

L'Univers dans ma poche

A vertical rainbow spectrum from red at the top to blue at the bottom, overlaid with a pattern of small white stars and dots, resembling a star field or a spectral analysis background.

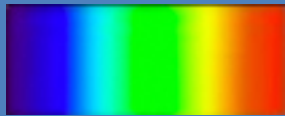
Déchiffrer la lumière des astres



Grażyna Stasińska
Observatoire de Paris

Types de spectre

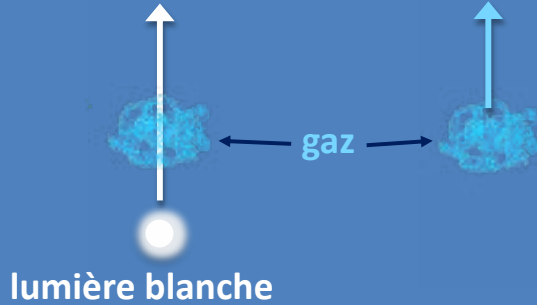
spectre continu



spectre avec raies d'absorption

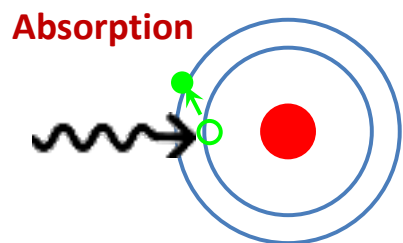


spectre de raies d'émission

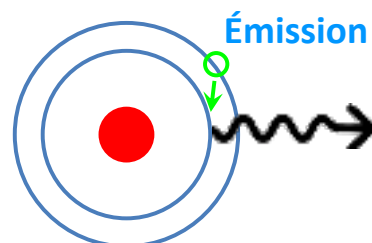


Un photon (un “grain de lumière”) peut exciter un atome en faisant passer un électron vers un niveau d'énergie supérieur. Si le photon a une énergie suffisante, il peut **ioniser** l'atome, c'est-à-dire lui arracher un électron. Dans les deux cas, le photon est **absorbé**.

Lors du processus inverse, désexcitation ou **recombinaison**, un photon est **émis**.



2



3

En 1835 le philosophe français Auguste Comte disait qu'on ne saurait jamais de quoi sont faits les astres.

Pourtant Isaac Newton avait déjà montré que si on décompose un faisceau de lumière du Soleil à l'aide d'un prisme, on obtient une tache portant les couleurs de l'arc-en-ciel : un « **spectre** » (voir TUIMP 2).

En 1814, Joseph von Fraunhofer avait construit un spectrographe qui permit de découvrir plus de 500 **raies** sombres dans le spectre du Soleil. Mais ce n'est qu'en 1860 que Gustav Kirchhoff montra que ces raies proviennent d'éléments chimiques présents dans les couches supérieures du Soleil.

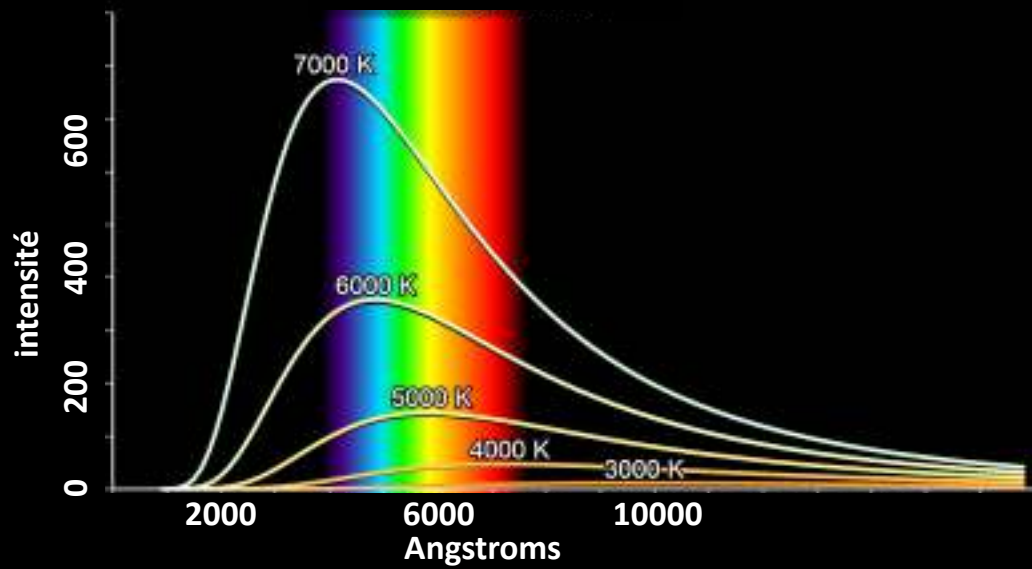
L'identification de ces raies commença peu après, contredisant les prédictions pessimistes de Comte.

C'était le début de l'astrophysique, cette branche de l'astronomie qui étudie la nature des astres à partir de l'analyse du rayonnement qu'ils émettent.

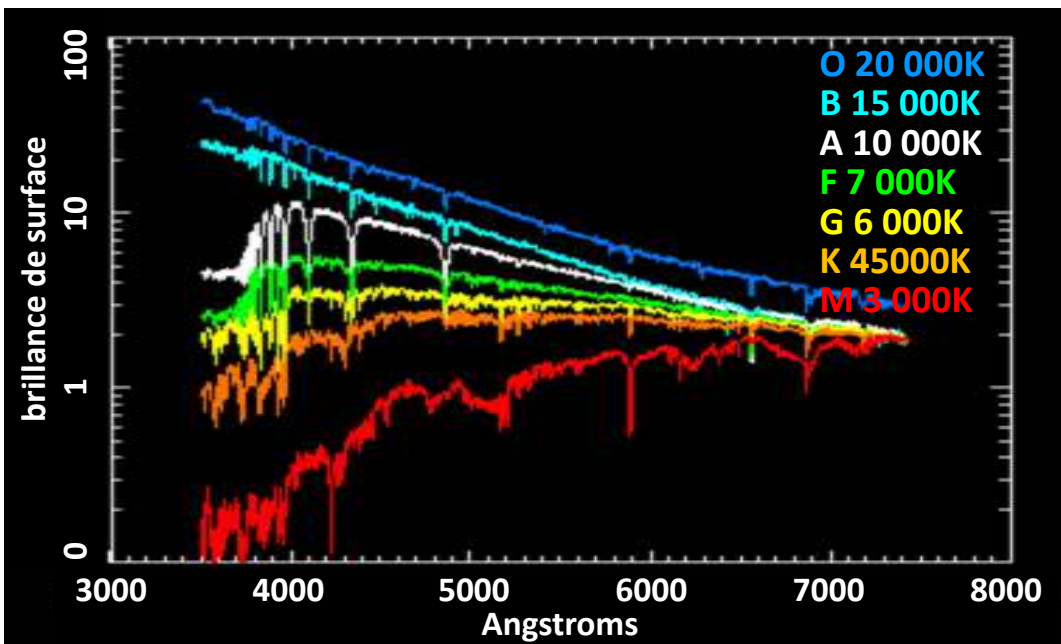
Les températures des étoiles

Toutes les étoiles n'ont pas la même couleur. Les plus froides sont rouges. Les plus chaudes sont bleues. Le Soleil, dont la température de surface est de 5505°C (5800 K) est jaune. Ces différences de couleur sont dues à la façon dont l'allure générale du spectre de rayonnement d'une étoile varie en fonction de la température, comme le montre la figure de la page ci-contre.

Au-dessous sont représentés des spectres dans le domaine visible d'étoiles réelles de différents types (O, B, A, F, G, K, M). A chaque type correspond une température. Outre la distribution globale de l'intensité du rayonnement, on remarque des raies d'absorption plus ou moins profondes, dues aux éléments présents dans l'atmosphère des étoiles sous forme d'atomes ou d'ions.



Intensité du rayonnement d'un corps chaud en fonction de la longueur d'onde, pour diverses valeurs de la température.



Spectres d'étoiles de différents types dans le domaine visible.

La composition des étoiles

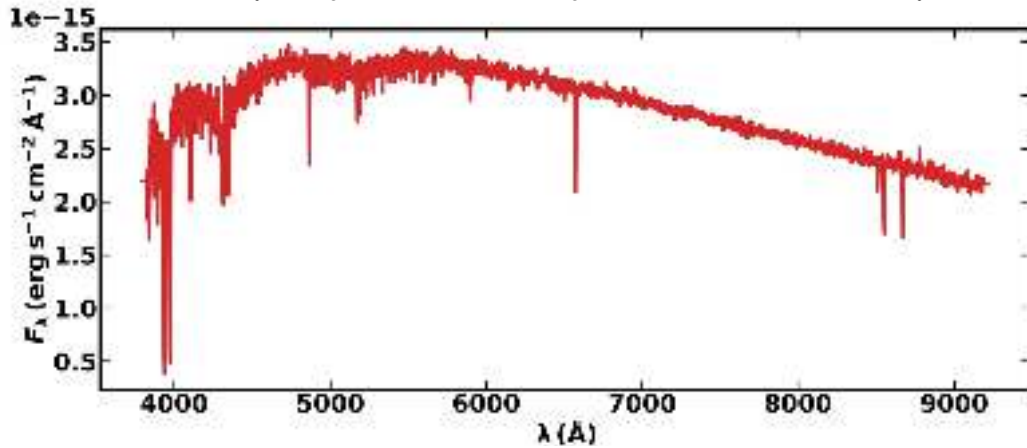
Aujourd'hui, grâce aux raies d'absorption observées dans les spectres d'étoiles, les astronomes savent quels éléments sont présents dans leurs atmosphères, et peuvent mesurer leurs abondances.

La composition chimique de l'atmosphère d'une étoile est, en général, identique à celle du nuage moléculaire où elle s'est formée. L'intérieur de l'étoile a une composition chimique différente à cause des réactions de nucléosynthèse qui s'y produisent (voir TUIMP14) mais on ne la mesure pas directement.

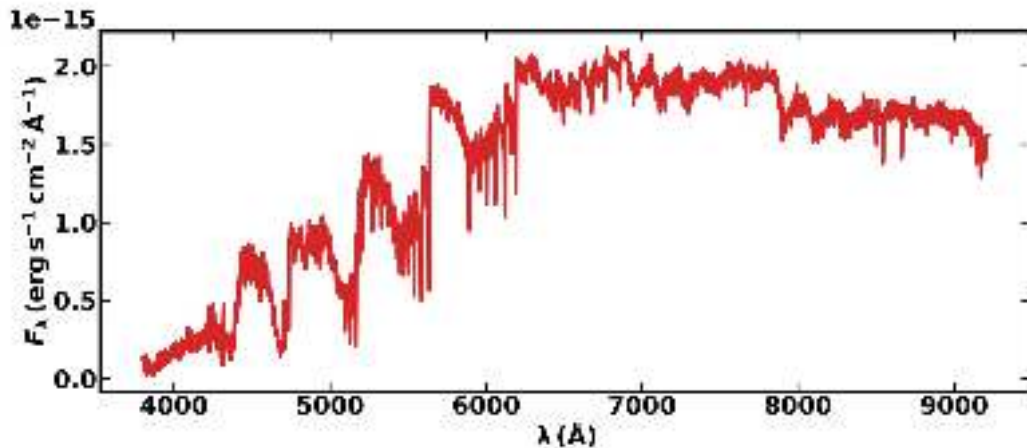
On constate qu'en gros, les étoiles ont une composition chimique semblable à celle du Soleil. Toutefois, les étoiles situées dans les parties les plus externes de la Galaxie sont globalement moins riches en éléments plus lourds que l'hélium, car elles ont été moins enrichies par des produits de nucléosynthèse.

7

Voici les spectres de deux étoiles qui ne diffèrent que par la composition chimique.



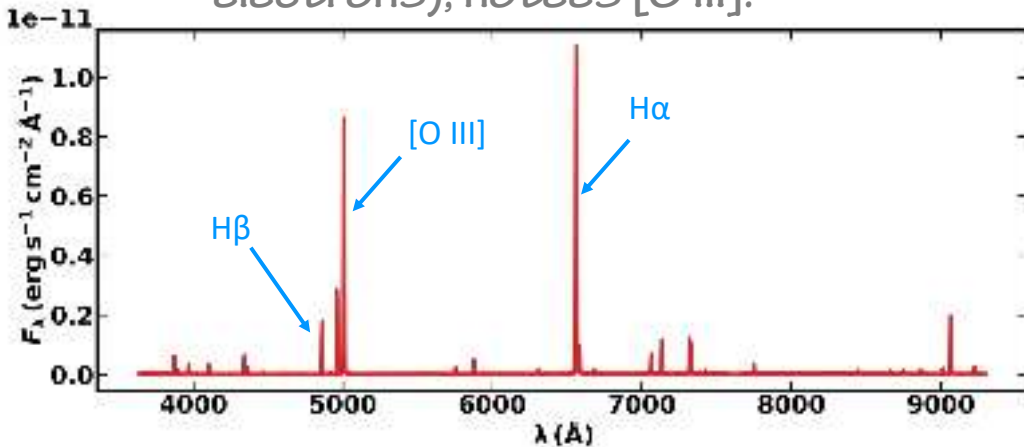
Ci-dessus : une étoile de type G de composition normale (semblable à celle du Soleil).



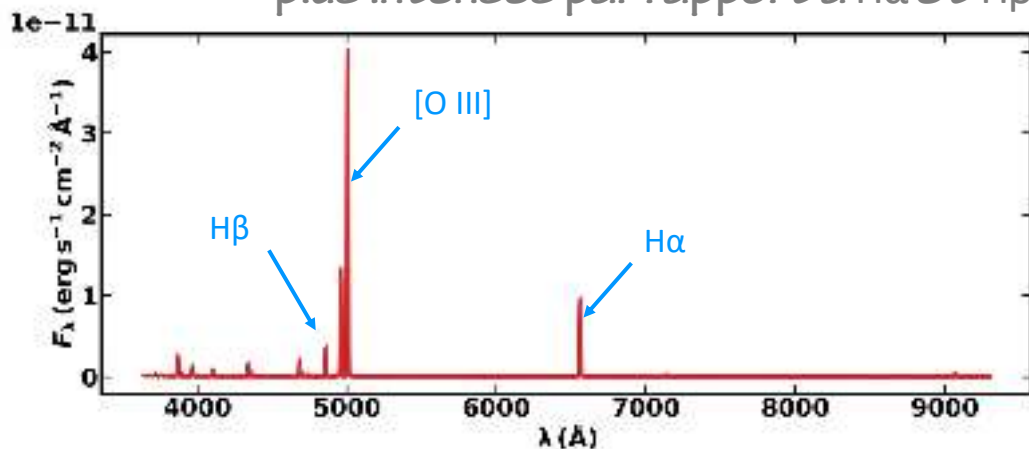
Ci-dessus : une étoile de type G dont la surface est très riche en carbone (produit dans l'intérieur de l'étoile et amené à la surface par convection). Les raies larges et profondes ainsi que la dépression aux plus courtes longueurs d'onde sont dues à des molécules carbonées. 6



La nébuleuse planétaire Hb 1 2, ionisée par une étoile de 48000 K. Les raies les plus intenses de son spectre sont les raies de **recombinaison** de l'hydrogène $H\alpha$ et $H\beta$ et les raies **interdites** de l'ion O^{++} (atome d'oxygène qui a perdu deux électrons), notées $[O III]$.



La nébuleuse planétaire NGC 7662 ionisée par une étoile de 130000 K. L'étoile étant plus chaude, elle produit une plus grande proportion d'ions O^{++} , et les raies de $[O III]$ sont plus intenses par rapport à $H\alpha$ et $H\beta$.



Les spectres des nébuleuses ionisées

Les nébuleuses sont des nuages de gaz diffus. Elles peuvent être **ionisées** par des étoiles massives jeunes dont la température avoisine 40000 K (ce sont les « régions HII ») ou par des étoiles évoluées moins massives qui peuvent dépasser 100000 K (ce sont les nébuleuses planétaires).

Les spectres des nébuleuses **ionisées** sont très différents des spectres stellaires. Alors que dans ces derniers on voit surtout des raies d'**absorption**, l'essentiel de la lumière des nébuleuses est **émis** dans quelques raies seulement, qui proviennent soit de **recombinaisons** de l'hydrogène et de l'hélium, soit de **collisions** avec des électrons libres du gaz.

Ces raies **collisionnelles** ne sont pas observées dans les étoiles et furent d'abord attribuées à un élément inconnu, appelé « nébulium ». Ce n'est qu'en 1928 que Bowen montra que ces raies proviennent d'éléments connus mais ne se produisent qu'à de très faibles densités. On les appelle « **raies interdites** ». 9

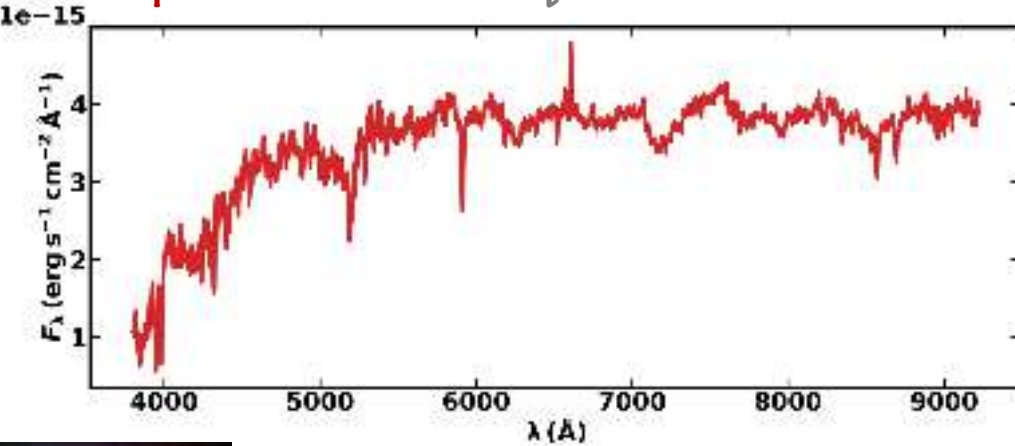
Les spectres de galaxies

Une galaxie contient des millions, voire des milliards d'étoiles et, parfois, du gaz. On s'attend donc à ce que le spectre d'une galaxie ressemble à celui d'une superposition de spectres d'étoiles et, éventuellement, de nébuleuses.

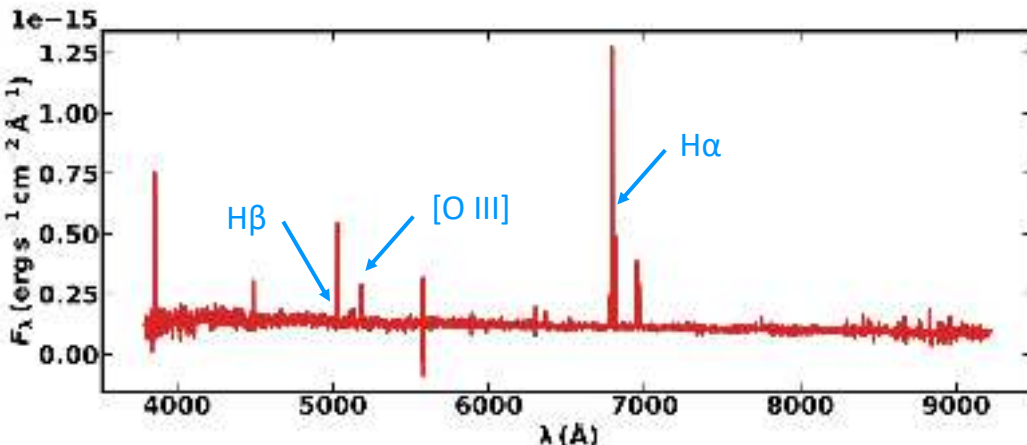
Les galaxies elliptiques (voir TUIMP 3 et 23) ne contiennent pas de gaz et les étoiles ne s'y forment plus depuis longtemps. Elles ne sont peuplées que d'étoiles vieilles, rouges, et toutes les étoiles massives qu'elles contenaient ont explosé sous forme de supernova. Leur spectre ne présente que des raies d'absorption.

Les galaxies spirales contiennent du gaz et des étoiles massives (de types O et B) capables d'ioniser le gaz. Leur spectre présente donc d'intenses raies d'émission, superposées à un spectre dominé par des étoiles chaudes.

Une galaxie elliptique. Dans son spectre, obtenu dans le cadre du Sloan Digital Survey (SDSS), l'intensité décroît vers les courtes longueurs d'ondes car la plupart des étoiles de la galaxie sont rouges. Le spectre montre les raies d'absorption caractéristiques de ces étoiles.



Une galaxie spirale. Son spectre est semblable à celui d'une région HII avec ses raies d'émission.



Les spectres des quasars

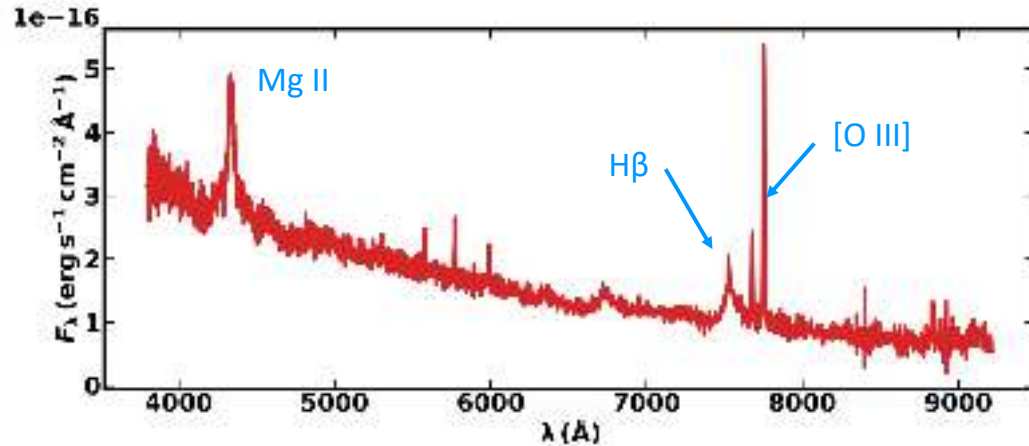
Les quasars sont des objets situés à de très grandes distances abritant en leur centre un trou noir supermassif qui attire la matière environnante (voir TUIMP 6). Avant de tomber dans le trou noir, la matière s'enroule en un « disque d'accrétion » et est chauffée à des centaines de milliers de degrés. Il en résulte un spectre très bleu.

Les raies d'émission sont élargies et décalées vers le rouge (ce décalage est appelé « redshift »).

L'élargissement et le redshift sont dus à l'effet Doppler (voir TUIMP 15), qui modifie la fréquence de l'onde lumineuse en fonction de la vitesse de la source par rapport à l'observateur. Les raies sont déplacées vers le rouge à cause de la récession des quasars due à l'expansion de l'Univers et élargies à cause de la rotation de la matière autour du trou noir.

Un quasar situé à un redshift z de 0,548, ce qui correspond à une distance d'environ 10 milliards d'années-lumière.

SDSS



À ce redshift, les raies sont décalées de plus de 50%. Ainsi, la raie $H\beta$ de l'hydrogène est observée à 7 524 Å alors que sa longueur d'onde au repos est de 4 861 Å. On voit même une raie du magnésium ionisé (Mg II) qui n'apparaît jamais dans les spectres optiques de galaxies proches.

Certaines raies ($H\beta$, Mg II) sont très larges, parce qu'elles se forment près du trou noir dans une zone où la vitesse de rotation atteint les 20 000 km/s.

Le spectre remonte vers le bleu à cause de l'émission du disque d'accrétion qui est très chaud.



Jeu

Lequel de ces objets présente des raies d'émission dans son spectre?



Seule la nébuleuse planétaire présente des raies d'émission dans son spectre.



Réponse au dos



Tous les autres objets ont des spectres de **type stellaire**.

L'Univers dans ma poche N° 30

Ce mini-livre a été écrit en 2021 par Grażyna Stasińska, de l'Observatoire de Paris, avec l'aide de Natalia Vale Asari (UFSC, Brésil).

Image de couverture : Le spectre du Soleil découpé en bandes empilées les unes au-dessus des autres. On y voit toutes les raies d'absorption formées dans l'atmosphère du Soleil dans le domaine visible. C'est le « code-barre » du Soleil. Ce spectre a été obtenu avec le télescope solaire de l'Observatoire National du Soleil à Kitt Peak, en Arizona (USA).



Pour en savoir plus sur cette collection et sur les thèmes présentés dans ce mini-livre tu peux visiter

<http://www.tuimp.org>

