

Les raies de Balmer

Où comment se découvrir la physique quantique
en pratiquant l'astrophysique dans mon jardin!

AFSCET Didier Cuminénil,
2 avril 2022



UNE PASSION ET UN REGARD au dessus du sol / de soi

J'avoue... :

J'aime passer plusieurs nuits en compagnie de belles inconnues !

Ce sont mes étoiles « Be »

et mes « nébuleuses »



Heureusement mon épouse est compréhensive

PLAN & intention

- **Partie 1 : La « spectro » dans mon jardin (les outils)**
- **Partie II : La lumière dévoilée**
- **Partie III : Avant les raies de Balmer (cas)**
- **Partie IV : Les raies de Balmer (et ses applications)**
- **Partie V : A la recherche du réel, par-delà le visible**
- **Partie VI : Position**

Ce n'est pas une communication académique, mais une sensibilisation ou un éclairage aux possibilités physiques de la lumière **par l'expérimentation spectroscopique**. Les raies de Balmer sont l'une des approches.
Par ailleurs, je m'en excuse pour ceux qui sont nourris de ou en pleine immersion dans la physique quantique. Ils trouveront parfois quelques redites à mon exposé !

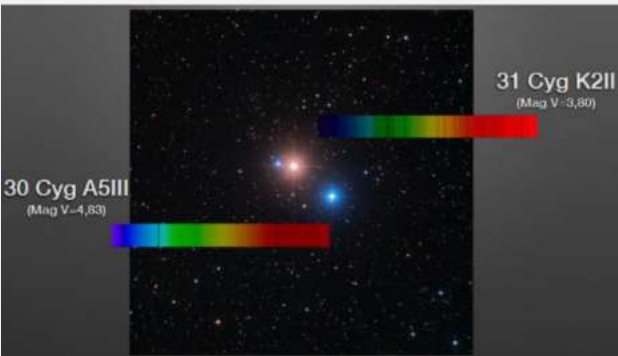
Un exposé pratico-pratique en partant de mon passe-temps ou violon d'Ingres !

Toutefois, plus conceptuel, Je terminerai par quelques réflexions sur la philosophie des sciences en rapport avec les observations astrophysiques

La « spectro » dans mon jardin

L'œil de Moscou : le spectroscopie

Pouvoir de résolution max $R=17.000$
Il permet d'accéder aux mesures des vitesses par effet Doppler, (20 Km/s) ainsi qu'à des détails précis dans le profil d'une raie. Dispersion de $0.0115\text{nm} / 0.115 \text{ \AA}$ (distance angulaire minimale autour de la raie $H\alpha$)
 $1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ mètre} = 0.1 \text{ nanomètre}$



Les yeux :

Télescope Schmitt Cassegrain
ouverture (235 mm)
Résolution 0.50" d'arc (mon œil : 1 mn d'arc)
Détail sur la lune : 1.2 Km)

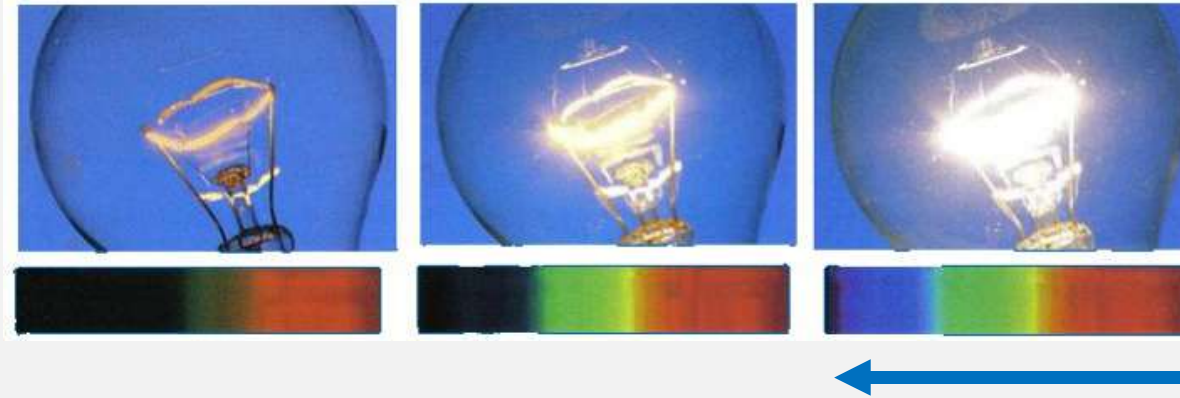
Deux caméras :

- 1) Caméra science (refroidit à -40°C)
- 2) Caméra de guidage

Le tout piloté à distance (en WiFi) sur ordinateur et bien au chaud en hiver !



la lumière dévoilée



Comment est créée la lumière ?

Plus le corps est chaud, plus son spectre se décale vers les longueurs d'ondes courtes

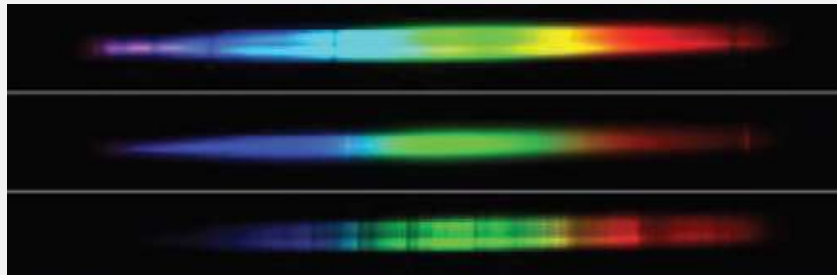
la lumière dévoilée

La lumière est constituée de photons :

- caractérisés par une longueur d'onde (couleur, énergie)
- qui se déplacent à la vitesse de la lumière
- qui interagissent avec la matière (interaction électromagnétique)

L'analyse de la lumière se fait à l'aide des profils (spectraux) de corps stellaires (étoiles, nébuleuses, planètes, etc.). On observe des raies d'émission et d'absorption à des signatures d'éléments chimiques.

Véga (type A)
Gama Cassiopée (Type Be)
Béta Pégase (type M)

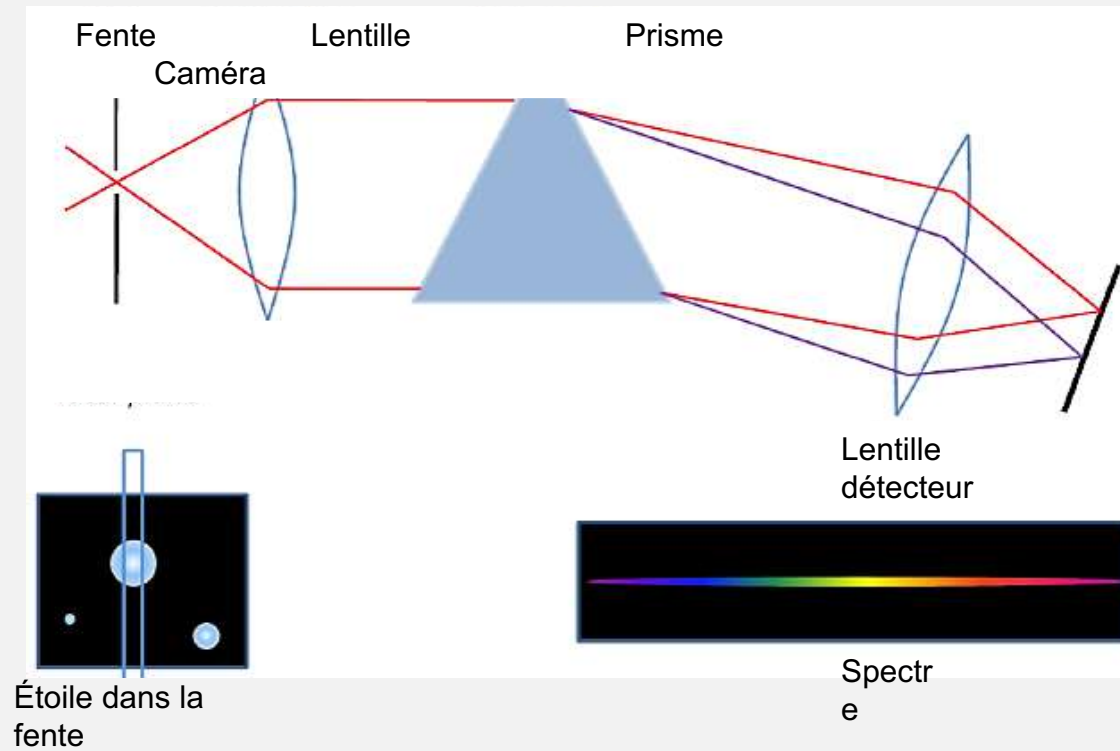


Hertzsprung-Russell : classification stellaire O, B, A, F, G, K, M (« Oh be a fine girl, kiss me“ / "Oh be a fine guy, kiss me“)

la lumière dévoilée



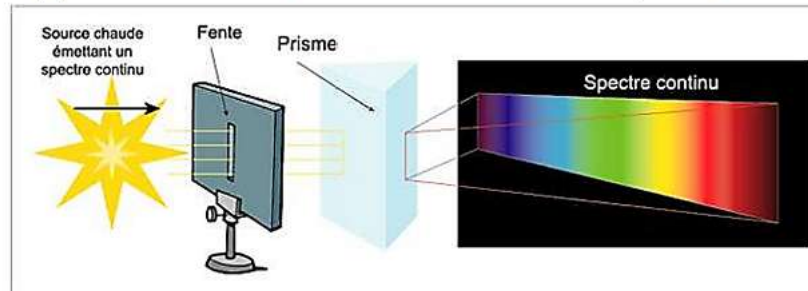
Un DVD se comporte comme un réseau de diffraction : on y voit des irisations colorées



Comprendre la lumière

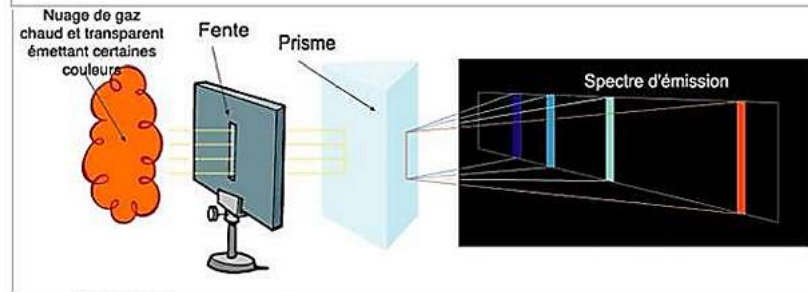
- Il existe 3 types de sources de lumière (G. Kirchhoff)

• Loi 1



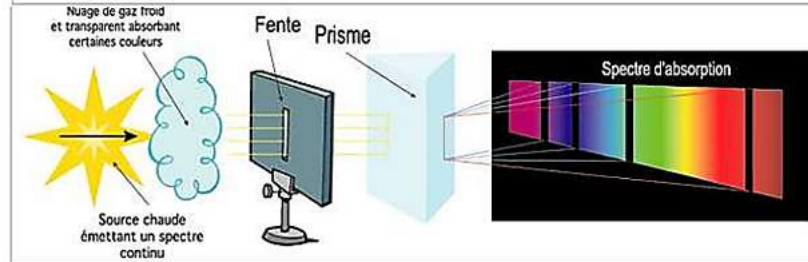
Soleil

• Loi 2



Etoile « Be »

• Loi 3



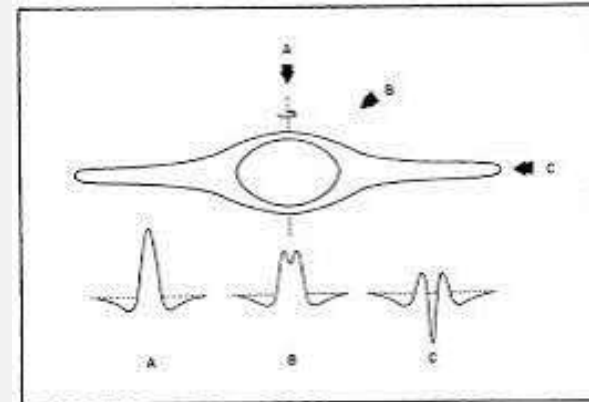
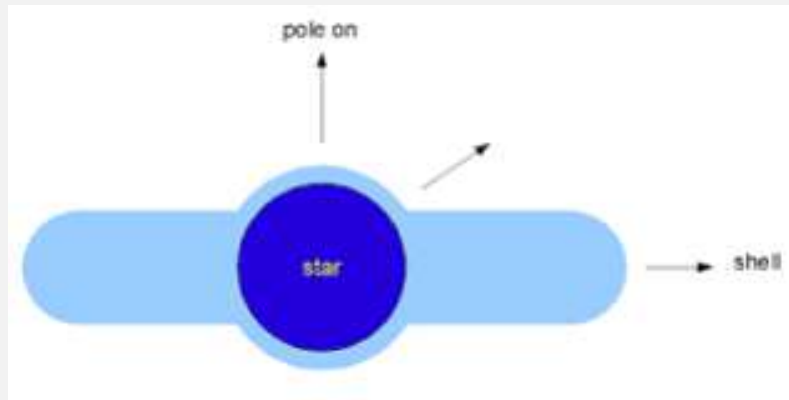
Nébuleuse

Avant les raies de balmer (cas)

Les étoiles Be sont des étoiles de Type B caractérisées par plusieurs **raies d'hydrogène en émission (Série de Balmer)**, parfois accompagnée de l'émission de raies de métaux neutres ou ionisés, tel que Fe II.

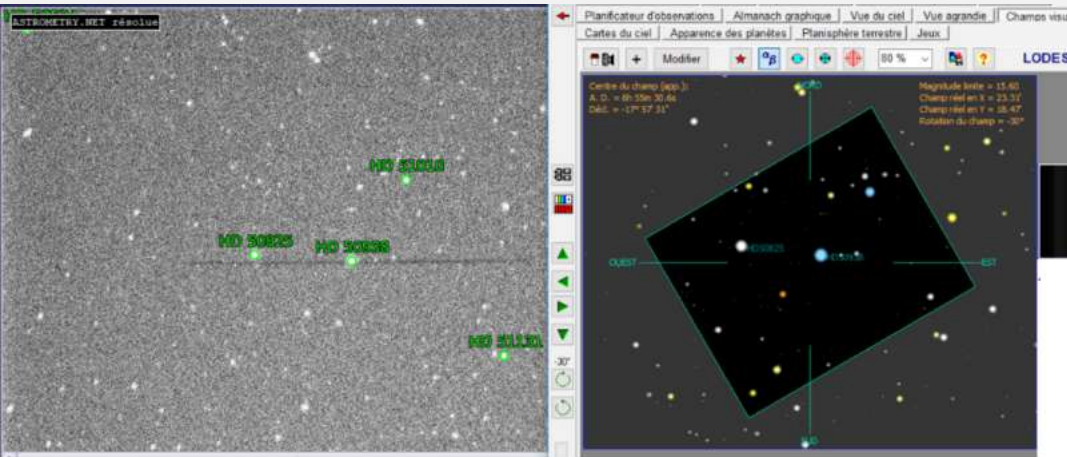
Elles possèdent un **disque de matière** s'étendant autour d'elles et responsable des **émissions observées**. Les étoiles Be **éjectent de la matière** épisodiquement pour former un disque d'accrétion ou des nuages circumstellaires, suivant un processus qui n'est pas encore élucidé.

En particulier, la **rotation très rapide des étoiles Be** (plusieurs **centaines de kilomètres à la seconde** à l'équateur), qui peut contribuer à ces éjections, ne suffit pas à expliquer à elle-seule le phénomène Be. **Le champ magnétique** pourrait être le processus fournissant le moment angulaire à l'origine du phénomène Be+

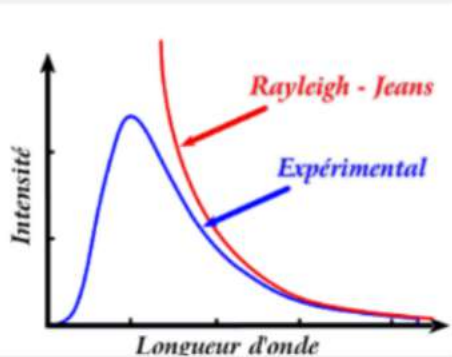
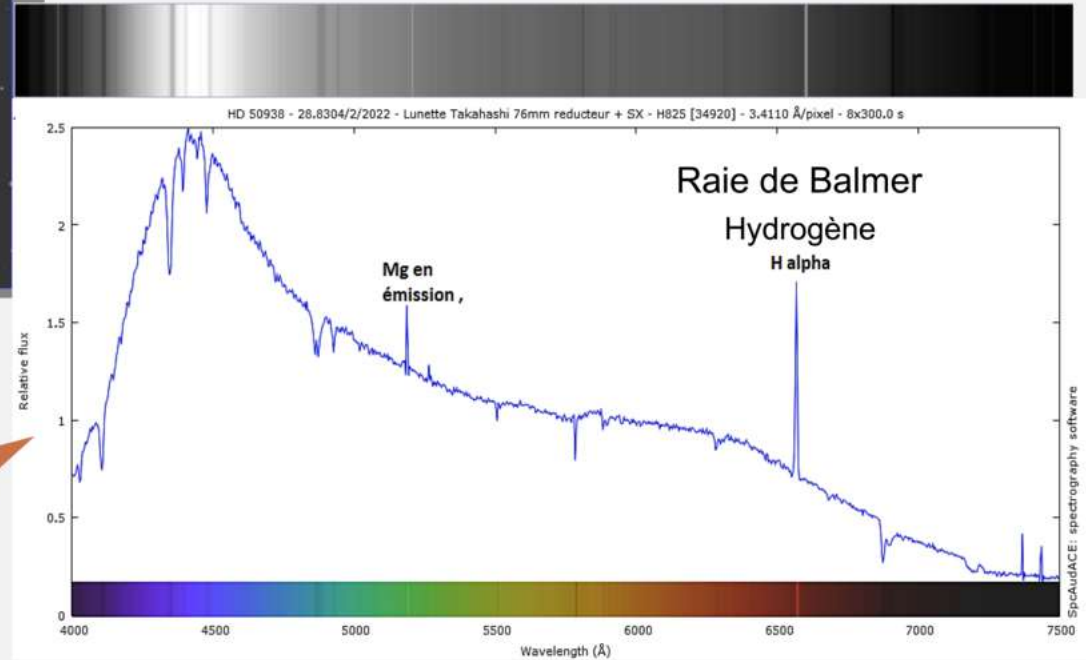


Avant les raies de balmer (cas)

Traitement spectral de l'ETOILE « Be » : HD 50938
(constellation du grand chien)



L'opération d'étalonnage spectral : loi de correspondance entre les pixels et la longueur d'onde



Mais pourquoi la courbe (flux) s'effondre à gauche ? : chute brutale, disparition du continuum !

Les raies de balmer (1er mai 1825 - 12 mars 1898)

Eduard Hagenbach a donné la liste des longueurs d'onde de l'hydrogène à un professeur de la ville de Bâle, **Jean-Jacques Balmer**, qui a trouvé une formule empirique les représentant par des nombres entiers à 60 ans !

En utilisant les mesures d'angström des raies d'hydrogène, il est arrivé à une formule pour calculer la longueur d'onde comme suit :

$$\lambda = h \frac{m^2}{m^2 - n^2} \text{ pour } m=3, 4, 5, 6, \text{ etc. et } n=2$$

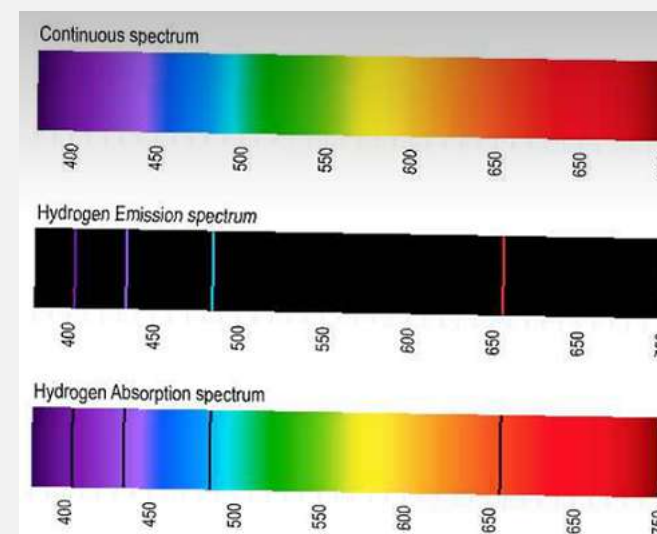
La formule de Balmer s'est avérée plus tard être un cas particulier de la formule de Rydberg.

Ces nombres représentent une notion fondamentale : **le spectre de l'hydrogène n'est pas continu mais discret** (le terme **discret** en mathématiques et physique signifie que deux valeurs sont séparées par un intervalle sans valeurs intermédiaires). Alors qu'un spectre thermique montre une transition continue entre les différentes couleurs, le spectre d'émission de l'hydrogène ne montre que **quelques couleurs précises**.

Cette formule allait être capitale dans la compréhension du mécanisme d'émission, mais il fallait lui ajouter un principe, qui a été énoncé par Max Planck (**quantification du niveau d'énergie de l'atome**).

Cette formule allait être capitale dans la compréhension du mécanisme d'émission, mais il fallait lui ajouter un principe, qui a été énoncé par **Max Planck (quantification du niveau d'énergie de l'atome)**.

Premières raies de la série			
Niveau d'énergie haut m	Niveau d'énergie bas n	Notation usuelle	Longueur d'onde (nm)
3	2	H α	656
4	2	H β	486
5	2	H γ	434
6	2	H δ	410
7	2	H ϵ	397





Les raies de balmer

Calcul a la main

La **série de Balmer** est un terme de physique atomique qui sert à désigner une série de raies spectrales de l'atome d'hydrogène correspondant à une transition électronique d'un état quantique de nombre principal $n > 2$ vers l'état de niveau 2.

L'identification de la série et la formule empirique donnant les longueurs d'onde est due à Johann Balmer (en 1885) sur la base du spectre visible. La justification *a posteriori* provient de la physique quantique.

La longueur d'onde des raies de la série de Balmer est donnée par :

$$\lambda = \frac{1}{R_H (1/4 - 1/n^2)}$$

où R_H est la constante de Rydberg associée à l'hydrogène. ($1.0968 * 10^7 \text{ m}^{-1}$)

Niv 4 \rightarrow Niv 2 4 \rightarrow 2 H β (486.1 nm)

$$\lambda = \frac{1}{R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)} \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\frac{1}{4} - \frac{1}{16} = \frac{3}{16}$$

$$\left(R_H = \text{cte} \right) 1.0968 * 10^7 \text{ m}^{-1} * \frac{3}{16} = 2.056500 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{1}{2.056500 \text{ m}^{-1}} = 4.86 * 10^{-7} \text{ m} = 486 \text{ nm}$$

Photon \rightarrow Electron

spontané absorption d'un photon lorsque l'électron reprend sa place à l'orbitale fondamentale

les Nbrs quantiques

Mon calcul au brouillon !

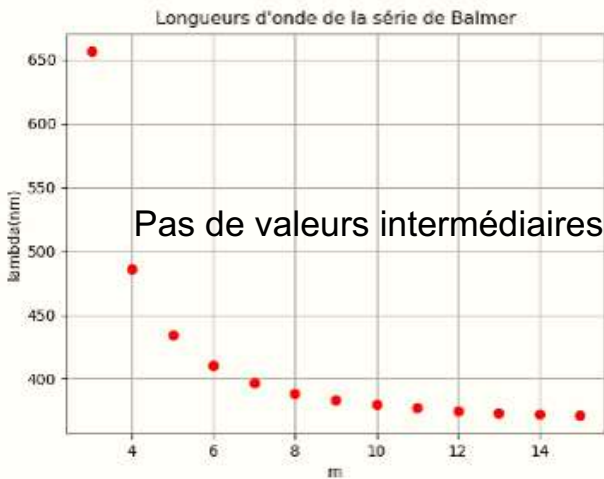
Les raies de balmer

Calcul en langage Python

En reprenant la formule de Balmer $\lambda_m = \frac{B \cdot m^2}{(m^2 - n^2)}$ (résente les différentes valeurs incrémentées de 3 à 15). Cette formule a l'avantage d'établir une infinité de longueur d'onde pour cette série, notamment dans la partie invisible du spectre

On peut vérifier sur le programme Python que les 4 premières longueurs d'onde (en nm) sont bien : **656, 486, 434, 410**.

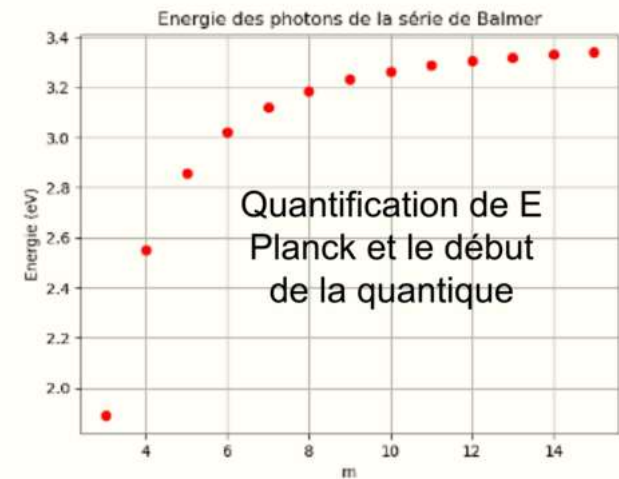
Ensuite, on va calculer l'énergie des photons correspondant à chaque longueur d'onde en fonction de la plage représentant les valeurs de m dans la formule. Pour cela on se sert de la relation de Planck : $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$



```
import matplotlib.pyplot as plt
B=364.6e-9
n=2
for m in [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15]:
    l=B*m**2/(m**2-n**2)

    print(m,l)
    plt.plot(m,l/1e-9,'or')
    plt.xlabel('m')
    plt.ylabel('lambda(nm)')
    plt.title('Longueurs d\'onde de la série de Balmer')
    plt.grid()
    plt.show()

h=6.62607015e-34
c=299792458
e=1.602176634e-19
E=h*c/l
E_eV=E/e
print(E_eV)
plt.plot(m,E_eV,'or')
plt.xlabel('m')
plt.ylabel('Energie (eV)')
plt.title('Energie des photons de la série de Balmer')
plt.grid()
plt.show()
```



Les raies de balmer

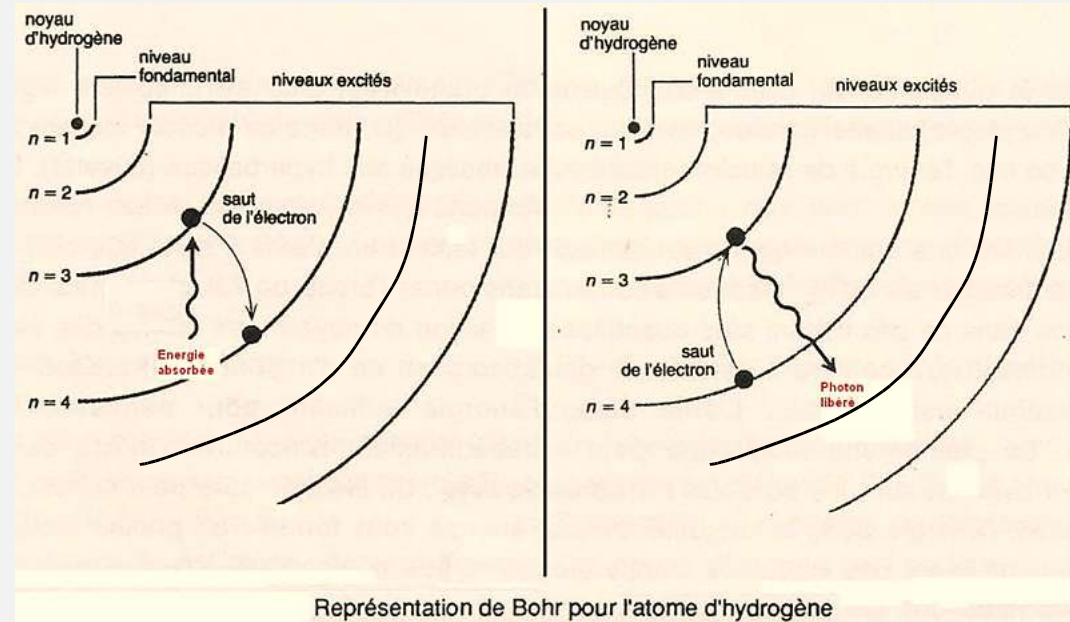


Dans la limite des **basses fréquences** (c'est-à-dire des grandes longueurs d'onde), la **loi de Planck tend vers la loi de Rayleigh-Jeans**, tandis que dans la limite des **hautes fréquences** (c'est-à-dire des petites longueurs d'onde), elle **tend vers la loi de Wien**. C'est **Max Planck** qui, à la fin du siècle, réussit à trouver une loi mathématique de rayonnement complètement en accord avec les mesures expérimentales. Mais il a fallu attendre **Einstein** pour expliquer.

SCIENCES DOSSIER
La loi de Rayleigh-Jeans

SCIENCES DOSSIER
La loi de Planck

SCIENCES DOSSIER
Les quanta de lumière d'Einstein



L'énergie ne peut varier que par **saut discret**.

Quand un électron saute d'un état à un autre (voir les niveaux m) il émet ou absorbe un photon (grain d'énergie lumineux).

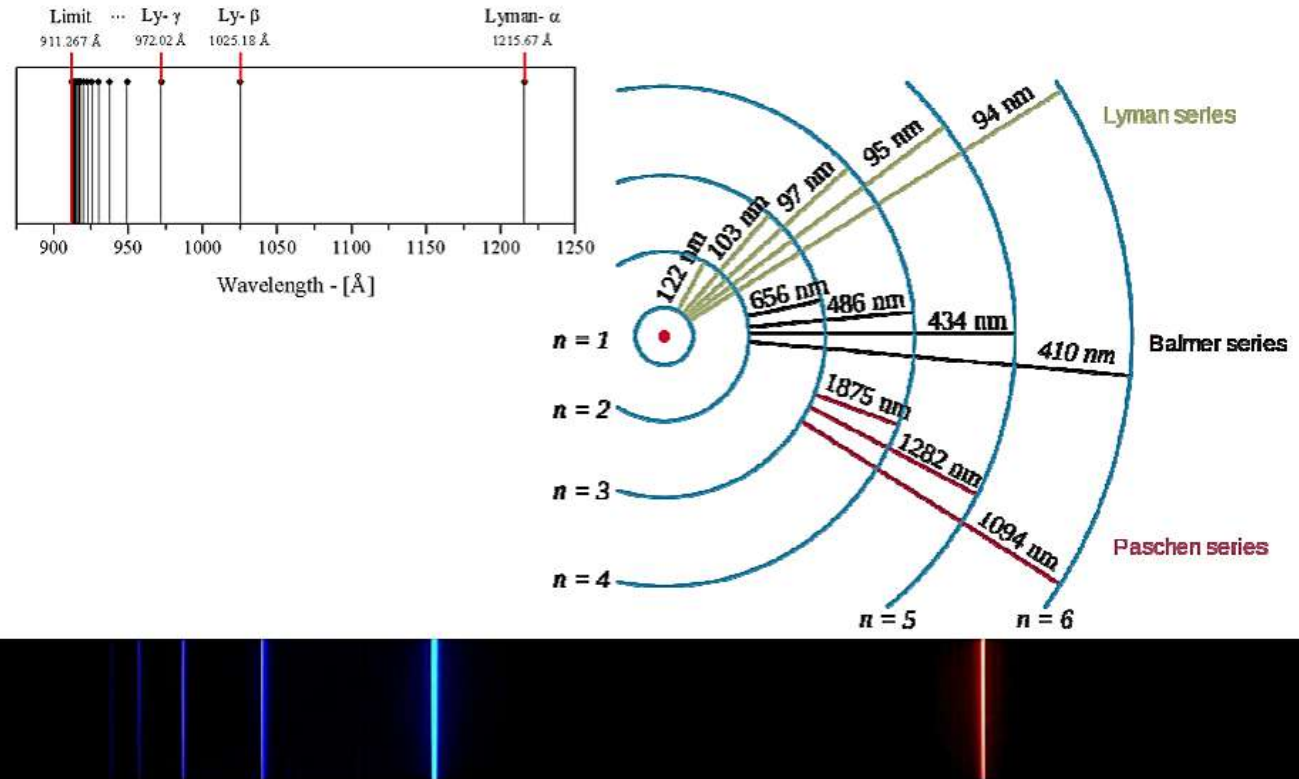
Plus la fréquence est grande, plus l'espacement entre les niveaux se réduit (Planck : $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$)

(h : constante de Planck; λ : longueur d'onde; ν : fréquence)

Les raies (le bleu, l'ultraviolet) se resserrent, le continuum disparaît (voir le programme informatique précédent)

Les raies de balmer

Cas de l'hydrogène



410 434 H β : 486nm

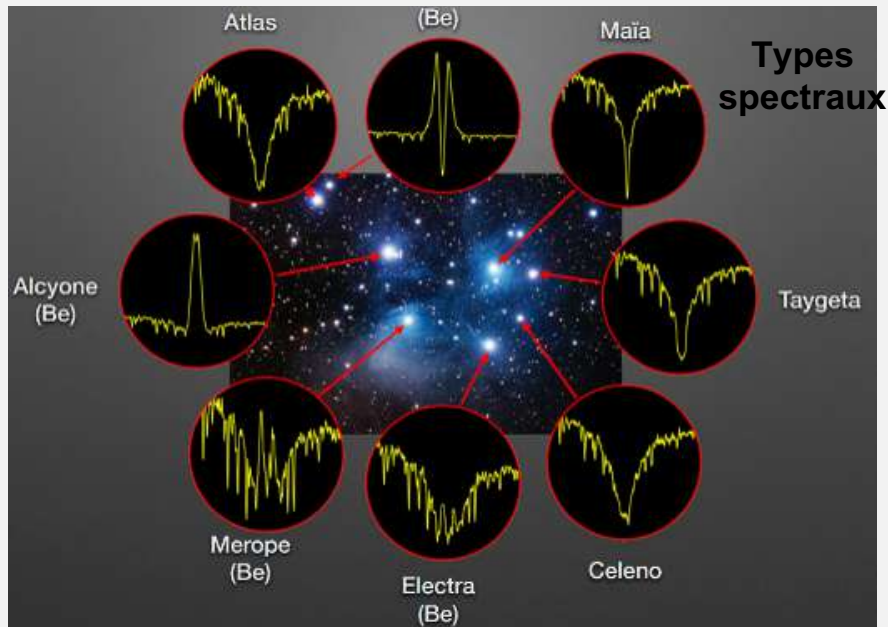
H α : 656nm

Elles représentent la longueur d'onde des photons émis lors des transitions des niveaux excités de l'atome d'hydrogène de ou vers le niveau fondamental

Les raies de balmer

La série de Balmer est particulièrement utilisée dans **astronomie** en raison de l'abondance de l'hydrogène dans l'univers. Les lignes (raies) de Balmer sont très fréquents dans un grand nombre d'objets, et elles sont aussi très intenses par rapport à celles des autres éléments.

On peut citer : **la classification spectrale des étoiles**, la détermination de **températures surfaciques** qui est basée sur l'intensité des raies spectrales, et celles de **Balmer** sont très importants dans ce sens. D'autres caractéristiques également sur les étoiles peuvent être obtenus à partir du spectre, tels que le **gravité** de surface et la **composition chimique** de l'atmosphère. Étant donné que les raies de Balmer sont très fréquentes, et leurs longueurs d'onde sont bien définies, elles peuvent être également utilisés pour déterminer la **vitesse radiale** par effet Doppler.



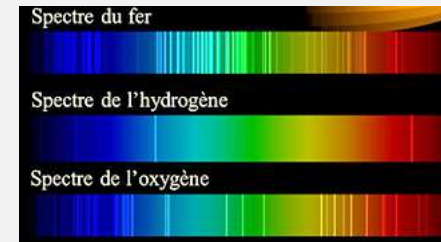
Calcul de la courbe de Planck de l'UV au rouge...
Température trouvée : **10000 K** (loi du corps noir)

Les raies de balmer

quelques applications

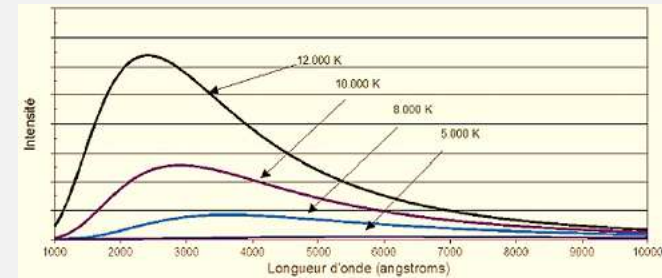
• Identifier un élément chimique

- La mesure de la longueur d'onde permet d'identifier l'élément chimique responsable.



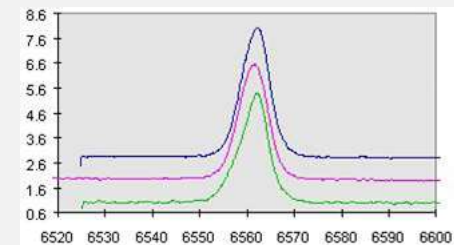
• Déterminer une température d'étoile

- On recherche la température de surface qui simule le continuum du profil observé (courbe de Planck)



• Mesurer une vitesse d'expansion d'enveloppe

- Le profil d'une raie est affectée par l'effet « Doppler-Fizeau ». Les étoiles qui ont une vitesse de rotation élevée présentent des raies plus larges.

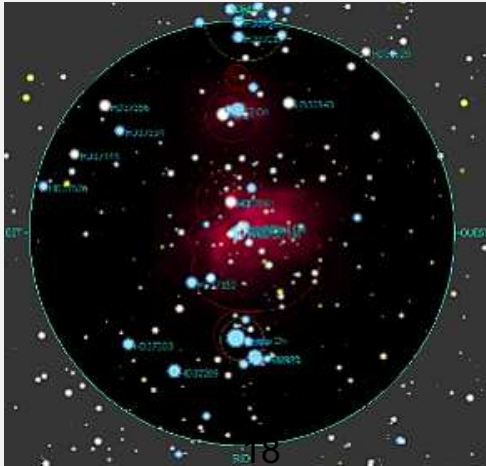


Les raies spectrales se déplacent en fonction du temps

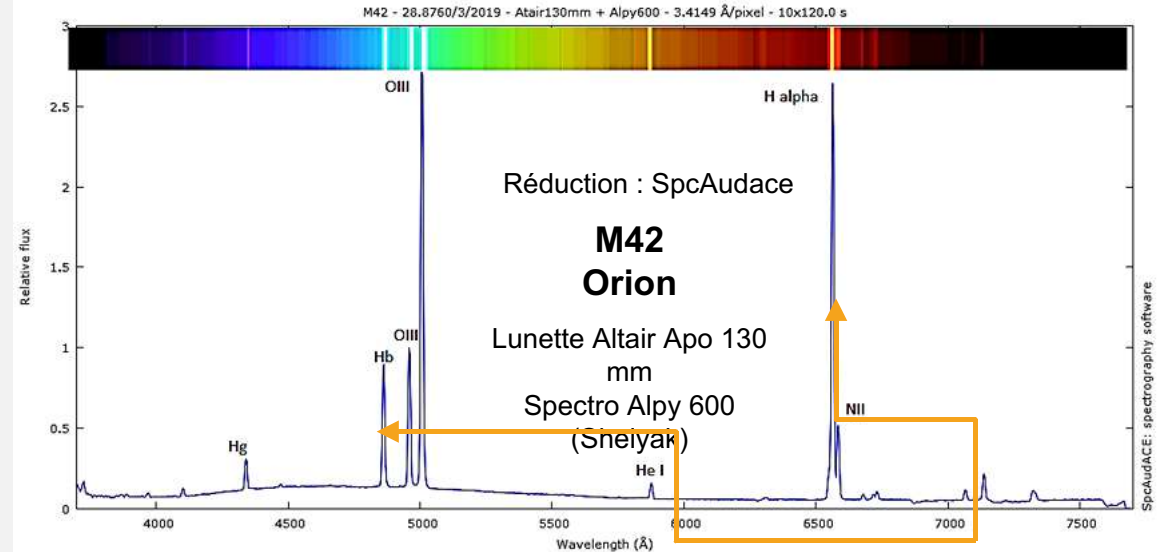
• Confirmer : une nébuleuse planétaire (signature spectrale) ou

Au delà des raies de balmer

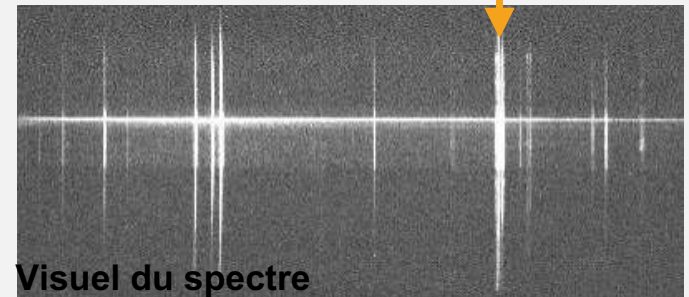
quelques applications



Nébuleuse diffuse à émission et réflexion (M=4; dimension : 90' x 60')



Raie de Balmer



Visuel du spectre

Les gaz et les plasmas sont tenus, car le continuum est atténué. La finesse des raies montre des vitesses faibles dans les gaz. La couleur rouge est caractéristique du gaz H II qui est électrisé par des étoiles jeunes et chaudes en arrière plan.

La température électronique (T_e) dans la région H II de la nébuleuse est : **9834 Kelvin** (calculée par SpcAudace).

La densité électronique (N_e) de la nébuleuse est : **2846. e-/cm³** (calculée par SpcAudace).

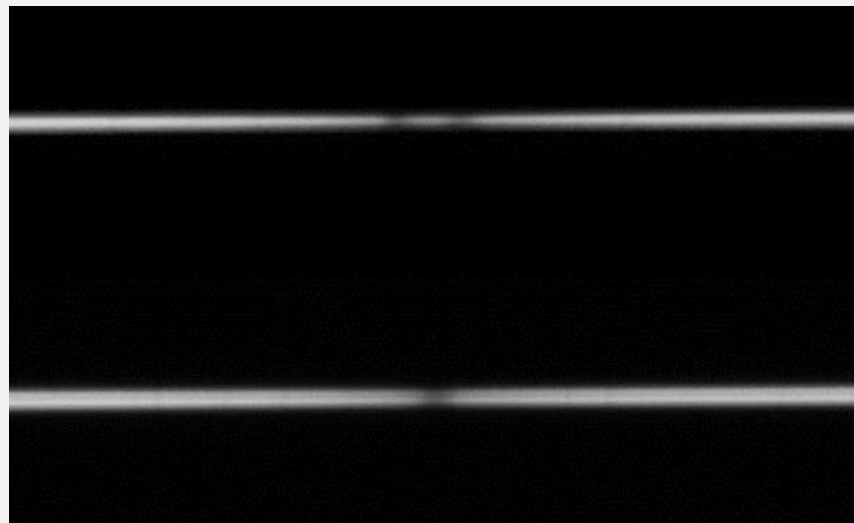


Les raies de balmer

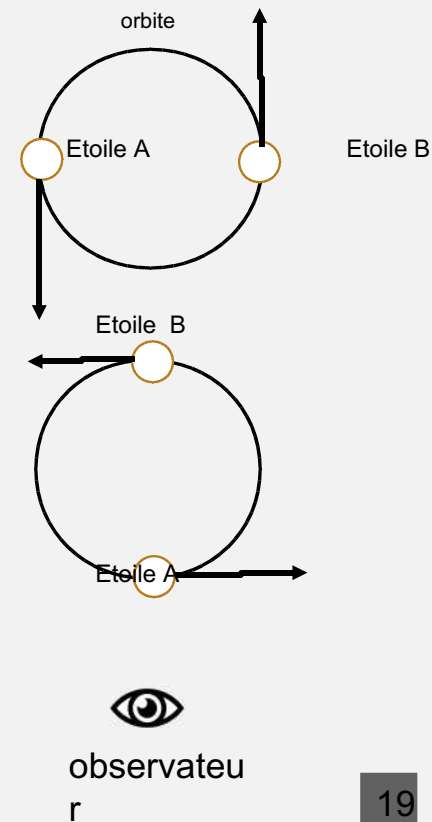
quelques applications

Spectres obtenus sur l'étoile bêta Aurigae $H\alpha$ 6562.88 Å

Le 13/02/2019 10x180s
Vitesse tangentielle max



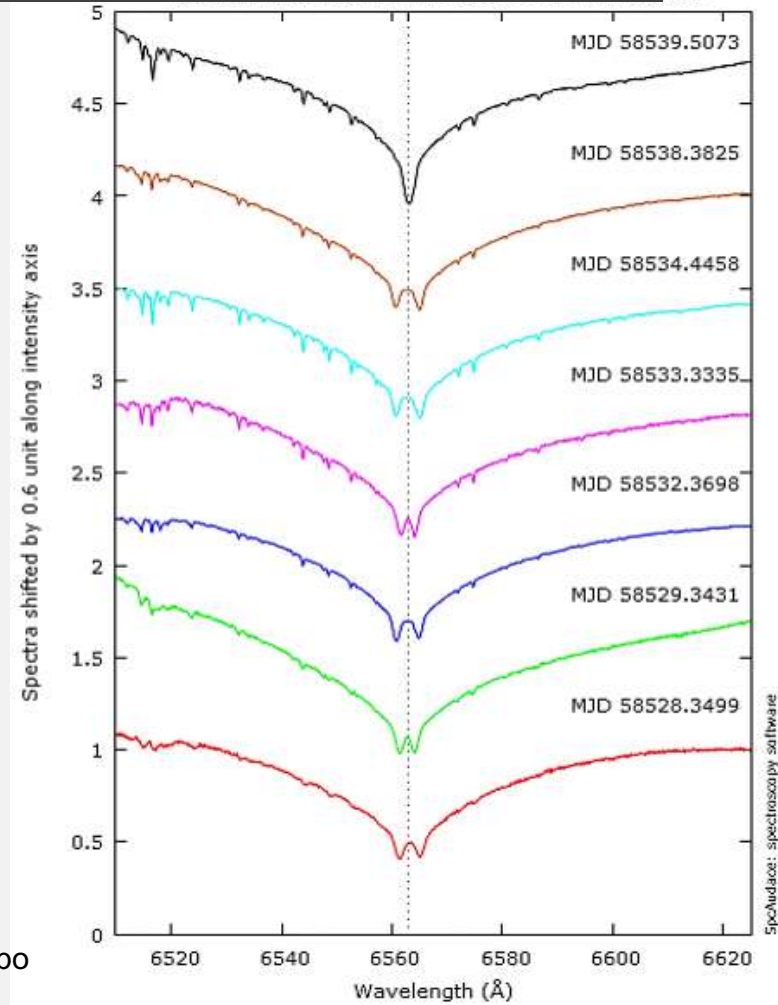
Le 24/02/2019 10x180s
Vitesse tangentielle nulle



Les raies de balmer

quelques applications

Les différents profils spectraux de l'étoile β Aurigae:
spectres traités par le logiciel de B. Mauclaire
« SPC Audace »



0 Å

4.176 Å

4.211 Å

2.42 Å

3.94 Å

2.575 Å

3.5868 Å

20

merci à mon collègue et ami, Michel Dumont qui m'a permis d'utiliser cette diapo



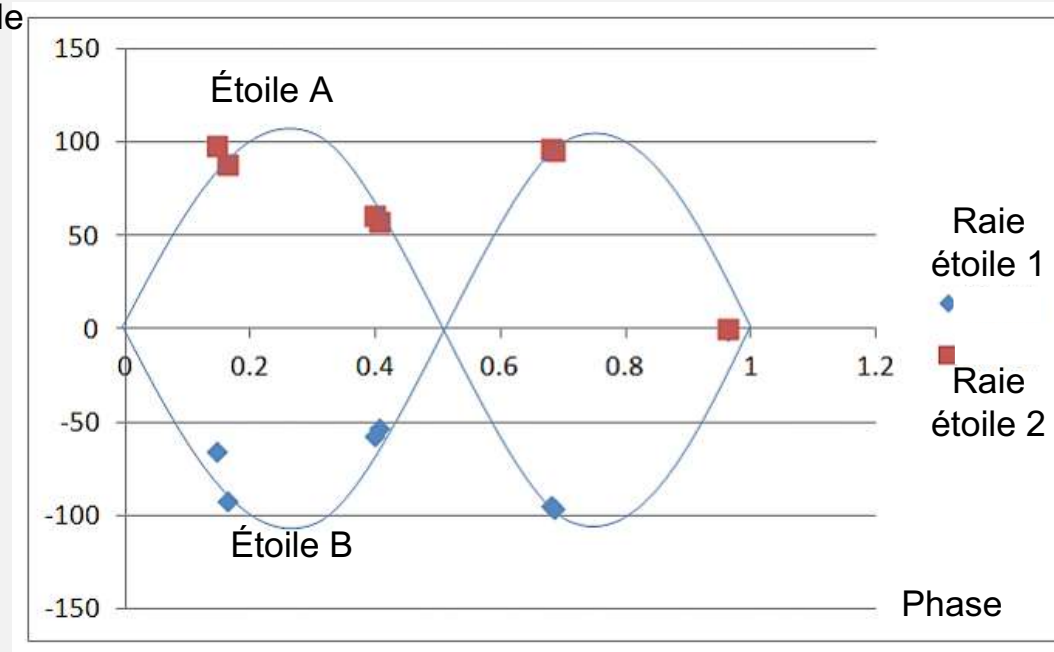
Les raies de balmer

quelques applications

Vitesse radiale
(en Km/s)

Vitesses radiales des étoiles
A et B du couple :

- $v_A = 106.5 \text{ km/s}$
- $v_B = 105.9 \text{ km/s}$



Merci à mon collègue et ami, Michel Dumont qui m'a permis d'utiliser cette diapo

A la recherche du réel Par-delà le visible

Je calcule des températures, je mesure des vitesses et des densités électroniques, etc., mais je ne vais pas sur place mesurer ! Du reste comment peut on postuler des univers à 11 dimensions, des cordes, des boucles sans valider scientifiquement ces hypothèses ! Combien d'astrophysiciens ont une certaine foi dans le système, dans la théorie et se perdent dans les méandres de la métaphysique !

Pour rappel, il existe **4 attitudes philosophiques** (exposé s'adossant au livre de **Bruno Jarrosson** : invitation à la philosophie des sciences, Seuil, 1992)

1) **Le réalisme fort :**

Le réel existe **indépendamment** de l'observateur. Je peux prédire avec une quasi certitude la valeur physique de la température (10 000K) de ma « Be ». Il existe bien un élément de réalité correspondant à cette grandeur. Le réel extérieur à ma pensée est bien connaissable. Je modélise, je simule le réel qui devient réalité, Ma connaissance m'offre une représentation fidèle de la façon dont **le monde est indépendant de l'esprit**. Mais ne suis-je pas trop **déterministe** à travers des calculs qui prônent implicitement l'enchaînement de causalités ?



Mécanisme de la vision
d'après
un dessin de René Descartes.

A la recherche du réel Par-delà le visible

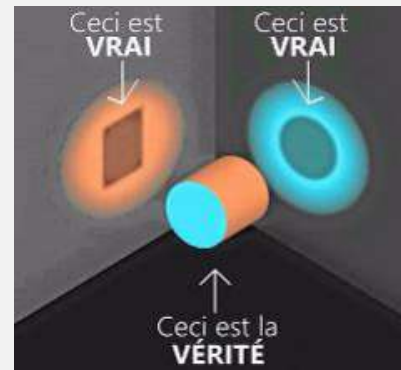
2) Le réalisme faible :

On admet l'existence d'un réel indépendant de l'observateur mais on considère que celui-ci est **voilé, masqué** (voir Bernard d'Espagnat). Ce sont mes **sens** à partir d'observations qui **interprètent le réel**. Certes, Il y a convergence des observations : une supernovæ est une étoile qui explose et qui deviendra peut être par la suite une « naine blanche ». La communauté scientifique s'accorde sur ce point et on peut observer ces phénomènes.

Mais ne confond t'on pas ce qui est **réel** de ce qui est **possible** qu'il soit et où que je veux que cela soit, On sait modéliser l'effondrement d'un étoile, l'énergie gravitationnelle, la dégénérescence de l'électron. Ne suis-je pas entrain de modéliser un phénomène qui correspond à **ma perception de l'univers**, à mon intuition ou à ce que je souhaite voir ?

Peut on distinguer une **croissance**, d'une **connaissance** ?

Finalement la connaissance n'est qu'une croyance dans laquelle nous avons une très forte croyance !



A la recherche du réel Par-delà le visible

3) L'instrumentalisme :

L'astrophysique (l'une des branches de la science) est un **outil, un instrument**. Celle-ci se réduit à des mathématiques, des règles de calcul, éclipsant même la réalité de la physique. On se garde de fournir des interprétations. Finalement on s'intéresse plus au **comment (utilité pratique) qu'au pourquoi**. On évite de donner du sens aux conclusions !



Les **théories** sont alors vues que comme des **instruments**.

L'instrumentalisme interdit complètement toute hypothèse ontologique sur la constitution du monde. Une théorie, pour un instrumentaliste, doit être simplement "empiriquement adéquate».

Peu de place à la philosophie, à la métaphysique dans ce courant de pensée. On s'en tient à la concordance entre les faits et la théorie sans **se prononcer sur le réel en soi**. Un instrumentalisme **évite** de donner un **jugement de valeur** à une théorie scientifique existante.

Par exemple, il ne dira pas que la mécanique de Newton est fautive mais que la relativité réduit son champ d'application. **Dans le fonds, elle restreint la manière trop confiante d'aborder les sciences.**

What is Gravity?

Newton said	Einstein said
	
$F = Gm_1m_2/r^2$	$G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$
It's a force	It's a distortion of space & time.
It depends on mass.	It depends on energy.

As we have seen, matter does not simply pull on other matter across empty space, as Newton had imagined. Rather matter distorts space-time and it is this distorted space-time that in turn affects other matter.

A la recherche du réel Par-delà le visible

4) L'idéalisme :

Ceux qui se réclament aujourd'hui de ce courant de pensée sont rares. C'est **mon esprit qui invente la réalité**. Même l'accord avec les autres sur l'expansion de l'univers n'est qu'une idée. C'est un **processus de pensée qui construit des représentations** et qui ne les considère pas comme **des choses en soi**. Les objets n'ont pas de réalité en eux-mêmes, la preuve, la « Be » que j'observe avec mes instruments dont la lumière a parcouru des dizaines de millions d'années n'existe probablement plus en 2022 et est elle réelle (je ne peux pas remonter dans son passé pour vérifier) ? Sur la forme ce sont des pixels fantômes qui apparaissent sur mon écran. d'ordinateur .

Attention l'idéaliste n'exclut pas le réel Il convient de faire une **distinction entre le réel et la réalité**.

Le **réel est** un concept ontologique qui désigne ce qui existe en dehors et indépendamment de nous. Il se définit par rapport à celui de **réalité** empirique, qui, lui, désigne ce qui existe pour nous grâce à notre expérience.

Supprimons par la pensée toute interaction avec le monde, il ne restera aucune réalité. Mais le monde n'a pas disparu pour autant et que plus rien n'existe.



Poussé à l'extrême l'idéalisme devient une sorte de subjectivisme ou de solipsisme radical (ce qui est certain c'est que j'existe et je pense !).

position

Mes sens sont limités. En tant qu'être vivant, Je me suis développé biologiquement sur une petite planète bleue composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et éclairée par une petite étoile (jaune) avec une vision dont la longueur d'onde s'étend entre 380 et 780 nm. Mon acuité visuelle d'une minute d'arc est faible . Je passe sous silence les limites de l'audition (20 et 20.000 hertz, et encore !), du toucher, etc.

Si j'utilise un « spectro » fixé derrière mon télescope, **j'élargi ma représentation du monde**, je pars à la recherche du réel et j'entrevois le monde subatomique) à travers les jeux de lumière et les raies de Balmer ! **Le réel lève partiellement son voile grâce à mes prothèses numériques !**

Je suis en accord avec ce que dit Etienne Klein : *"La science contredit presque toujours le bon sens »* et je ne passerai pas sous silence sa boutade : *« il y a une différence de taille entre M. Tout-le-monde et un scientifique : le premier croit savoir ce qu'il ignore, le second cherche ce qu'il ne sait pas encore ».*

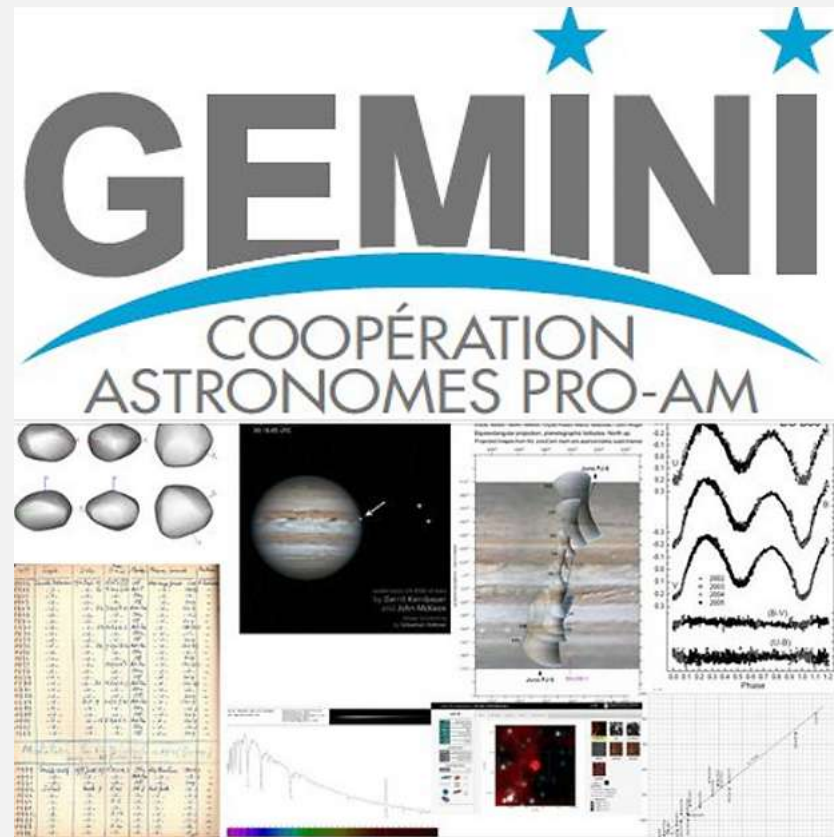
C'est donc la connaissance, plus que les croyances, les sens qui sont les moteurs de l'humanité
« La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information » Einstein
Si nous revenions 1000 ans ou même un siècle dans le passé (suite à un désastre mondial), on se rendrait vite compte que la caractéristique première de notre bien être est basée sur la science.

La connaissance scientifique représente un levier essentiel au développement social et économique de nos société. La démocratiser est alors primordial.



Merci pour votre attention

« Connaître son ignorance est la meilleure part de la connaissance. » (proverbe Chinois ?)



bibliographie

