centre figurant le

<sup>2</sup> Les Kelvins sont notés K. Ils correspondent à nos degrés Celsius habituels majorés de 273 degrés Celsius.

Soleil et des électrons gravitant autour comme des planètes. Dans ce modèle la force électrique remplaçait la force gravitationnelle mais les lois étaient assez semblables. Il sera montré que les trois lois de Kepler s'appliquent aux électrons orbitant autour du noyau. Surprenant !?

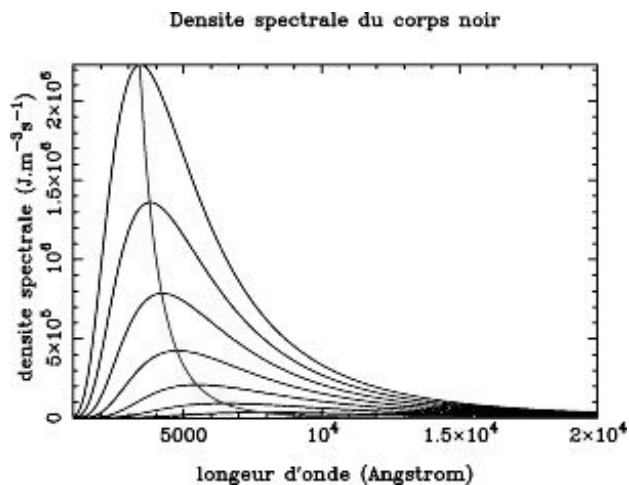


Figure 4 : densité spectrale de corps noirs entre 3000 K et 8500 K

Depuis Coulomb on connaissait la force qui s'exerce entre deux charges électriques,  $q$ , séparées par une distance  $r$ :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

On imagina alors que l'électron possédait une charge élémentaire  $e$ , négative, et le noyau une charge positive opposée  $e$  (positive).

Nous verrons dans le prochain cours, comment Bohr réussit en combinant l'idée de Planck, le modèle de Rutherford et l'expression de la force électrique, à retrouver de manière élémentaire la relation de Balmer pour l'atome d'hydrogène.

### Fiat lux !

Un lecteur, Mr. Hugues de Sainte Foy, nous a signalé une "incorection" dans le précédent Cours. (CC109, page 2, colonne 2, premier paragraphe). J'avais écrit "... sa quantité de mouvement changeant proportionnellement à ... [la] force". La formulation était ambiguë. La force est égale à la variation de la quantité de mouvement par unité de temps. En effet, La définition de la force est  $\mathbf{F}=\mathbf{dp}/dt$ , où  $\mathbf{p}$  est le vecteur quantité de mouvement et où  $t$  est le temps. Notons que cette définition très générale de la force est valable aussi en mécanique relativiste. En mécanique de Newton, où la masse  $m$  est constante et où  $\mathbf{p}=\mathbf{mv}$ , on retrouve la fameuse loi fondamentale de la mécanique de Newton :  $\mathbf{F}= m d\mathbf{v}/dt = m\mathbf{a}$ , où  $\mathbf{a}$  est le vecteur accélération. Merci à ce lecteur attentif. **GP**