

Spectroscopies

Yann MONCEAUX

Table des matières

Introduction	1
1 Le réseau	1
1.1 Spectromètre à réseau	1
1.2 Rayonnement du corps noir	1
1.3 Spectre de raies	2
2 L'interféromètre de Fabry-Pérot	3
2.1 Principe	3
2.2 Exploration du spectre	3
2.3 Comparaison entre le réseau et le Fabry-Pérot	4
Conclusion	4
Questions	4
Remarques	5
Bibliographie	5

Niveau : L2

Prérequis :

- -Spectre électromagnétique
- Réseaux de diffraction
- Rayonnement du corps noir
- Spectres de raies (émission et absorption)
- Effet Doppler

Introduction

Historiquement, la première dispersion expérimentale de la lumière blanche a été mis en oeuvre par Newton en 1655 avec un prisme -> le présente en direct, on peut voir la partie visible du spectre de la lampe blanche. La spectroscopie désigne l'étude expérimentale du spectre d'un phénomène physique. On va l'étudier dans le cadre de l'astronomie, comment on met en place ces méthodes et à quelles informations elles permettent de remonter.

1 Le réseau

1.1 Spectromètre à réseau

Rappel : Présentation sur slide du schéma d'un réseau avec les caractéristiques principales

Les directions des interférences constructives sont données par la formule des réseaux : $\sin \theta' - \sin \theta = p \frac{\lambda}{a}$ où p désigne l'ordre.

C'est ainsi qu'un réseau permet de séparer spatialement les différentes longueurs d'ondes (dispersion). Si on veut l'utiliser en astronomie il faut le combiner à un système optique : le télescope.

Ex : présentation du télescope Schmidt-Cassegrain. (avec slide)

La lumière venant d'un objet à très grande distance est envoyée sur un miroir sphérique, qui l'envoie sur le miroir central, qui permet une observation à l'oeil à travers l'oculaire. Pour former le spectromètre, on remplace la partie avec l'oculaire par un système qui envoie la lumière sur un réseau, le spectre (étalé spatialement) est alors envoyé sur une caméra.

Transition : Maintenant qu'on dispose d'un spectromètre on va voir les informations qu'il peut donner.

1.2 Rayonnement du corps noir

Un corps noir désigne un objet idéal qui absorbe parfait toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, ce qui provoque une agitation thermique en son sein. Son rayonnement est uniquement thermique.

Présentation sur slide du spectre du corps noir.

Le spectre de la lumière émise par une étoile permet donc de remonter à sa température de couleur, température du corps noir rayonnant une énergie de même distribution spectrale. En pratique, les étoiles s'approximent assez bien à des corps noir, et la température de couleur est une assez bonne estimation de leur température de surface.

Pour l'estimer on peut par exemple utiliser la loi de Wien $\lambda_{max} \times T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$

Ex : le Soleil. Présente sur diapo la comparaison entre le spectre expérimental et le corps noir à 5525K. Bon accord entre les deux.

1.3 Spectre de raies

Le rayonnement du corps noir n'est pas la seule information qu'on obtient par spectroscopie. En plus du caractère continu, on peut voir sur l'exemple du spectre de la nébuleuse d'Orion l'apparition de raies.

Ces raies correspondent à des transitions électriques, et sont centrées autour de longueurs d'ondes λ telles que $\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$ où ΔE est l'écart énergétique entre les deux niveaux de la transition. On va pouvoir en déduire plusieurs informations.

Composition Chimique : C'est le plus intuitif, en remontant aux longueurs d'ondes des transitions, on peut identifier les éléments présents. Exemple de la nébuleuse IC 4593. Une nébuleuse est un objet céleste composé de gaz raréfié, de plasma ou de poussières interstellaires. -> Présentation du spectre de raies avec l'identification des éléments sur diapo. On note donc pour IC4593 la présence d'hydrogène, d'oxygène, d'hélium et d'argon.

Typiquement on retrouve très souvent l'hydrogène. Ce dernier est repéré grâce à la série de Balmer, qui désigne les transitions électroniques pour l'hydrogène d'un niveau $n > 2$ au niveau $n=2$. Les longueurs d'ondes de ces transitions sont données par $\lambda = B \left(\frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right)$ où B désigne la constante de Balmer.

Vitesse radiale : On peut également en déduire la vitesse radiale d'objet céleste, par effet Doppler. Celui-ci décale les longueurs d'ondes selon la relation $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$. On voit que si l'objet s'éloigne de la Terre, le décalage s'effectue vers les plus grandes longueurs d'ondes, vers le rouge, c'est le redshift.

En prenant en compte la vitesse de la Terre autour du Soleil, $V_R = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda} - V_{Terre}$. Pour IC 4593, $V_R = 22 \text{ km/s}$ ce qui est assez lent. (décalage de la raie H_α de 0.05 nm à vitesse de la Terre nulle, non repérable sur le graphe précédent).

Il existe d'autres quantités qui peuvent être déterminées, par exemple le champ magnétique peut être détecté par effet Zeeman (les raies se scindent et selon l'écart on remonte à la valeur du champ).

Transition : D'autres objets que les réseaux sont utilisés, c'est le cas de l'interféro-

mètre de Fabry-Pérot. On va maintenant présenter son fonctionnement puis essayer de le comparer au réseau pour comprendre pourquoi on préférera utiliser l'un plutôt que l'autre.

2 L'interféromètre de Fabry-Pérot

2.1 Principe

L'interféromètre de Farby-Pérot est constitué de 2 miroirs parallèles éloignés d'une distance L . On considèrera que les deux miroirs ont des coefficients de réflexion et transmission en amplitude identiques et réels. On fera l'hypothèse que la lumière envoyée est sous forme d'une onde plane progressive monochromatique $s(x, t) = so \times \exp(kx - wt)$. Le déphasage pour un aller retour dans la cavité est $\Phi = k \times 2Ln$

Calcul de l'intensité transmise en sortie du Fabry-Pérot

On aboutit à
$$It = \frac{Ii \times t^4}{1 + \frac{4r^2}{(1-r^2)^2} \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right)}$$

Il y a résonance pour $\Phi = 2p\pi$, or $\Phi = k \times 2Ln = 2\pi\sigma 2Ln$.

Il y a donc résonance pour les nombres d'ondes tels que $\sigma_p = \frac{p}{2Ln}$. L'interféromètre de Fabry-Pérot permet de sélectionner des nombres d'ondes (et donc des longueurs d'ondes).

Présentation de l'intensité normalisée du Fabry-Pérot sur diapo, introduit l'écart entre 2 nombres d'ondes de résonances successifs $\Delta\sigma$ et la largeur à mi hauteur $\delta\sigma$. On introduit la finesse, $F = \frac{\Delta\sigma}{\delta\sigma}$. On peut montrer que $F \approx \frac{\pi r}{1-r^2}$.

Transition : On a pu voir que le Fabry-Pérot sélectionne des longueurs d'ondes, comment peut-on l'utiliser en tant que spectromètre ?

2.2 Exploration du spectre

La condition de résonance, $\sigma_p = \frac{p}{2Ln}$ dépend de la longueur de l'interféromètre, ainsi que de l'indice optique. On a ainsi deux moyens de jouer sur les longueurs d'ondes sélectionnées.

Variation de L : La longueur est contrôlée en accolant des cales piézo-électriques contre un des miroirs, qui devra être fixée sur une monture élastique pour permettre le déplacement.

Variation de n : L'indice est typiquement contrôlé en faisant varier la pression, avec une pompe pour faire le vide.

En pratique les deux se font. On peut remarquer qu'ici, le balayage du spectre sera temporel, tandis que pour un réseau, il est spatial.

2.3 Comparaison entre le réseau et le Fabry-Pérot

Intervalle spectral libre :

Pour le réseau, dans une direction θ' , on trouve les longueurs d'ondes telles que $\lambda_p = \frac{a}{p}(\sin \theta' - \sin \theta)$.

En nombre d'onde, $\sigma_p = \frac{p}{a(\sin \theta' - \sin \theta)}$. Pour qu'il n'y ait pas de recouvrement entre des ordres différents, il faut que l'étalement spectral de la lumière incidente $\Delta\sigma$ soit tel que $\Delta\sigma < \frac{1}{a(\sin \theta' - \sin \theta)}$. On note cette dernière quantité l'intervalle spectral libre, et on peut remarquer ici qu'il est l'inverse de la différence de marche.

Pour le Fabry-Pérot, pour qu'il n'y ait pas recouvrement, comme $\sigma_p = \frac{p}{2Ln}$, il faut que $\Delta\sigma < \frac{1}{2Ln}$. Dans ce cas on voit que l'intervalle spectral libre est encore l'inverse de la différence de marche, c'est un résultat qui peut se généraliser.

Si théoriquement on peut faire en sorte que l'intervalle spectral libre soit aussi grand qu'on veut, on est limité en pratique. Actuellement, l'intervalle spectral libre maximal atteignable pour un Fabry-Pérot est toujours inférieur à celui qu'on peut atteindre avec un réseau. Un réseau permet d'avoir un étalement spectral de la source plus grand sans problème de recouvrement par rapport au Fabry-Pérot.

L'avantage du Fabry-Pérot en revanche est qu'il a une luminosité plus forte que le réseau. Cela permet d'être plus précis, et c'est plutôt avec un Fabry-Pérot que la raie H_α est repérée pour regarder le décalage par effet Doppler.

Conclusion

On aura pu voir au cours de cette leçon que la spectroscopie présente énormément d'applications rien qu'en astronomie. Il existe d'autres types de spectroscopies, comme en chimie.

Questions

— **Limite de résolution du spectromètre à réseau ?**

Dépend de la largeur de la fente, ainsi que du nombre de fentes éclairées

— **Intensité en fonction de $\sin(\theta')$?**

Périodique, de période $\frac{\lambda}{a}$, modulée par un sinus cardinal au carré.

— **Comment mettre la lumière dans un autre ordre que 0 ?**

Réseau en échelottes, exemple réseau blasé.

— **Raies (creusées) dans le spectre du Soleil ?**

Raies d'absorption dues à l'absorption, soit près du Soleil soit à l'atmosphère de la Terre. (Je n'ai pas trouvé où le spectre a été pris, donc choix de ne pas

commenter au cours de la leçon)

- **Pourquoi le spectre d'IC 4593 ne présente pas de rayonnement du corps noir ?**
Soit filtré, soit la température est telle qu'il est hors visible, à confirmer
- **Que se passe-t-il si l'objet étudié se déplace perpendiculairement à l'axe entre la Terre et l'objet ?**
Pas de décalage Doppler
- **Est-ce qu'une onde sort du même côté que l'entrée du Fabry-Pérot ? Résonance ?**
Oui même condition de résonance qu'à la sortie.
- **Quels types de miroirs existent ?**
Métalliques (conducteurs) ou diélectriques.
- **Comment obtenir des miroirs avec r très proche de 1 ?**
Empilements de diélectrique, avec coefficient de Fresnel, en jouant sur l'épaisseur du milieu et l'indice on peut avoir des interférences destructives en transmission et constructives en réflexion.
- **Spectroscopies en Chimie**
UV-visible : absorption ; IR : fréquences de vibration ; RMN : décalage chimique.

Remarques

- Il faut parler de résolution ! C'est un des points à introduire quand on fait le rappel sur le réseau, et à pouvoir comparer à la fin avec le Fabry-Pérot. Comparer la résolution des deux au décalage de la raie H_α .
- Etre au point sur la spectroscopie par Transformée de Fourier.
- Attention à la manip introductive (ne pas oublier la fente)
- Ne pas oublier de mentionner le mot dispersion !
- Il manque des ODG pour le Fabry-Pérot.

Bibliographie

- Astronomie Astrophysique, Agnès Acker, Dunod
- spectroscopie instrumentale, P.Bousquet, Dunod Université
- L'observation en astrophysique, Pierre Léna et Daniel Rouan