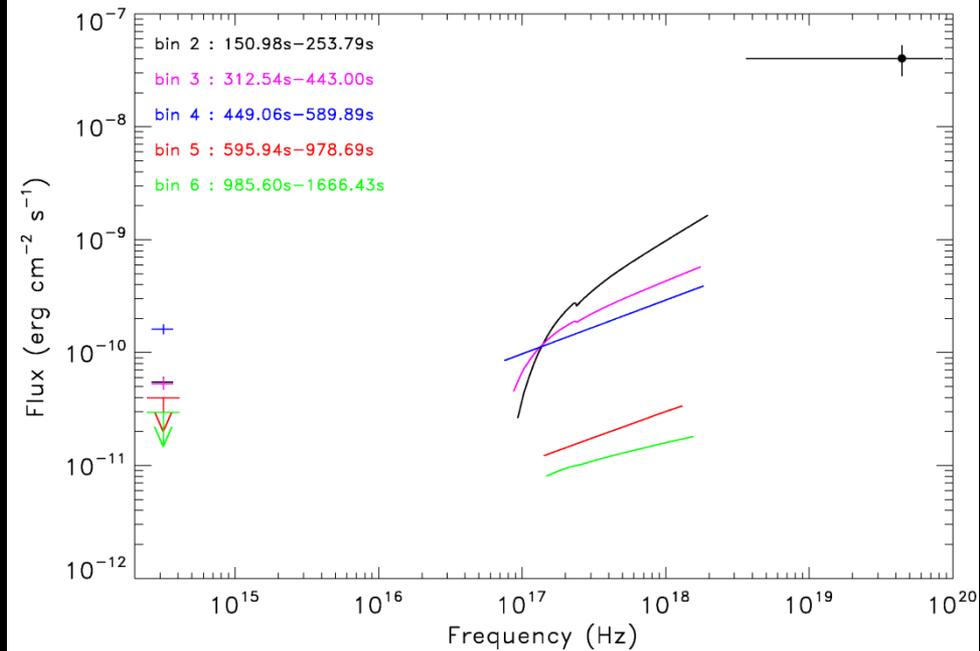
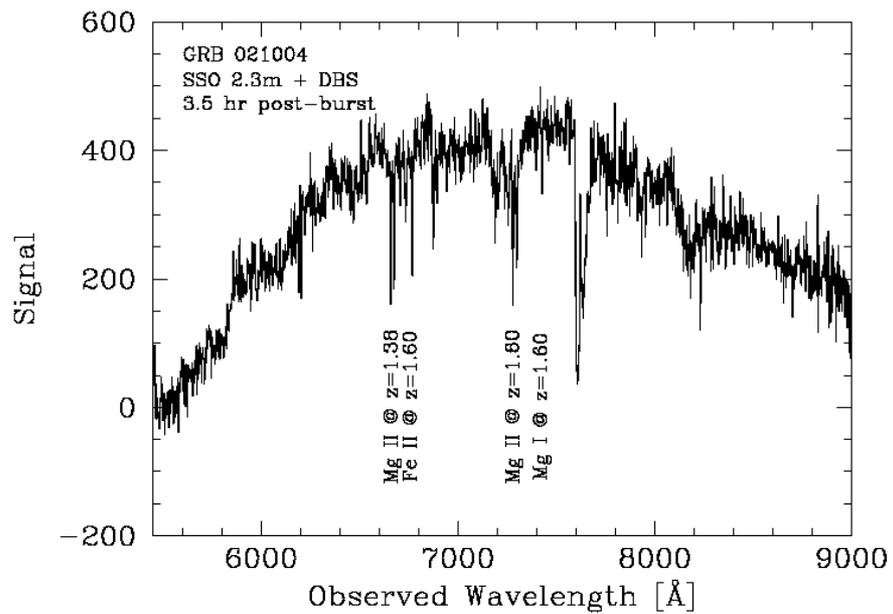


LA SPECTROSCOPIE



LA LUMIÈRE – NOTION D'ONDE

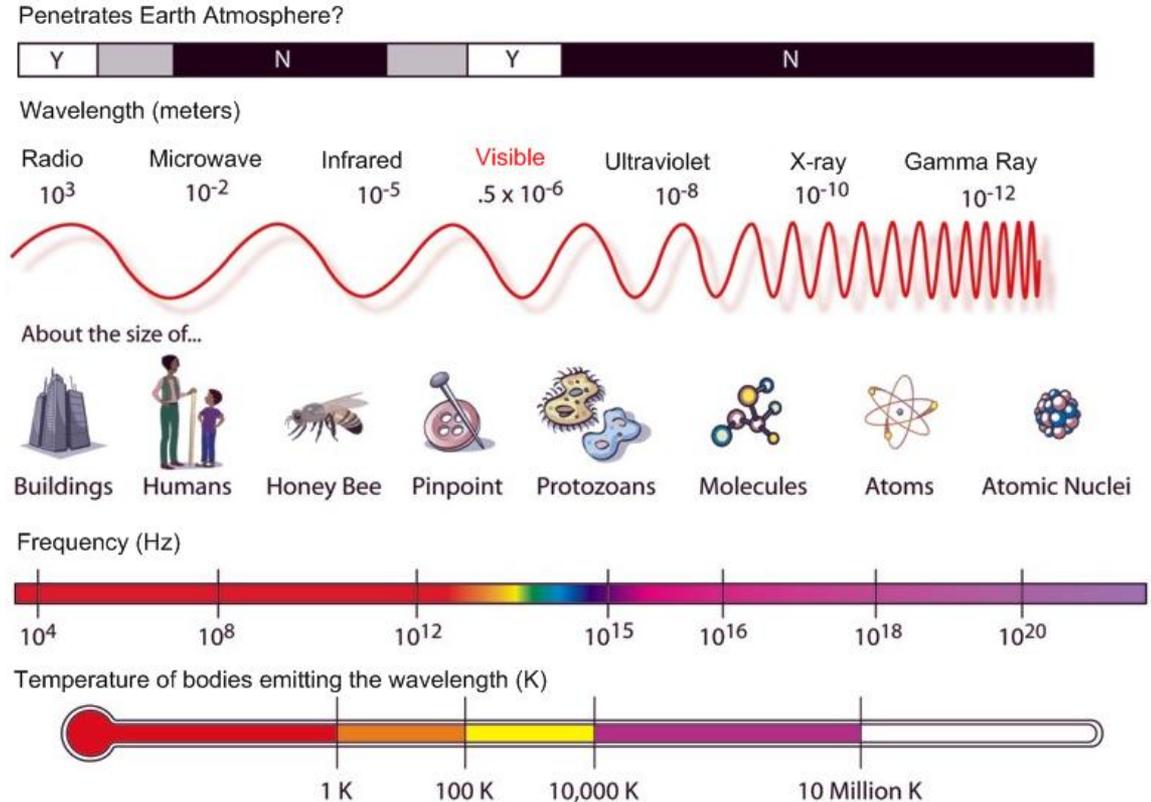
Vecteur d'une des quatre force fondamentale

Notion dualiste :
onde ou d'un flot de particules (les photons)

La lumière est une **onde électromagnétique** : elle n'a pas besoin de support physique (comme une onde acoustique), et se propage dans le vide à une vitesse finie, notée c

A noter que cette vitesse est la vitesse limite qu'un corps de masse non nulle peut avoir si on lui fourni une énergie infinie.

The Electromagnetic Spectrum



RELATIONS USUELLES

Les grandeurs caractéristiques sont :

λ : la longueur d'onde, exprimée en mètres

T : la période, exprimée en secondes

ν : la fréquence, exprimée en Hertz

Les constantes importantes sont :

$c = 299792 \text{ km/s}$

$h = 6,626068 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

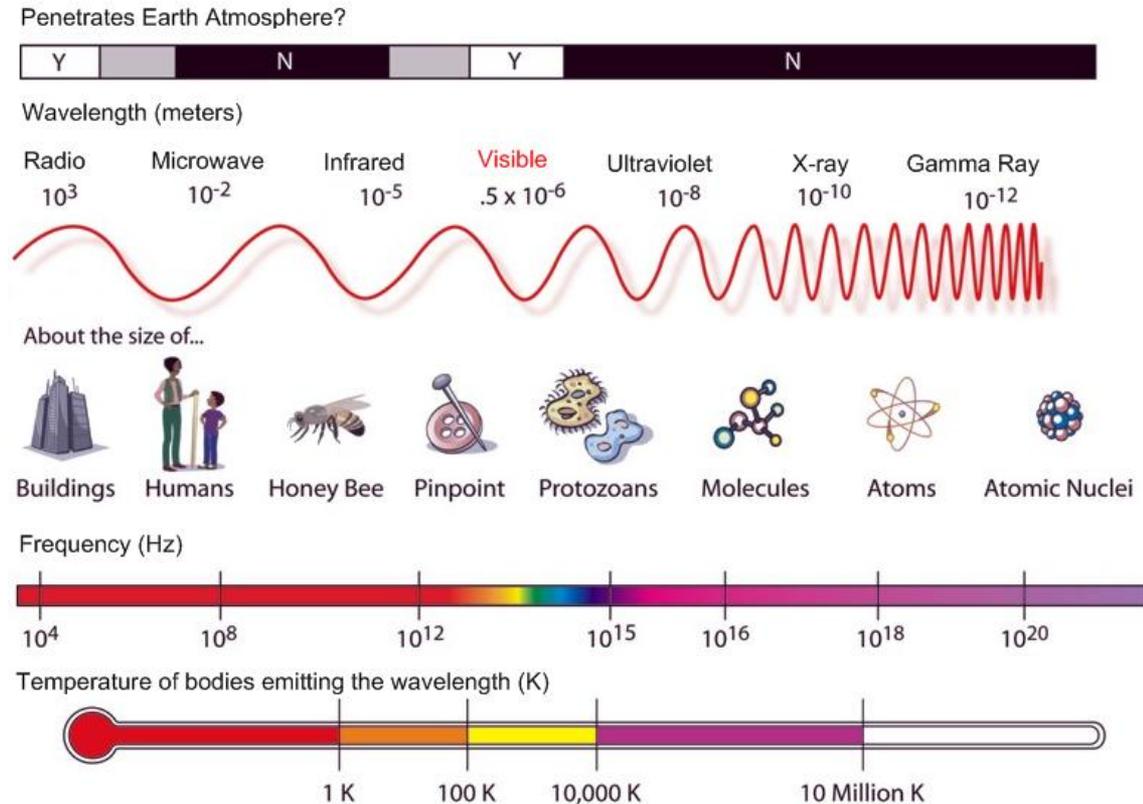
Il y a quelques relations usuelles à connaître pour la lumière :

$$\lambda = c \times T$$

$$\nu = 1 / T = c / \lambda$$

$$E = h \times \nu$$

The Electromagnetic Spectrum



DECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE

La découverte que la lumière visible n'est pas toute la lumière est due à Herschel (qui découvrit également Uranus)

Il est possible de décomposer la lumière, il s'agit de la spectroscopie

On caractérise un spectroscope par son **pouvoir de résolution**

$$R^{-1} = \lambda/\Delta\lambda = \Delta\nu/\nu = \Delta E/E$$

avec ΔX la séparation minimale mesurable entre deux éléments de X.



LES MÉTHODES SPECTROSCOPIQUES

Décomposer la lumière revient à mesurer la longueur d'onde de chaque photon pour construire un histogramme de répartition en fonction de l'énergie (le spectre)

$$E = h \times \nu$$

Si un photon laisse toute son énergie quelque part, si je peux la mesurer, alors j'ai accès à sa fréquence, et donc sa longueur d'onde

Cette méthode est possible, et est couramment utilisée à très courtes longueurs d'onde (rayons gamma), où l'énergie est grande (on peut atteindre le Joule !).

Dans le cas de l'optique, ce n'est pas encore possible : l'énergie est trop faible et le nombre de photons à mesurer par secondes trop grand. On utilise deux autres méthodes

LE PRISME

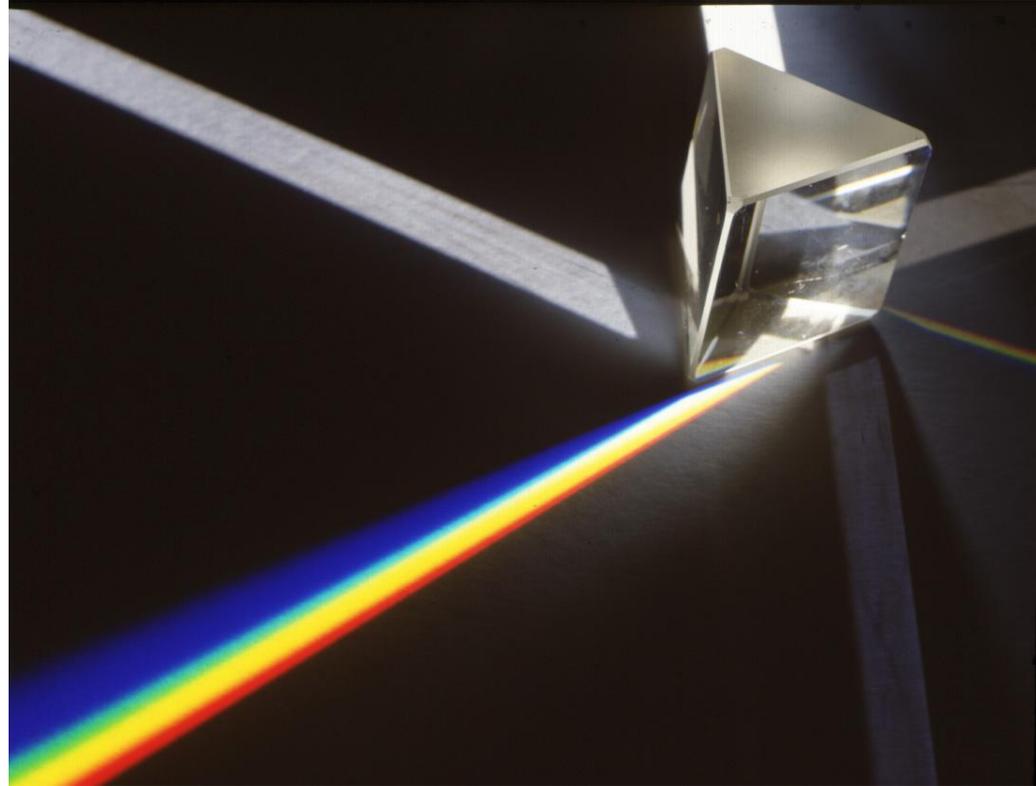
Méthode la plus ancienne.
Se base sur la réfraction de la lumière
dans un corps transparent

Inconvénients

1. la résolution maximale est faible (~ 1000)
2. Il est impossible de trouver un corps parfaitement transparent à tout (il y des déformations spectrales)

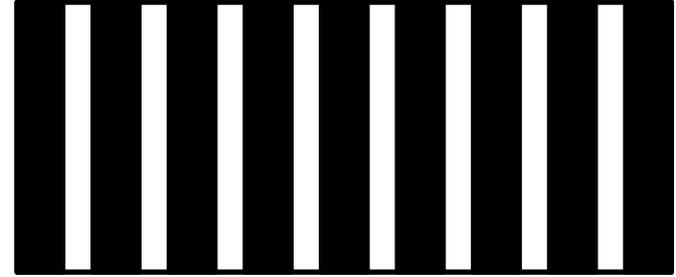
Avantage

Facile à réaliser



LE RÉSEAU DISPERSIF

Il s'agit d'un dispositif regroupant un ensemble de fente (réseau par transmission)



Les 3 grandeurs du réseau :

largeur de fente : E

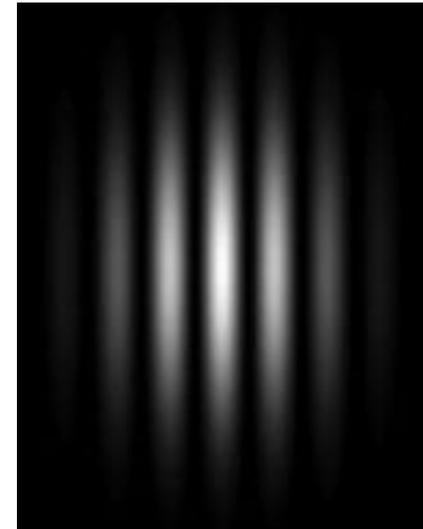
longueur du réseau : L

pas du réseau : a

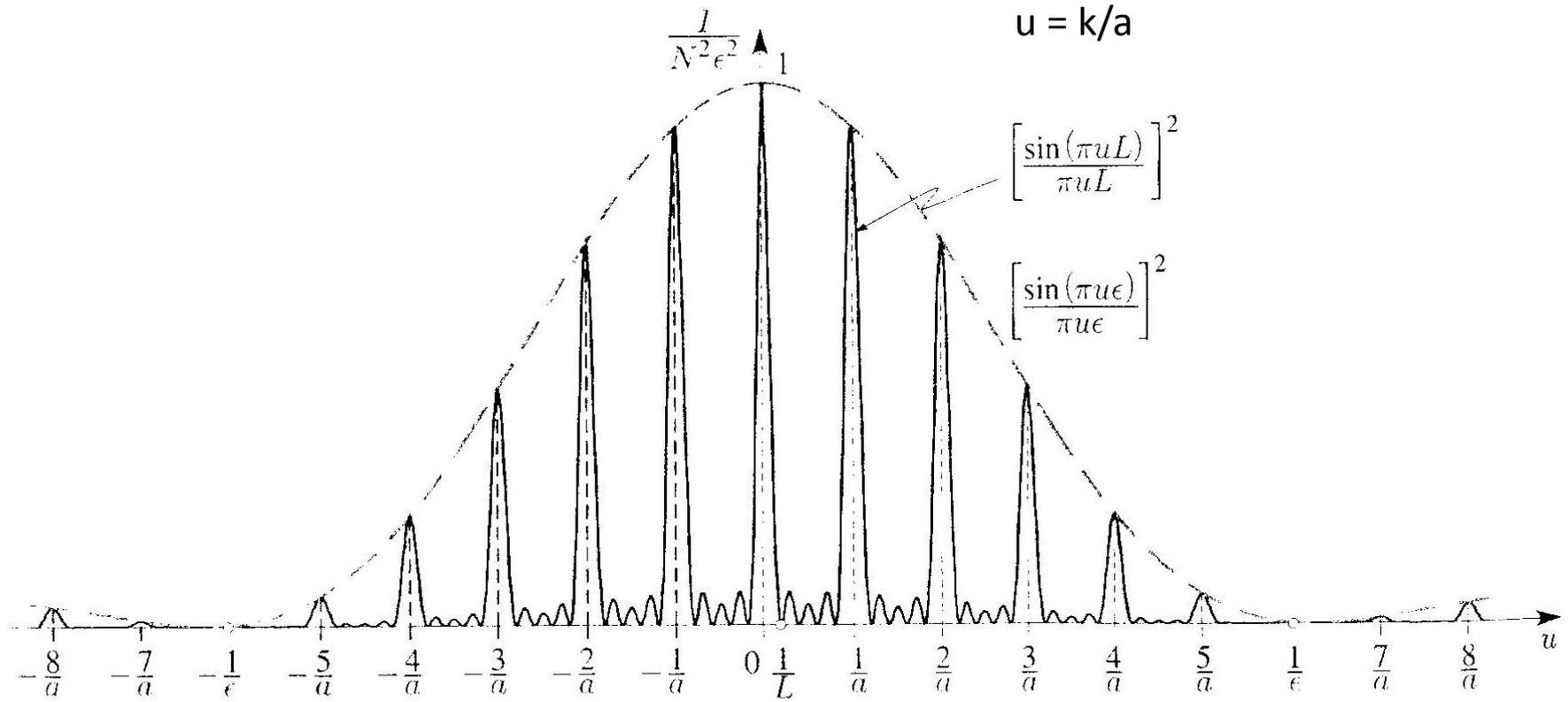
Relation donnant la position des maximums d'intensité :

$$a (\sin \theta_{\text{out}} - \sin \theta_{\text{in}}) = k\lambda$$

avec θ_{in} θ_{out} les angles incident et de sortie du réseau



LE RÉSEAU DISPERSIF



$$u = k/a = (\sin \theta_{\text{out}} - \sin \theta_{\text{in}}) / \lambda$$

LE RÉSEAU DISPERSIF

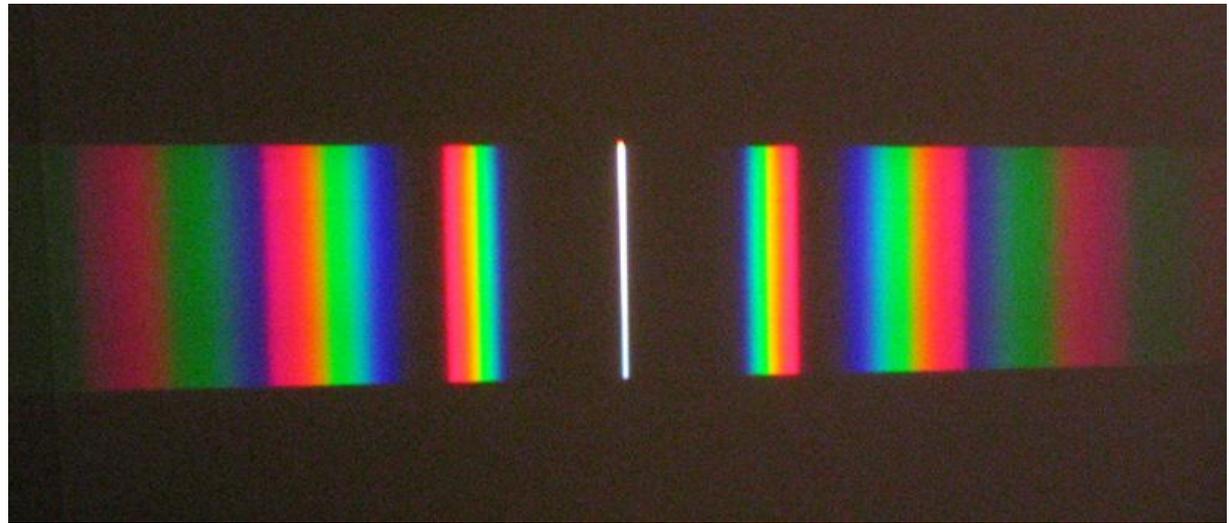
Dans le cas des ondes polychromatiques, la position de chaque ordre varie en fonction de la longueur d'onde (sauf ordre 0) : il est possible de décomposer la lumière

inconvénient

maximum d'émission à l'ordre 0 (pas pratique)

avantage

La résolution spectrale est beaucoup plus grande



L'idéal est d'avoir un maximum d'émission sur un ordre non nul, et peu d'ordres lumineux
Ceci passe par un réseau par réflexion

LES SPECTROMÈTRES PROFESSIONNELS

Les spectromètres blazés sont construits afin que le maximum d'émission soit concentré sur un grand ordre (meilleure résolution spectrale) et non sur l'ordre 0

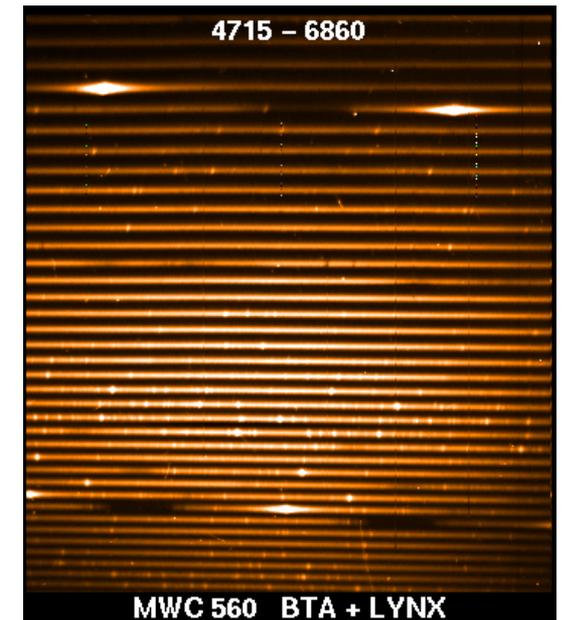
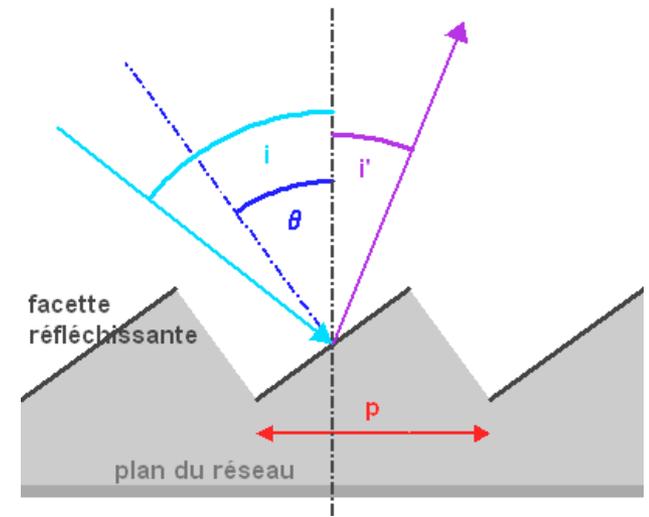
Réseau par réflexion avec une inclination de la face réfléchissante

Cette solution a un défaut : les grands ordres sont en général « mélangés » (on parle de confusion d'ordres)

Nécessité d'ajouter un élément dispersif supplémentaire perpendiculaire

Le résultat est que les ordres ne se suivent plus, mais sont empilés : ce sont les spectromètres échelles

Nécessité de recomposer le spectre



POURQUOI UTILISER LA SPECTROSCOPIE ?

La spectroscopie permet de mesurer la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde.

La répartition de l'énergie émise dans le spectre électromagnétique donne des informations sur la matière qui a émis cette énergie

Toute matière traversée par une onde électromagnétique peut y laisser une signature spécifique indiquant ses propriétés

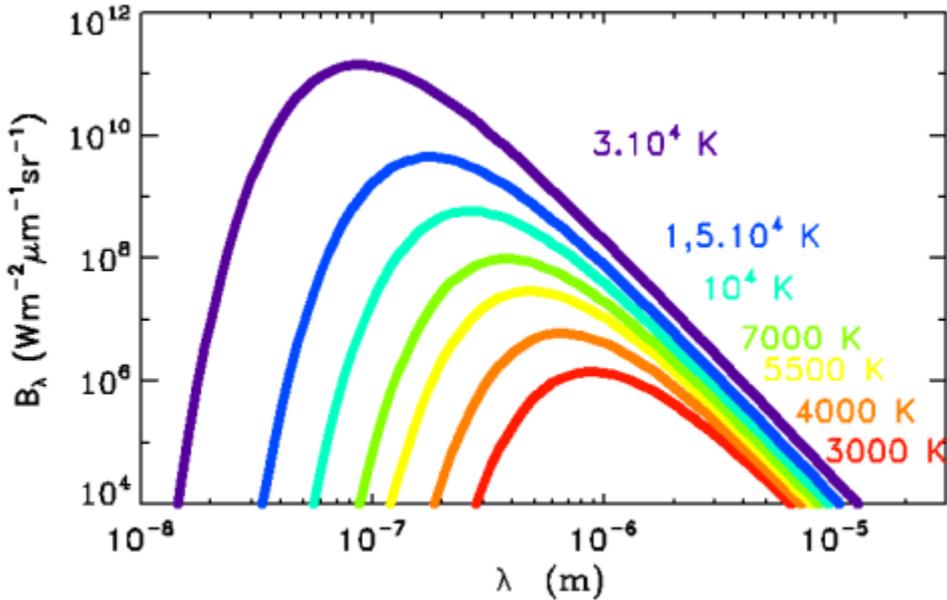
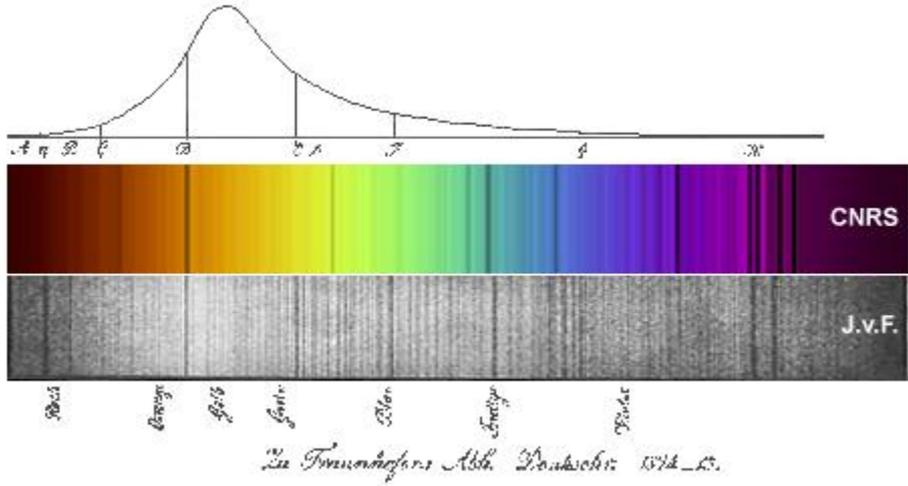
La spectroscopie offre de ce fait une connaissance des mécanismes physiques qui œuvrent lors de l'émission et de la transmission de l'énergie

Il y a 5 grandes applications de la spectroscopie

MESURE DU CONTINUUM

La première mesure possible est une mesure « large », qui permet de savoir « globalement » comment est émis l'énergie et si elle a traversé des milieux spécifiques

Exemple de mesures possibles à partir du continuum : la température d'une étoile



Spectre du corps noir

$$L_\lambda = \frac{2hc_\lambda^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc_\lambda}{k\lambda T}\right) - 1}$$

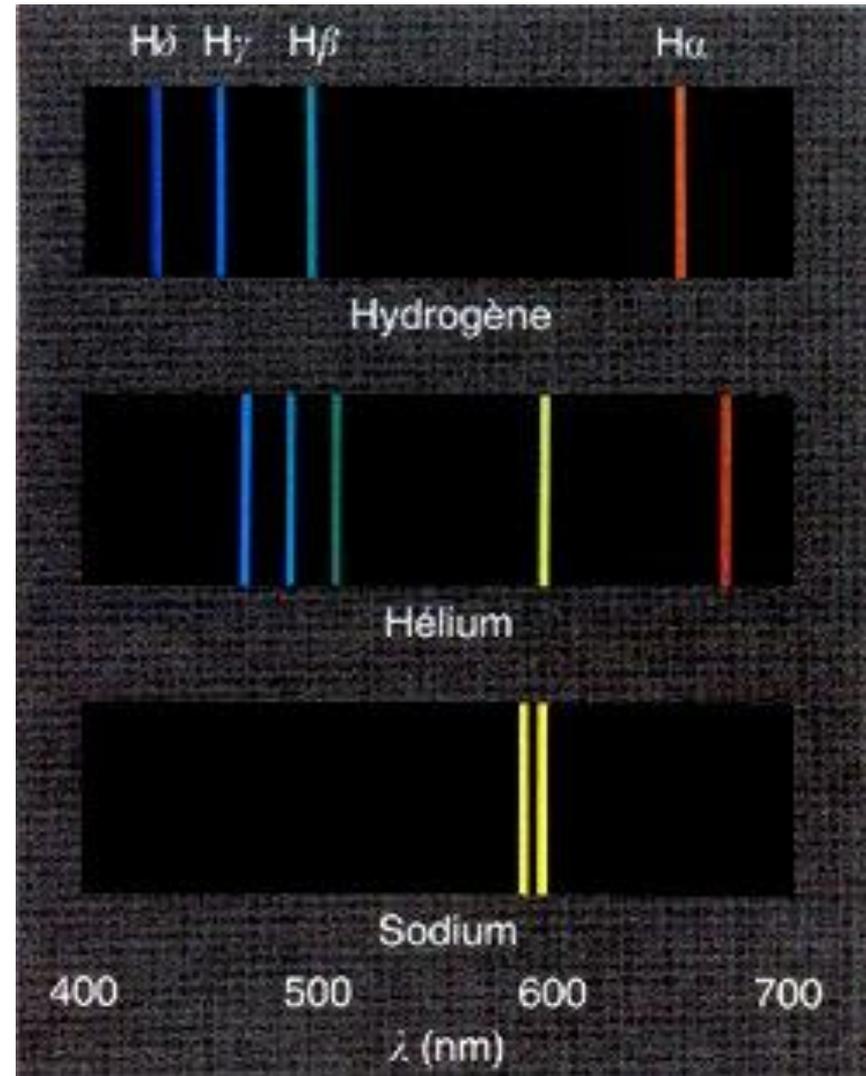
$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,9651 \cdot kT} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

MESURE DE LA COMPOSITION DES ÉTOILES

La seconde mesure possible est une mesure « fine » pour chercher les variations du continuum : les raies d'émission et d'absorption

Chaque élément possède des raies d'émissions et d'absorption spécifiques (par exemple le doublet du sodium à 589.0 et 589.6 nm).

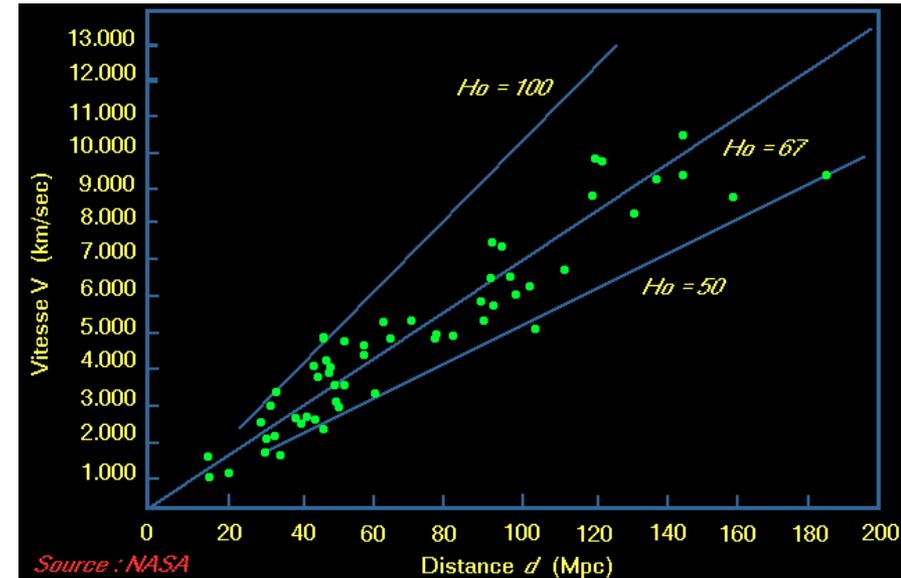
La recherche de ces raies dans les spectres permet de connaître la composition de la matière qui émet le rayonnement (cas des raies d'émission) et de la matière traversée par le rayonnement (raies d'absorption)



MESURE DES DISTANCES : LE REDSHIFT

Les deux effets précédents donnent sa forme au spectre. Il y a également 3 effets qui le modifie.

Le premier est le décalage vers le rouge cosmologique. L'Univers est en expansion actuellement, toutes les galaxies s'éloignent les unes des autres.



Ce ne sont pas les galaxies qui se déplacent mais le tissu de l'espace-temps qui s'étire. Une bonne analogie est un élastique que l'on étire d'une quantité constante au cours du temps : la longueur d'onde augmente avec le temps, le spectre est décalé vers le rouge

MESURE DES DISTANCES : LE REDSHIFT

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0}$$

$$d_L = \frac{c}{H_0} \left(z + \frac{1}{2}(1 - q_0)z^2 \right)$$

Exemple : le rayonnement fossile. Il s'est produit $\sim 300\,000$ ans après le Big Bang à une énergie de ~ 3000 K. Il est maintenant observé à une énergie de 2.7 K

On obtiens : $z \sim 1000$

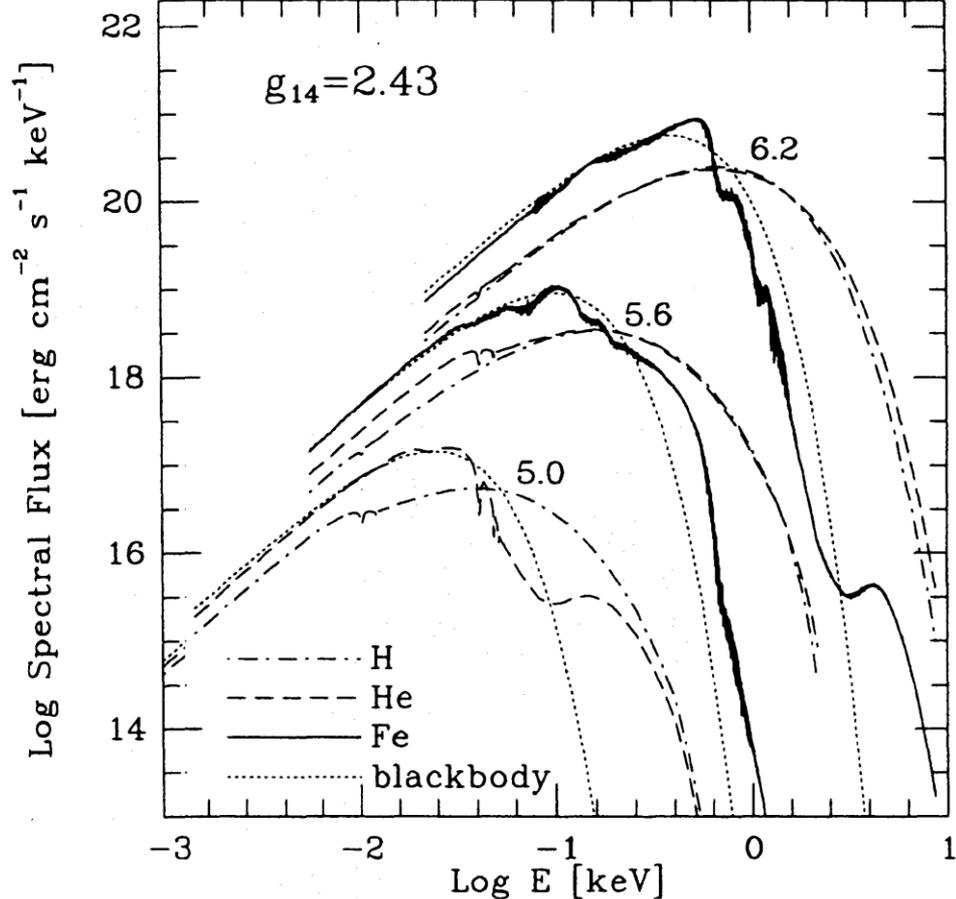
On en tire : $d \sim 45600 \times 10^9$ années lumières

MESURE DE LA MASSE : LE REDSHIFT GRAVITATIONNEL

C'est un effet apparenté au redshift. Chaque corps déforme le tissu de l'espace-temps autour de lui (cette déformation est responsable de la gravité, d'après Einstein). Les photons qui sont émis par un corps « voient » cette déformation et réagissent de la même façon que lors du redshift, en augmentant leur longueur d'onde

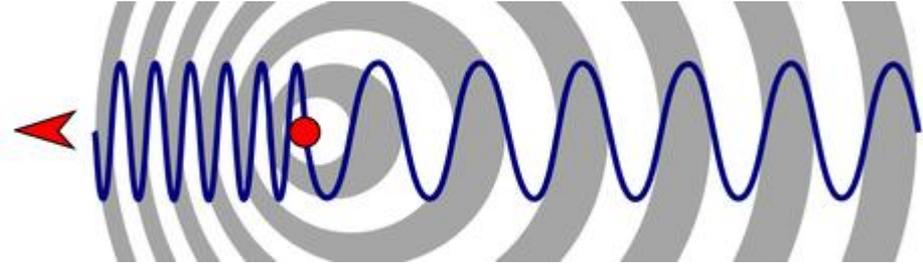
La déformation est proportionnelle à un paramètre appelé la compacité. Le redshift gravitationnel, qui mesure la déformation de l'espace temps, mesure donc la compacité

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 - \frac{2GM}{r_{\text{receiver}}}}{1 - \frac{2GM}{r_{\text{source}}}}}$$



MESURE DE LA VITESSE : L'EFFET DOPPLER

Le dernier effet qui modifie le spectre est l'effet Doppler. Il est bien connu de tous : c'est lui qui est responsable du changement de ton (de l'aigu vers le grave) quand une ambulance passe sirènes hurlantes devant nous.



Du fait de la vitesse, les ondes sont « tassées » quand le corps voyage vers nous (on parle de blue-shift dans le cas de la lumière, la longueur d'onde diminue), puis étirées quand il s'éloigne (c'est encore un red-shift, cette fois avec tiret)

$$1 + z = \gamma \left(1 + \frac{v_{\parallel}}{c} \right)$$

LA SPECTROSCOPIE À L'OHP

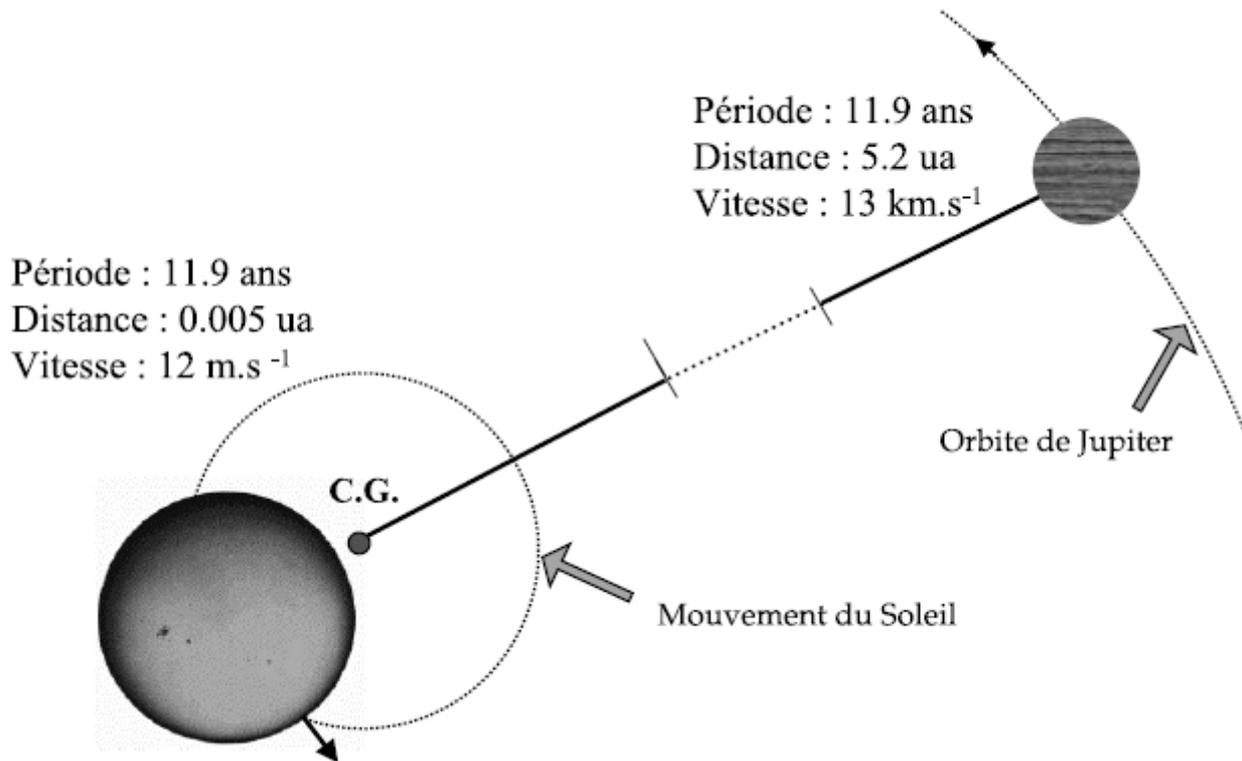
L'Observatoire de Haute Provence est le lieu où a été découverte la première planète extrasolaire.

Ces travaux se poursuivent dans cette thématique : l'instrument SOPHIE a été conçu pour détecter et confirmer la présence d'exoplanètes.

D'autres travaux sont également effectués, par exemple la mesure de distance de galaxies lointaines et fortement actives (les quasars), ou la mesure de la composition de certaines étoiles.

MESURE PRATIQUE DES VITESSES RADIALES

Dans un système binaire, chaque objet orbite autour du centre de masse commun



MESURE PRATIQUE DES VITESSES RADIALES

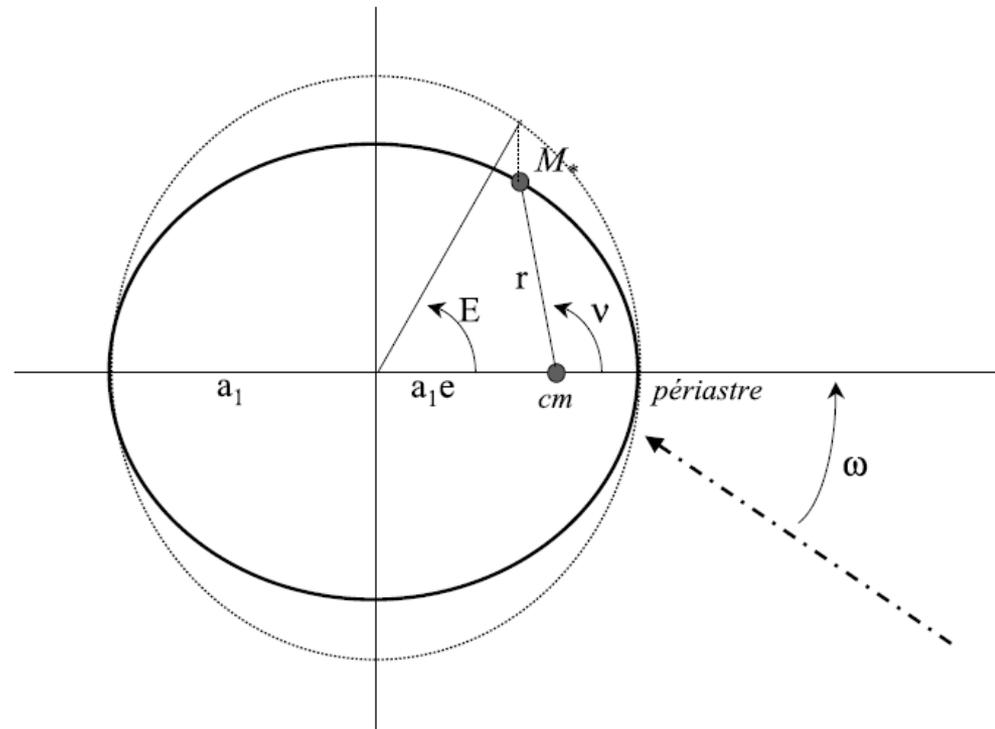
Position de l'étoile :

$$r = \frac{a_1 (1 - e^2)}{1 + e \cos \nu},$$

Lois de Kepler :

$$\frac{r^2}{2} \cdot \frac{d\nu}{dt} = cte = \frac{\pi a_1^2 \sqrt{1 - e^2}}{P}.$$

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G (M_* + m)}.$$



MESURE PRATIQUE DES VITESSES RADIALES

Calcul de la vitesse :

$$V = r \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{2 \pi a_1^2 \sqrt{1 - e^2}}{r P}.$$

Relation entre les deux corps

$$a_1 = a \cdot \frac{m}{M_* + m}.$$

Soit au final, en projetant la vitesse sur la voute céleste :

$$V_{rad} = \frac{m}{M_* + m} \cdot \frac{2 \pi a \sin i}{P \sqrt{1 - e^2}} [\cos(\nu(t) + \omega) + e \cos \omega],$$

MESURE PRATIQUE DES VITESSES RADIALES

$$V_{rad} = V_0 + K \cdot [\cos(\nu(t) + \omega) + e \cos \omega],$$

$$K = \frac{m \sin i}{(M_* + m)^{2/3}} \cdot \frac{(2\pi G)^{1/3}}{P^{1/3} \sqrt{1 - e^2}} = \frac{m \sin i}{(M_* + m)^{1/2}} \cdot \frac{G^{1/2}}{a^{1/2} \sqrt{1 - e^2}}.$$

A noter : on ne mesure pas la masse de la planète, mais une masse minimale !

$$\frac{m \sin i}{(M_* + m)^{2/3}}$$

MESURE PRATIQUE DE POPULATIONS STELLAIRES

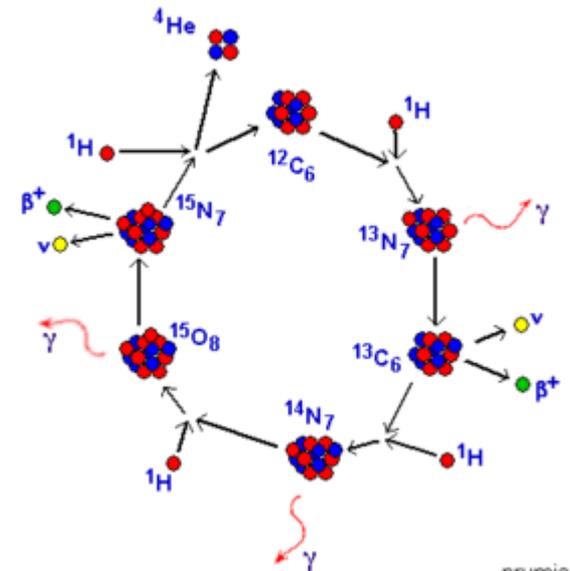
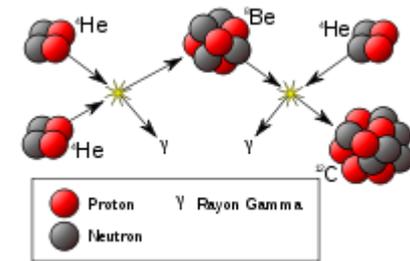
Les relations nucléaires dans les étoiles produisent de l'énergie à partir de protons

Il y a 3 grands cycles :

le cycle PP (proton -> particule alpha)

le cycle triple alpha (particule alpha -> carbone)

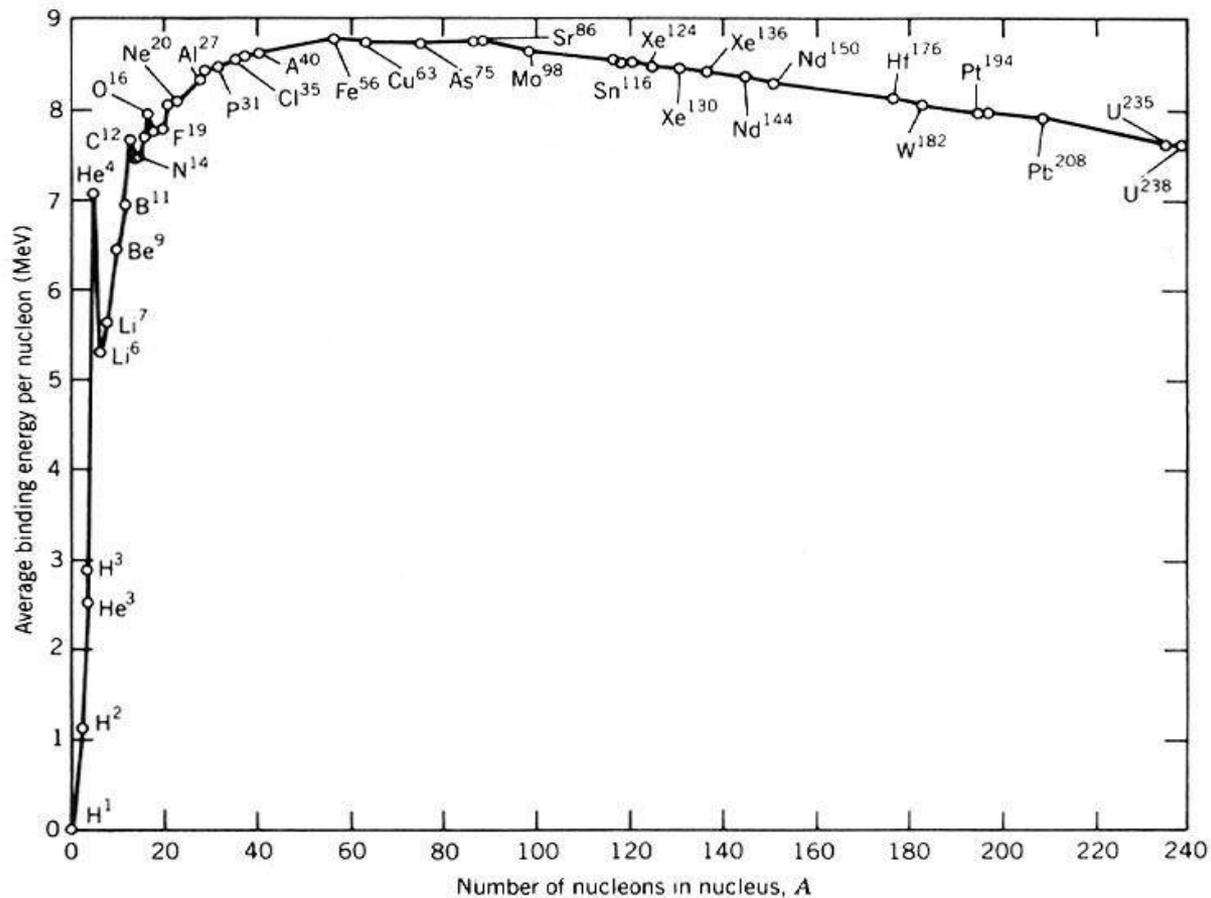
le cycle CNO



MESURE PRATIQUE DE POPULATIONS STELLAIRES

La fusion nucléaire produit de l'énergie jusqu'à un certain seuil : le fer

Au-delà, les réactions consomment de l'énergie



MESURE PRATIQUE DE POPULATIONS STELLAIRES

Au début, l'Univers ne contient que des protons, des particules alpha et des traces d'autres éléments

Les métaux sont formés dans les étoiles et libérés en fin de vie. On distingue dans les étoiles des populations, suivant leur composition :

Pop I : étoiles de type solaire, riches en métaux

Pop II : étoiles pré-solaires, pauvres en métaux

Pop III : étoiles primordiales, absence de métaux

Obtenir des spectres permet de vérifier la présence de métaux (et leur concentration).

Les amas globulaires sont des objets anciens, où on peut éventuellement voir les diverses populations stellaires

LES OBSERVATIONS EN PRATIQUE

A l'inverse des télescopes de 80 et 120 cm, le télescope de 193 cm est un télescope a usage professionnel fortement demandé.

Il est difficile d'obtenir du temps télescope, et les observations ne se font pas « à la main ».

Le télescope sera pointé pour vous.

La correcte mise en route de l'instrument sera faite pour vous.

Les observations, images de calibration et autre seront faites pour vous.

Vous obtenez des produits « tout fait »

Ce mode de fonctionnement est normal dans un observatoire, c'est le mode d'observation de service (le seul disponible dans le cas des observatoires spatiaux).

RÉDUCTION INSTRUMENTALE

Les instruments professionnels sont basés sur des CCDs

Il faut réaliser une réduction instrumentale pour passer du signal brut au signal net

Il y a certaines limitations dont il faut tenir compte lors de cette réduction

Il n'est pas dit que le niveau « vide » soit nul

Le CCD peut réagir différemment en fonction de la position

L'agitation thermique ajoute du bruit

l'électronique de lecture peut ajouter du bruit

Il est important de comprendre ceci car certains effets instrumentaux peuvent induire des erreurs dans l'analyse !

RÉDUCTION INSTRUMENTALE

L'image de noir (dark field) est une pose de durée donnée prise avec obturateur fermé

Elle permet de corriger :

1. du niveau initial éventuellement non nul
2. de l'agitation thermique



Elle est soustraite à la pose que l'on veut corriger

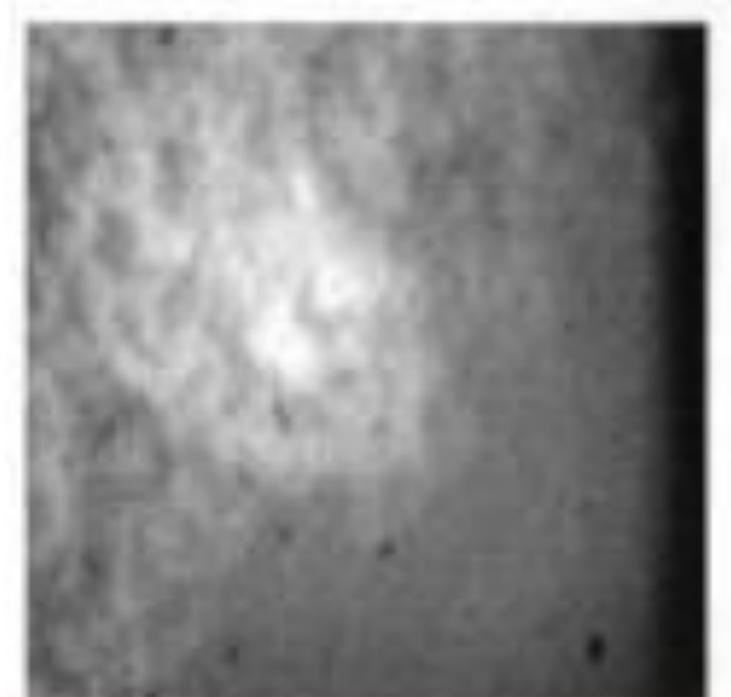
Le temps de pose est nécessairement le même que celui de la pose corrigée

RÉDUCTION INSTRUMENTALE

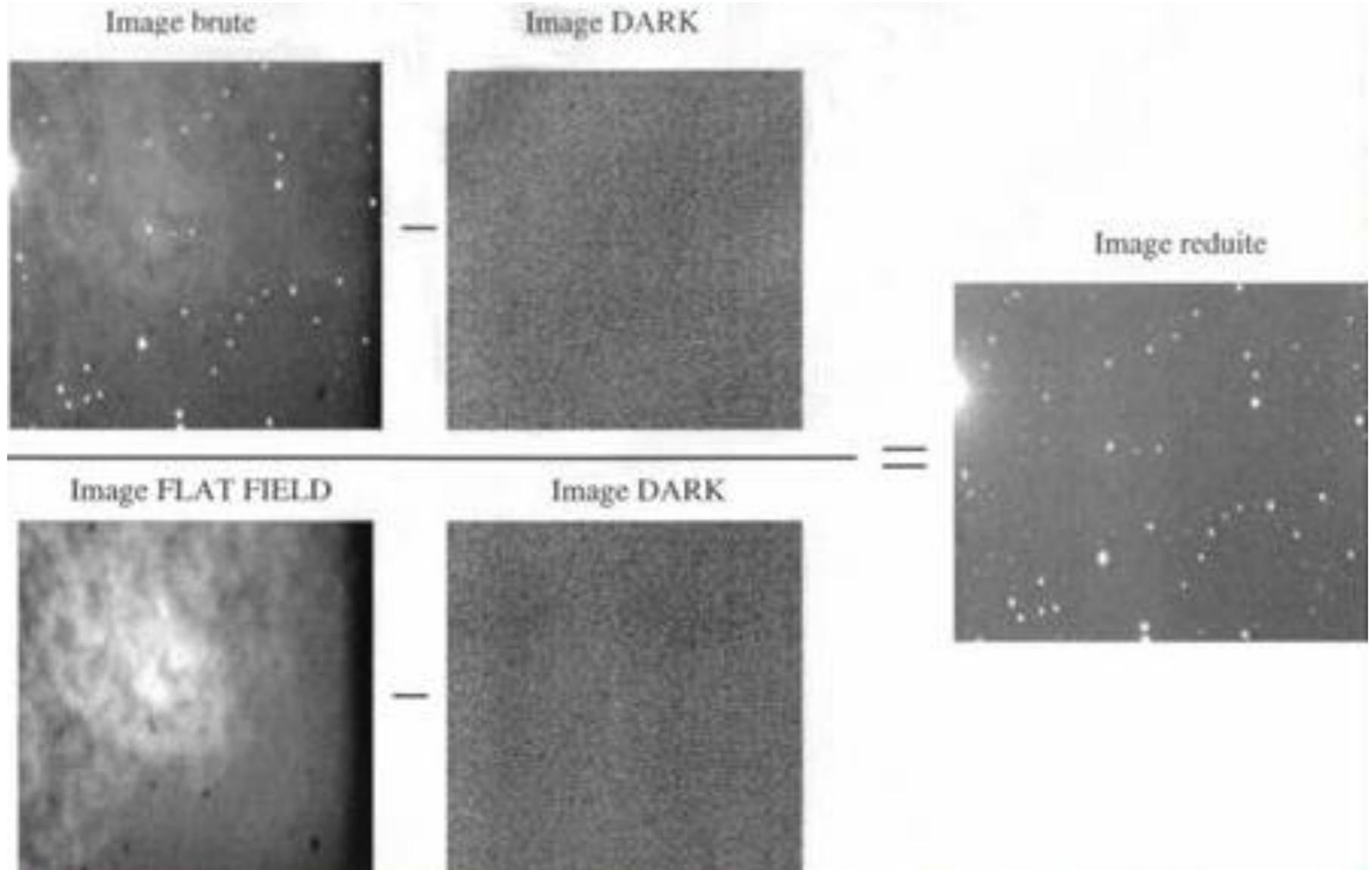
L'image de réponse (flat field) est une pose de durée courte, obturateur ouvert, d'une image uniforme (ça peut être le ciel du matin, ou un écran blanc). Elle corrige de la réponse différentielle du CCD

Elle divise la pose que l'on veut corriger

Elle doit également être corrigée par le dark



RÉDUCTION INSTRUMENTALE



OBTENTION DU SPECTRE BRUT

Avec l'instrument SOPHIE, la calibration instrumentale est faite automatiquement (groupes 2 et 3). L'instrument CARELEC est plus « rudimentaire ».

Des séries de flat et de darks sont réalisés en début et/ou fin d'observation, et servent à corriger les images de la nuit.

Question : pourquoi le faire à chaque fois ?

Le spectre obtenu est dit « brut » : il contient tout le signal enregistré, corrigé des effets instrumentaux.

Notez qu'il n'est pas corrigé des bruits de lecture électroniques !

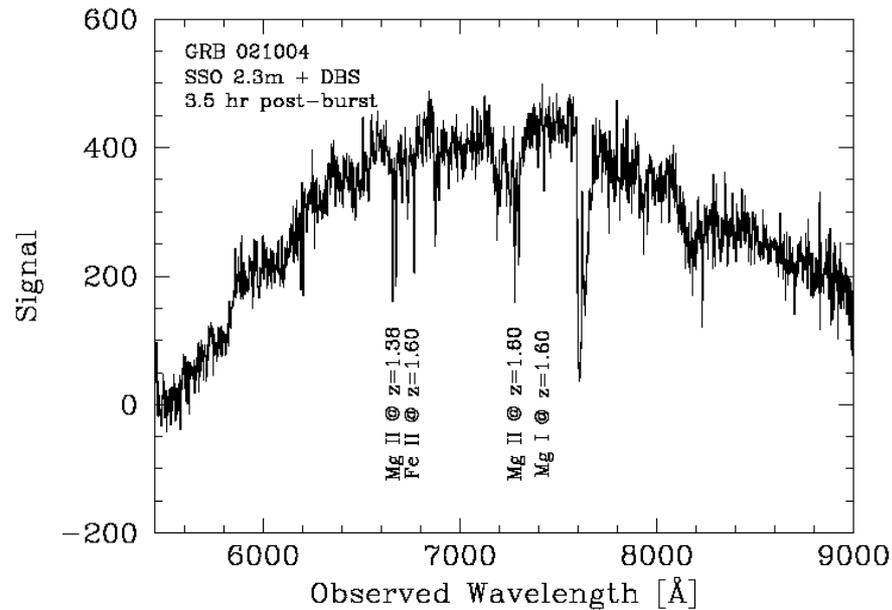
SOUSTRACTION DU FOND

Le ciel n'est pas « noir ».

La preuve en est que même lorsque la lune est couchée on y voit un peu...

Il y a des lumières parasites, qui constituent un fond.

Ce fond doit être soustrait au spectre brut pour obtenir le spectre net (à analyser)



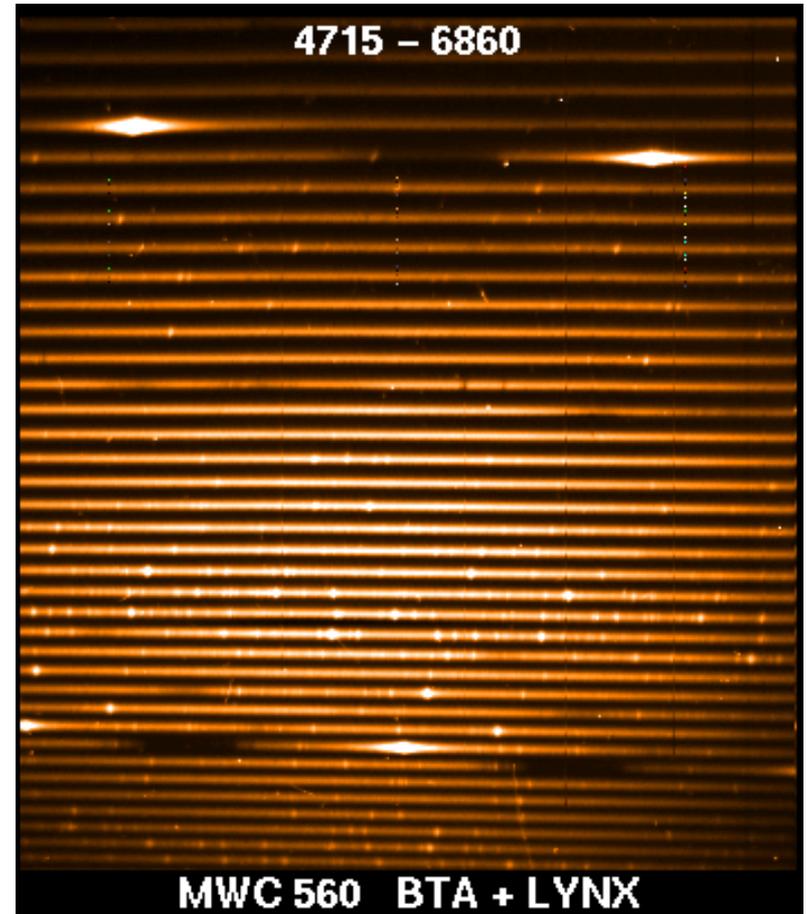
LA CALIBRATION EN ÉNERGIE

A ce stade, l'information disponible est une image où se trouvent des lignes de signal

Il n'y a encore aucune information pratique

Il faut en premier lieu calibrer l'axe des X : quelle est l'énergie associée à chaque pixel ?

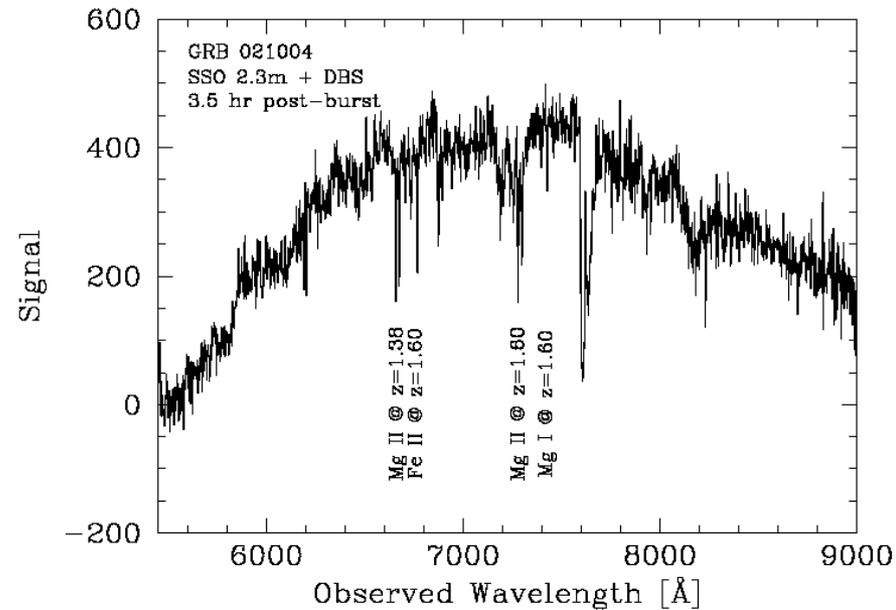
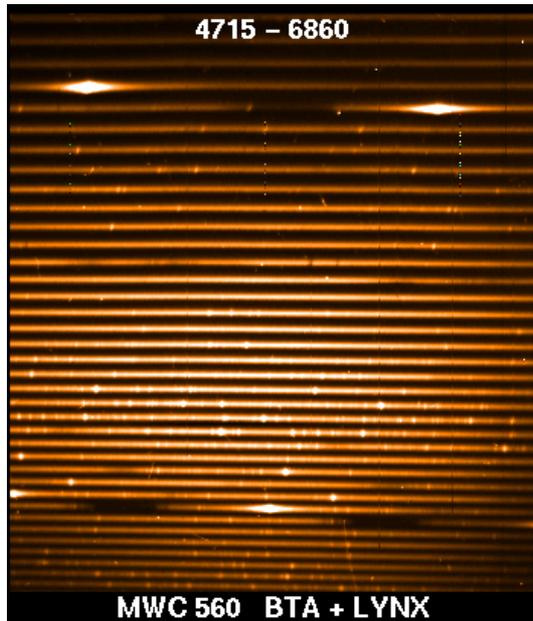
Ceci est fait par l'utilisation de lampes de calibrations (en général des lampes à gaz qui émettent des raies spécifiques)



SPÉCIFICITÉ DES SPECTRO ÉCHELLES

La dernière étape de calibration consiste à « recoller » les ordres afin d'augmenter le signal disponible

Cette étape est la plus critique, et est réalisé automatiquement par le logiciel de traitement.



STATISTIQUE ET TAUX DE COMPTAGE

Le spectre net se présente sous la forme d'une somme de chiffres
A chaque pixel, est associé un nombre ADU, qui est proportionnel à la quantité d'énergie reçue

125	145	154	162	149	158	156
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Ces nombres sont des mesures physiques. En tant que tel, il peut y avoir des erreurs

Erreur électronique (numérisation)

Statistique Gaussienne (ou Poissonienne dans le cas des petits nombres)



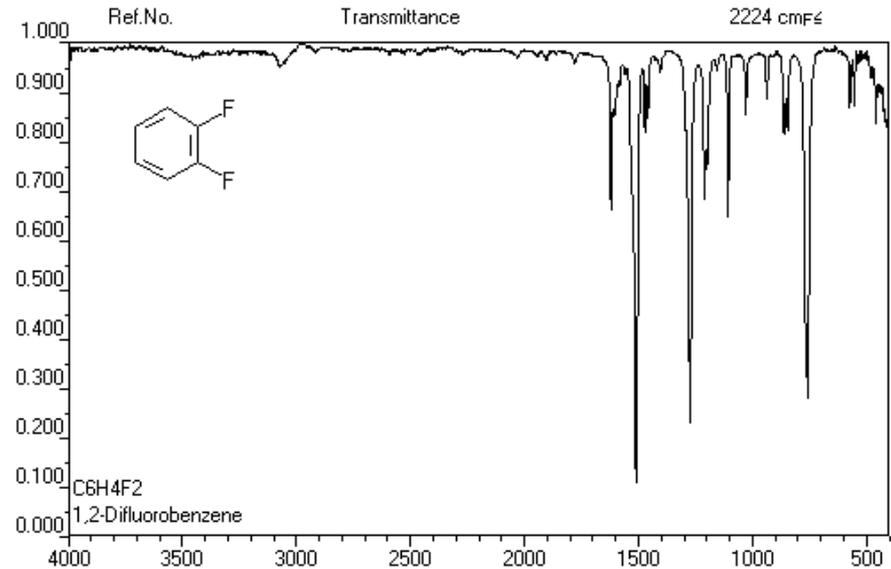
Les erreurs sont calculées par le programme et données à 66% de niveau de confiance

SIGNIFICATIVITÉ DES RAIES OBSERVÉES

Vous allez mesurer des positions de raies. Il faut donc les détecter, et estimer la véracité de leur existence : c'est la mesure de significativité.

Méthode la plus pratique : estimer le continuum, regarder les endroits où le spectre s'en écarte beaucoup

Vous ajusterez « à la main » la position de 2-3 raies avec une gaussienne



Notez que la méthode proposée n'est pas celle utilisée par les professionnels (on préfère les ajustements de χ^2 , qui permettent de tenir compte du niveau de bruit de fond)

LA MESURE DE LA POSITION D'UNE RAIE

Dans le monde idéal, une raie est définie par un « creux » ou une « bosse » d'épaisseur nulle (un seul pixel dévie du continuum). La position est vite obtenue !

Dans le monde réel, il y a 2 effets à tenir compte. L'un est qu'une raie a une certaine épaisseur, l'autre que cette épaisseur dépend de plusieurs paramètres

Cas idéal : tous mes atomes sont fixes. Ils rayonnent tous à la même énergie. J'ai une raie, potentiellement d'épaisseur nulle.

LA MESURE DE LA POSITION D'UNE RAIE

Cas réel : mes atomes sont dans une étoile, ils sont chaud ! Ils ont donc une agitation thermique. Si la moyenne de leur vitesse est nulle (étoile fixe), il n'est pas dit que leur vitesse le soit. Il y a un effet Doppler pour chaque atome.

Le mouvement des atomes est un mouvement brownien. Ceci signifie que la distribution de vitesse suit une Gaussienne. Question : ça donne quoi pour la raie ?

Les raies sont des Gaussiennes, d'autant plus étalées que l'agitation thermique est grande. Plus cet étalement est important, plus trouver l'extremum (le sommet de la raie) est difficile à cause de la statistique de comptage.

$$\Delta\lambda_D = (\lambda_0/c) \sqrt{2kT/m}$$

LA MESURE DE LA POSITION DES RAIES

Dans le travail que vous allez faire, il n'est nulle part indiqué quel élément à produit la raie que vous observez

Il vous faudra donc mesurer des positions, puis déduire de ces positions le nom des raies (pour avoir la valeur de l'émission au repos).

La solution pour cela est de rechercher plusieurs raies facilement reconnaissable d'un même élément, faire le test pour plusieurs éléments, et ne pas oublier votre esprit critique au vestiaire : trouver une vitesse radiale de l'ordre de 10% de la vitesse de la lumière signifie que vous avez gagné le prix Nobel ou que vous vous êtes trompé dans l'identification des raies !!!

PETIT RÉSUMÉ THÉORIQUE

- Faire les observations
- Réduire les données pour obtenir un spectre brut
- Soustraire le fond pour obtenir le spectre net
- Trouver des raies et mesurer leur position
- Trouver les éléments associés à ces raies
- Mesurer la vitesse radiale à partir de ces positions ou la composition
- En déduire des propriétés pour les systèmes planétaires ou stellaires observés

VOTRE STAGE EN PRATIQUE

Groupe 1 (hier soir) : mesure de populations stellaires dans les amas globulaires

Présenter les observations réalisées

Expliquer la sélection des raies recherchées

Groupes 2 et 3 : mesure de redshift par effet Doppler

Présenter les observations réalisées

A partir de documents, étudier un système exo-planétaire

Tous :

Estimer la vitesse radiale attendue dans le cadre d'un système stellaire « type »

(étoile de 0.8 masses solaires, planète de 0.2 masses solaires, période de rotation de 8 jours, orbite circulaire)

L'INSTRUMENT SOPHIE

Spectromètre échelle SOPHIE

Instrument monté au foyer du 193cm
Instrument thermalisé, sous atmosphère contrôlée

Résolution : 40 000 ou 75 000 (suivant le mode d'observation)

