



Spectroscopie

l'étude des « apparitions fantômes »
la danse des spectres

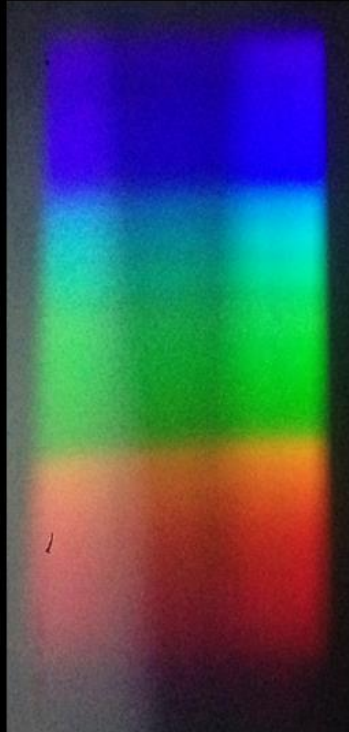


« Esprits des flammes inconstantes, Accourez! j'ai besoin de vous. Accourez! accourez! »

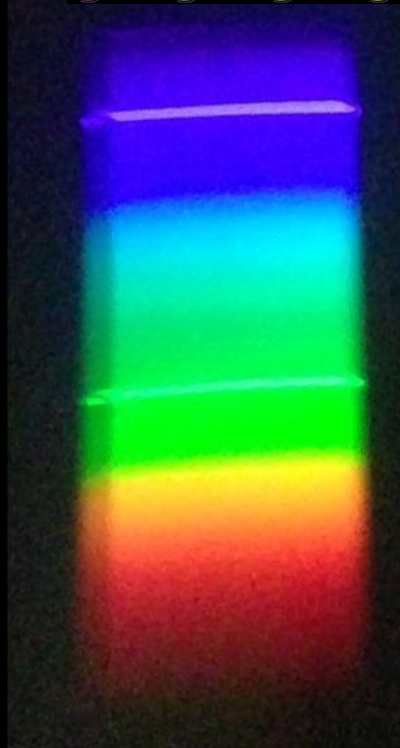
Méphisto, ballet des follets, La Damnation de Faust de Berlioz

Spectroscopie domestique

maison hantée !!



le Soleil
sur mon bureau



le néon
dans mon garage



l'ampoule basse conso
sur ma table de nuit

(spectromètre à deux balles + iPhone)

rayonnement

lumière
ondes
domaines (IR, VIS, UV)

matière

molécules
atomes
noyaux

condition expérimentales

choisies (labo)
subies (observation)

objets d'étude

échant. labo

organiques
minéraux
polymériques

astro

soleil, planètes
nébuleuses
galaxies, quasars

moyen d'obtention des spectres

sélectif (filtres, monochromateurs)
dispersif (prismes, réseaux, interféromètres)
mathématique (Transformée de Fourier)

intensité



longueur d'onde
fréquence

Interactions matière / rayonnement

labo

analyse élémentaire
composition chimique
analyse structurale

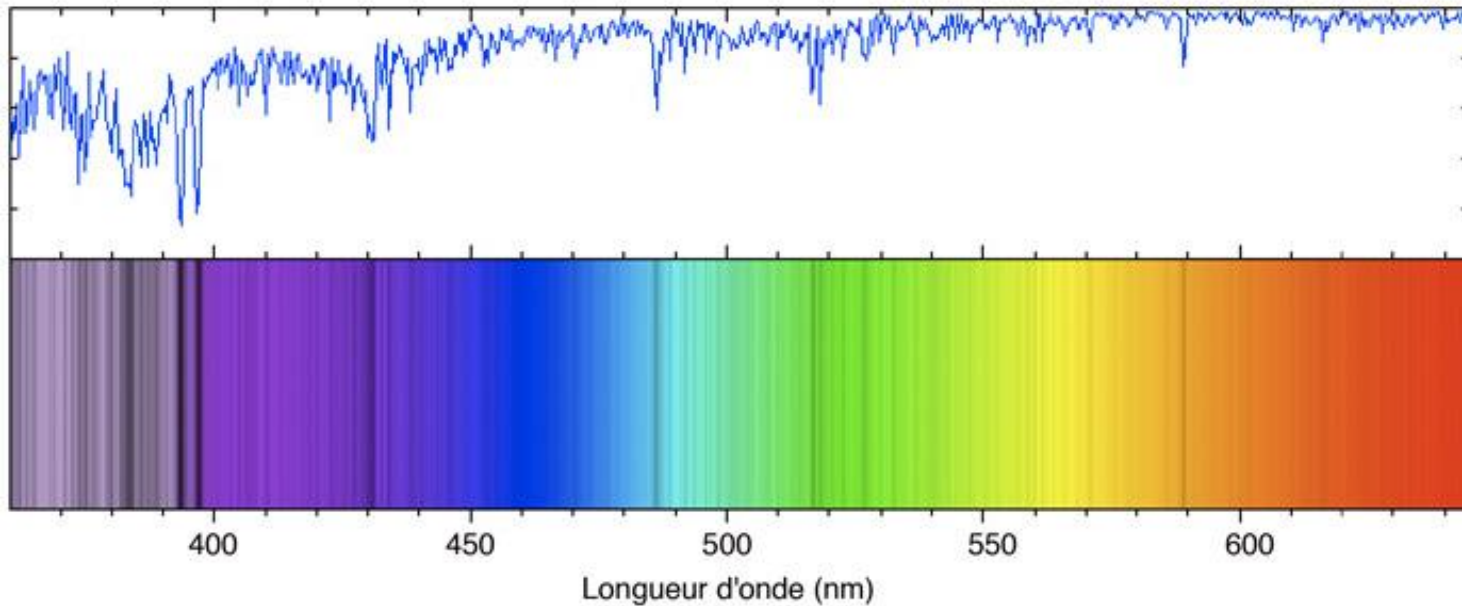
astro

Effet Doppler / Fizeau; loi de Hubble

vitesses de fuite
vitesses de rotation
détection d'exoplanètes
atmosphères d'exoplanètes

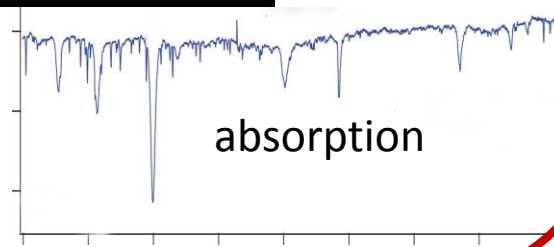
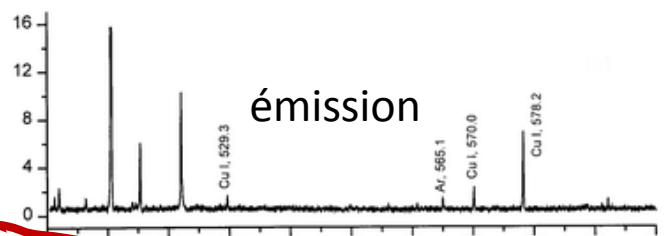
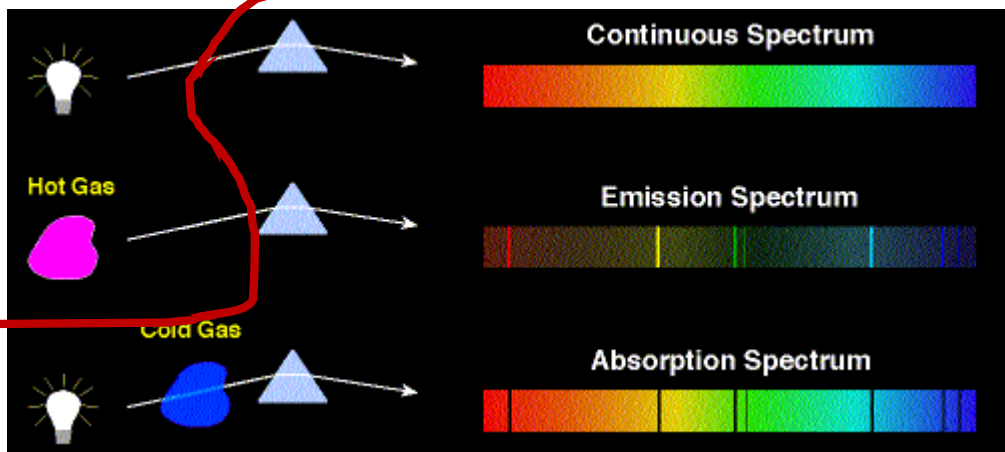
La spectroscopie ne se réduit pas aux spectres colorés

- seul le **domaine visible** donne lieu à spectres colorés
 - la plupart du temps, ils sont **numérisés** pour être traités (ajoutés, soustraits, recherchés, classés, etc...)
 - dans les grands observatoires, on utilise des spectres numérisés ou profils spectraux (convertis ou obtenus directement comme tels)



- les **spectres numérisés**: intensité = **f (fréquences)** existent pour tout le domaine de radiation électromagnétique

Interactions matière / rayonnement



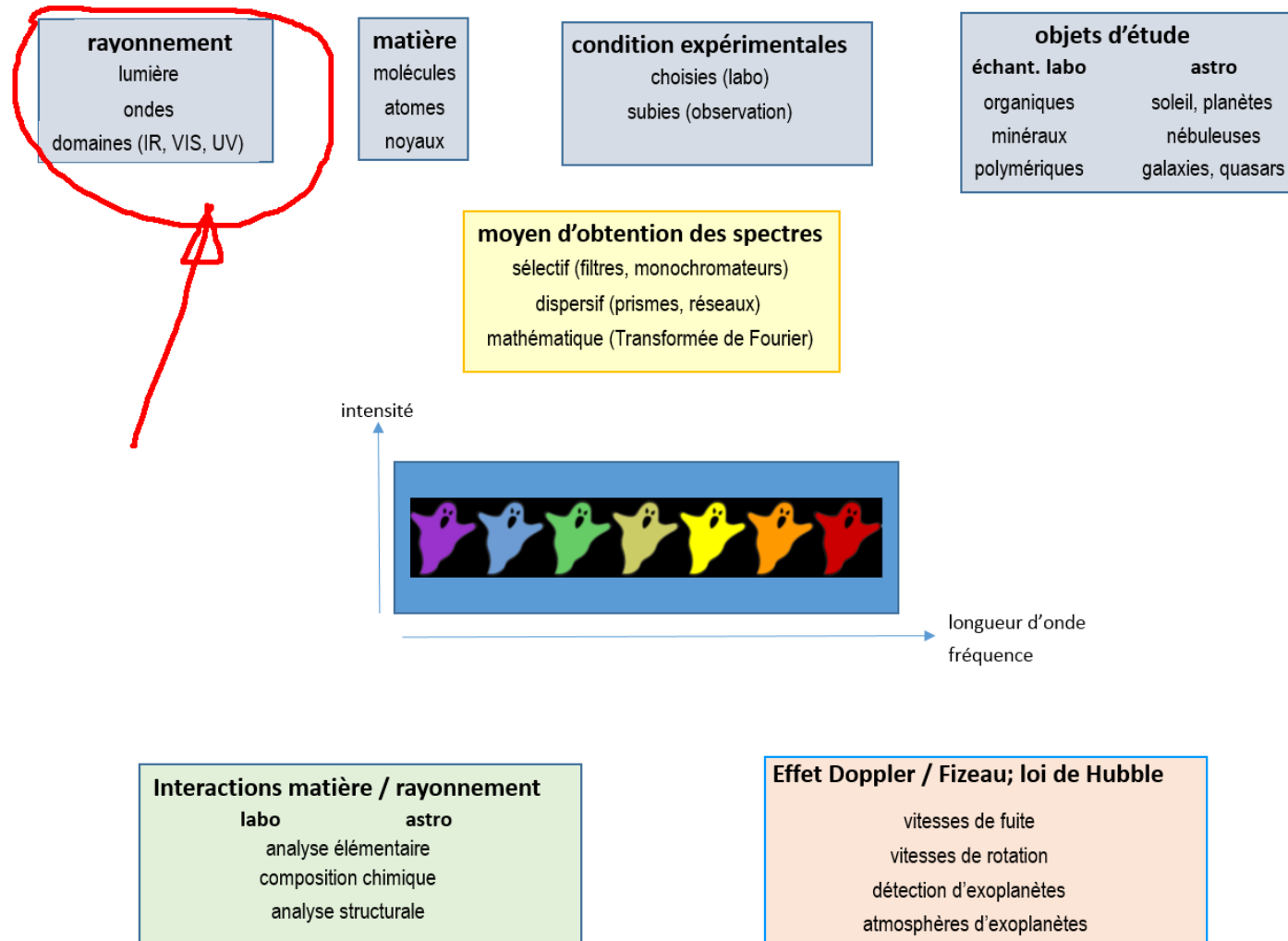
H, He, C, K
dans l'étoile

théorie des interactions
rayonnement / matière

H, He, C, K
dans le milieu
interstellaire

- la **spectroscopie** est un ensemble de techniques visant à déterminer les fréquences présentes dans les ondes électromagnétiques (et autres phénomènes vibratoires? sonores, mécaniques, ... pourquoi pas gravitationnels?) en vue de les interpréter en fonction de théories connues par ailleurs

Le rayonnement

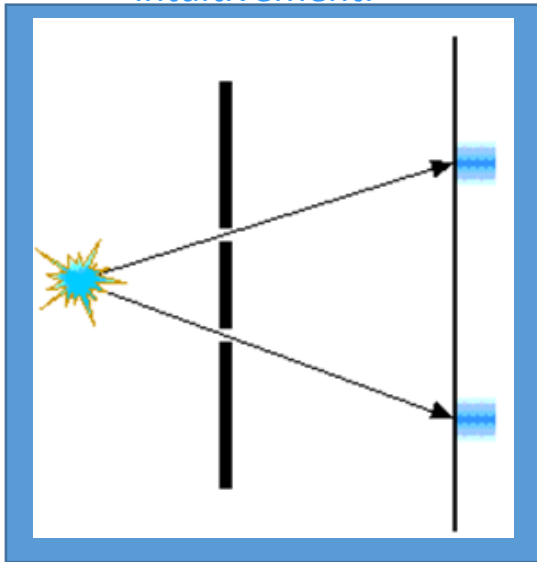


Preuve de la nature ondulatoire de la lumière

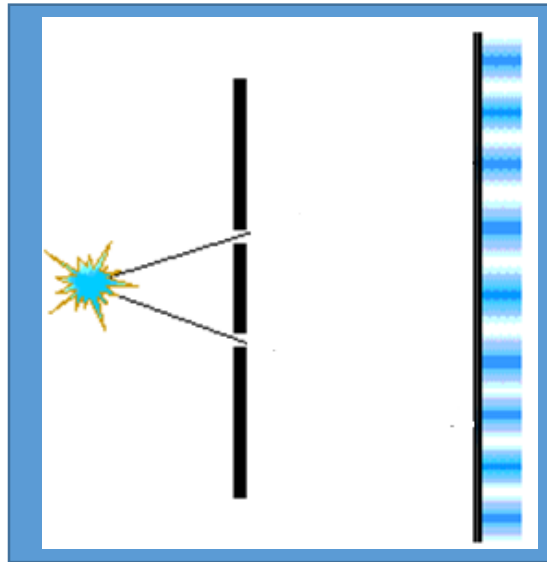
expérience des deux fentes d'Young

voir YouTube [animation fentes d'Young](#)

intuitivement:



or on observe:



car:

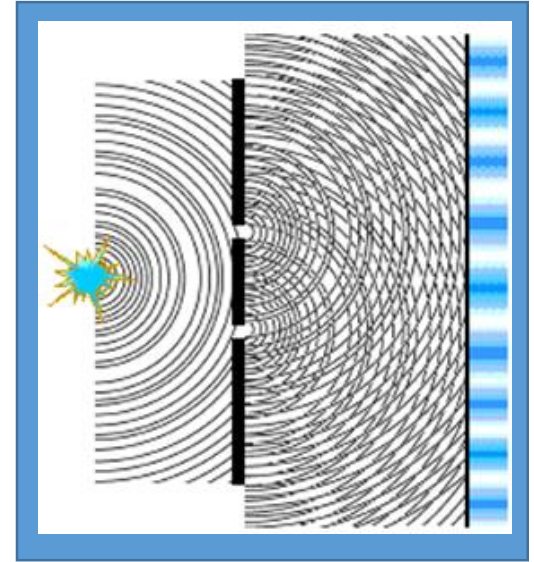


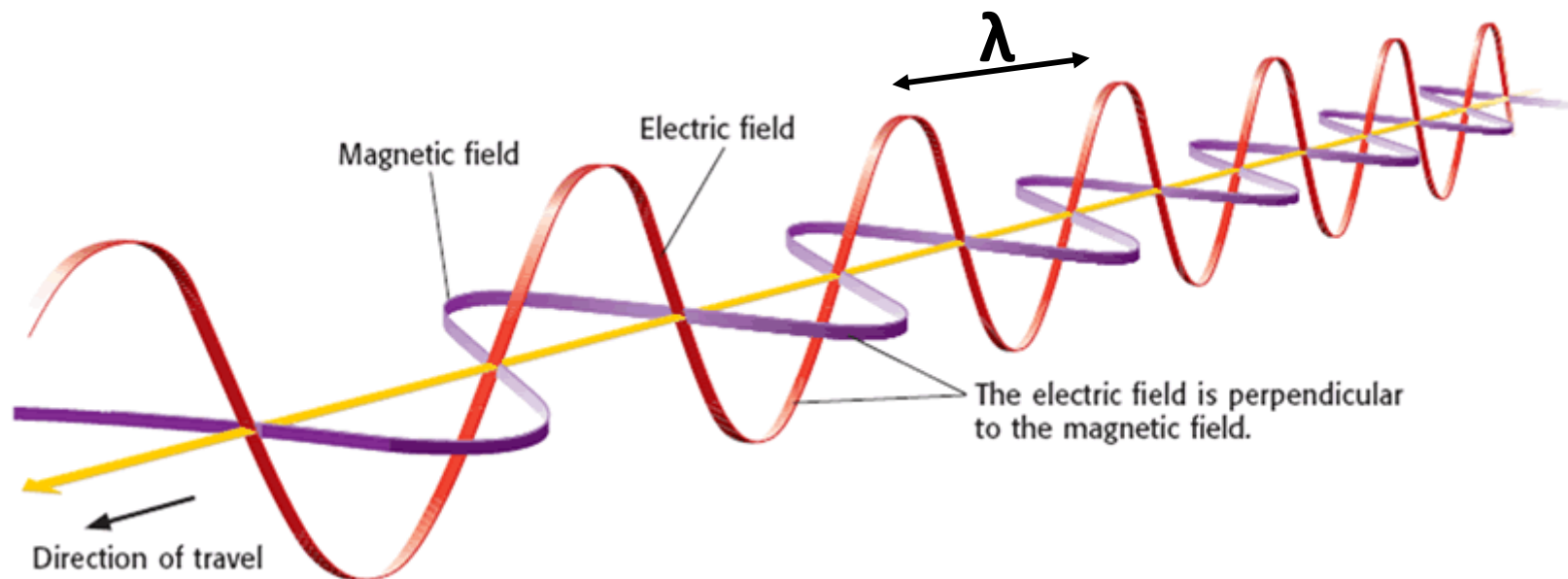
schéma d'interférence ➔ nature ondulatoire

les photons sont à la fois :

- des 'grains' de lumière se propageant en ligne droite
- des paquets d'ondes

Ondes électromagnétiques

ondes électromagnétiques

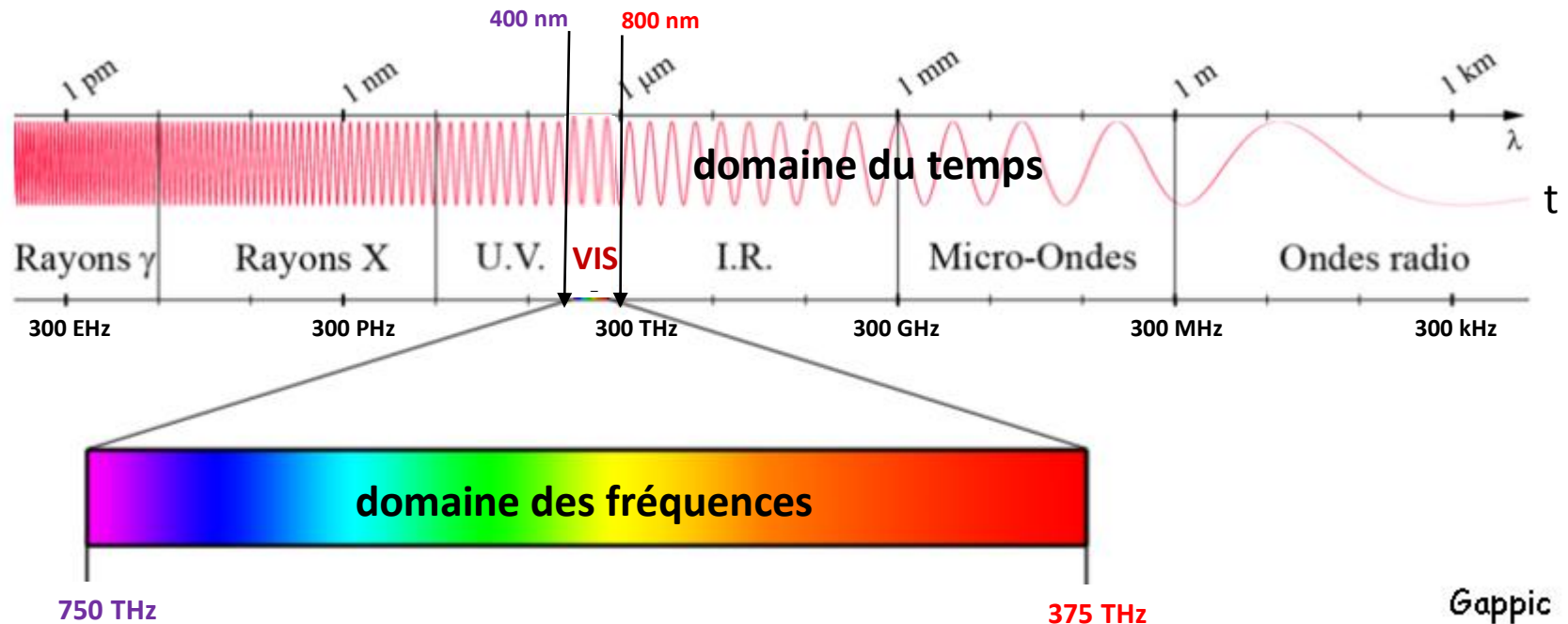


$$\lambda = c / \nu \quad \longleftrightarrow \quad \nu = c / \lambda$$

longueurs d'onde
et **fréquences** sont
inverement
proportionnelles

$$E = h \cdot \nu \quad (h \approx 4,134\,335\,9 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})$$

Ondes électromagnétiques



Gappic

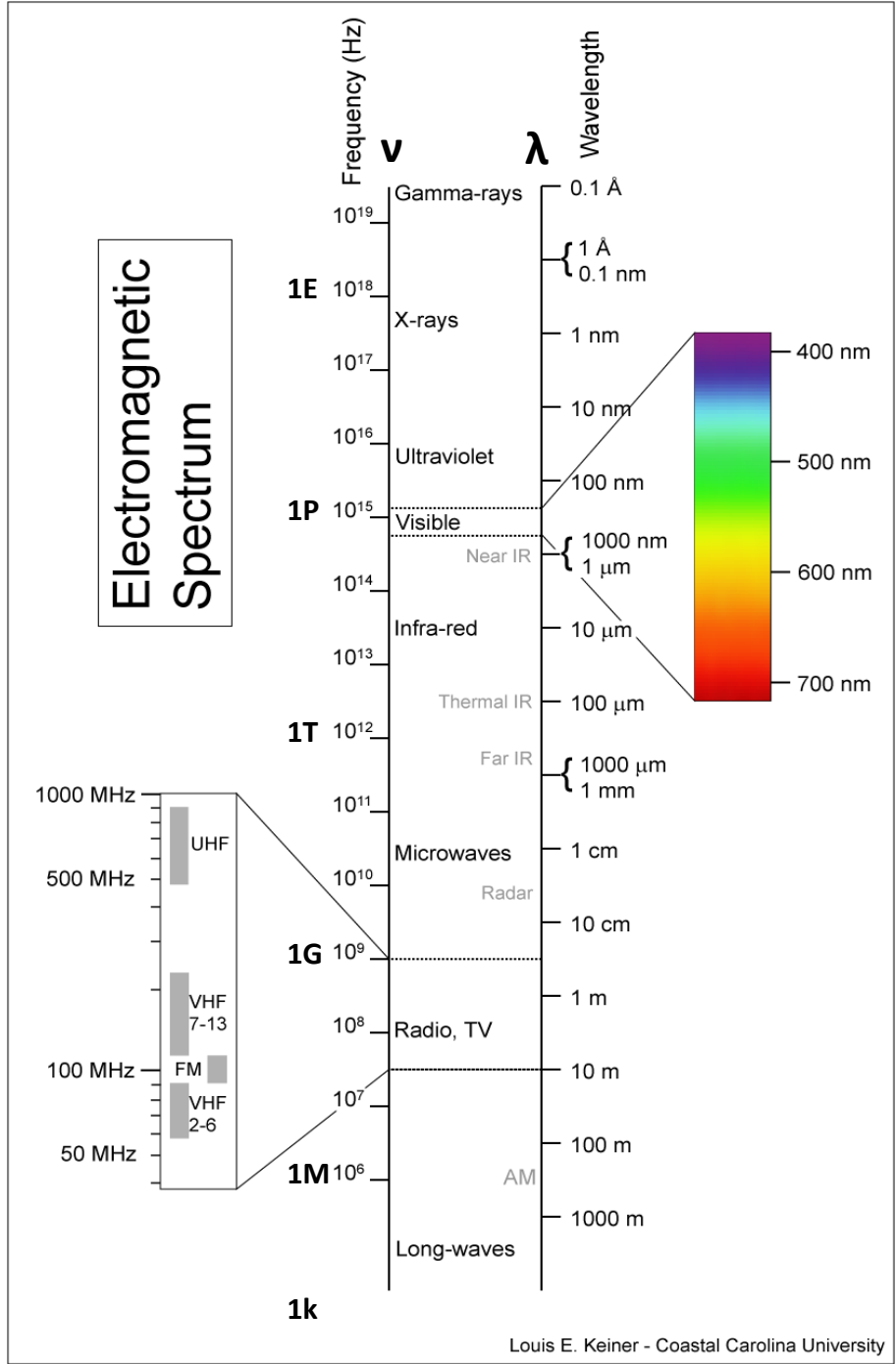
- la perception des couleurs ne concerne que le domaine visible
- la technique spectroscopique s'applique à tous les domaines du spectre électromagnétique : ne pas la réduire aux spectres colorés !!

Ondes électromagnétiques

pas de support de propagation matériel

longueur d'onde $\lambda = c / \nu$ fréquence

vitesse de la lumière



exemple d'onde électromagnétique:

le Rayonnement thermique

- Il y a **rayonnement thermique**:

- dès qu'il y a mouvement de particules chargées dans la matière

- donc, dès que $T > 0^\circ\text{K}$: collisions interatomiques  rayonnement thermique

- différent de convection ou conduction

- on 'sent' le feu de cheminée dans une pièce froide

- on 'sent' la chaleur du Soleil, alors qu'il fait -50°C à 10000m



- pour une même T , oscillations très différentes: large domaine de radiation

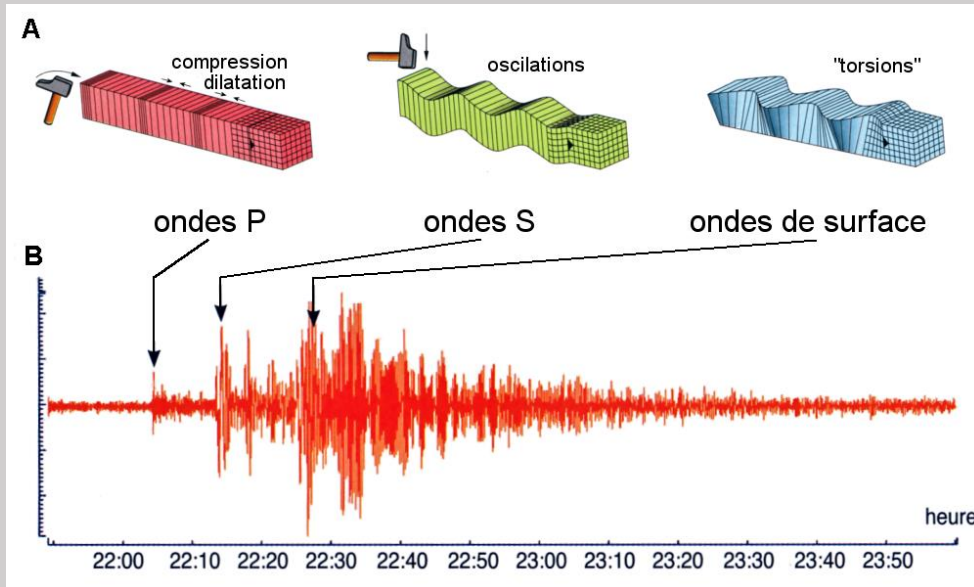
Soleil: une partie du spectre (VIS et IR) correspond à la radiation thermique

Terre: réémission par radiation thermique dans l'IR

CMB: réémission par radiation thermique dans l'IR

Ondes mécaniques

support de propagation matériel



- ondes sismiques

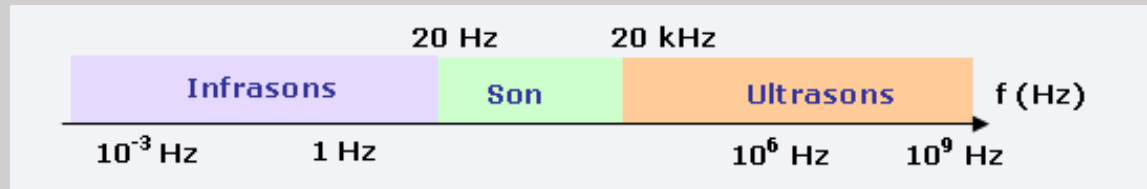


- ondes des vagues

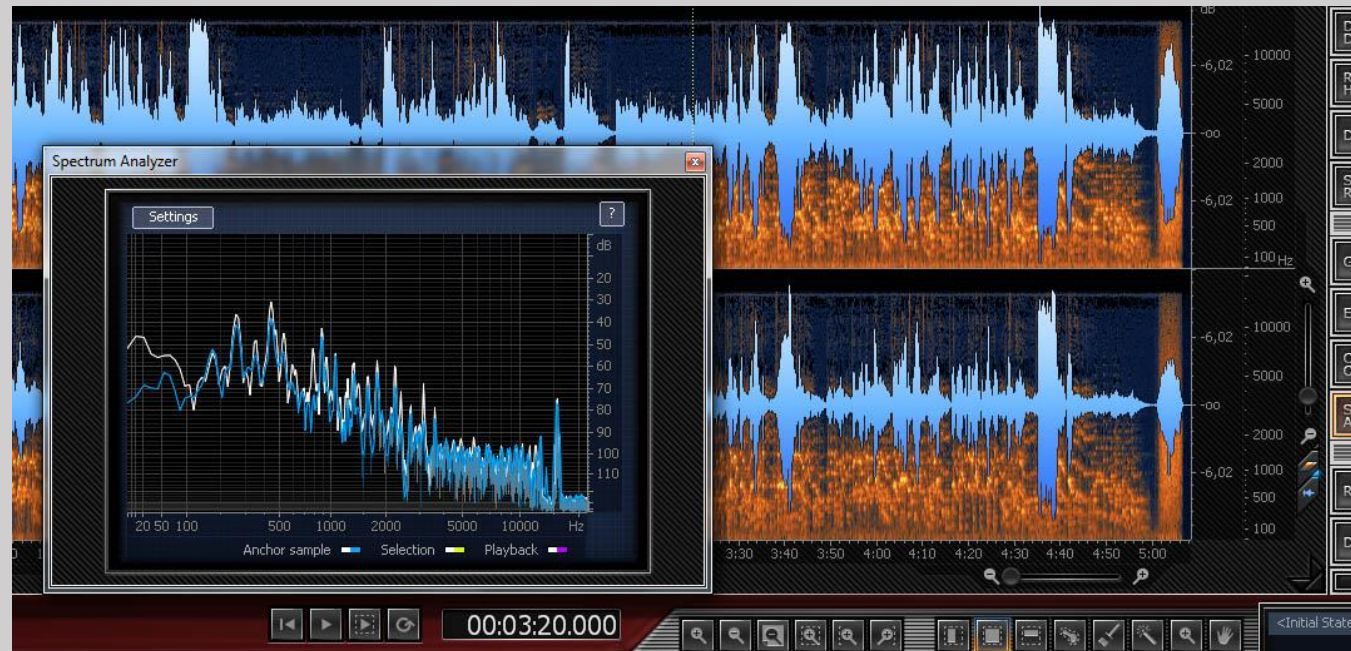
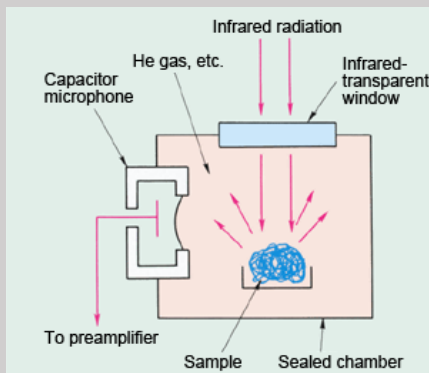
Ondes acoustiques

- support nécessaire:
 - dans le vide pas de transmission du son
 - dans l'oreille (air avant le tympan, liquide dans l'oreille interne)
- vibrations de pression acoustique

domaine de fréquences

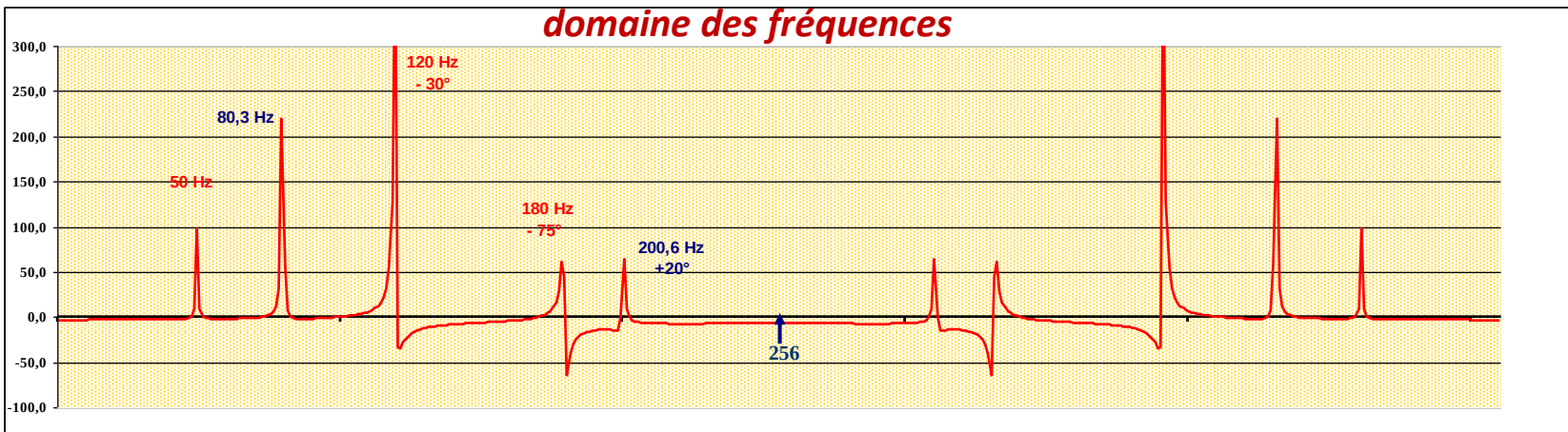
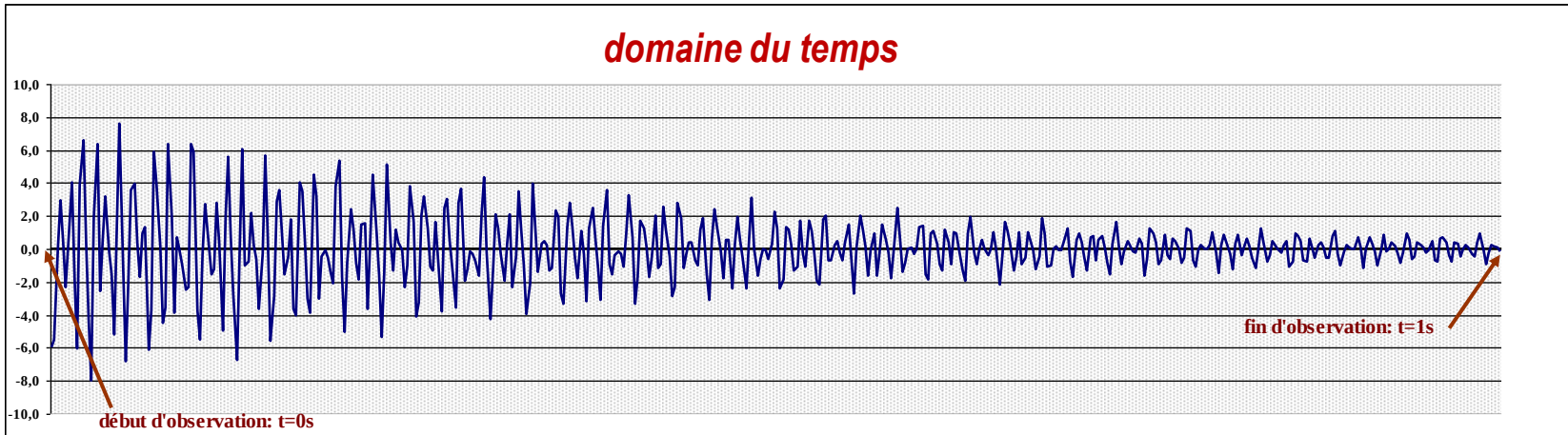


- la perception des sons (récepteur oreille humaine): de 20 Hz à 20000 Hz
- ➔ échantillonnage 40 kHz



- **spectroscopie (photo-)acoustique:** la plainte des molécules torturées !!

Ondes = phénomènes vibratoires



- **un spectroscope permet – entre autres – d'établir la liste de fréquences (le spectre) d'un signal temporel**

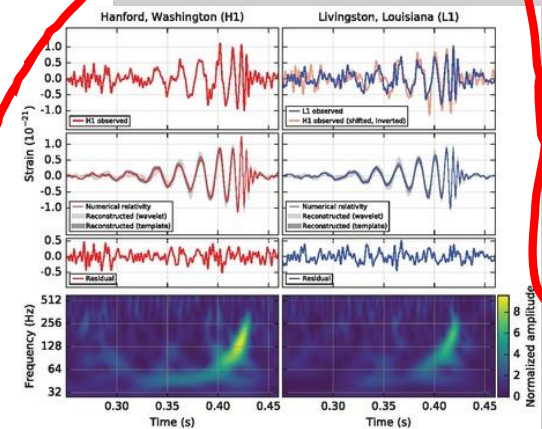
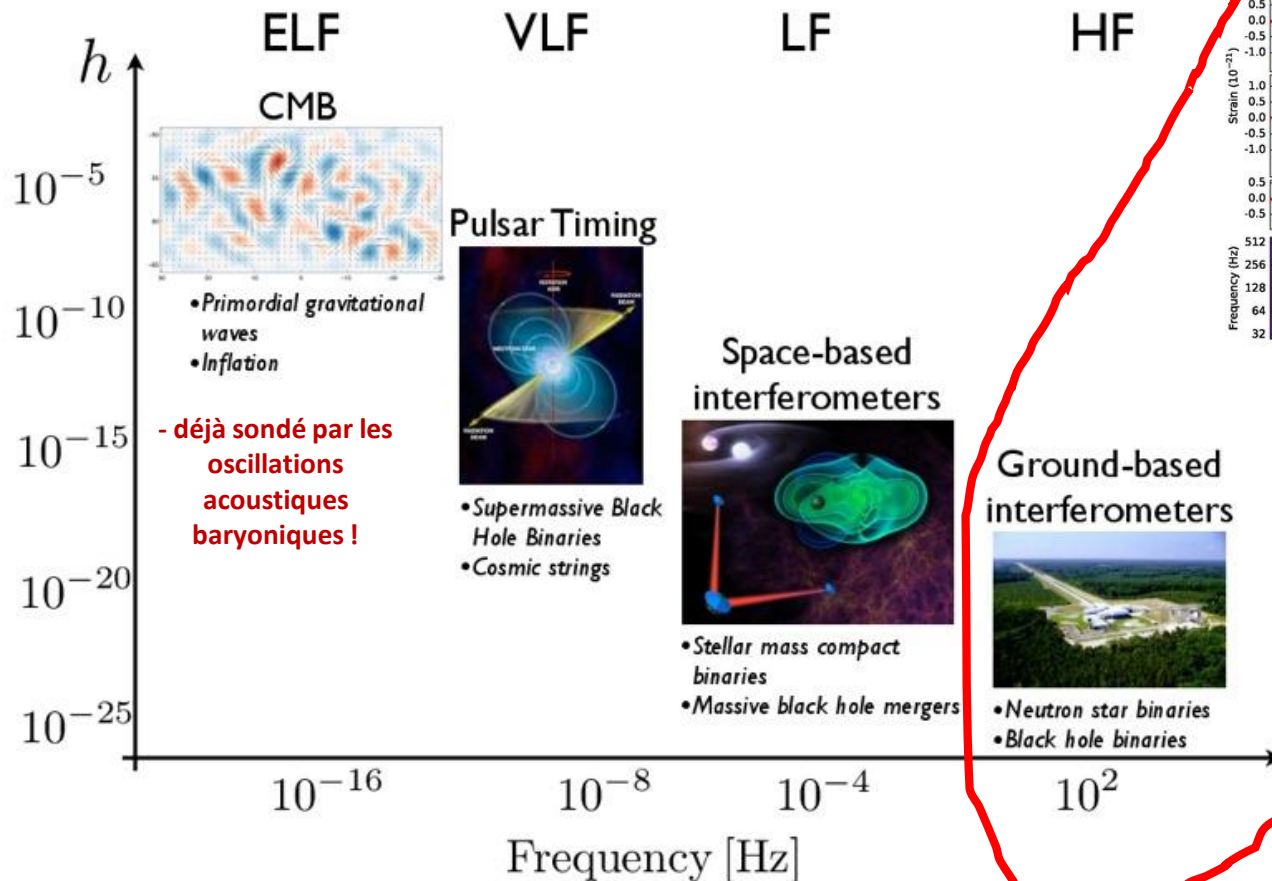
à noter que les yeux (+ cerveau !) - s'ils ont cette faculté de perception des couleurs – ne fonctionnent pas suivant le principe d'un spectromètre; l'oreille (cochlée + cerveau) – si !!

Ondes gravitationnelles

Ultra-basses
fréquences

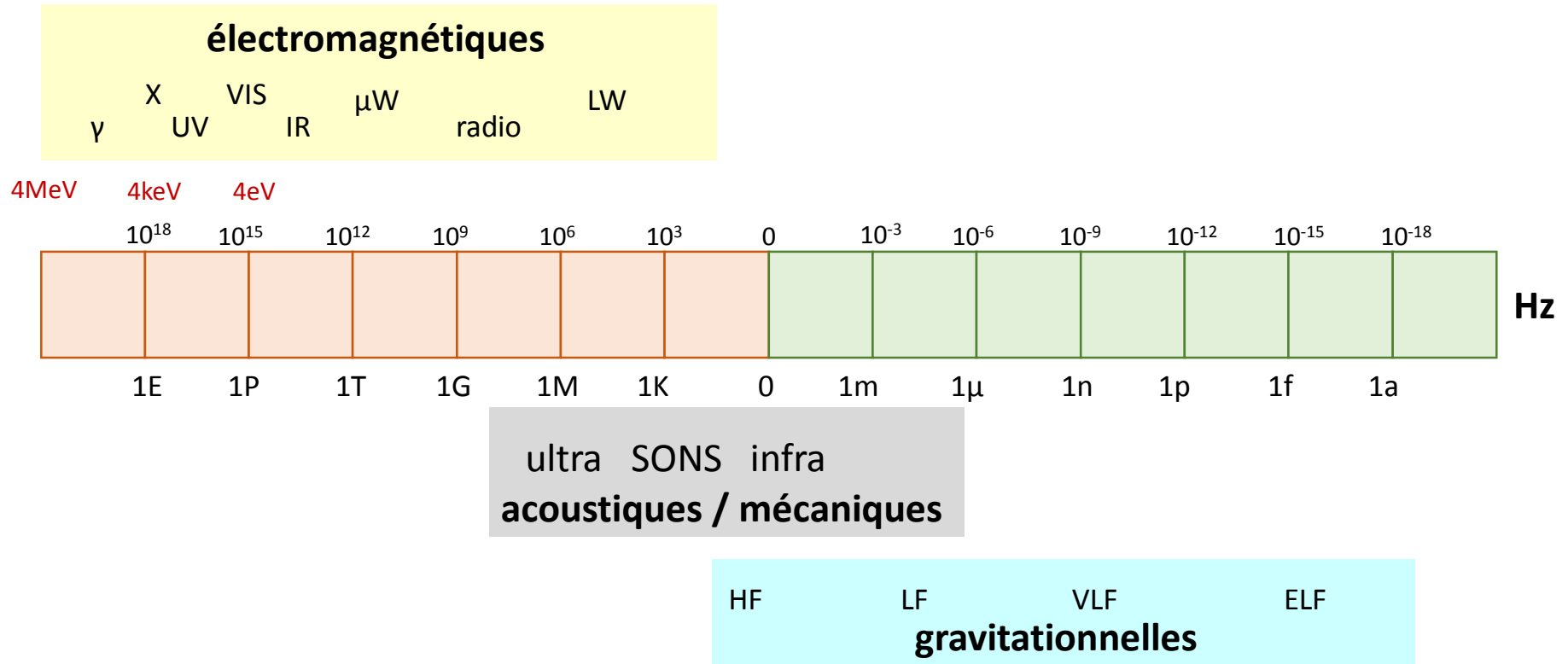
- les rides de l'espace - temps:
 - prédites par la théorie de la relativité générale d'Einstein

The big picture of gravitational wave astronomy

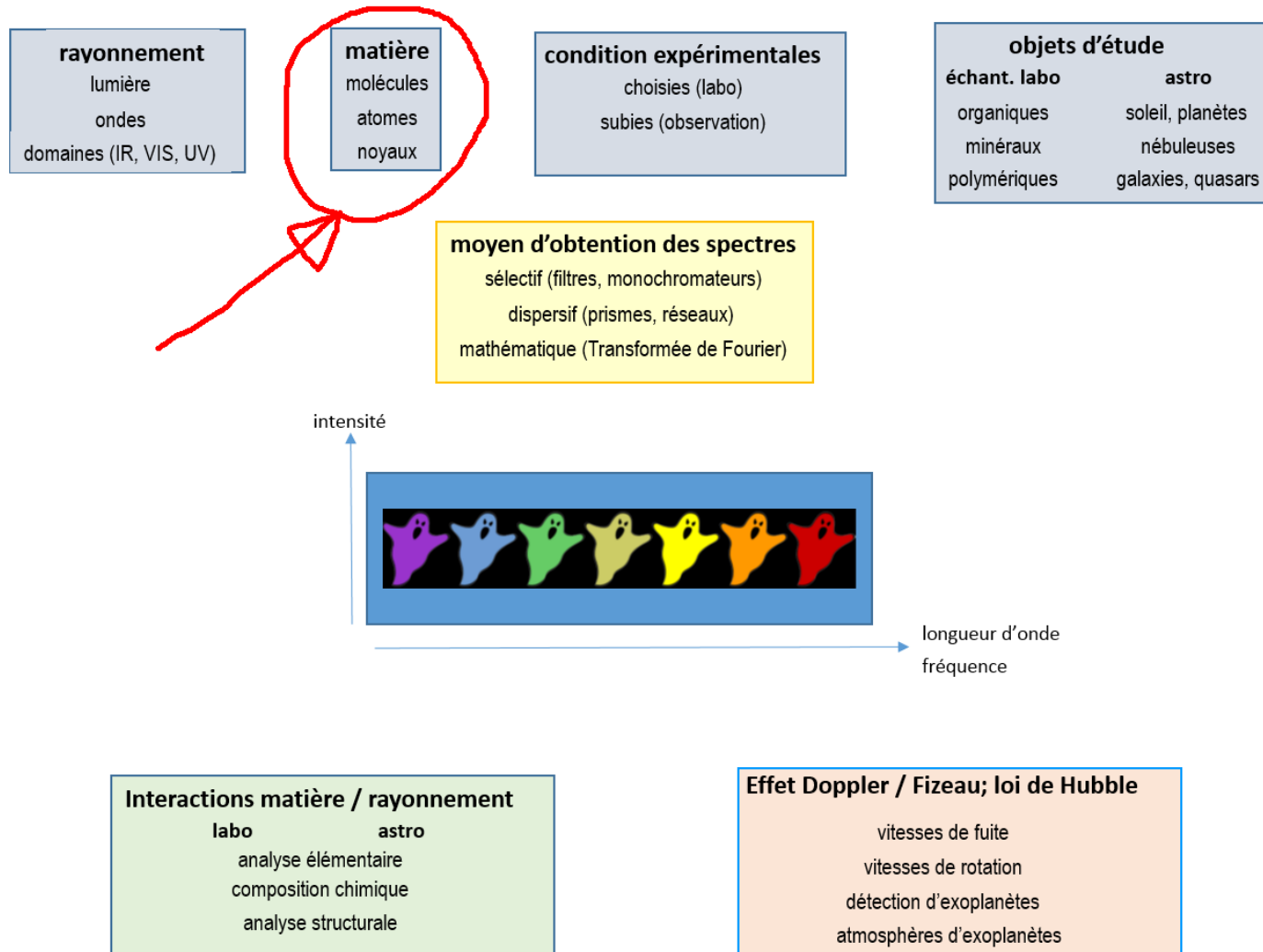


ALIGO 2016
même le cosmos tweete !!

Les ondes dans tous leurs états !



La matière



Qu'est-ce que la matière ?

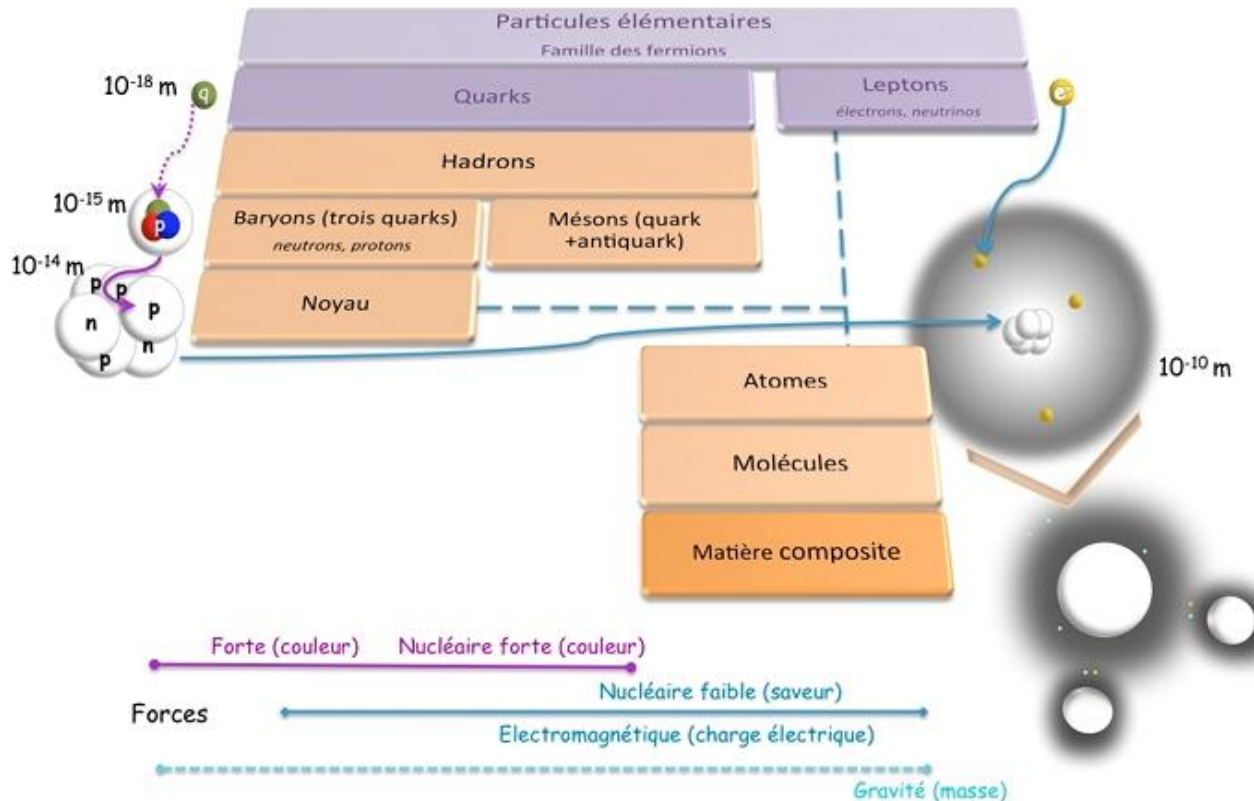


Schéma illustratif des corps de matière interagissant à distance sous l'influence des quatre forces fondamentales. Ils sont constitués de particules élémentaires de matière regroupées sous le terme de *fermions*. Dans la prochaine partie, nous allons aborder la seconde famille de particules élémentaires de matière, elles transmettent les forces entre les fermions, ce sont des *bosons médiateurs* qui se manifestent sous forme de rayonnement.

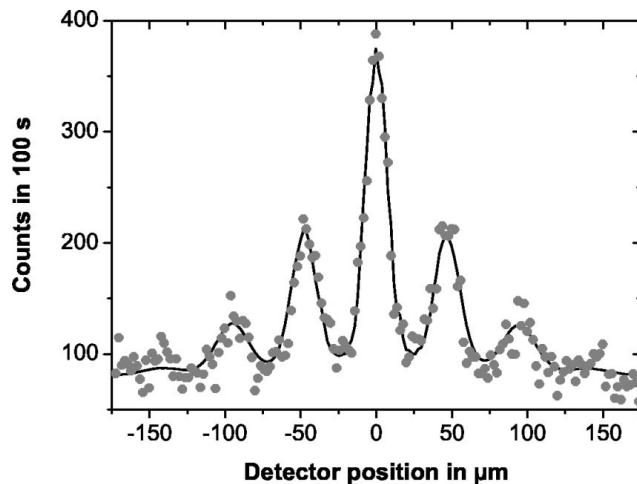
Dualité onde / particule

- le rayonnement est à la fois 'photon' et onde $E = h \cdot \nu$

- les particules constitutives de la matière ont aussi une nature ondulatoire**

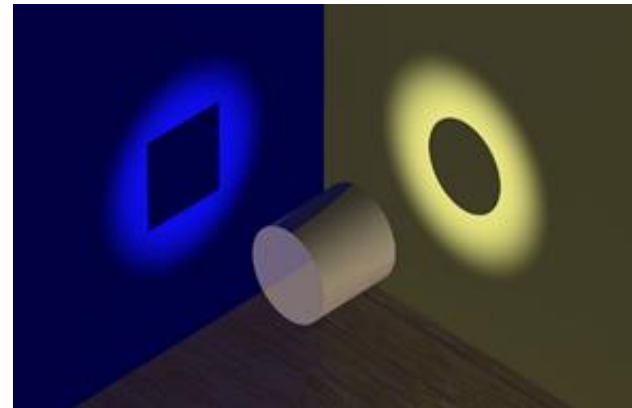
$$\lambda = h / p \quad (\text{de Broglie 1924})$$

- preuves: expérience de la double fente, avec électrons, protons, molécules



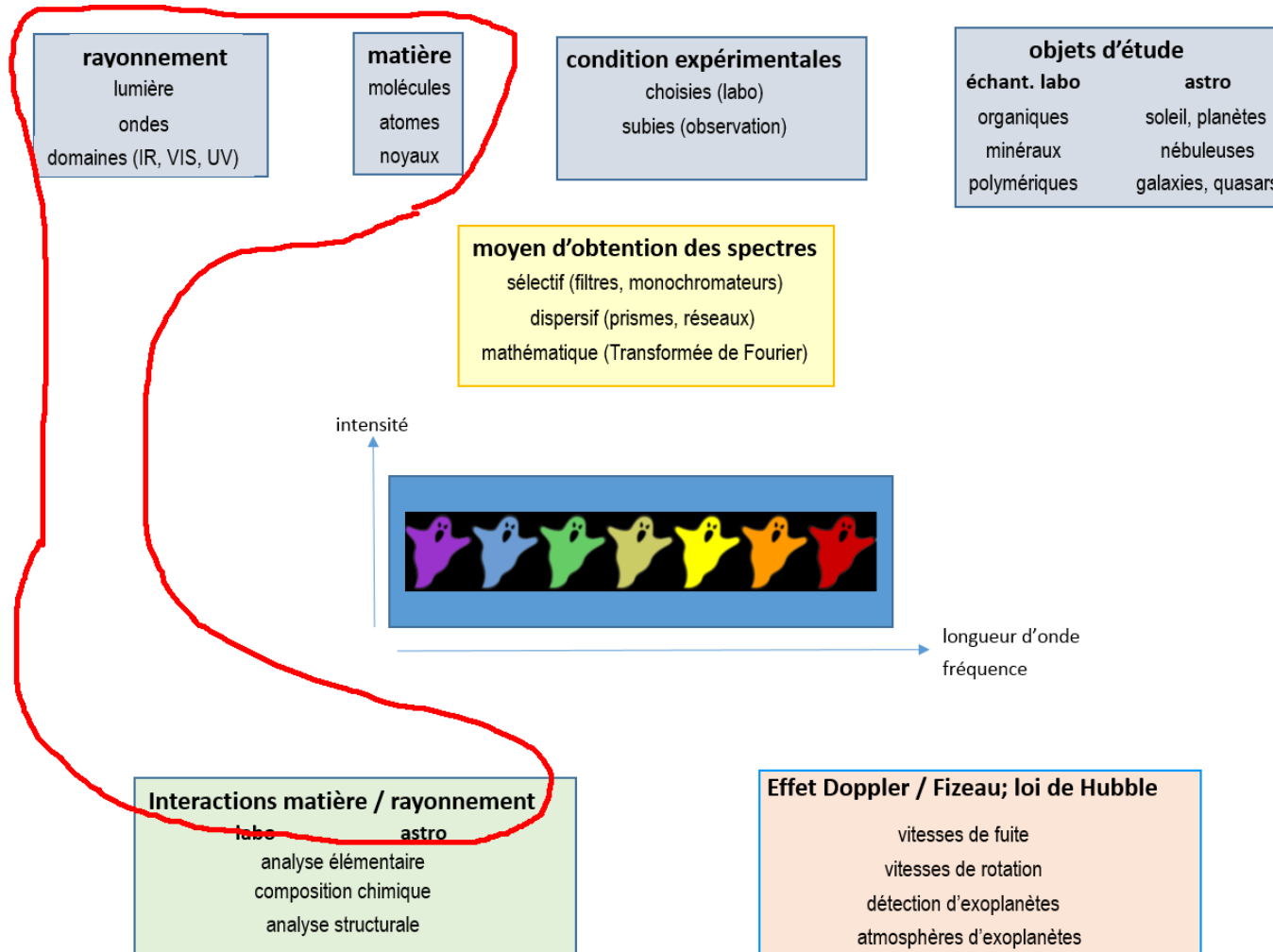
ex: diffraction du fullerène (1999)

O.Nairz et al, Am. J. Phys., Vol. 71, No. 4, April 2003



- toute particule est décrite par sa fonction d'onde** – qui définit sa densité de probabilité de présence
- cette dualité *ne concerne pas le monde macroscopique*
donc difficile à 'concevoir' à partir de notre expérience quotidienne

Interactions ondes / matière



quarks
baryons

noyaux

atomes

molécules

matière

au niveau macroscopique

interaction = transmission d'énergie

- transmission directe (par ex. thermique ou mécanique)

la casserole sur la plaque à induction

l'enfant qui sonne une cloche

la troupe au pas sur un pont (Angers 1850, Tacoma 1940)



- transmission à distance, « par sympathie » (par ex. acoustique)

excitation d'une corde non frappée, par une corde sonore

le bibelot sur le piano

l'avion qui fait vibrer la vitre

la Castafiore

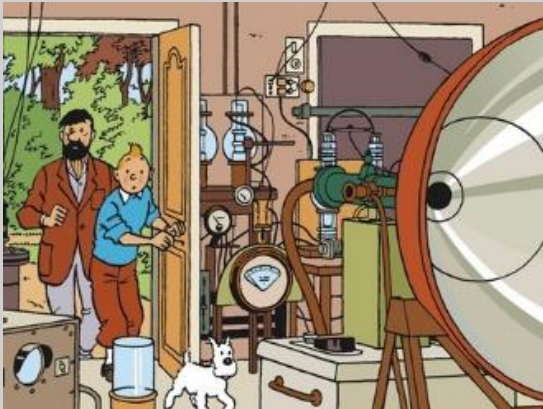
le Professeur Tournesol



résonance: l'interaction est maximale quand la fréquence de l'onde excitatrice (excitateur) devient égale à la (aux) fréquence(s) propre(s) de vibration du système (résonateur)



fréquences privilégiées

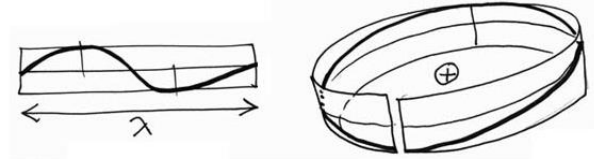


quarks baryons
noyaux
atomes
molécules
matière

au niveau atomique

- analogie démontrée au XXème siècle entre constituants de la matière (noyaux/atomes/molécule) et les oscillateurs

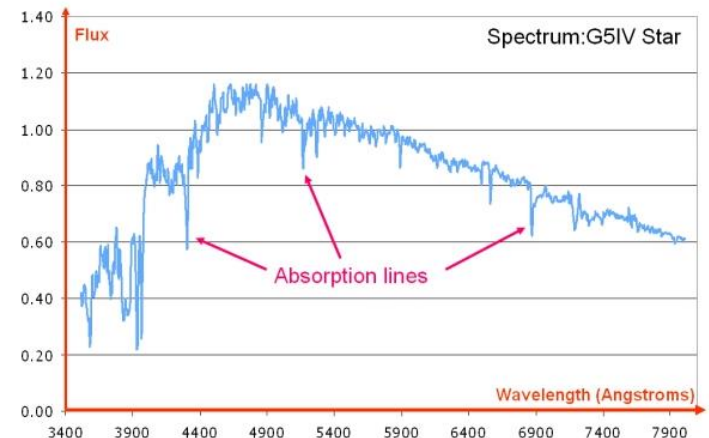
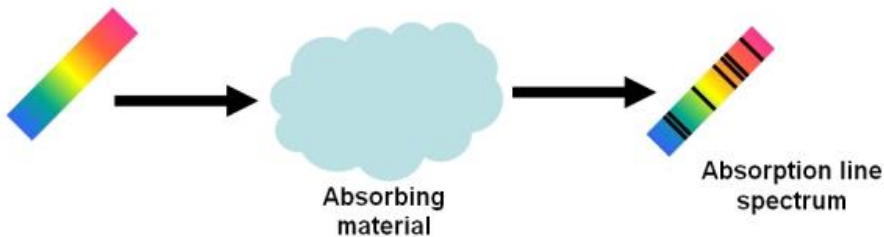
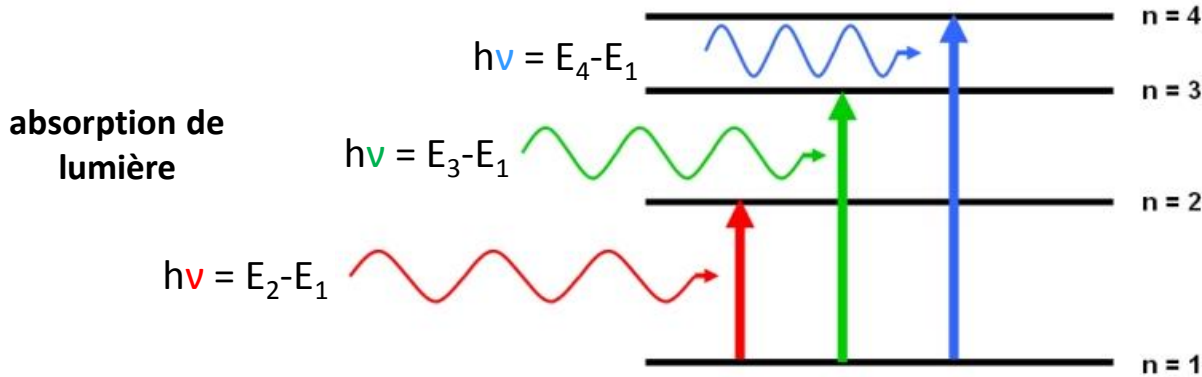
- orbite d'un électron analogue à une **onde stationnaire circulaire**, tel un mode résonant d'une corde vibrante



quantification des niveaux d'énergie dans un atome

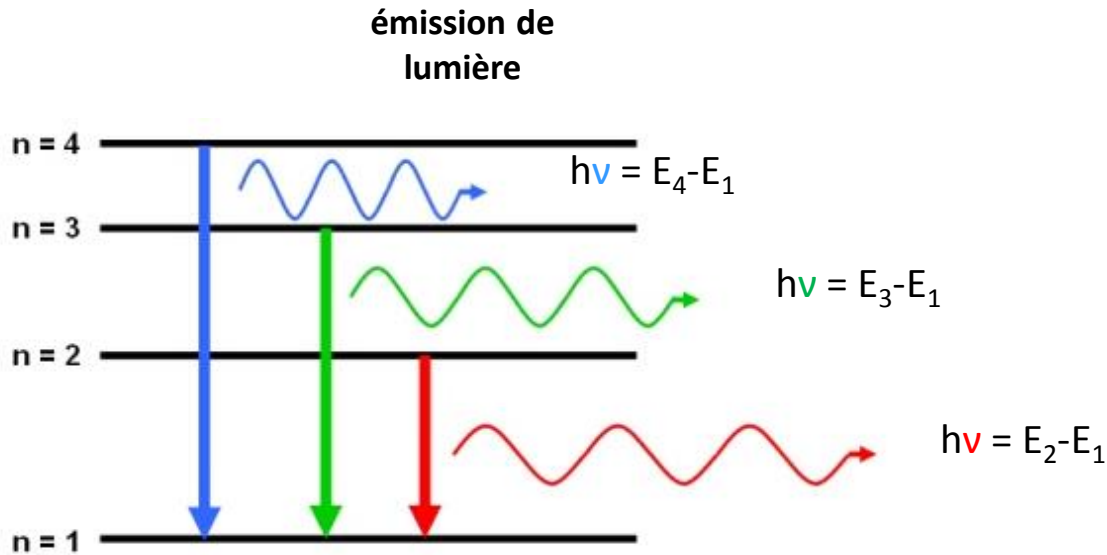
- absorption résonante d'énergie par les atomes à certaines fréquences
- reflet du niveau énergétique des orbitales électroniques

Physique quantique

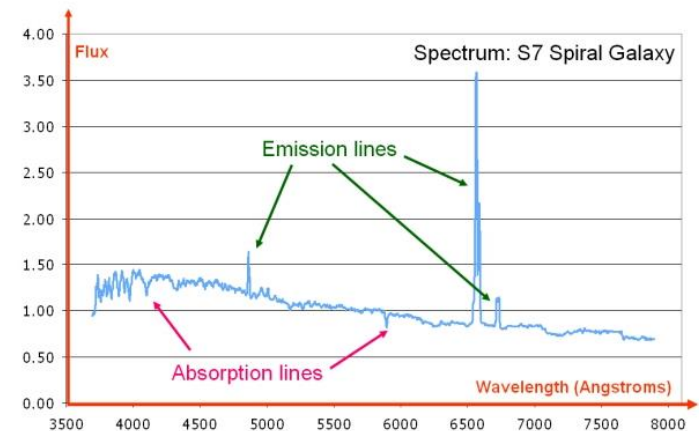
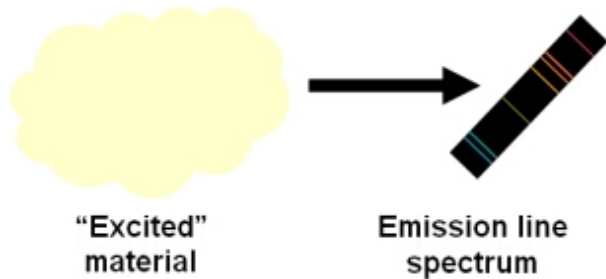


quarks baryons
noyaux
atomes
molécules
matière

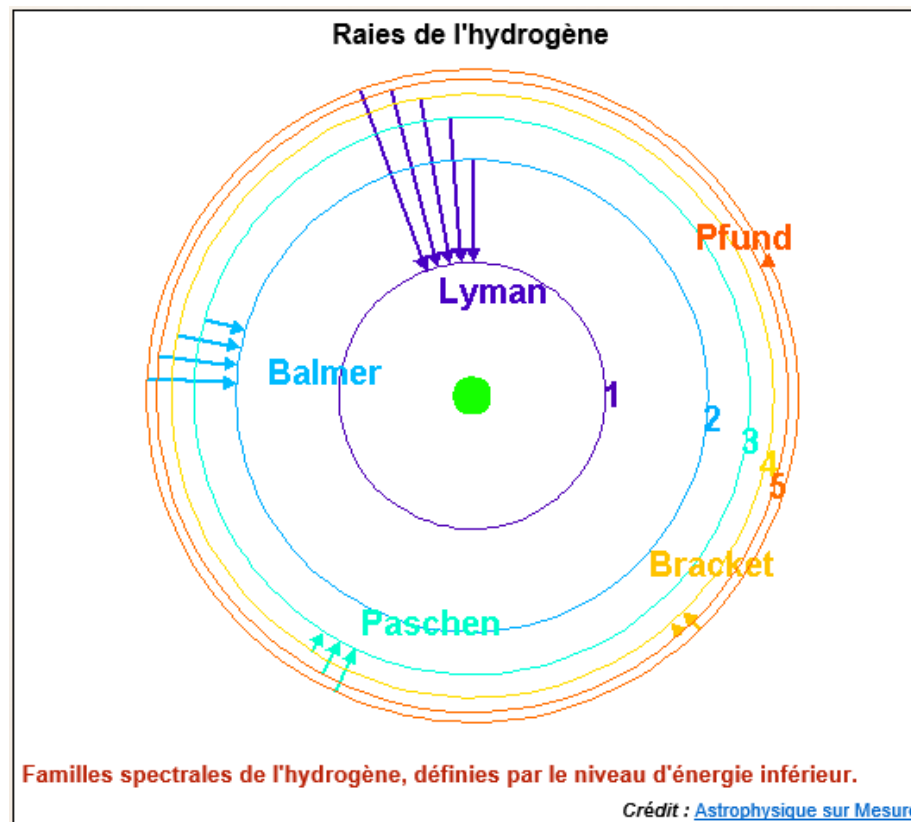
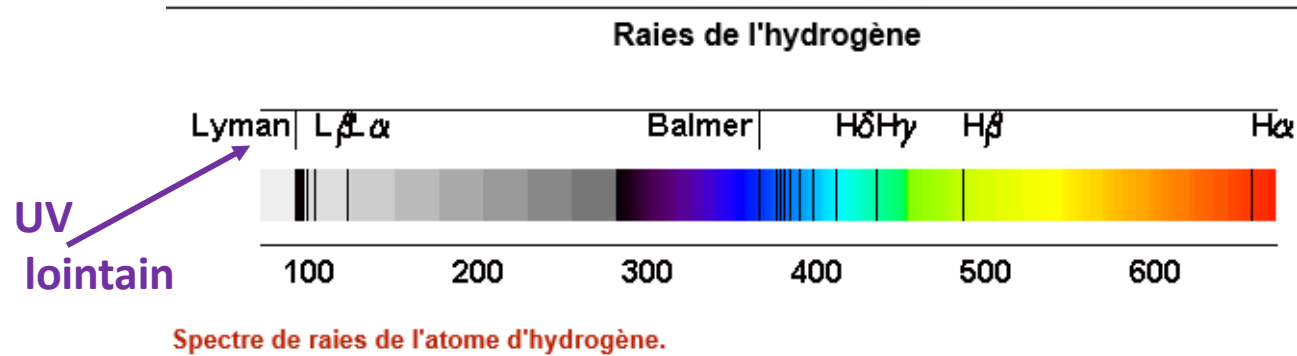
au niveau atomique



- **réversibilité:** un atome ne peut émettre que les fréquences qu'il est susceptible d'absorber



Transitions énergétiques électroniques: échanges matière / rayonnement



Lyman: UV
Balmer: VIS
Paschen: IR

quarks
baryons

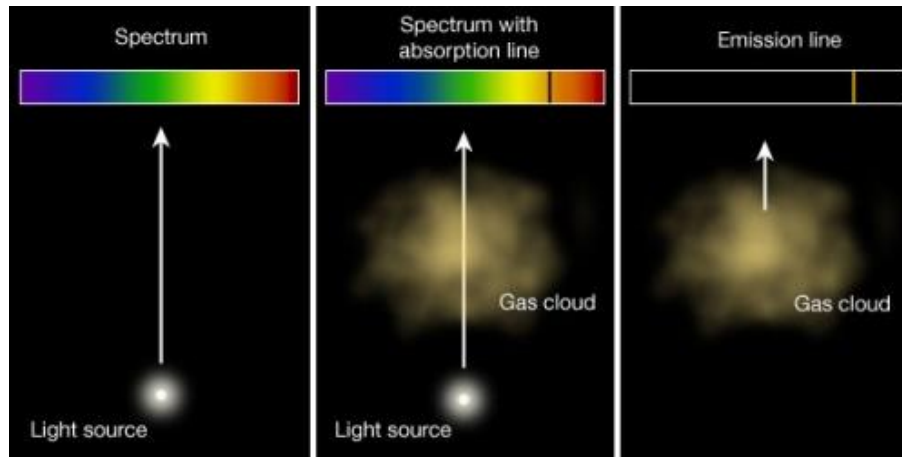
noyaux

atomes

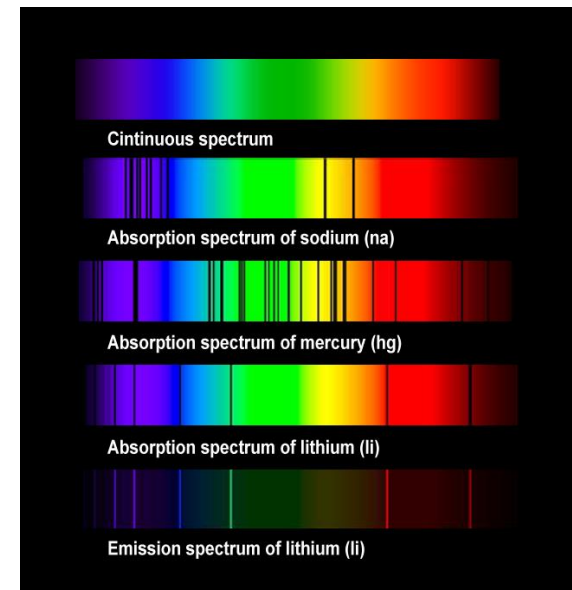
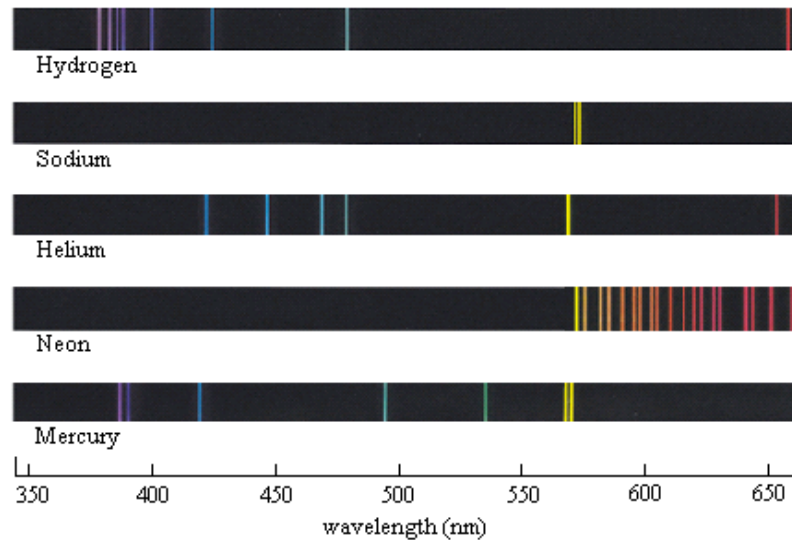
molécules

matière

Spectres d'émission et d'absorption atomique



- au labo, on maîtrise a priori le type de spectre obtenu
- en astro, on constate le type de spectre obtenu et on l'explique a posteriori



au niveau moléculaire

quarks
baryons

noyaux

atomes

molécules

matière

- absorption possible d'énergie incidente

- vibrations, rotations moléculaires

Spectroscopie infra-rouge

identification des molécules
et des mélanges de molécules
organiques

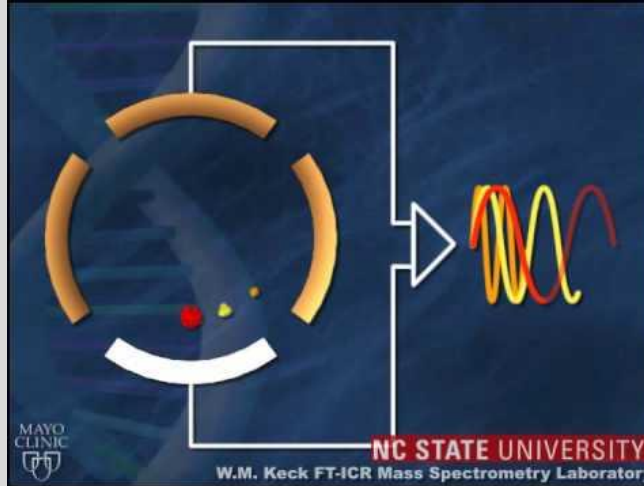
Spectroscopie UV

identification des liaisons
insaturées



Spectrométrie de masse

- existence de 'spectres de masses' – signature des fragments d'une substance pure ou d'un mélange donné - après bombardement électronique de la substance de départ
- les spectres de **résonance cyclotronique ionique** (spectro de masse à transformée de Fourier) sont des spectres de fréquence de rotation des fragments
- cryoaimants



Spectroscopie de mobilité ionique

spectres de temps de vol de fragments ionisés (portiques « renifleurs » sécurité)

quarks baryons
noyaux
atomes
molécules
matière

au niveau nucléaire

- certains noyaux (^1H , ^{13}C , ^{19}F , ^{31}P , ^{15}N ,...) sont susceptibles de transitions nucléaires
- sous certaines conditions (présence de champs magnétiques forts), transitions d'états de spins
- la fréquence de ces transitions dépend de la proximité immédiate d'autres noyaux

➡ analyse de la structure fine des molécules organiques (analyse chimique)

Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (à la base de l'IRM)



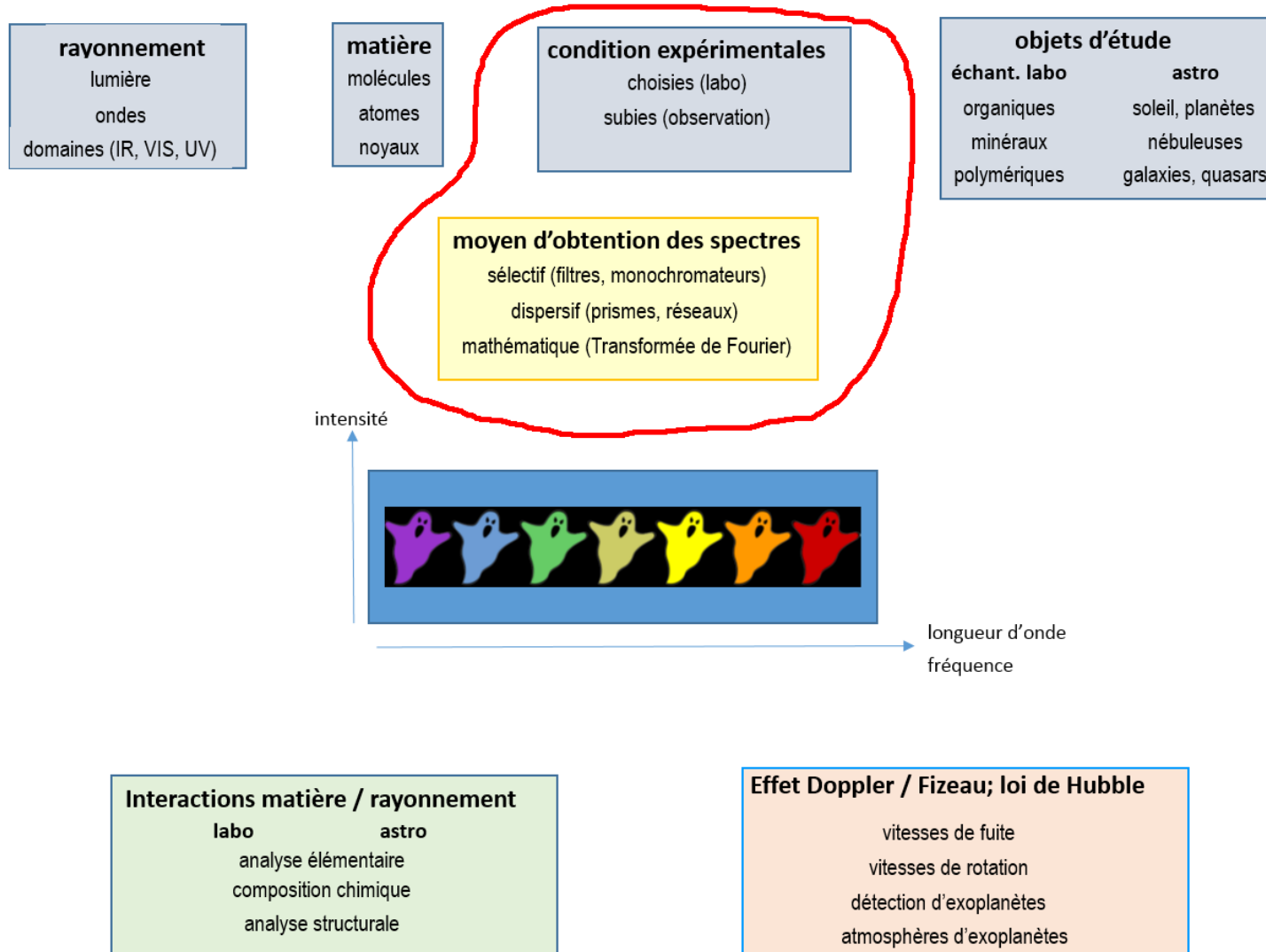
fréquences impliquées:
quelques centaines de MHz
(ondes radio)

^1H : 200 MHz, si champ
magnétique de 4 tesla

analyse des temps de relaxation:
info sur le milieu environnant
(IRM)



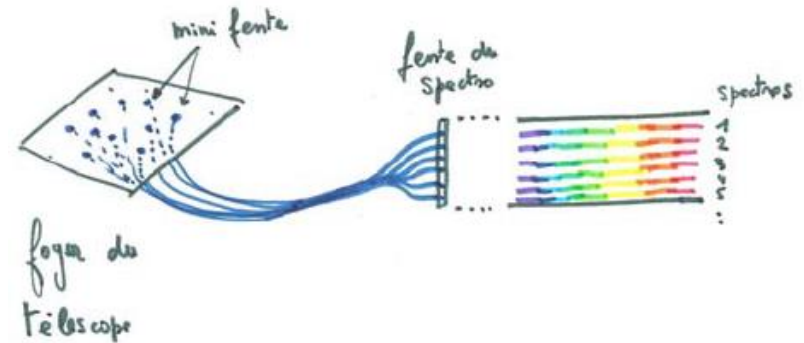
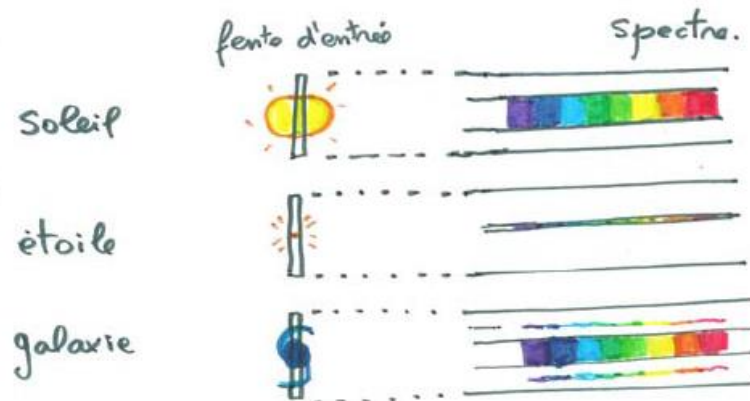
L'analyse spectrale



Analyse sélective:

Sélection spatiale à l'entrée du spectro

la question se pose surtout en astro



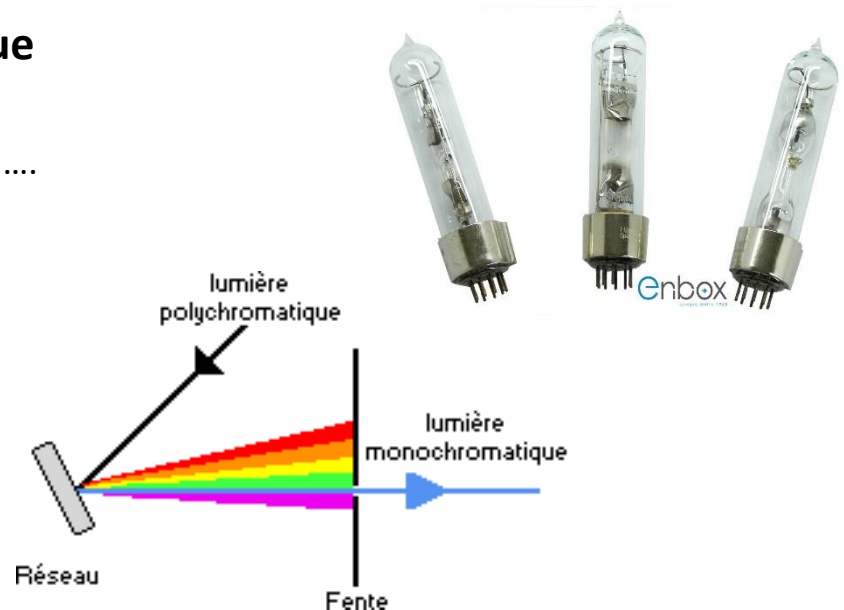
Sélection d'une lumière monochromatique

Lampes: par exemple, He, Cd, Ne, Zn,

Monochromateurs:

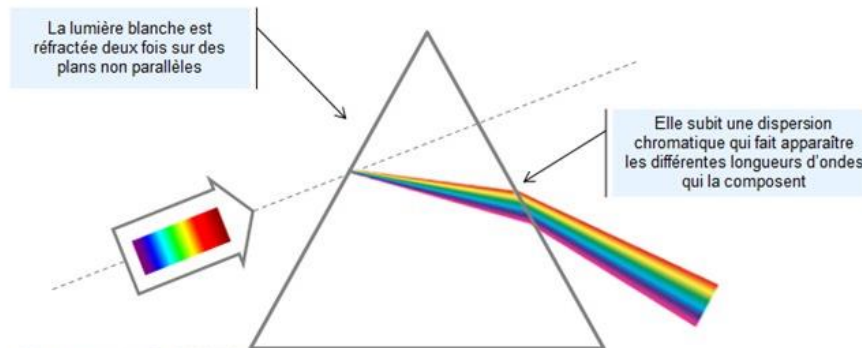
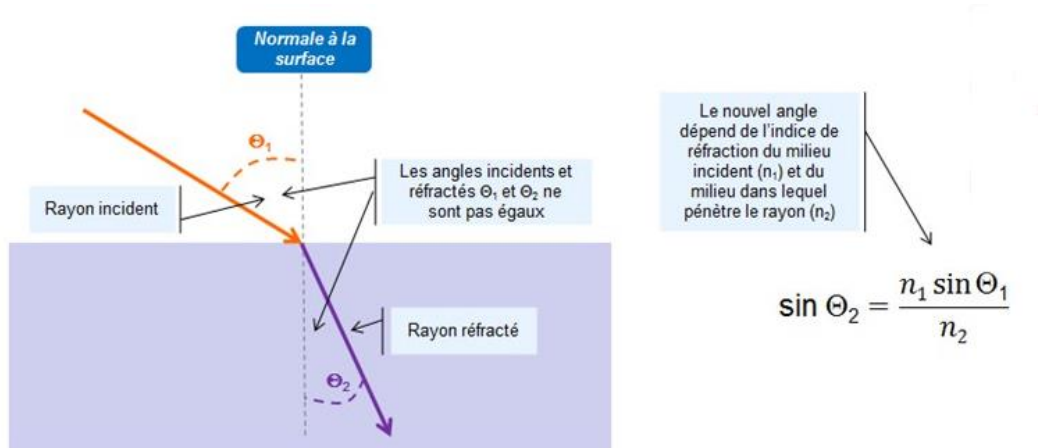
Filtres:

- optiques
- électroniques
- numériques



Analyse dispersive: réfraction par un prisme

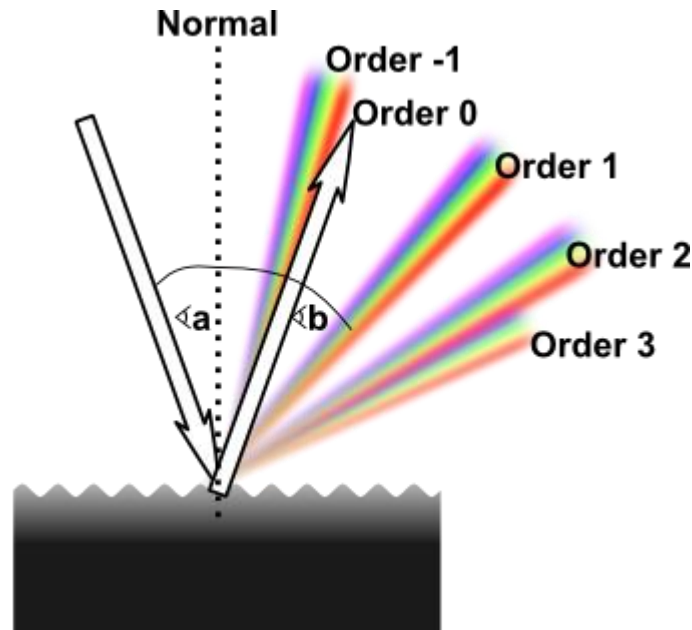
- domaine visible essentiellement



Analyse dispersive: diffraction par un réseau

- domaine visible essentiellement
- le réseau « étale » le rayon incident selon les fréquences, en de multiples spectres

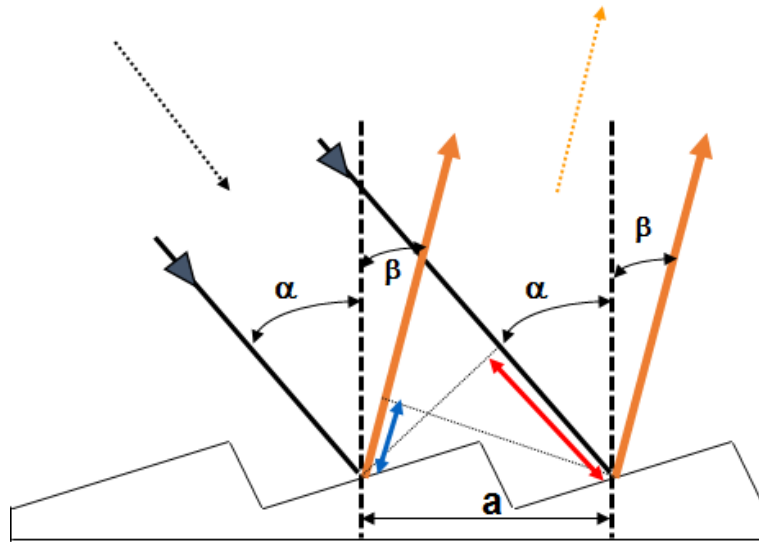
exemple: CD ou DVD



l'ordre 0 est l'image de la source
non diffractée, par réflexion

problème des ordres, dont on peut tirer partie dans certaines conditions
(ICP/AES) à réseau échelle croisé

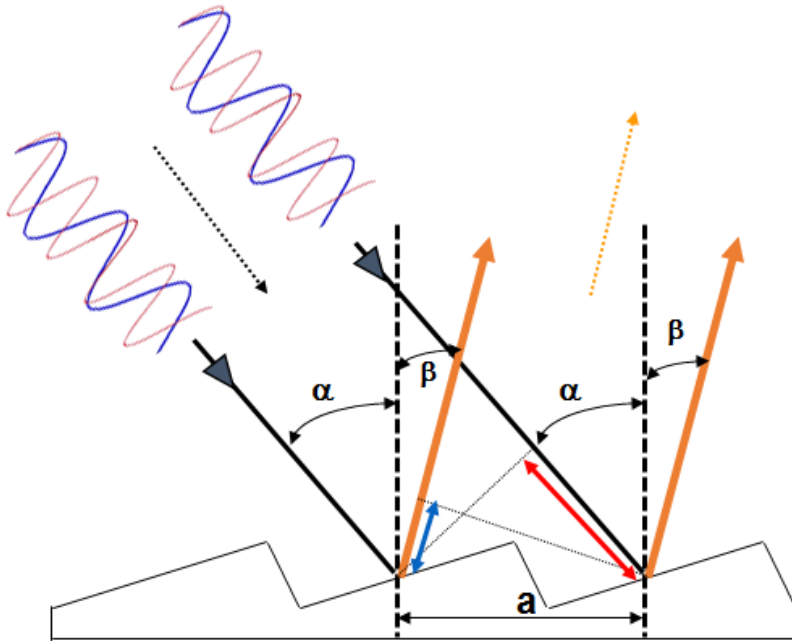
Diffraction par un réseau



si incidence α et observation à $-\beta$, différence de chemin optique:

$$\Delta x = a \cdot \sin \alpha - a \cdot \sin \beta$$

Diffraction par un réseau



si incidence α et observation à $-\beta$, différence de chemin optique:

$$\Delta x = a \cdot \sin \alpha - a \cdot \sin \beta$$

Diffraction par un réseau

- rayons incidents: rouge en phase; bleu en phase
- rayons réfractés: rouge déphasé; bleu en phase



sous l'angle β on verra le bleu

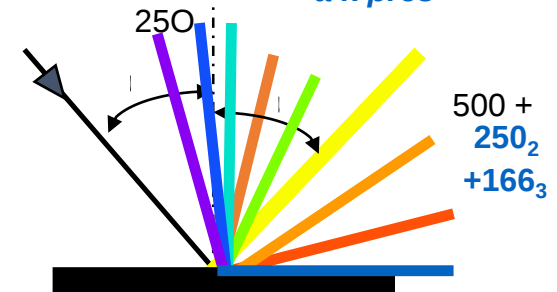
* pour $k = 1$ et $\alpha = 90^\circ$, on a

$$\lambda_{\max} = 2.a$$

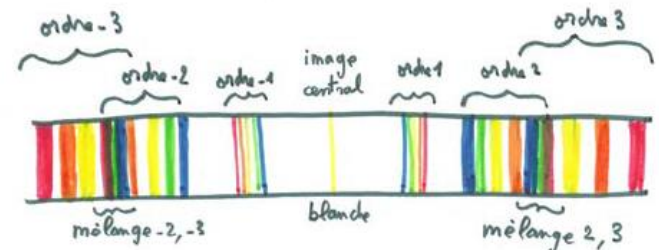
3600 traits/mm $\longrightarrow$ $a = 278 \text{ nm}$

$$\lambda_{\max} = 556 \text{ nm}$$

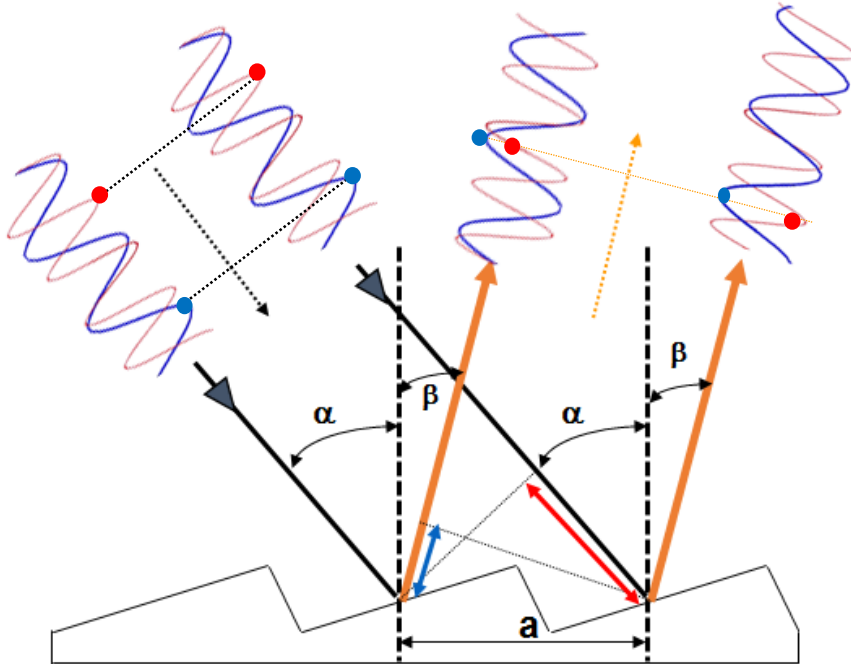
à k près



superposition éventuelle des ordres



Les ordres élevés sont plus dispersés, mais ils se mélangent avec les ordres voisins.



si incidence α et observation à $-\beta$, différence de chemin optique:

$$\Delta x = a.\sin\alpha - a.\sin\beta$$

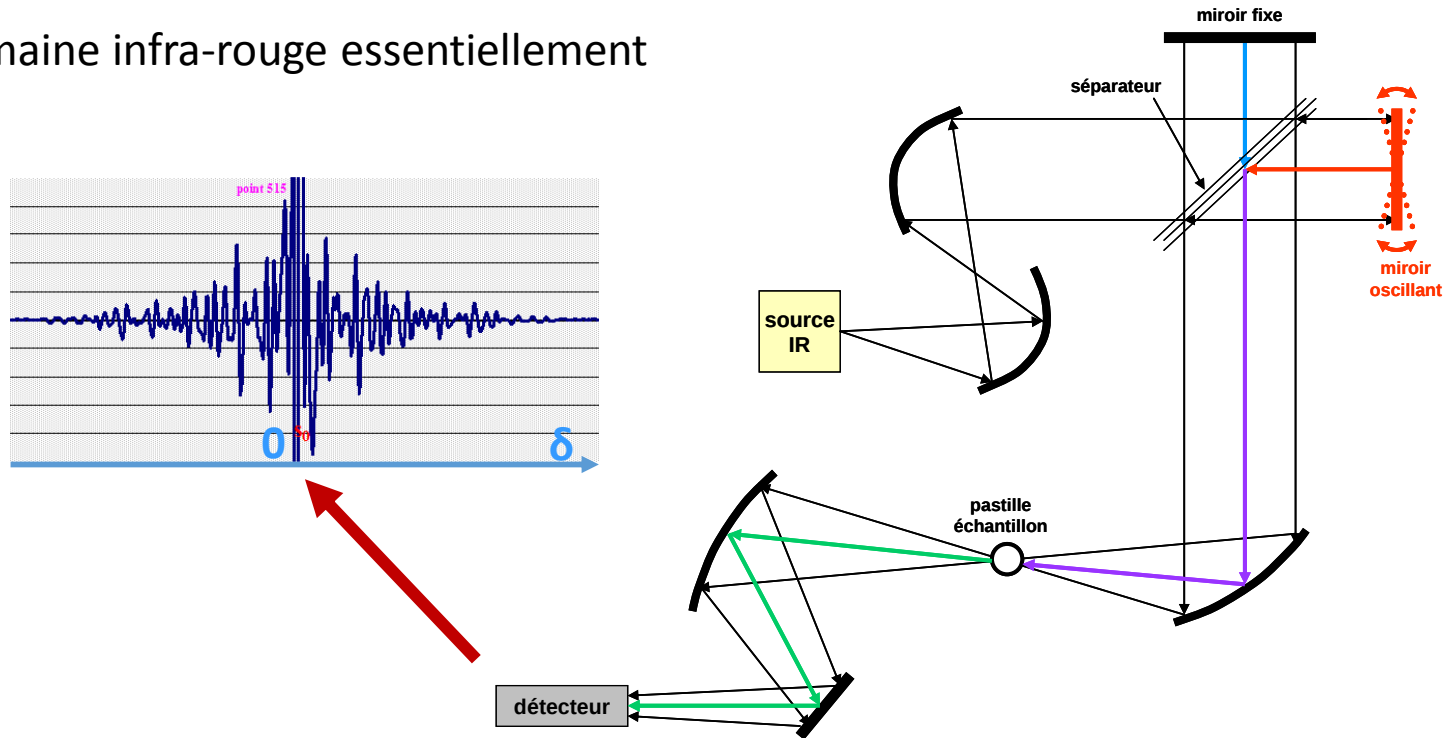
les longueurs d'onde observées seront celle pour laquelle on a

interférence constructive soit $\Delta x = k \lambda$:

$$k . \lambda = a.\sin\alpha - a.\sin\beta$$

Analyse dispersive: balayage interférométrique

- domaine infra-rouge essentiellement

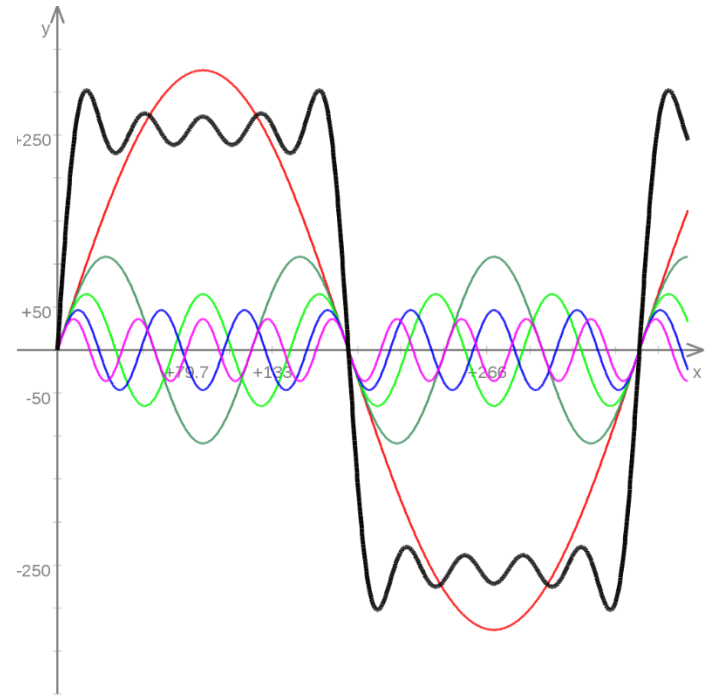


- positions du miroir oscillant $\rightarrow$ variations du chemin optique δ
- pour un λ donné de la source:
interférence constructive pour: $\delta = k \cdot \lambda$
interférence destructive pour: $\delta = (k+1/2) \cdot \lambda$ $\rightarrow$ sinusoïde de fréquence: $(2/\lambda) \cdot (d\delta/dt)$
- pour tous les λ de la source: somme de toutes les sinusoïde de fréquence: $(2/\lambda_i) \cdot (d\delta/dt) = \text{interférogramme}$
- si on intercale l'échantillon: **l'absorption** de certaines fréquences **est 'encodée' dans l'interférogramme**

NB: l'intérêt de ce montage est de s'affranchir de la variation extrêmement rapide ($\sim \text{THz}$) dans le domaine des temps en imposant la cadence d'oscillations plus lentes dans le domaine des chemins optiques

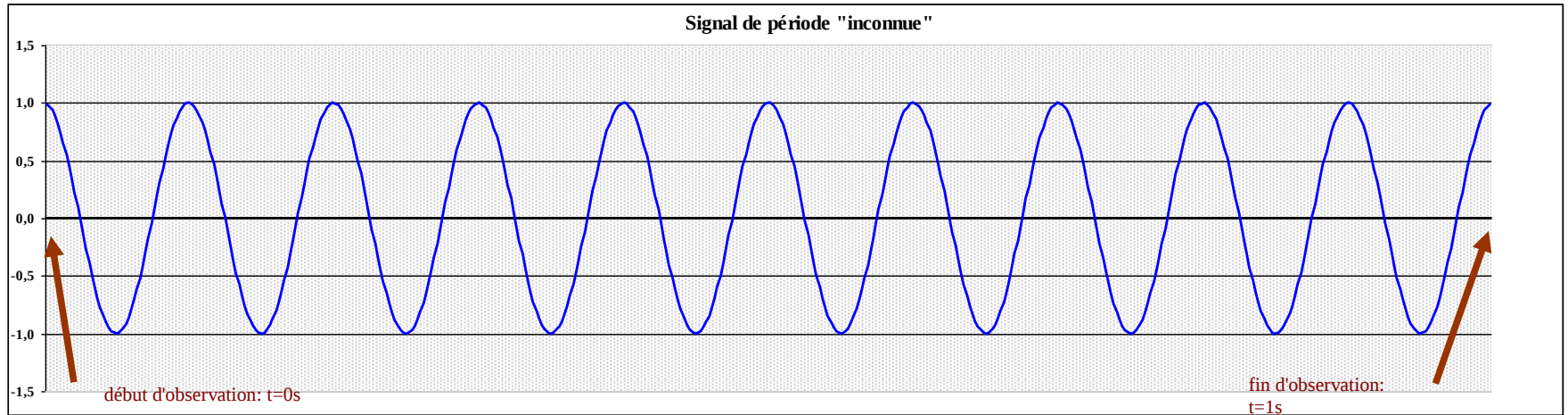
Transformée de Fourier

- **théorème de Fourier**: tout signal temporel est une somme pondérée de signaux sinusoïdaux de fréquences diverses



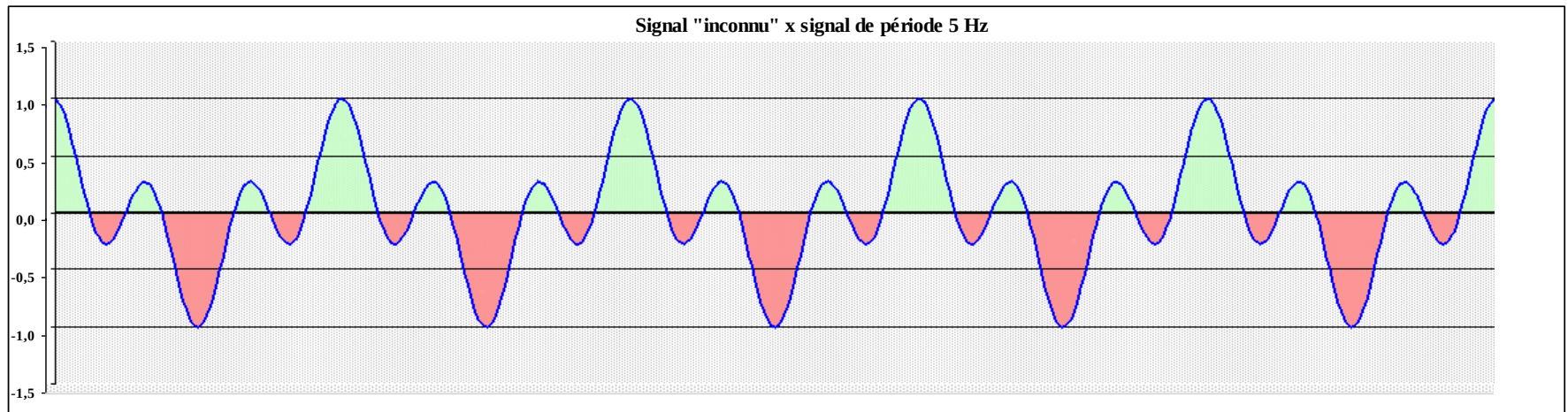
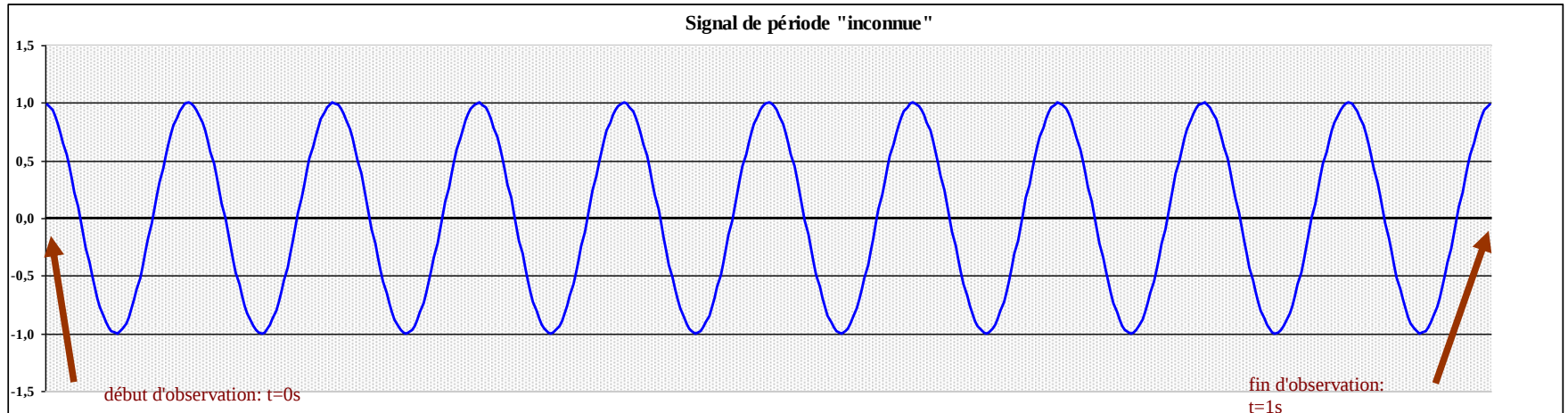
- **la Transformée de Fourier** 'extraît' mathématiquement les fréquences, d'un signal temporel numérisé
 - la Transformée de Fourier – associée à la Transformation inverse – permet le filtrage des signaux, la désaisonnalisation des chroniques, etc....
 - la Transformée de Fourier 2D extrait les fonctions de contraste des images et permet leur retraitement (filtrage, etc...)

Quelle fréquence ?



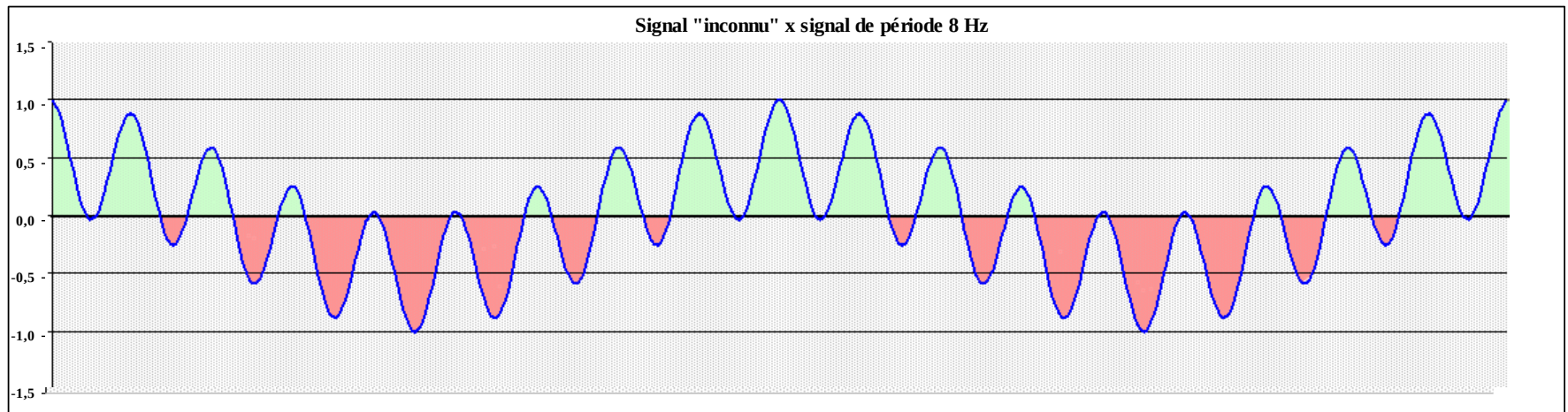
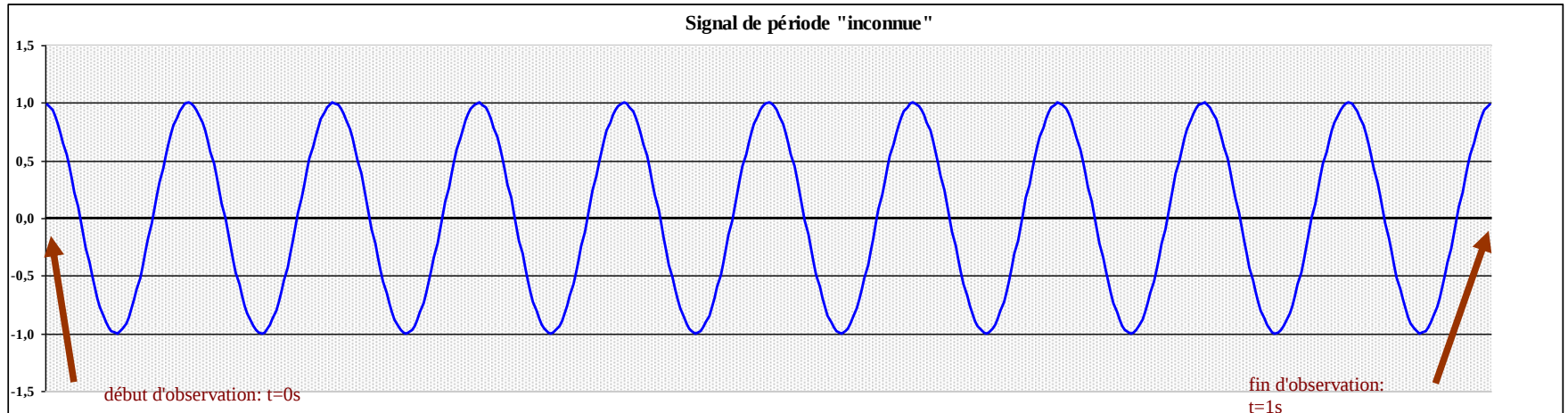
Quelle fréquence ?

5Hz ?



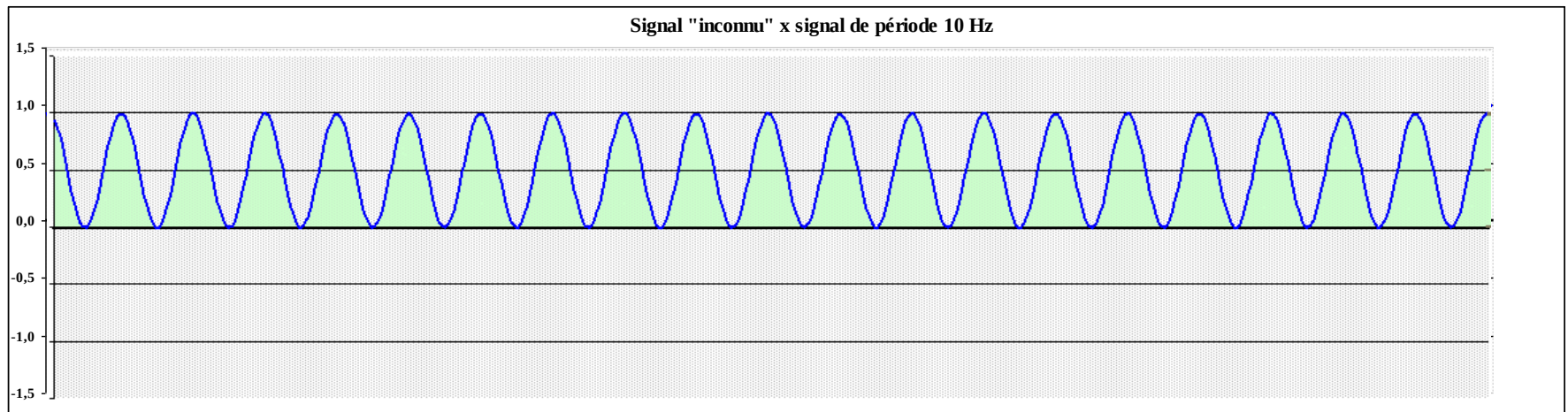
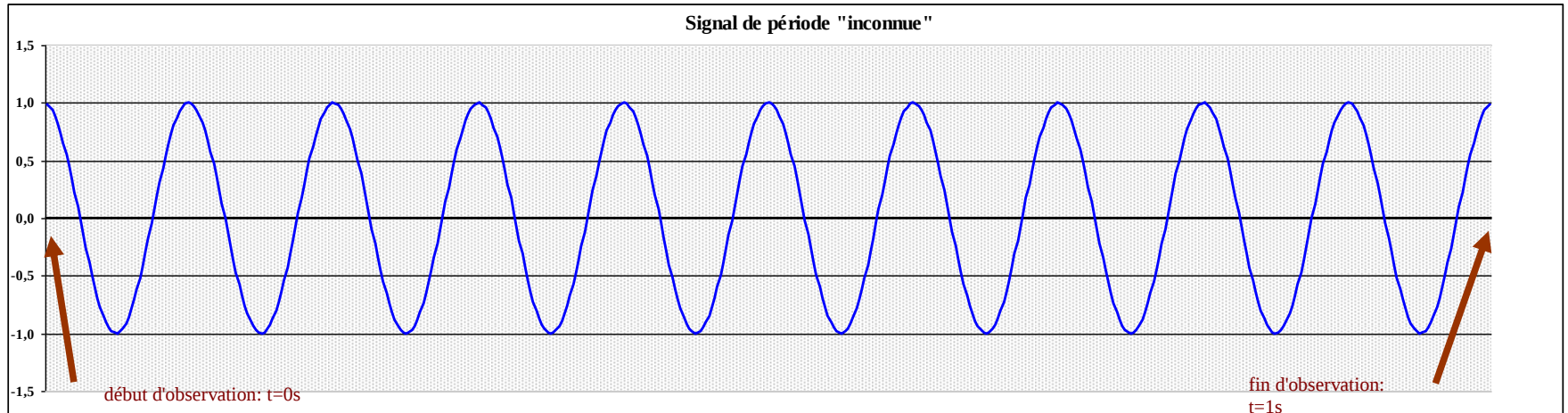
Quelle fréquence ?

8Hz ?



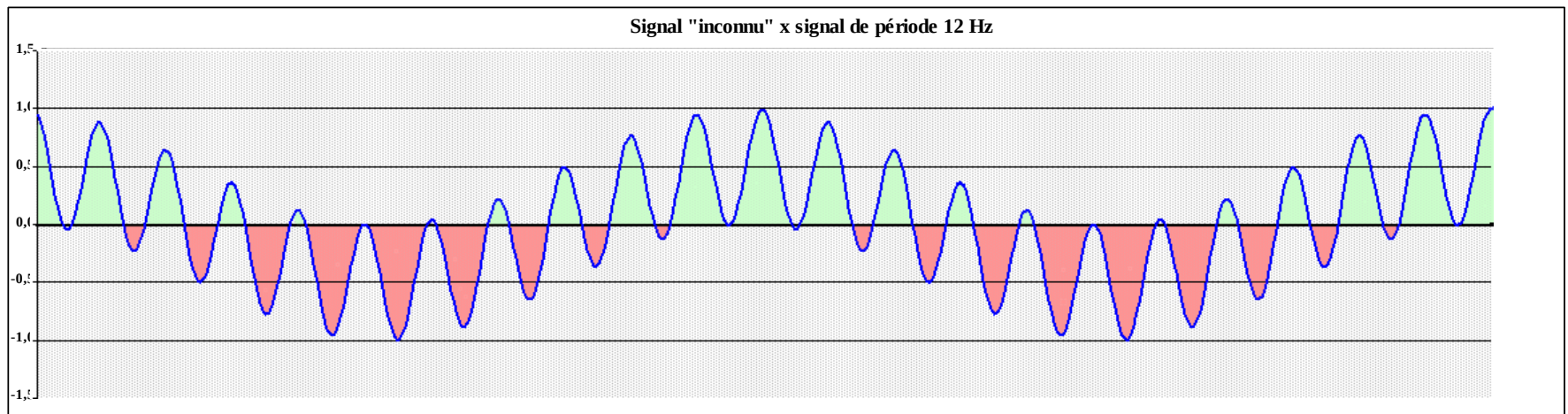
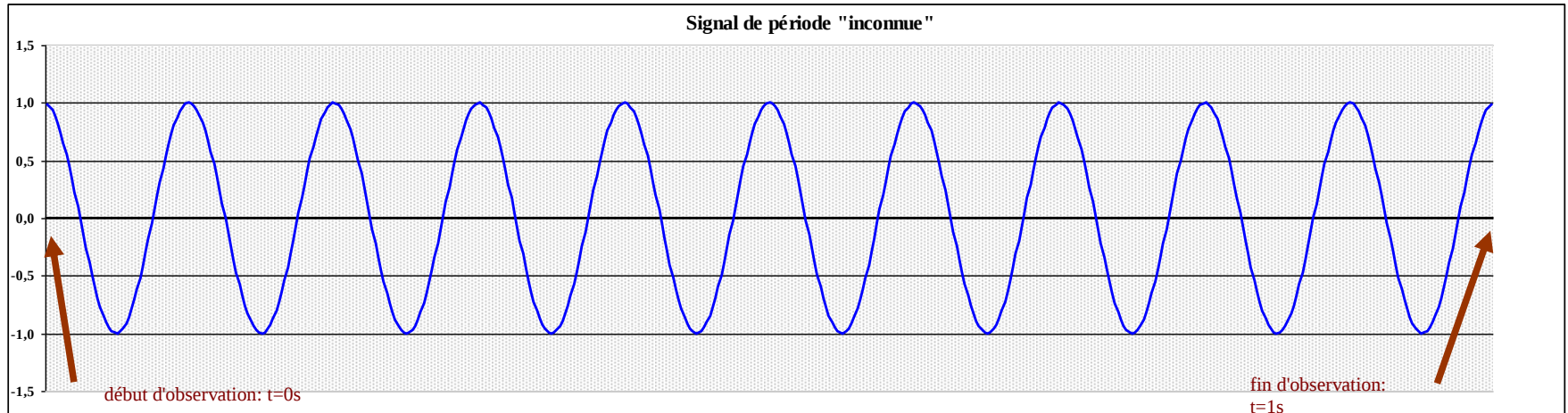
Quelle fréquence ?

10Hz ?



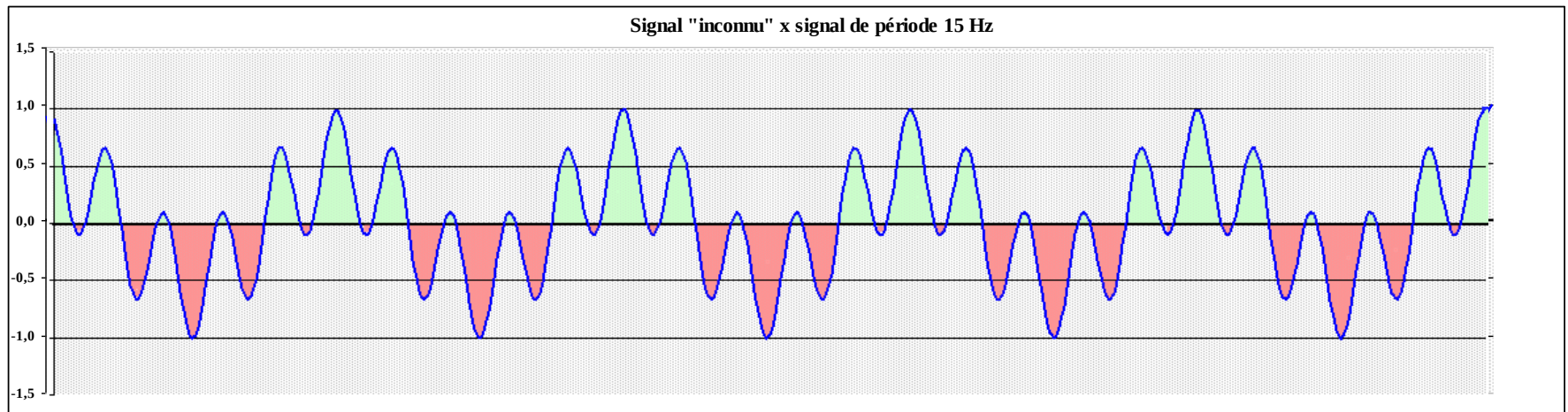
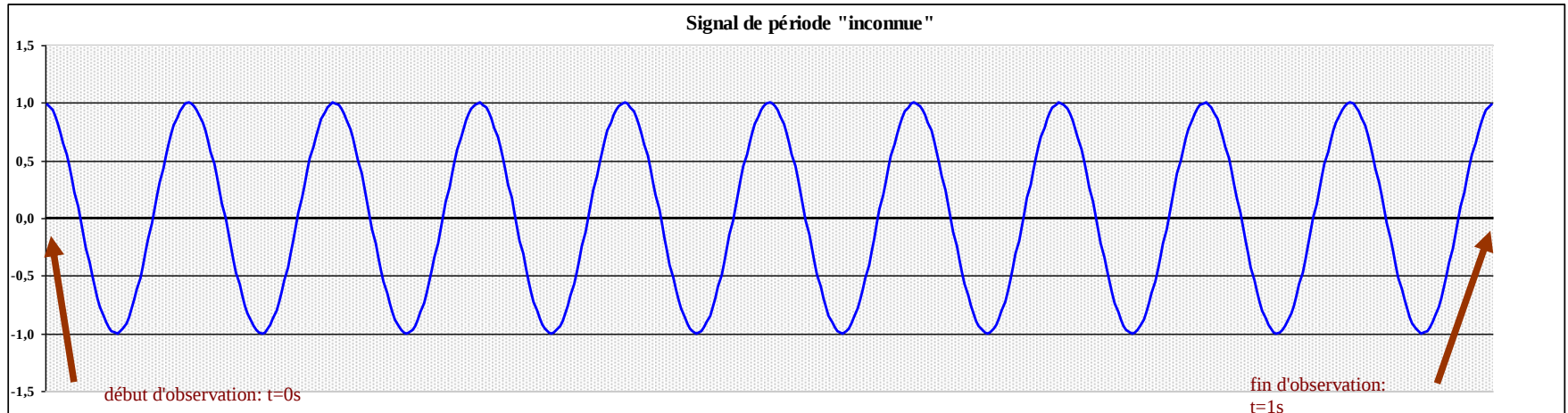
Quelle fréquence ?

12Hz ?



Quelle fréquence ?

15Hz



... un balayage numérique en fréquence !!

somme des surfaces signal inconnu signal variable

$$F_c(v_1, v_2) = \int \cos(2\pi v_0 t) \times \cos(2\pi v t) \times dt$$

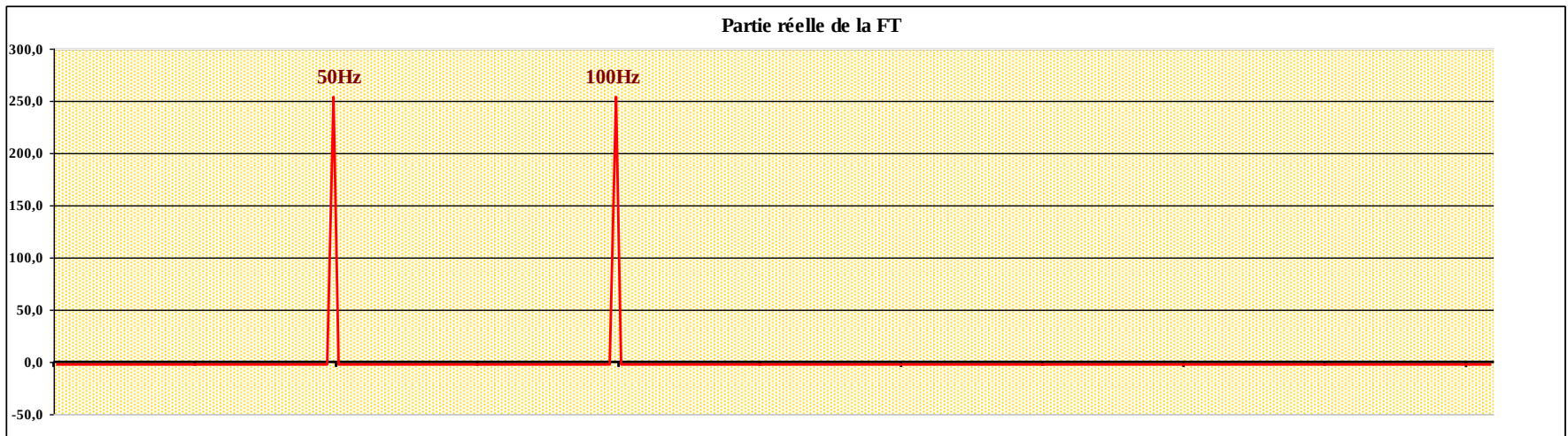
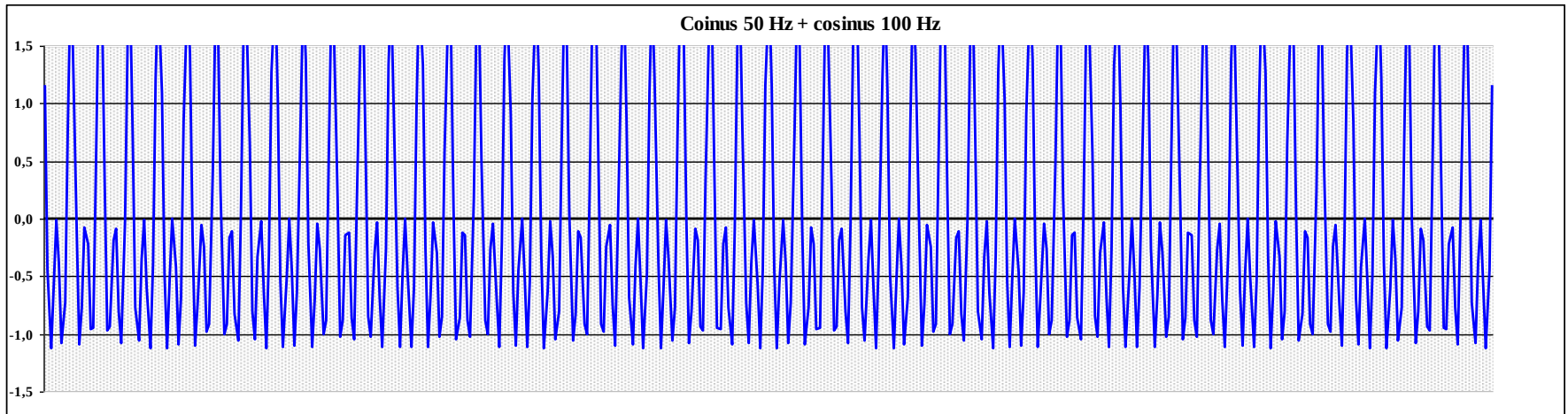
avec: $F_c(v_1, v_2) \neq 0$, pour $v = v_0$ pic dans le spectre de fréquences
 et $F_c(v_1, v_2) = 0$, pour $v \neq v_0$

$$F_c(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \times \cos(2\pi v t) \times dt$$

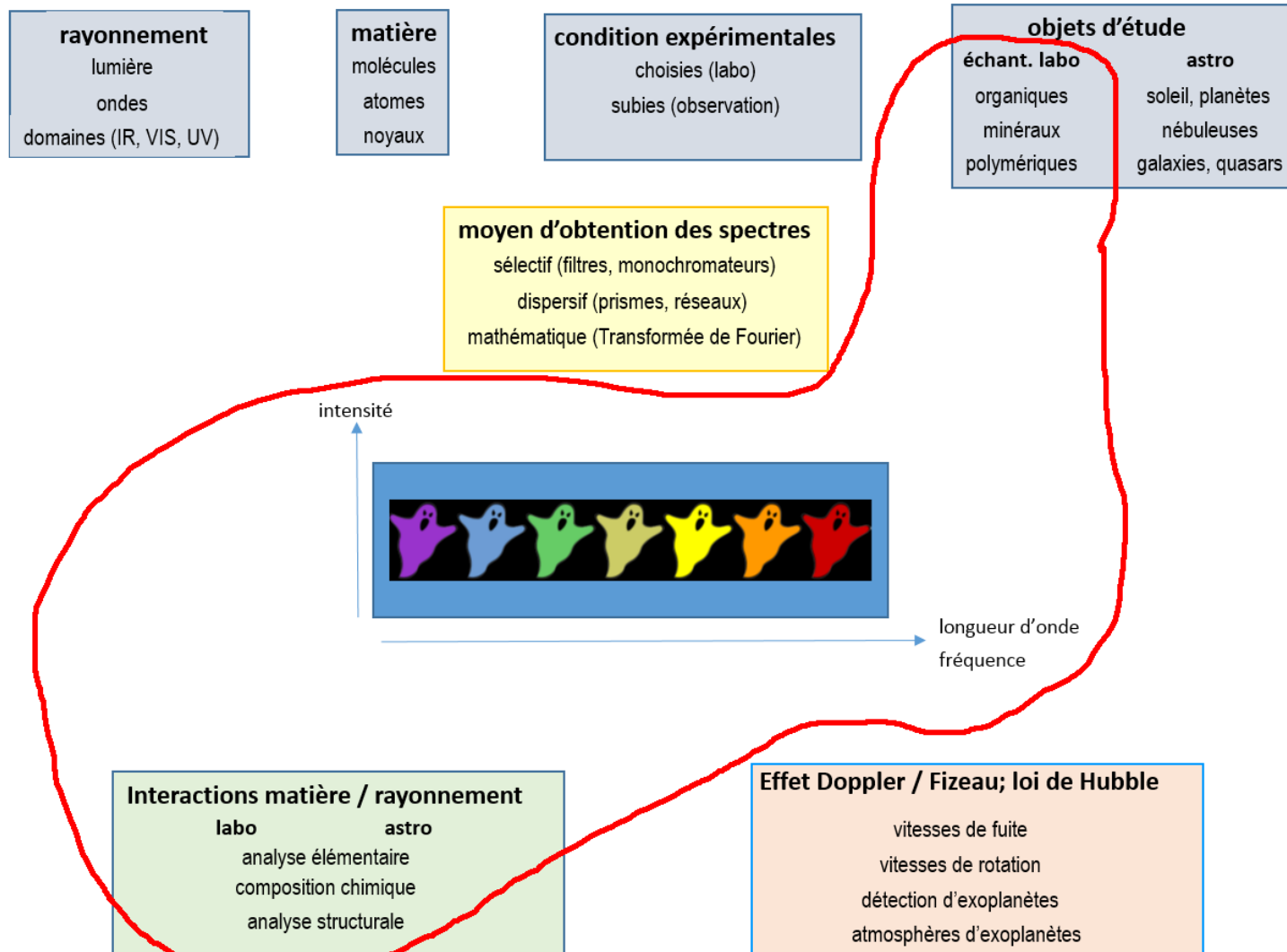
gourmand en temps calcul ! ➡

algorithme FFT et puces spécialisées

exemple...

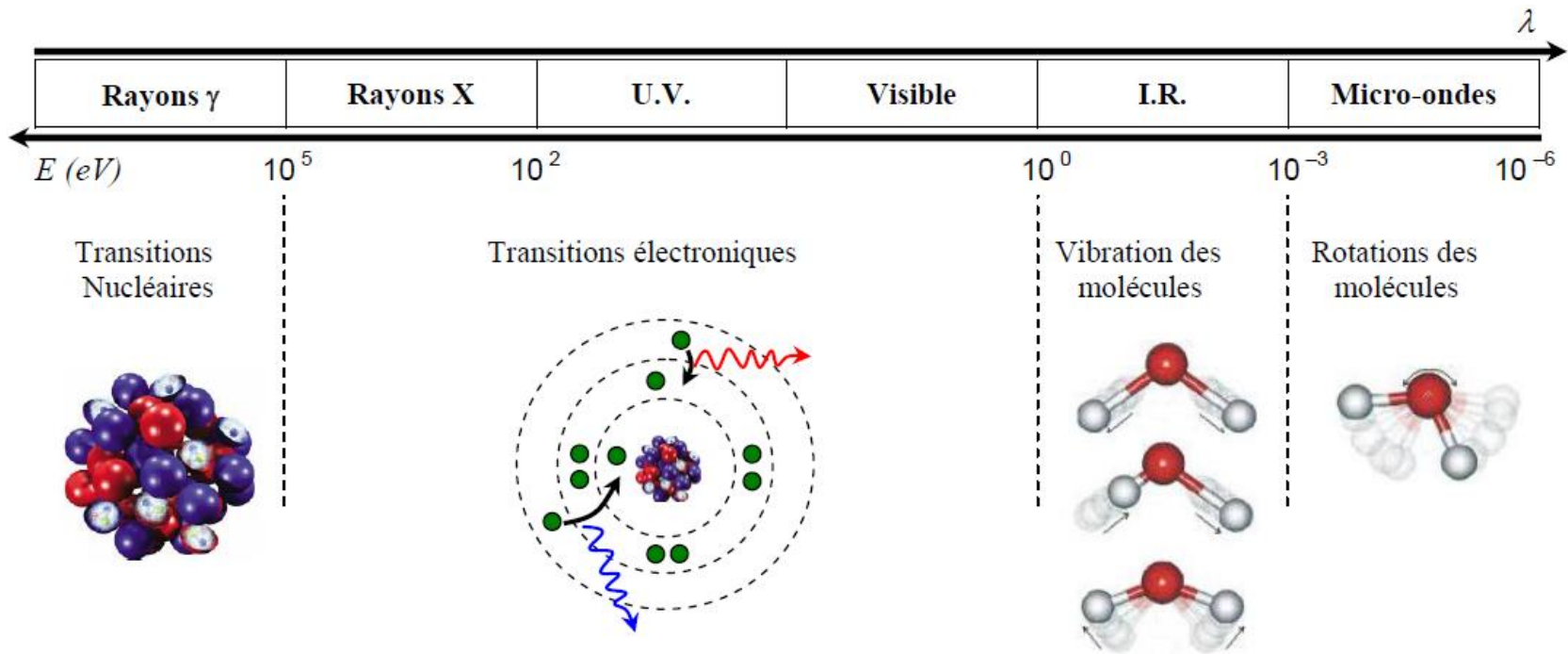


L'interprétation spectrale



exemples d'analyse spectrale

- selon la fréquence, l'énergie échangée est $\pm$ grande ($E = h \cdot \nu$)
- on pénètre $\pm$ dans la matière



quarks
baryons

noyaux

atomes

molécules

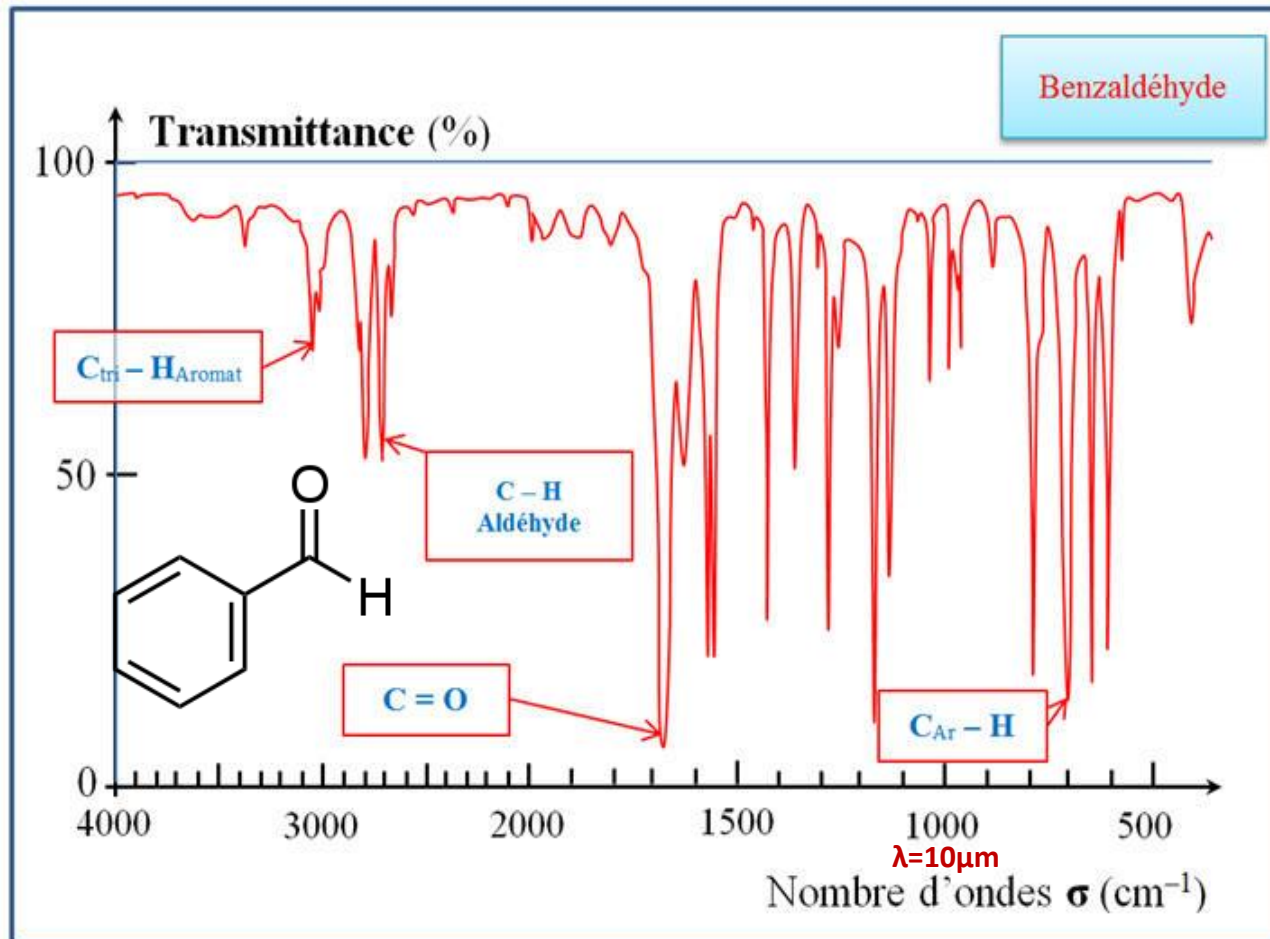
matière

au niveau moléculaire

Infra-rouge

Spectre IR = empreinte digitale de la molécule

la « gym » des liaisons intra-moléculaires: stretching, bending,...



identification de la nature des liaisons

quarks
baryons

noyaux

atomes

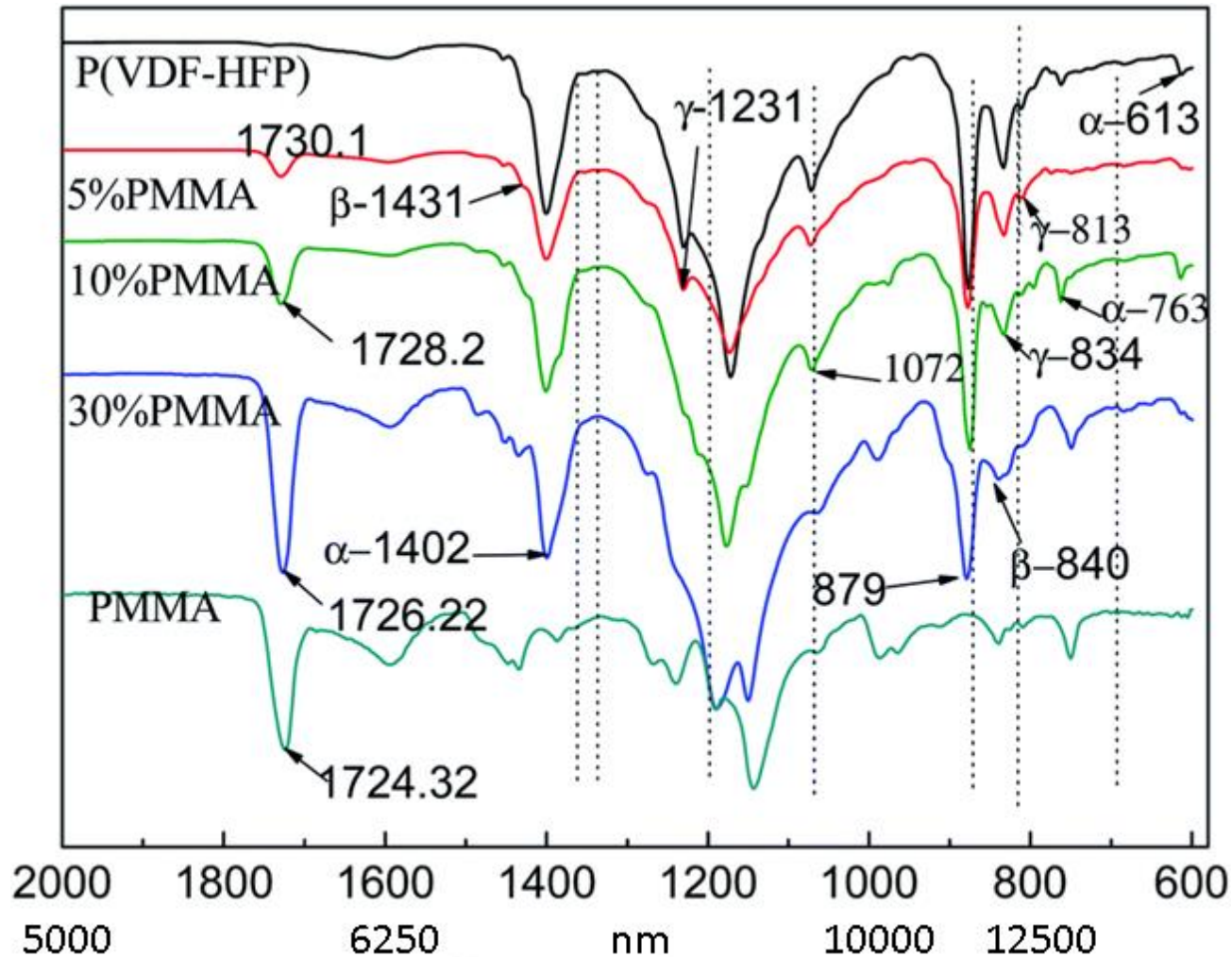
molécules

matière

au niveau moléculaire

Infra-rouge

dosage de mélanges par spectro IR

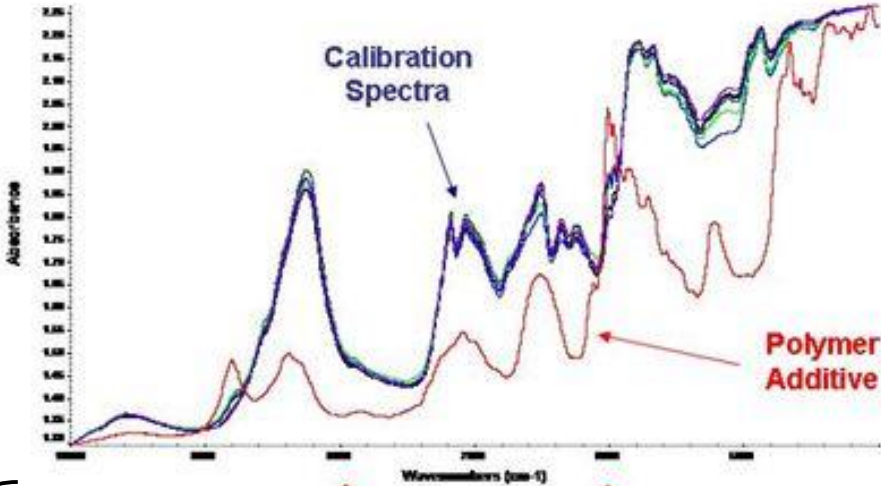


quarks baryons
noyaux
atomes
molécules
matière

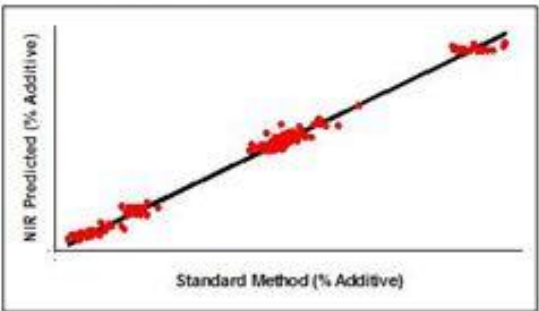
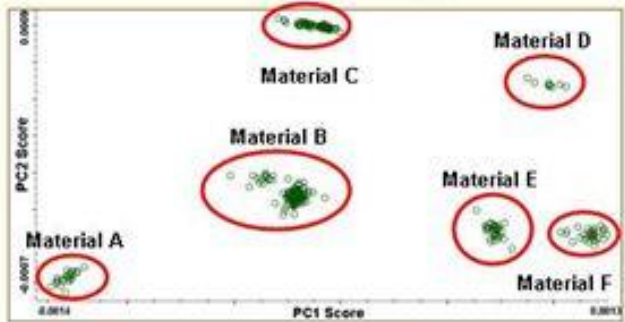
au niveau moléculaire

proche Infra-rouge

dosage d'additifs dans le proche infra-rouge
 empreinte complexe → pas d'interprétation possible



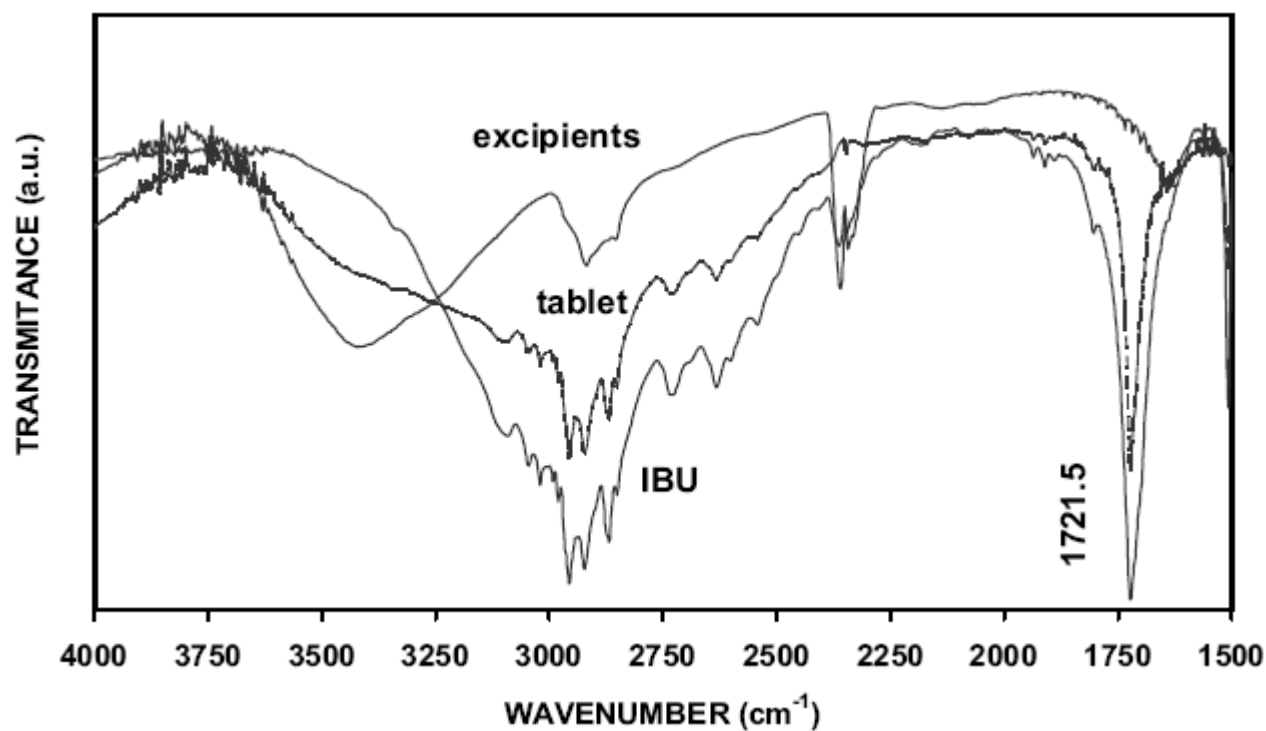
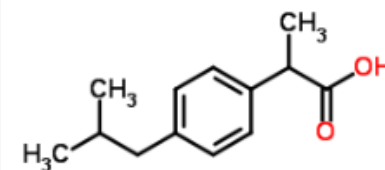
recours à des
méthodes statistiques
 de reconnaissance de forme



au niveau moléculaire

dosage principe-actif / excipient

ibuprofene

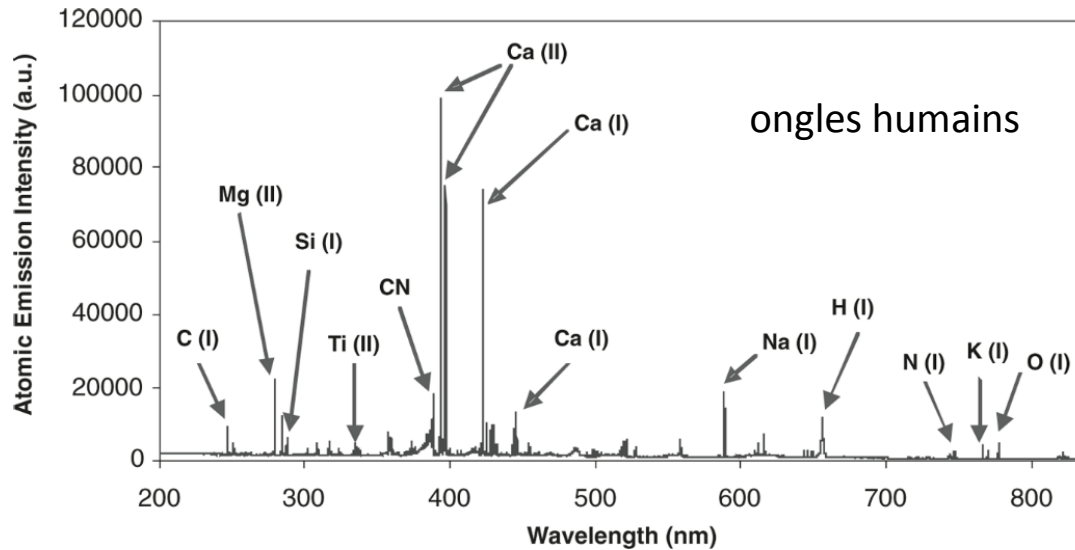


2-(4-Isobutylphenyl)propanoic acid

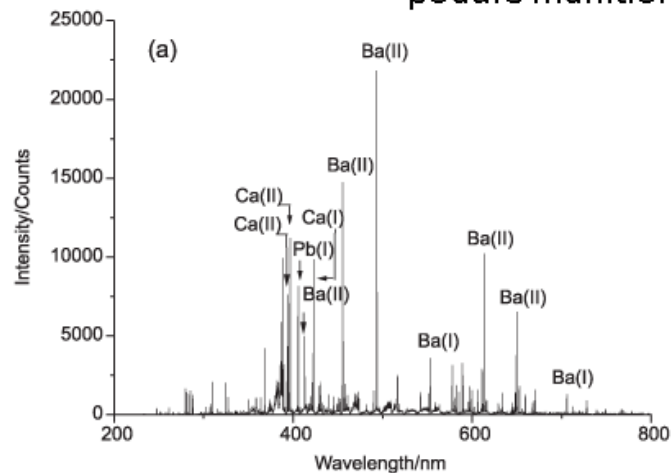
quarks baryons
noyaux
atomes
molécules
matière

au niveau atomique

spectro d'émission atomique



poudre munition



quarks
baryons

noyaux

atomes

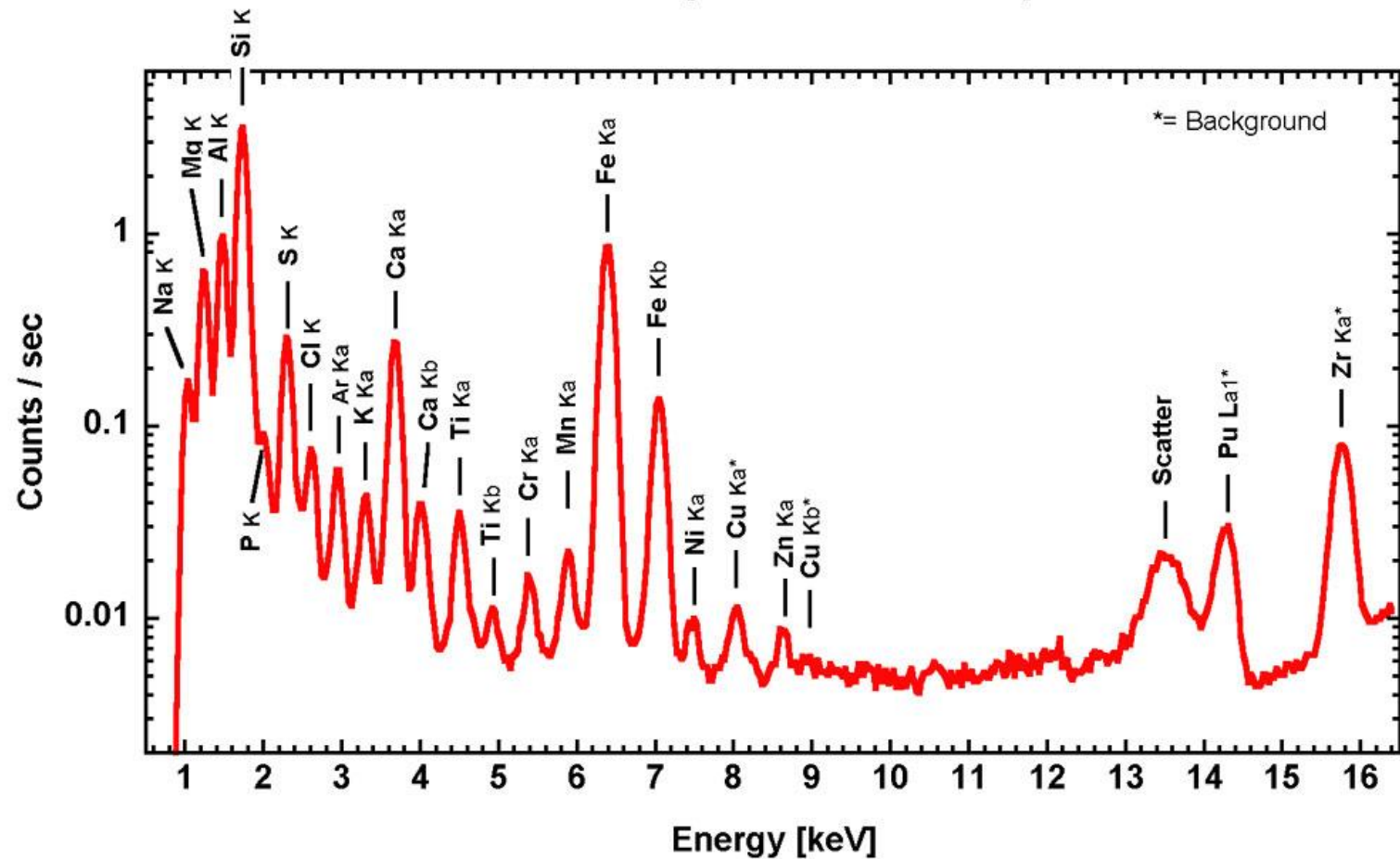
molécules

matière

au niveau atomique

rayons X

MER-A Spirit APXS X-Ray



quarks baryons
noyaux
atomes
molécules
matière

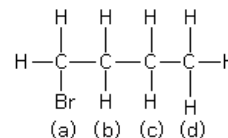
au niveau nucléaire

ondes radio

spectro de résonance magnétique nucléaire

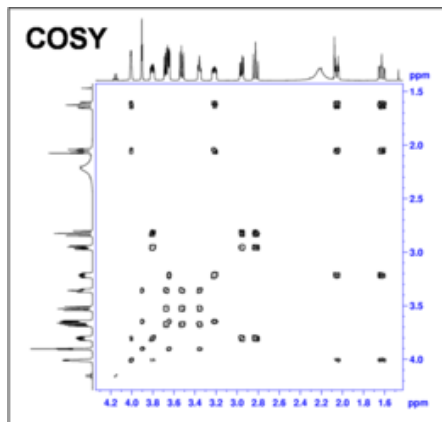
nécessite la présence d'un champ magnétique puissant (~4-5 Tesla)

Exemple: molécule de bromobutane

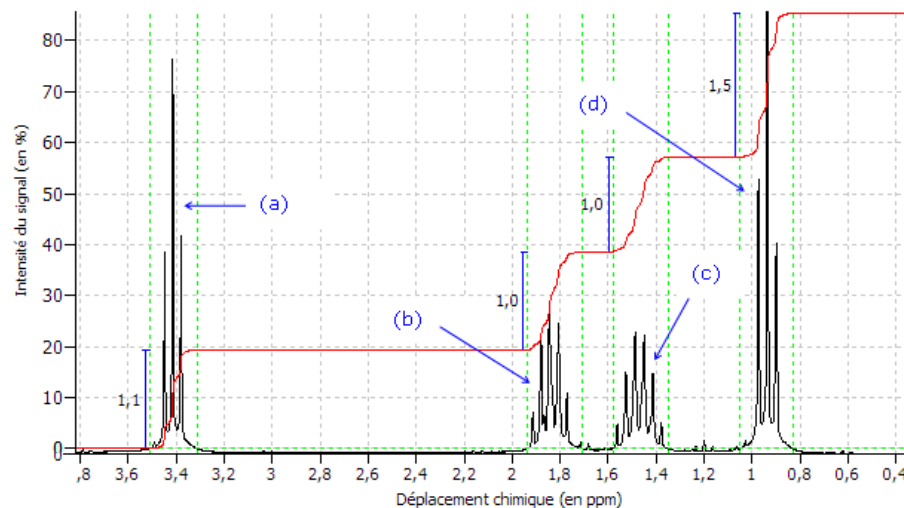


Protons équivalents	Nombre de protons	Protons voisins	Nombre de pics du signal	Hauteur intégration
Protons du groupe (a)	2	2	3	2
Protons du groupe (b)	2	4	5	2
Protons du groupe (c)	2	5	6	2
Protons du groupe (d)	3	2	3	3

- le phénomène observé est nucléaire (basculement de la précession des noyaux)
- noyaux d'hydrogène distingués selon leur environnement
- autres noyaux possibles (^{13}C , ^{19}F , ^{31}P , ^{15}N ,...)
- les informations qu'on en tire sont au niveau des structures moléculaires

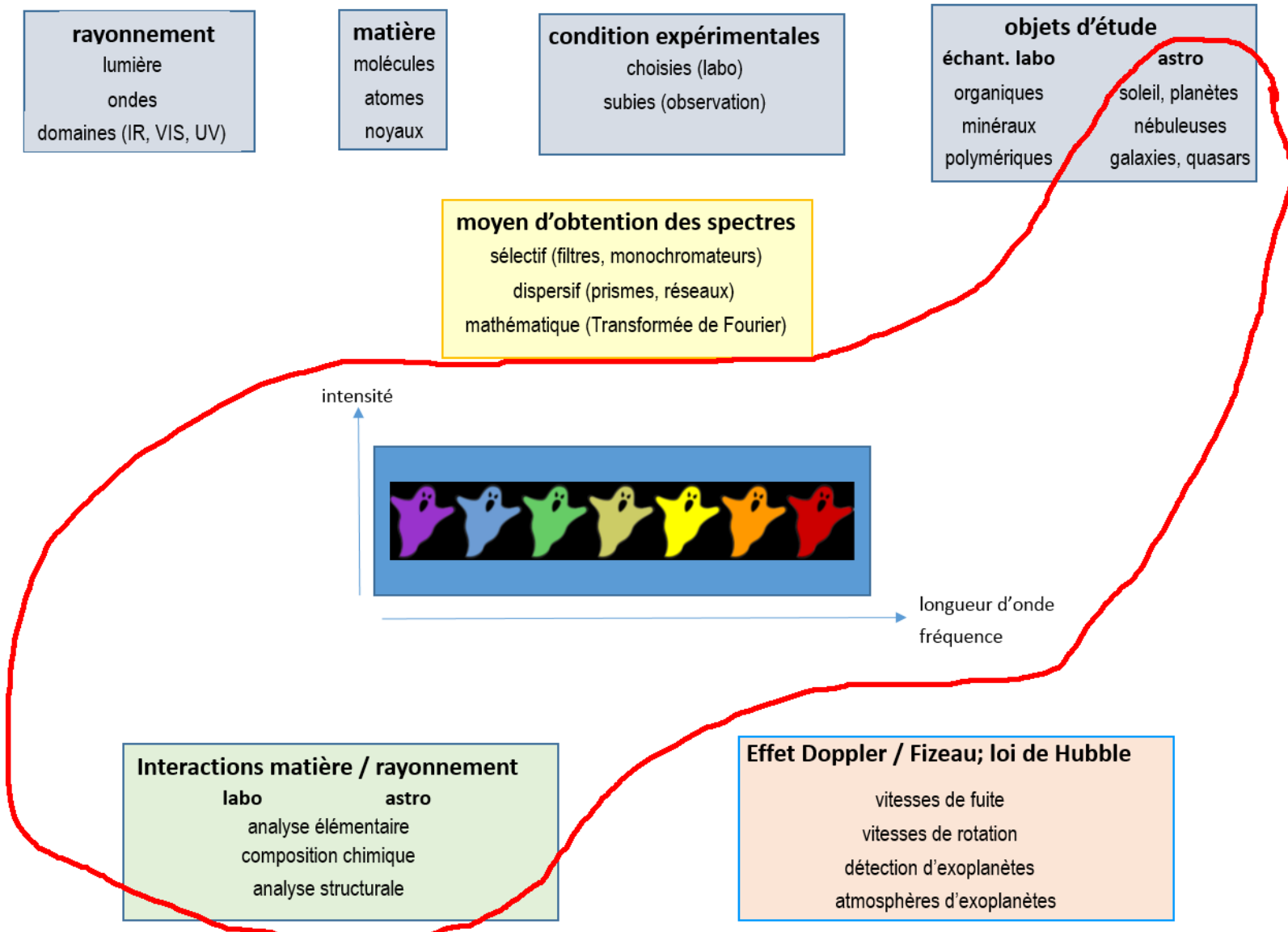


- carte de connectivité des atomes



domaine autour de **200MHz ± 300Hz**

CAS PARTICULIER: L'ASTRONOMIE



Spectroscopie stellaire

Les spectres des étoiles sont la superposition:

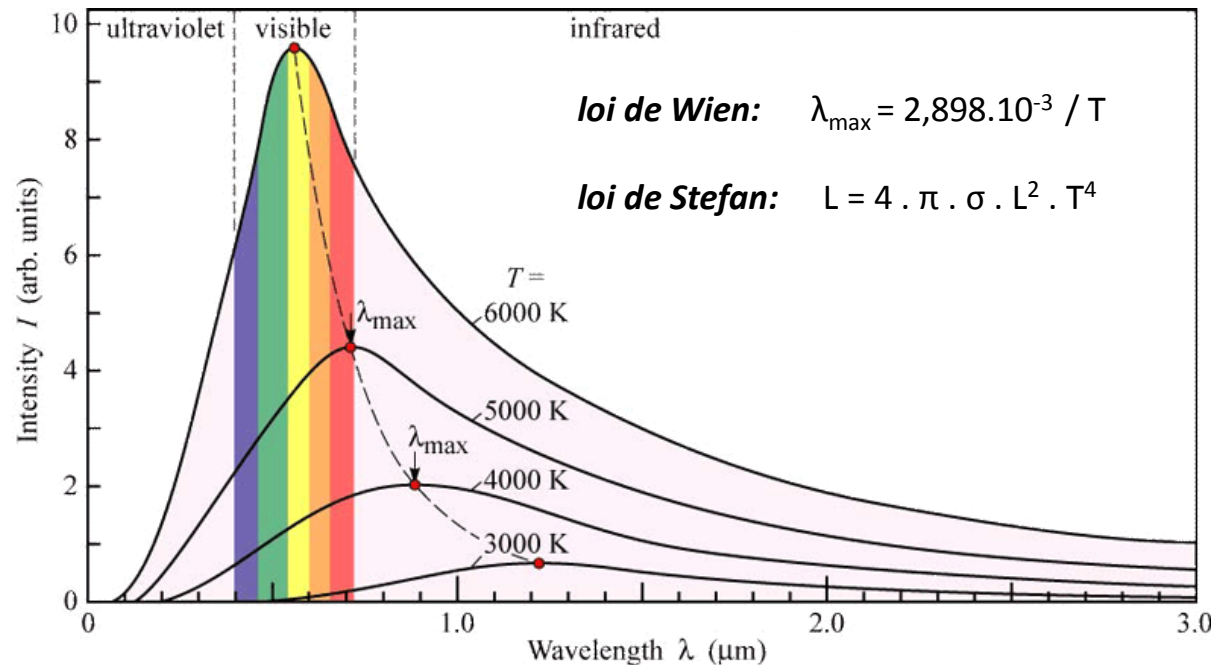
- d'un spectre continu du cœur
- de raies d'absorption de la photosphère



- la composante continue est un indicateur de la **température** (théorie du rayonnement; corps noir)
- la nature des raies observées est un indicateur de **composition chimique** (théorie quantique des interactions matière/rayonnement)
- le décalage éventuel des raies est un indicateur de **vitesse** (loi de Hubble)
- le dédoublement éventuel des raies est un indicateur de **magnétisme** (effet Zeeman)

Rayonnement thermique des étoiles

- un corps est dit noir s'il est à l'équilibre et ne réfléchit pas de rayonnement extérieur :
 - 'à basse température', il apparaît noir
 - chauffé, il peut émettre dans le visible ou d'autres gammes
- on assimile une étoile à un corps qui :
 - absorbe toutes les radiations
 - est à l'équilibre thermodynamique
 - réémet dans toutes les directions le spectre du corps noir
 - qui ne dépend pas de sa forme
 - qui ne dépend que de sa température



(en astro, on assimile les étoiles (sauf Soleil) à des corps noirs – à une température effective donnée ; ce n'est qu'une approximation

Classification spectrale des étoiles

W étoiles Wolf-Rayet

Classe	température ¹	couleur conventionnelle	raies d'absorption	
O	> 25 000 K	bleue	azote, carbone, hélium et oxygène	Oh
B	10 000 - 25 000 K	bleue-blanche	hélium, hydrogène	Be
A	7 500 - 10 000 K	blanche	hydrogène	A
F	6 000 - 7 500 K	jaune-blanche	métaux : fer, titane, calcium, strontium et magnésium	Fine
G	5 000 - 6 000 K	jaune (comme le Soleil)	calcium, hélium, hydrogène et métaux	Girl/Guy
K	3 500 - 5 000 K	orange	métaux et monoxyde de titane	Kiss
M	< 3 500 K	rouge	métaux et monoxyde de titane	Me

L,T,Y naines brunes

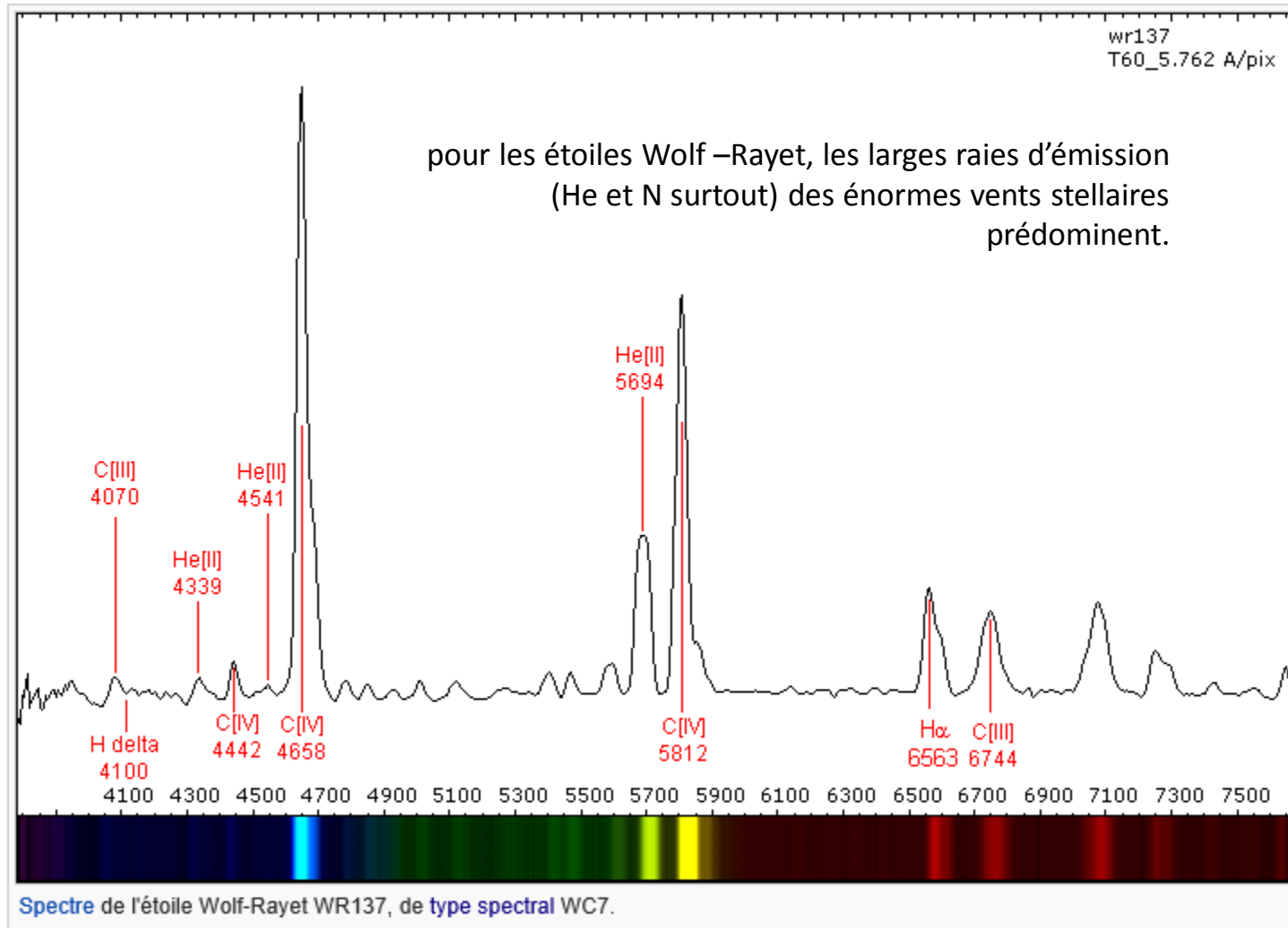
R,C,S étoiles carbonées

It appears that when stars were first being classified in the 1890s, an astronomer at Harvard named Edward Pickering decided to sort the stars according to **how much hydrogen they contained**. The ones with the most hydrogen were called A stars, those with a bit less were labeled B stars, and on down the alphabet for a total of 22 classes. Another Harvard astronomer, Annie Jump Cannon, realized from her observations that the stars could be classified by their temperatures instead, so she **ordered the stars from hottest to coldest**. The stars labeled "O" in the previous classification turned out to be the hottest stars, and "B" stars were the second hottest, on down to "M." As a scientist, she knew that it is more useful to classify objects by temperature (which explains why a particular quantity of hydrogen is observed) rather than simply the amount of hydrogen present.

Type WR

WR137

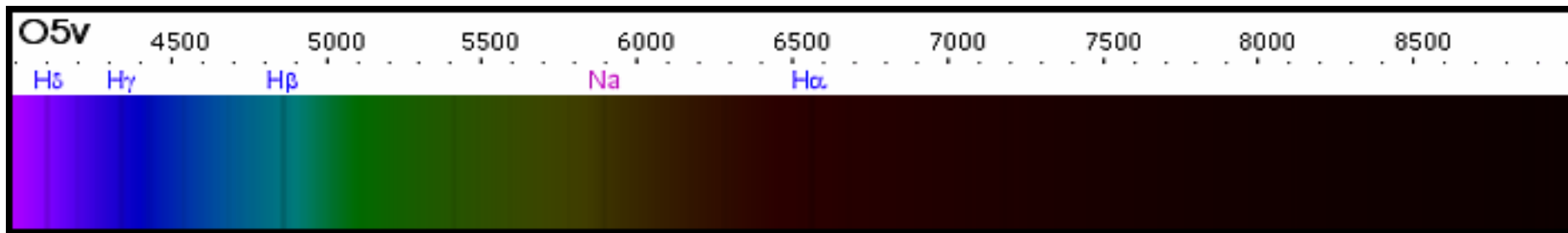
- étoiles Wolf-Rayet
- très massives; perdent beaucoup de masse → vents stellaires



Type O

δ Orion

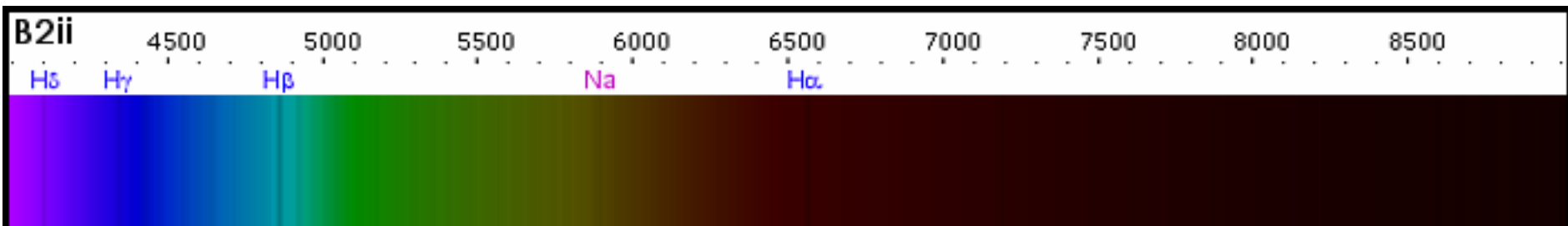
- émettent surtout dans l'UV
- dans le visible, He neutre et raies de Balmer de l'hydrogène essentiellement



Type B

Rigel

-

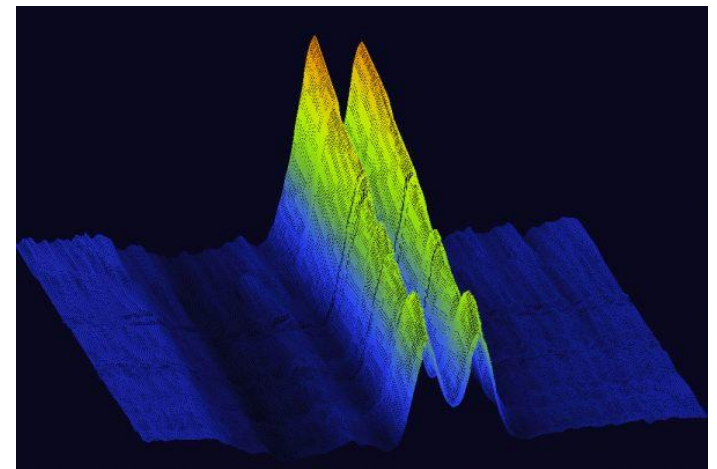


Type Be: découvert en 1866 par le père
Angelo Secchi (observatoire du Vatican)

γ Cas a sa raie H_{β} en émission !!

les étoiles Be tournent très rapidement autour d'elles-mêmes
ce qui génère une enveloppe gazeuse et des raies en émission

"Une étoile Be est une étoile de type B non supergéante qui a été observée
au moins une fois avec au moins une raie de Balmer en émission".

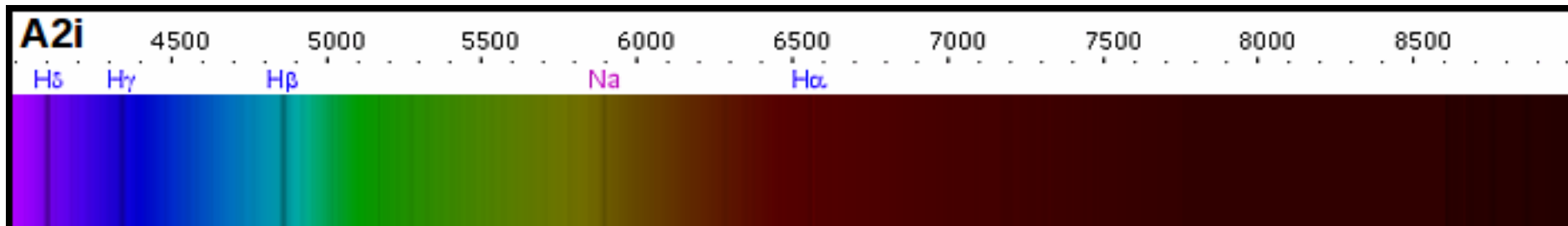


ω Aur: raie H_{α}

Type A

Deneb, Sirius

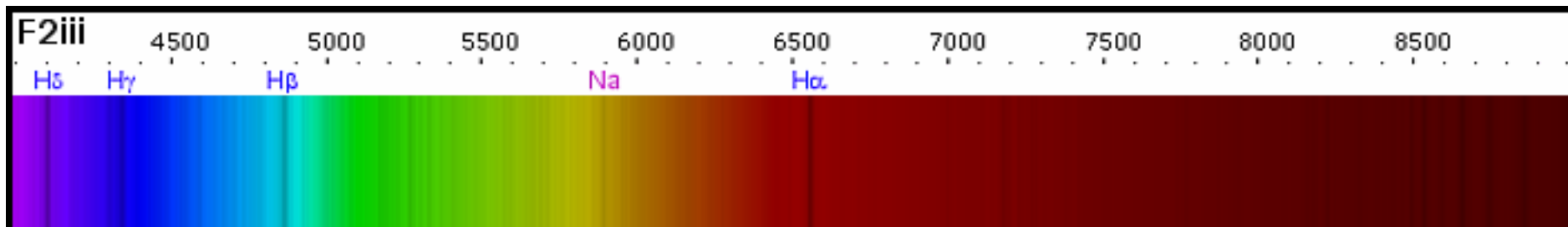
raies H intenses; un peu de K ionisé



Type F

étoile polaire, Procyon A

raies H plus faible; Fe, Ti, Ca , Mg



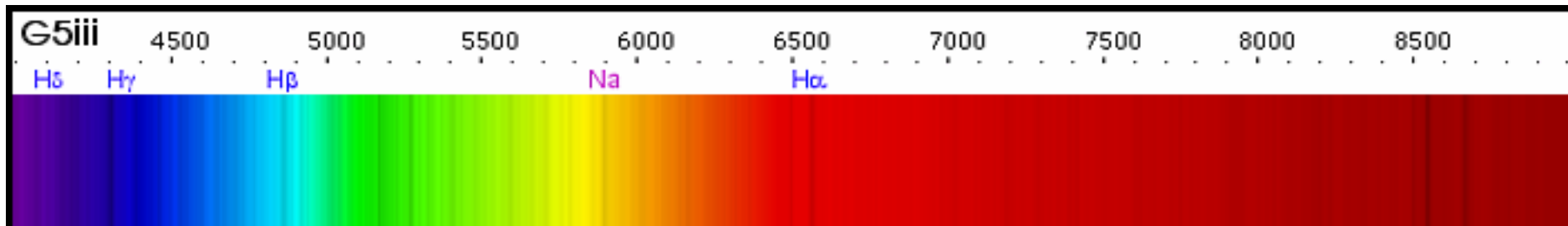
Type G

naine jaune

Soleil, α Centauri A

Ca II, H, K

raies moléculaires CH, CN, C₂, OH



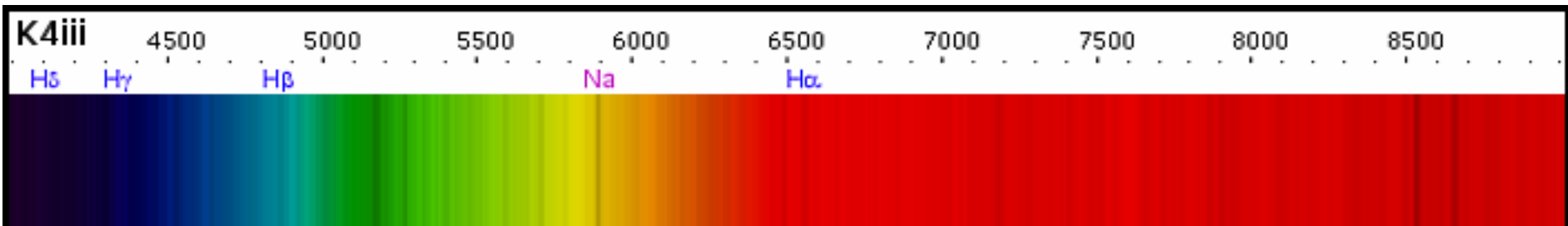
Type K

Antarès, α Centauri B

naine orange

métaux neutres

CH, CN, CO, TiO



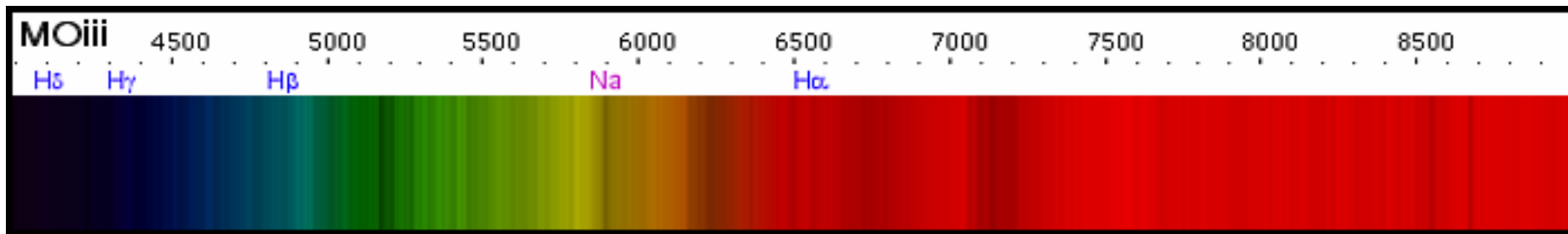
Type M

Proxima Centauri, Bételgeuse

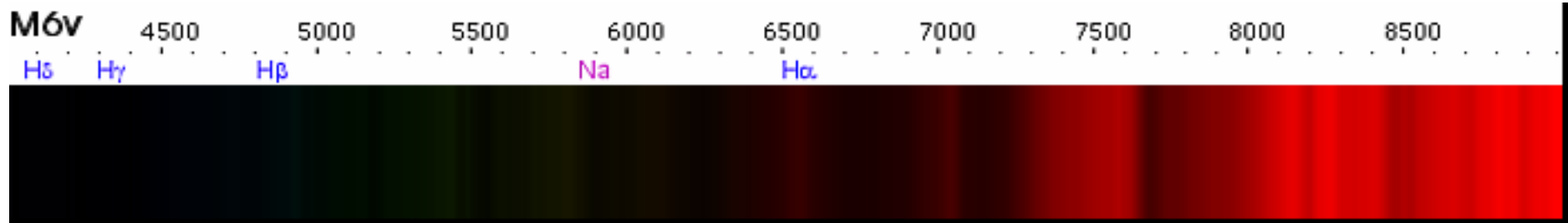
naine rouge, géante rouge, naine brune

métaux neutres

CN, CH, CO, TiO, MgH, H₂

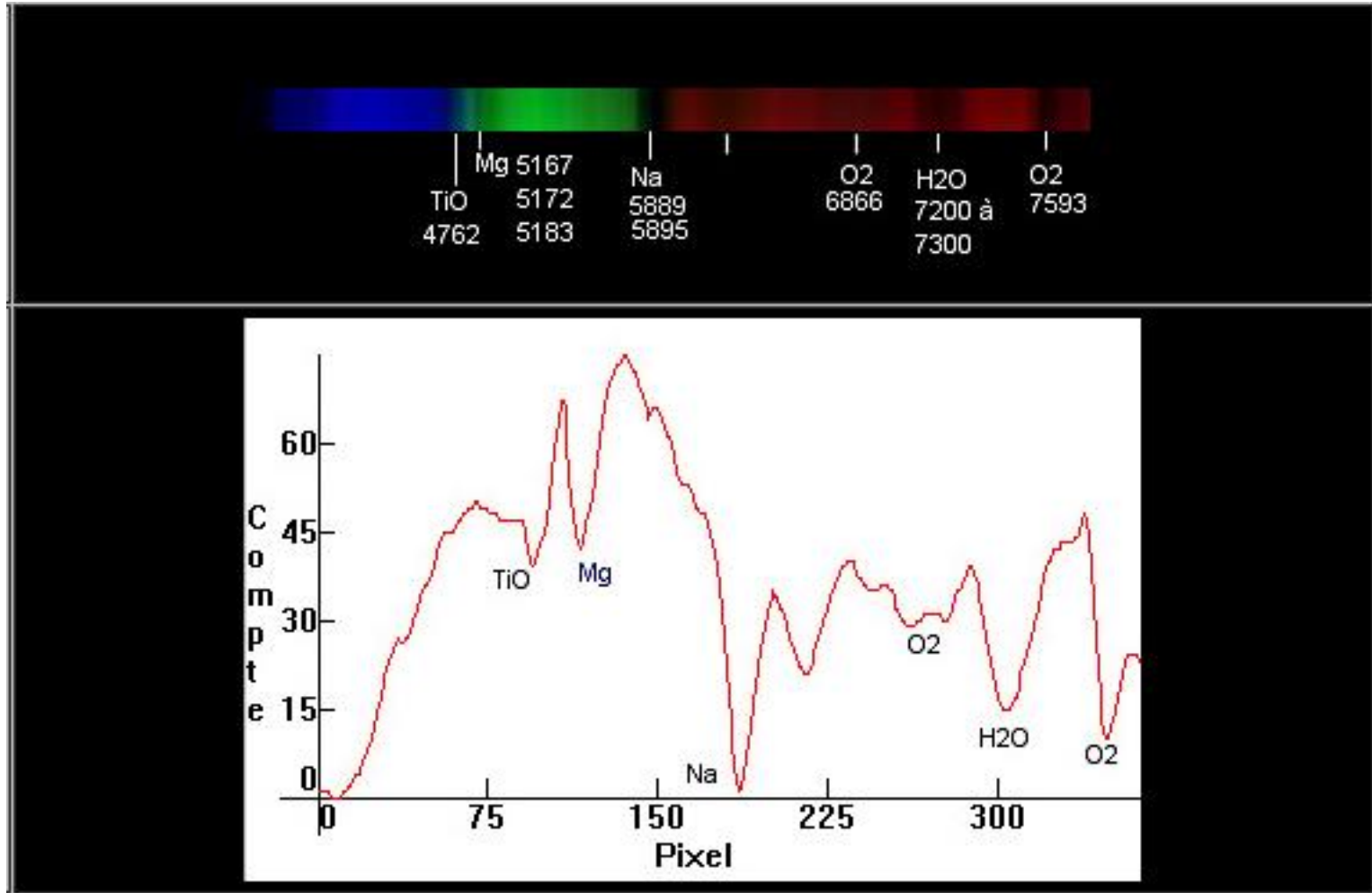


Type M



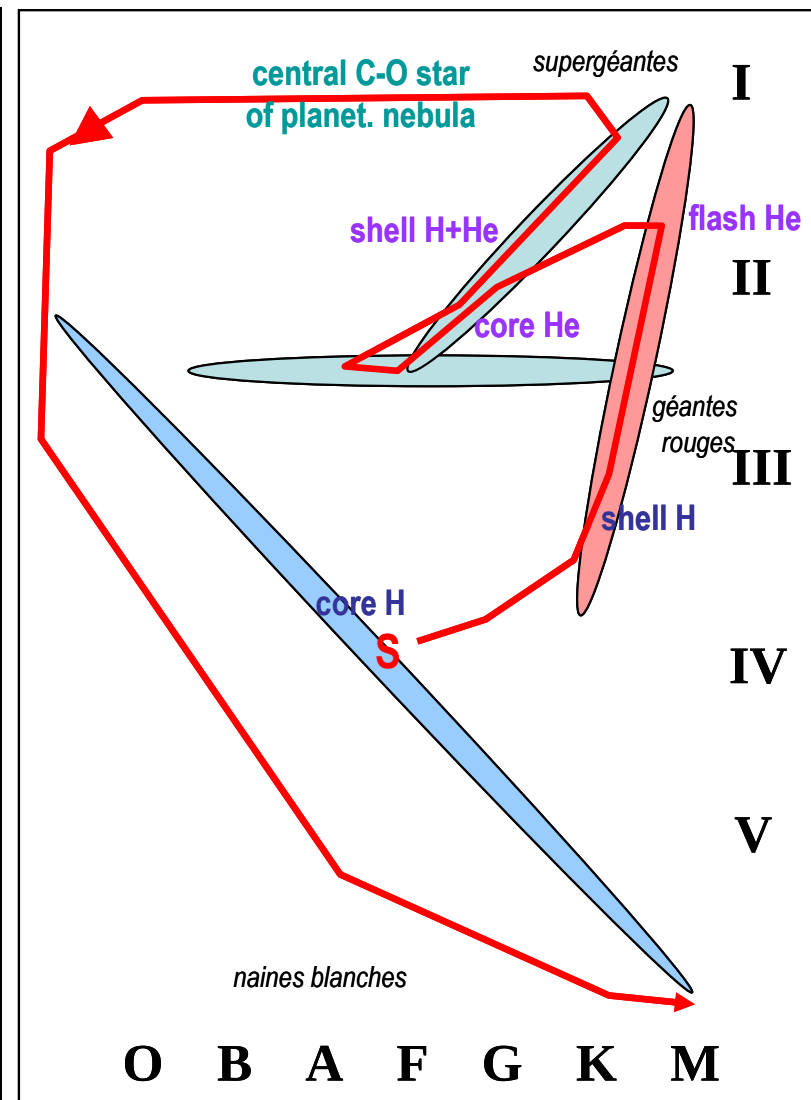
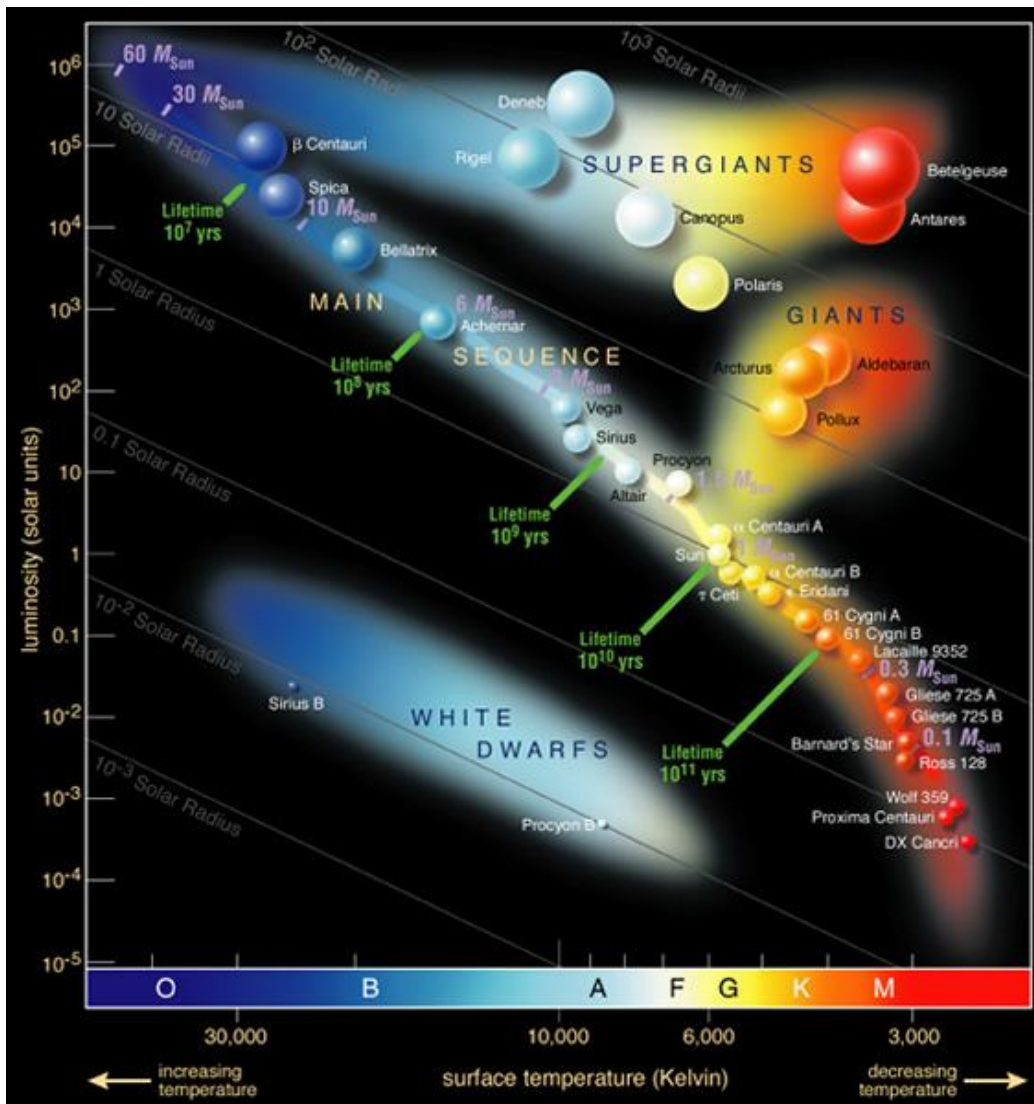
Type M

Bételgeuse



raie de l'oxyde de titane à 4762 Å, la raie du magnésium Mg I (il s'agit en fait du "triplet" du Mg I à : 5167, 5172, 5183 Å. La résolution du spectrographe est trop basse pour séparer ces raies). Le doublet du sodium (Na) à 5889 Å et à 5895 Å sous la forme d'une raie unique. Dans le rouge et le proche infrarouge d'autres raies peuvent être observées : oxygène (O₂) de l'atmosphère terrestre à 6866 Å. Vapeur d'eau (H₂O) de l'atmosphère terrestre entre 7200 Å et 7300 Å. Oxygène (O₂) de l'atmosphère terrestre 7593 Å

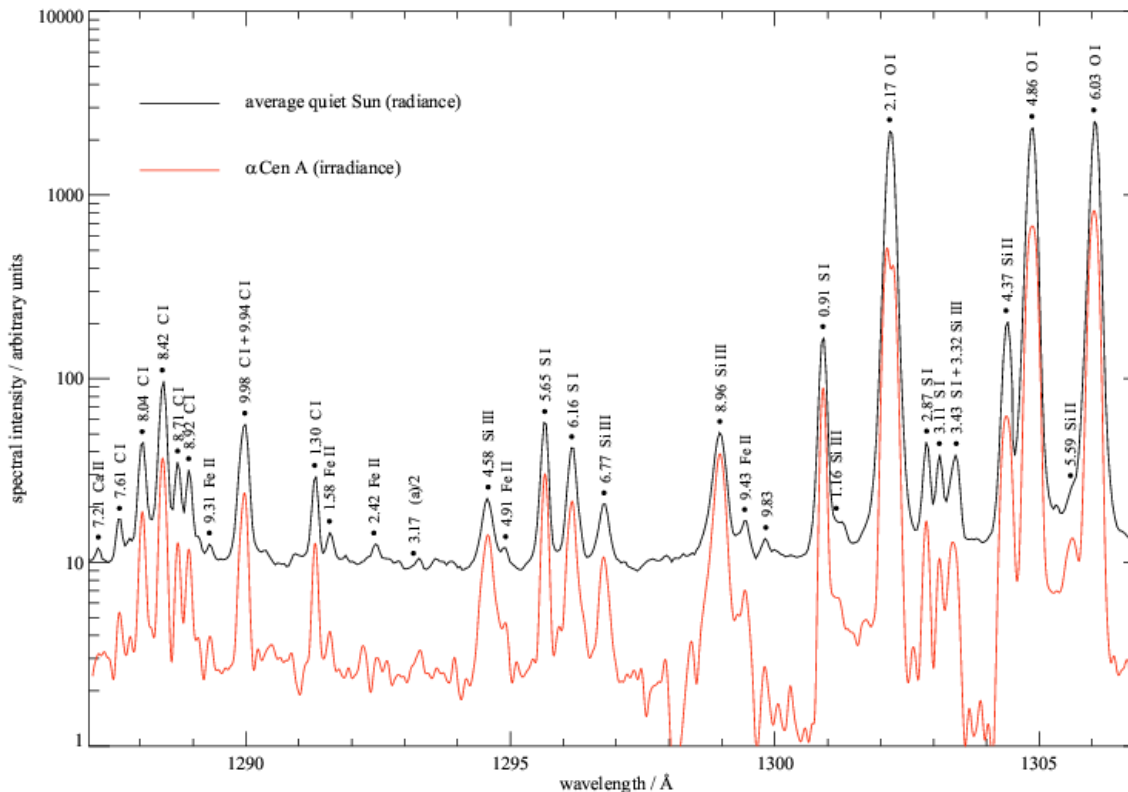
Classification spectrale des étoiles



Spectroscopie du soleil dans l'ultra-violet lointain

par rapport aux spectres du domaine visible, les observations en ultra-violet lointain permettent le diagnostic de milieux astrophysiques très chauds.

Figure 1. Extraits des spectres détaillés du soleil et de l'étoile α Centauri, entre les longueurs d'ondes 128,7 et 130,7 nm



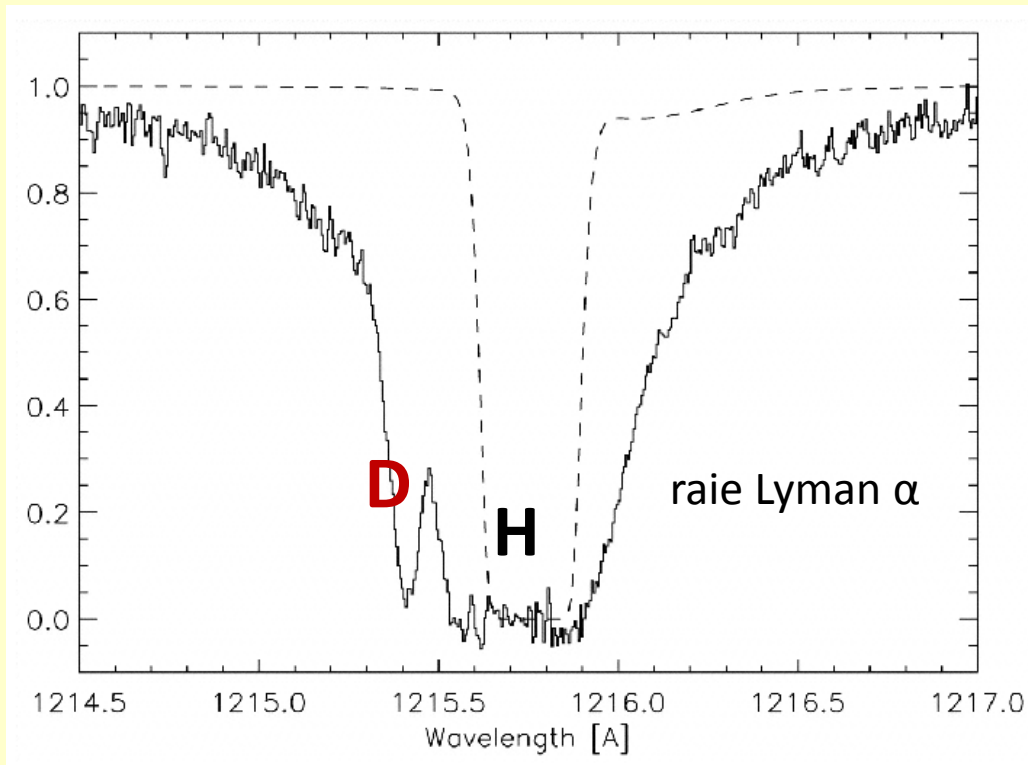
comparaison
Soleil / α Centauri
sur la teneur en Fe, Si, C, O

Quant au rayonnement ultra-violet émis par les couches profondes, pour l'essentiel, il n'émerge pas directement de l'atmosphère. La raison est que les photons correspondants ont assez d'énergie pour ioniser les atomes neutres rencontrés et disparaissent par « photo-ionisation ».

Dans l'ultra-violet lointain le **rayonnement continu** est donc peu **intense**. On voit alors des raies qui sont **émises** dans des couches extérieures de la photosphère. La densité y est assez faible pour que les photons émis par les atomes ou ions excités émergent directement.

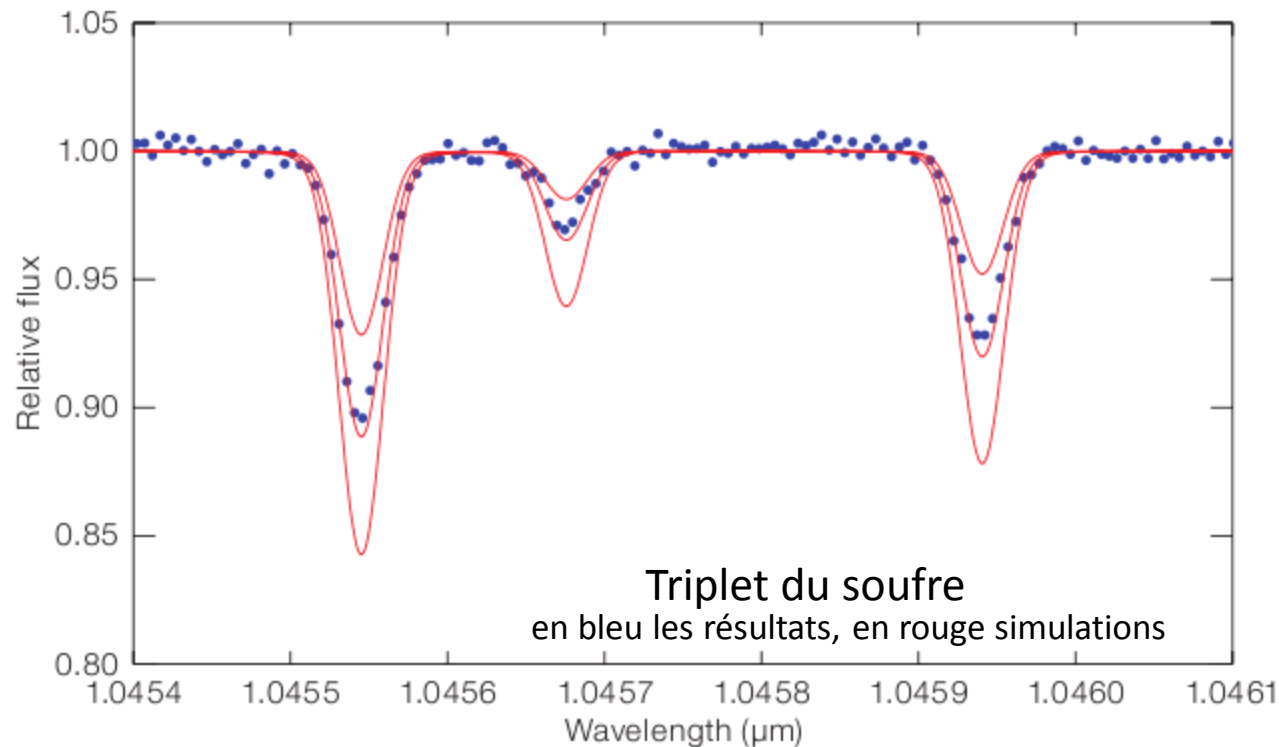
Spectroscopie stellaire en **ultra-violet lointain**

- importance du **rapport D/H** dans une étoile
 - validation des théories de nucléosynthèse (il s'agit du **deutérium cosmologique** !)
 - - nécessite la mesure des transitions de Lyman de l'hydrogène, dans l'UV lointain - bloqué par l'atmosphère terrestre → **télescope embarqué** !!



Spectroscopie stellaire en **infra-rouge**

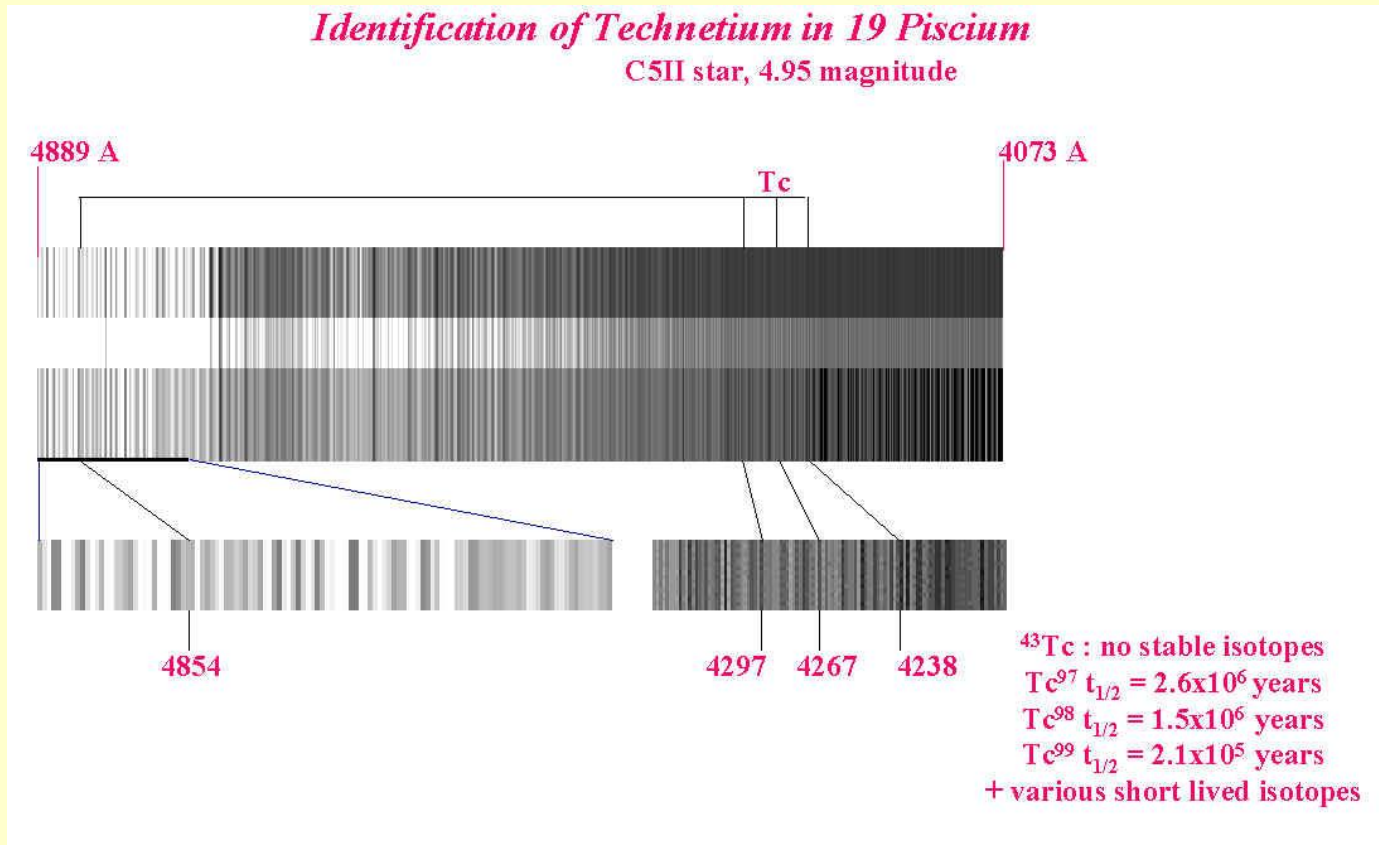
- l'IR permet de voir « derrière » les nuages de poussière interstellaire
- dosage du soufre dans une vieille étoile
la « métallicité » donne une idée de l'âge des étoiles



25 fois moins de soufre que dans le soleil

test des hypothèses de nucléosynthèse dans la galaxie

Spectroscopie de la belle orange des Poissons 19Psc !



- mise en évidence d'un **rapport** $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ très inhabituel...

Spectroscopie stellaire en (sub)millimétrique (**IR lointain**) radioastronomie

- l'étude de l'[univers](#) jeune à travers l'observation de [galaxies](#) distantes
- l'étude des [jets galactiques](#)
- l'étude de la formation des [étoiles](#) à travers l'observation des [nuages moléculaires](#) (comme celui d'[Orion](#)) et la détection de [proto-étoiles](#)
- l'étude de la formation des [planètes](#)
- la recherche d'[exoplanètes](#) par [astrométrie](#)
- l'étude du [système solaire](#) reposant sur l'étude des poussières et sur celle des atmosphères de différentes planètes comme [Mars](#) et [Vénus](#) (ce dernier sujet permettra par exemple de se faire une meilleure idée de leur dynamique atmosphérique ou encore de détecter la présence d'eau)

- résultats de ALMA

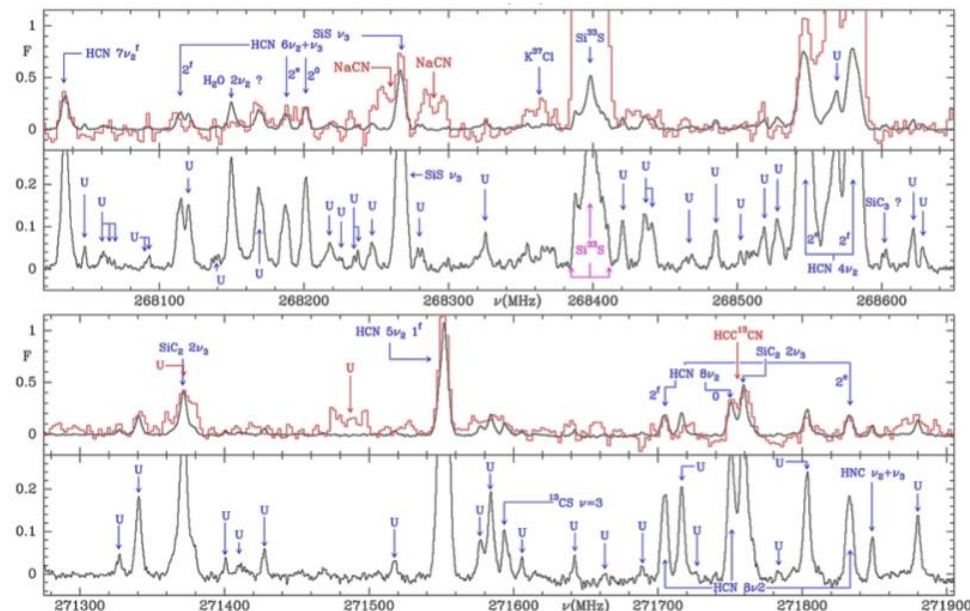


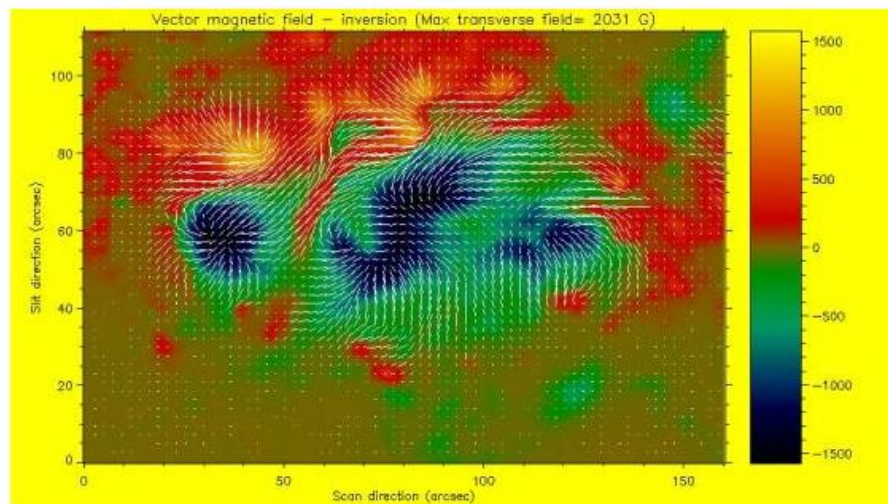
Figure 1. CW Leo spectra from ALMA in selected parts of a 20 GHz bandwidth measured by ALMA. Intensity is in Jy/bm and spectral resolution 1 MHz. Upper panels (red) show IRAM 30m spectra; lower panes the ALMA data.

Spectroscopie stellaire dans le **visible**

Mesure du champ magnétique à la surface d'une étoile par spectroscopie

- les raies d'absorption sont démultipliées en présence de champ magnétiques (**effet Zeeman**)

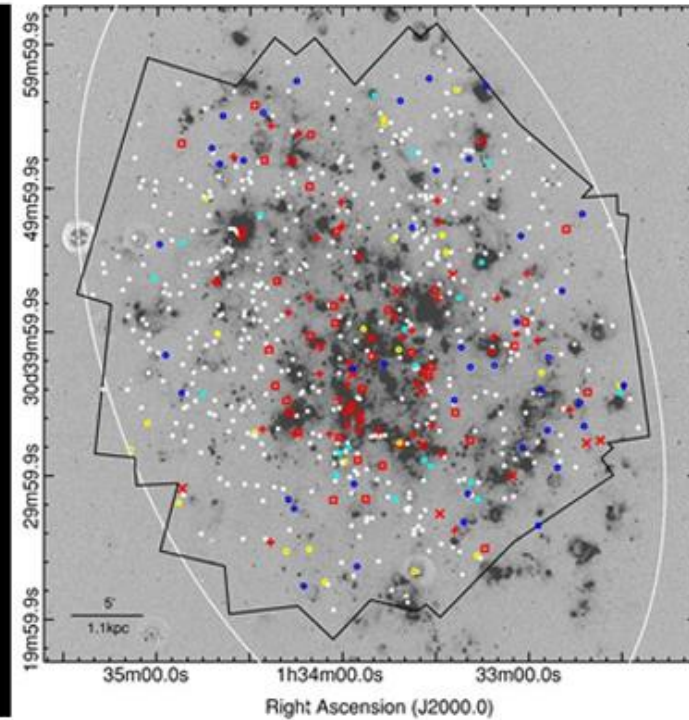
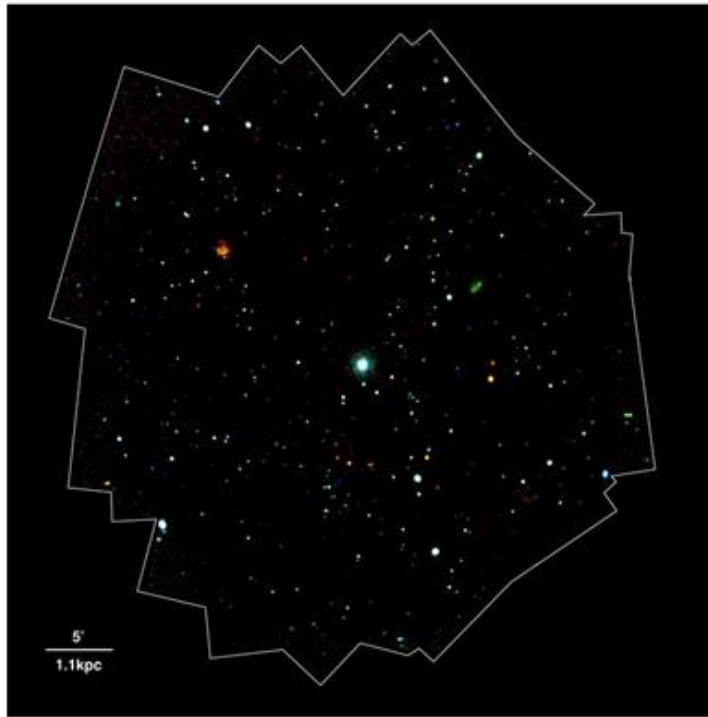
$10^7 - 10^{10}$ T	étoile à neutron ou pulsar
$10^6 - 10$ T	étoile de type naine blanche
$10^{-2} - 1$ T	étoile chaude magnétique
$0 - 10^{-4}$ T	planètes du système solaire (norme de 3 à $6 \cdot 10^{-5}$ T à la surface terrestre)
$10^{-11} - 10^{-9}$ T	nuage interstellaire



- ➔ - l'analyse des raies et les simulations permettent de cartographier le champ magnétique solaire

Astronomie en rayons X: astrophysique des hautes énergies

- atmosphère terrestre opaque aux rayons X → télescope embarqué



en rouge; candidats binaires X.

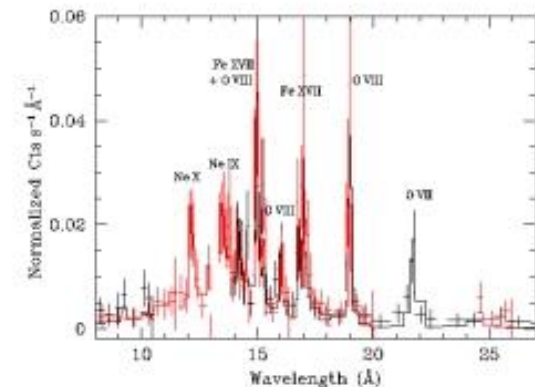
en bleu: quasars et galaxies à noyau actif

R. Tüllmann et al., the Astrophysical Journal Supplement Series, 193:31 (26pp), 2011 April

ex: cartographie X de M33 par Chandra

Chandra et XMM-Newton

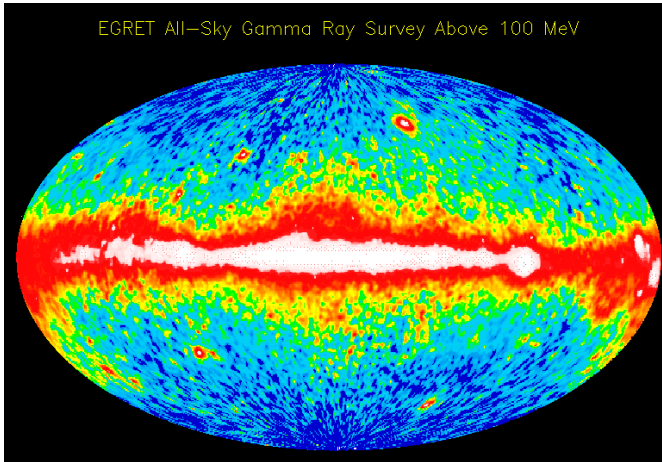
- étude des trous noirs supermassifs et galaxies actives
- structure étoiles à neutrons
- nébuleuses protoplanétaires
- interactions exoplanètes / étoile
- collision de vents stellaires dans syst. binaires massifs
- émissions X des Wolf-Rayet et de sources non stellaires



Astronomie en **rayons γ** : astrophysique des hautes énergies

Rayons γ : photons émis par désexcitation d'un noyau issu d'une désintégration (donc radioactivité)

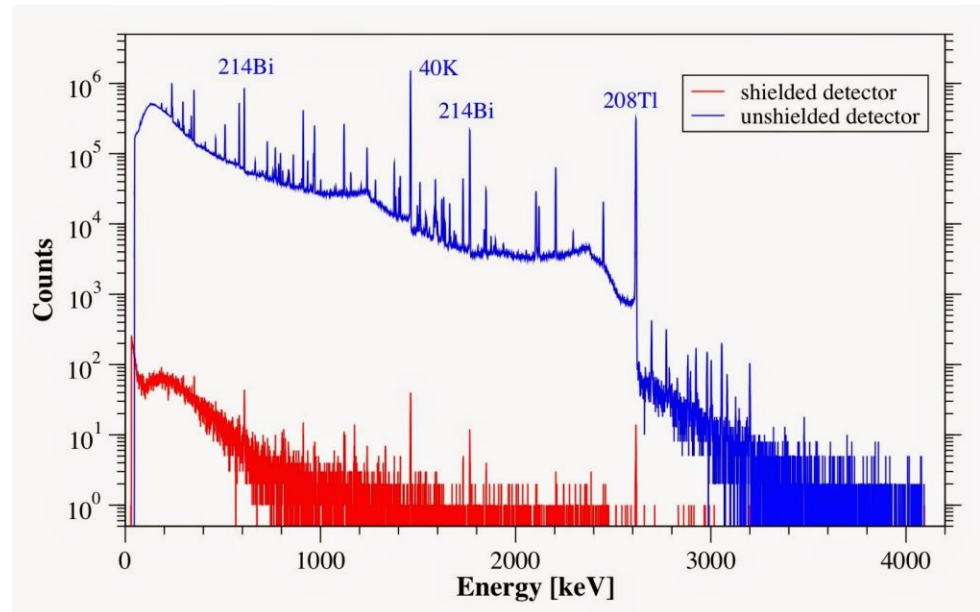
$$\lambda < 1\text{pm}; \quad \nu > 300\text{ EHz}; \quad E = h \cdot \nu \rightarrow E > 1\text{ MeV}$$



- compréhension des processus thermonucléaires dans les étoiles

- **détection des événements les plus énergétiques de l'univers:**

supernovae, trous noirs supermassifs,
sursauts γ , pulsars, galaxies actives



Spectroscopie planétaire

- spectre basse résolution, reflet de l' **existence** de deux sources d'énergie:

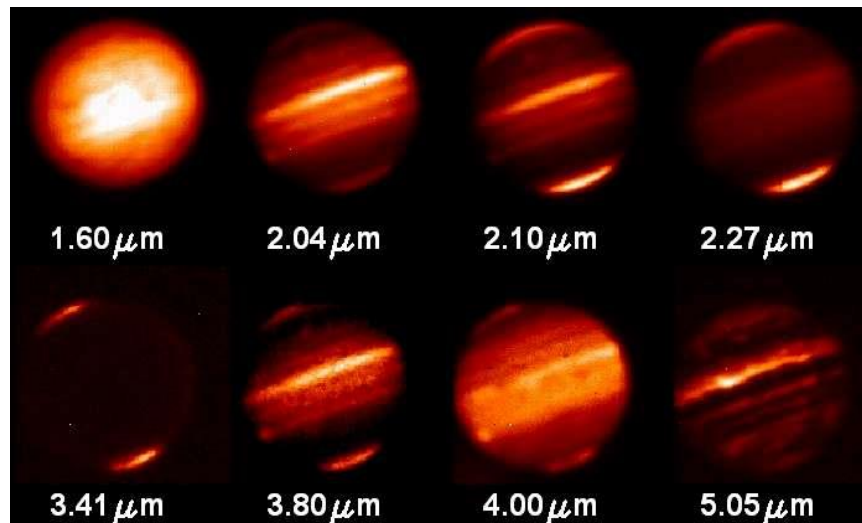
- rayonnement reçu de l'étoile centrale
- température d'équilibre de la planète

- les spectres des planètes sont un mélange:

- d'un spectre continu
- de raies d'émission
- de raies d'absorption

ex. de Jupiter:

spectre lumière solaire réfléchi



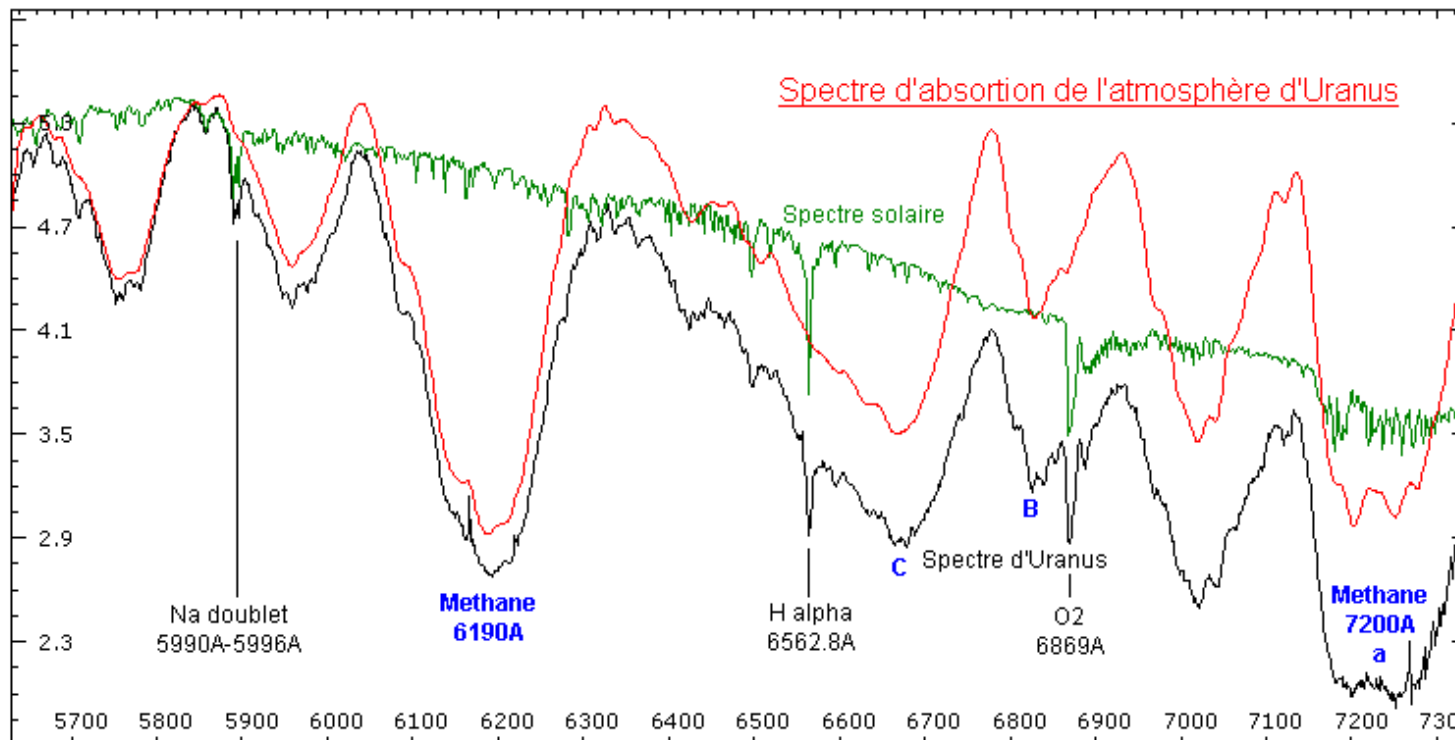
spectre composante interne

Spectroscopie planétaire

- les spectres des planètes sont un mélange:

- d'un spectre continu
- de raies d'émission
- de raies d'absorption

Uranus



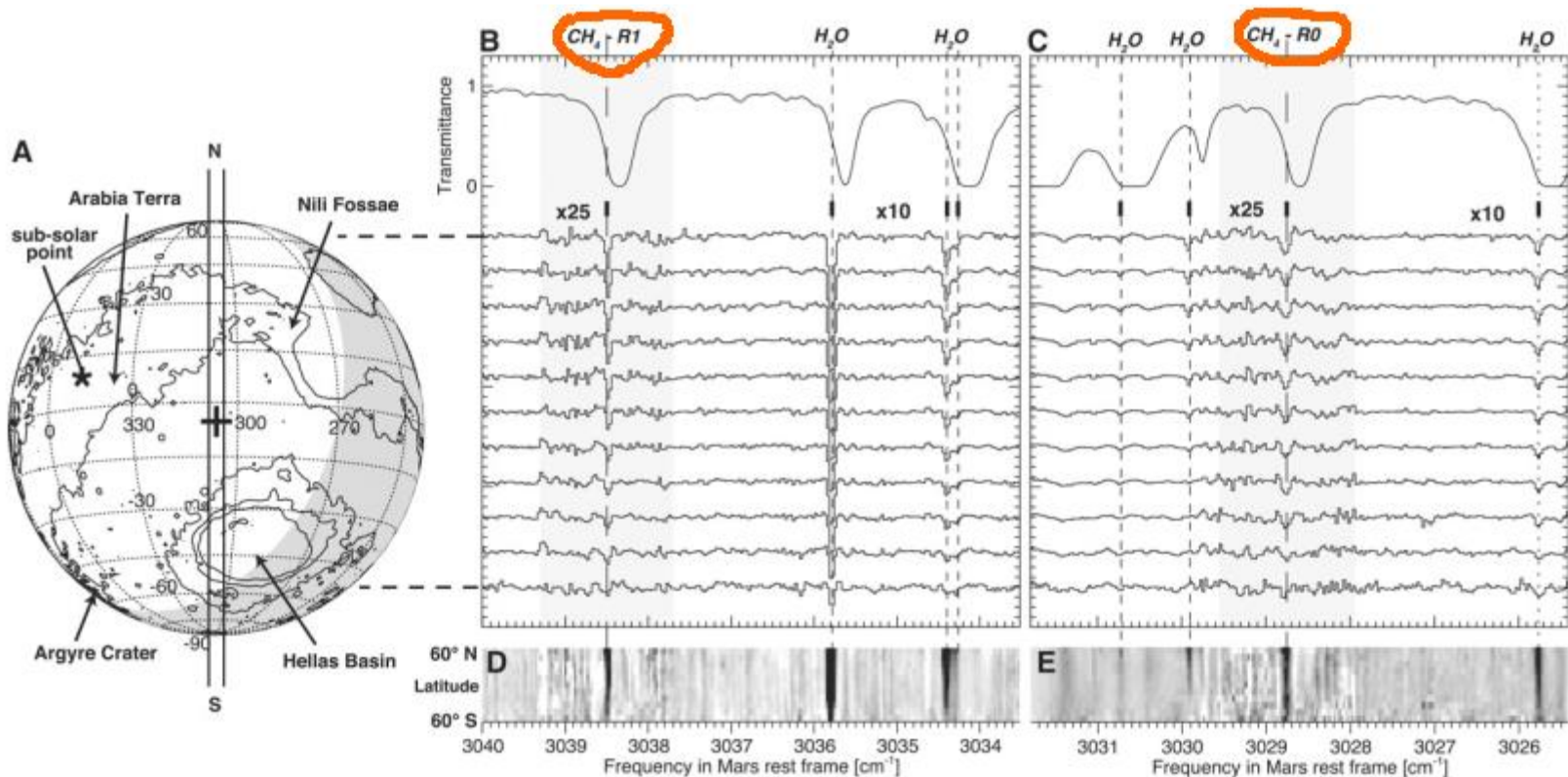
Le spectre d'Uranus montre la transformation que subit la lumière solaire lors de sa réflexion/absorption par cette planète.

Spectroscopie planétaire

Cartographie du méthane sur Mars:

mesure de 2 fréquences d'absorption du méthane (proche IR)

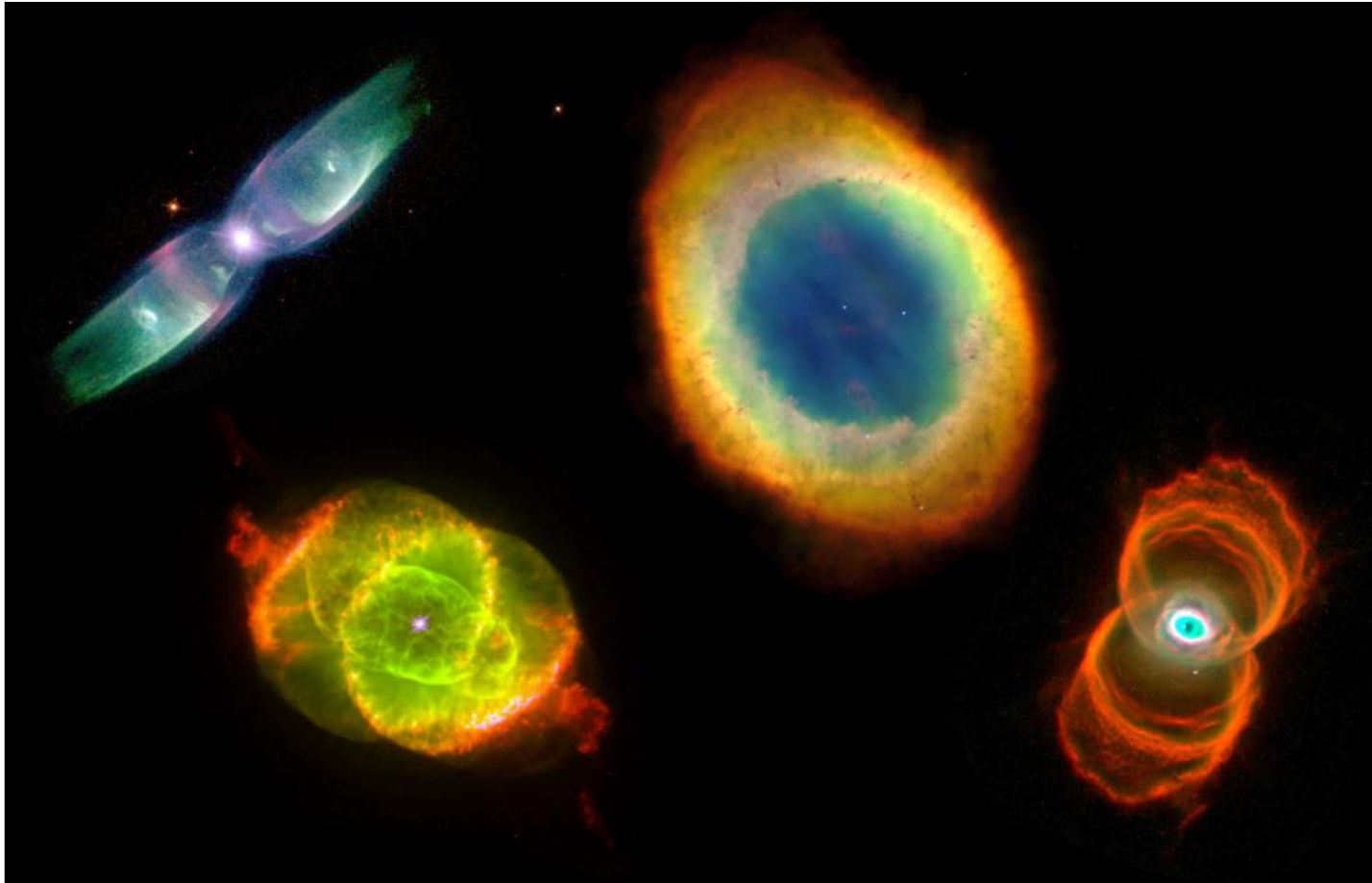
mesure de 11 spectres – du Nord au Sud du disque planétaire



nécessité de soustraire les effets de l'atmosphère terrestre (transmittance)

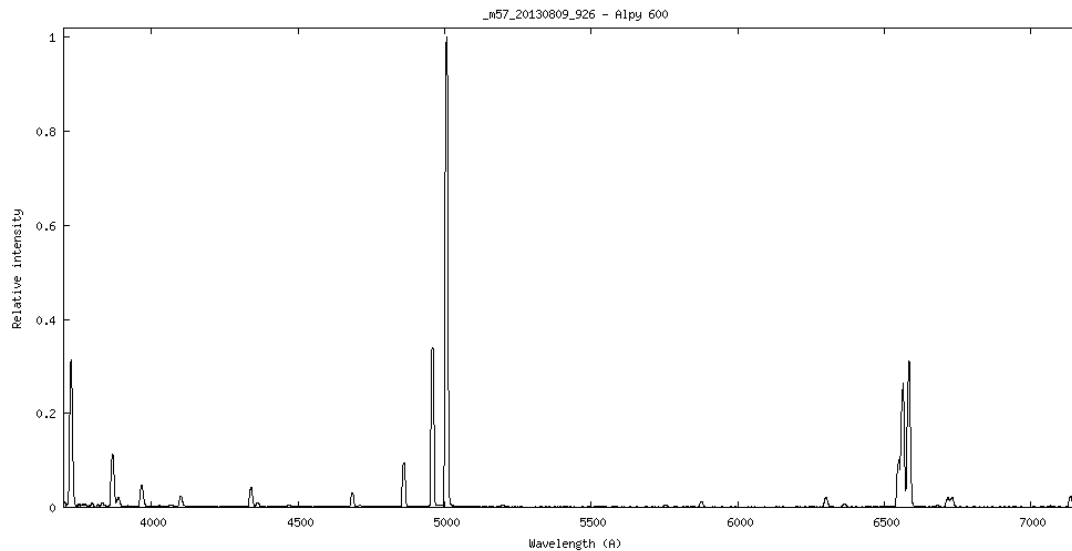
par contre le décalage Doppler entre les 2 planètes à l'époque des mesures était négligeable

Spectroscopie des nébuleuses planétaires



Spectroscopie des nébuleuses planétaires

- objets surfaciques
- possibilité d'analyse spectrale en chaque point



Spectroscopie des nébuleuses planétaires

- objets surfaciques
- possibilité d'analyse spectrale en chaque point → imagerie

M27: spectrographies à différentes longueurs d'ondes

<http://www.astrosurf.com/buil/scan/demo.htm>

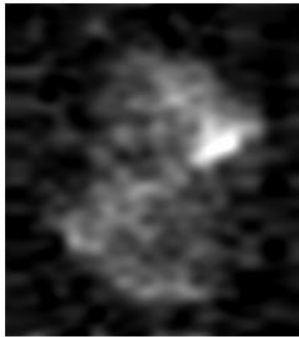


Image [O II] - 3723 Å

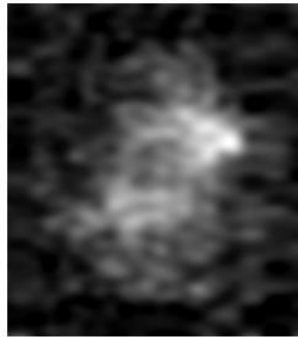


Image [Ne III] - 3866 Å

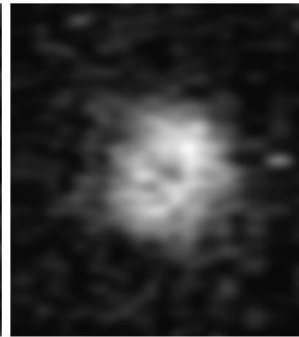


Image He II - 4683 Å

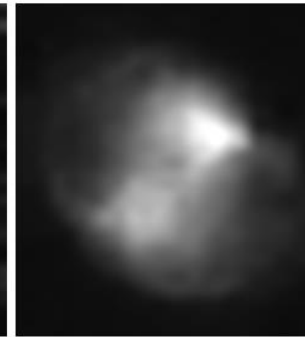


Image [O III] - 5007 Å



Image Halpha - 6563 Å

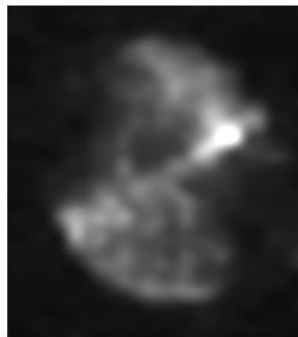


Image [N II] - 6583 Å

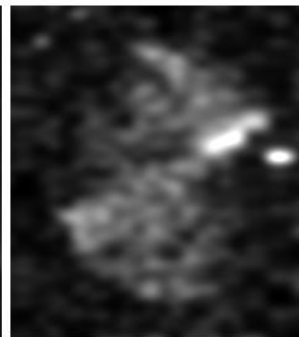


Image [S II] - 6723 Å

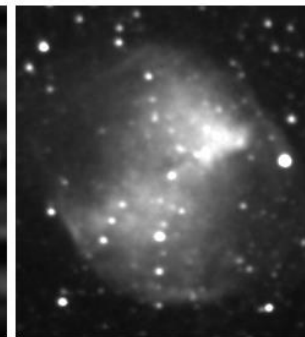


Image Luminance (voie guidage)

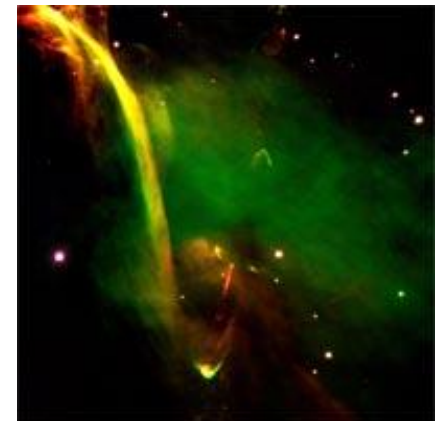
Spectroscopie des galaxies: l'expérience MUSE

- objectif: **analyse des galaxies lointaines**, pour **tester des modèles d'univers**
 - émettent surtout des raies de l'hydrogène
 - mais impossibilité d'utiliser des filtres hypersélectifs, car on ne connaît pas le décalage Doppler, donc les λ précises
 - la spectro permettrait un balayage spectral, mais il faudrait connaître la localisation précise des objets candidats à spectrographier

➡ idée de la spectrographie de champ intégral

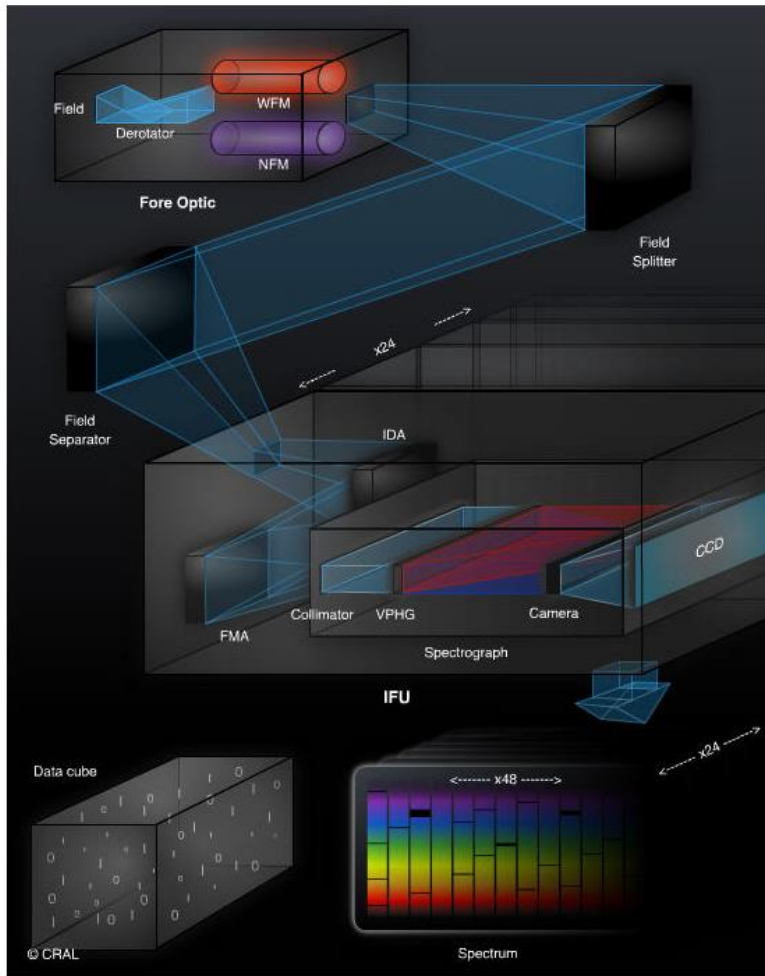
- 24 spectros en parallèle + optique adaptative... montés sur le VLT !!!

- un mode grand champ pour les galaxies
- un mode champ restreint pour les objets plus proches
- possibilités:
 - **détection et étude des galaxies lointaines**; 15000 attendues, de toute nature
 - **détection des étoiles massives dans des galaxies proches** – actuellement vues par les spectros comme des nébuleuses
 - étude de la **dynamique autour des trous noirs centraux** des galaxies proches
 - **étude des jets atomiques** se manifestant lors de la naissance d'étoiles jeunes
 - étude **des planètes et autres petits corps** (atmosphères des planètes géantes, volcanisme de Io, phénomènes aléatoires...)



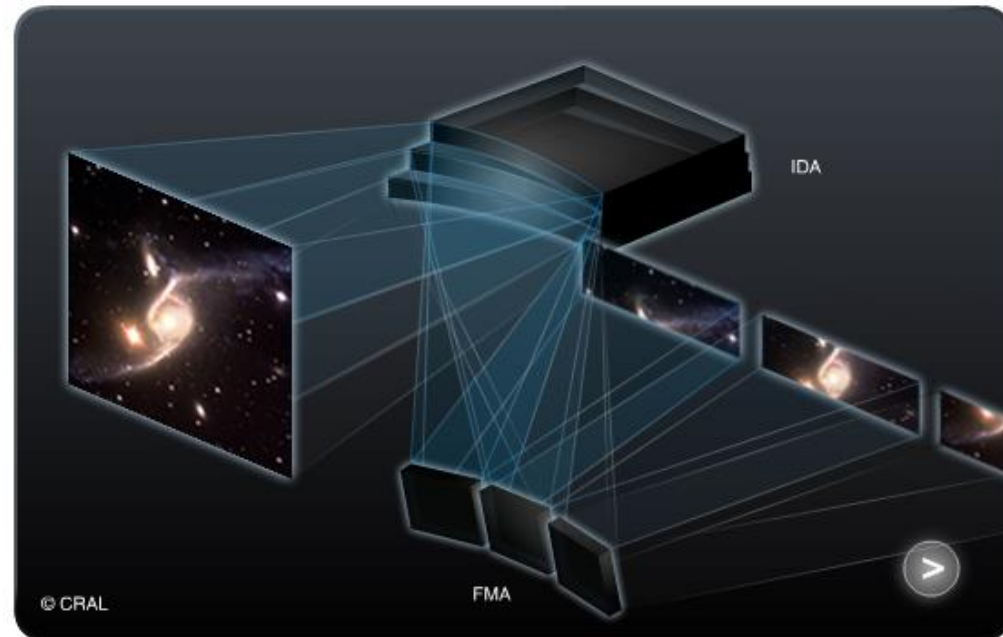
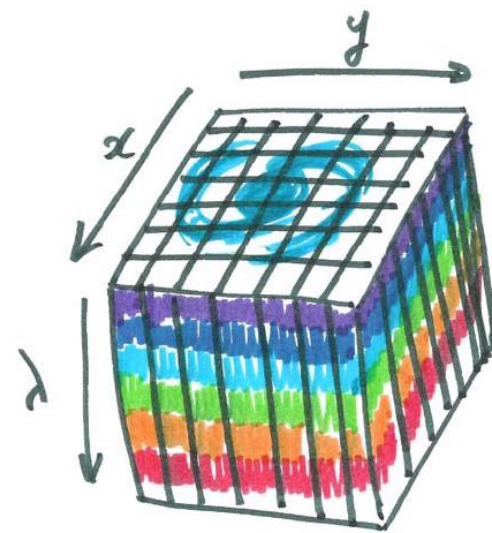
Protoétoile dans Orion

Spectroscopie des galaxies: l'expérience MUSE



System description of MUSE.

spectre de chaque point de chacun
des 24 sous-champs



The MUSE image slicer concept

reconstitution de l'image par parties

NB: [conférence sur MUSE le 7 avril 2016 à Cluny](#)

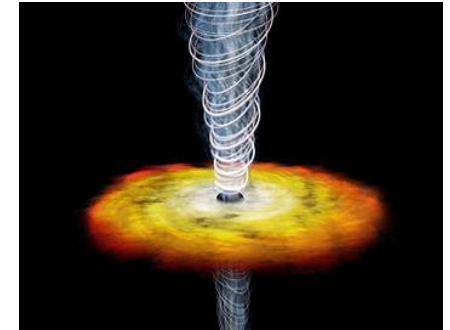
Spectroscopie des quasars

UV lointain

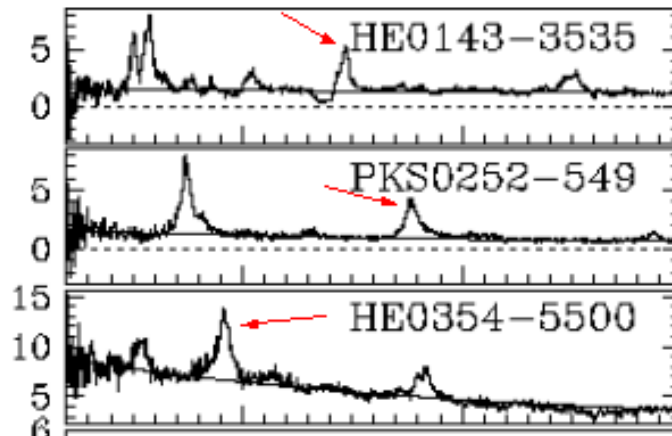
- Quasar = quasi stellar radiosource; rayonne dans l'UV
- Quasar = galaxie dont l'énergie provient du disque d'accrétion d'un trou noir massif « avalant » la matière;

$$(\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{émis}}) / \lambda_{\text{émis}} = z$$

- grâce à la spectro UV, mesure de distances:
 - **extrêmement lointains 10-12 milliards d'a-l; $z=4$**

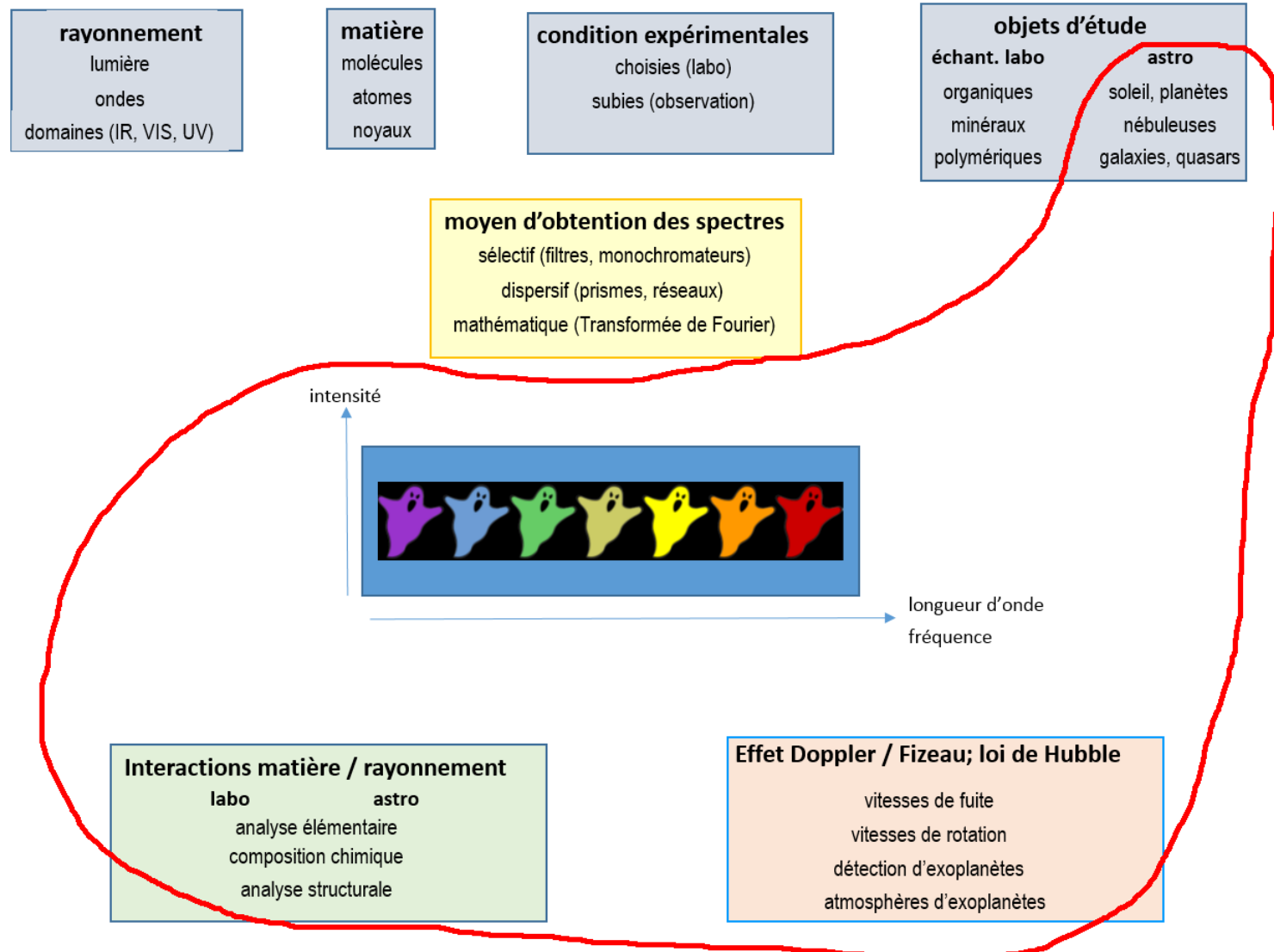


raie théorique de C3+ à 1550nm

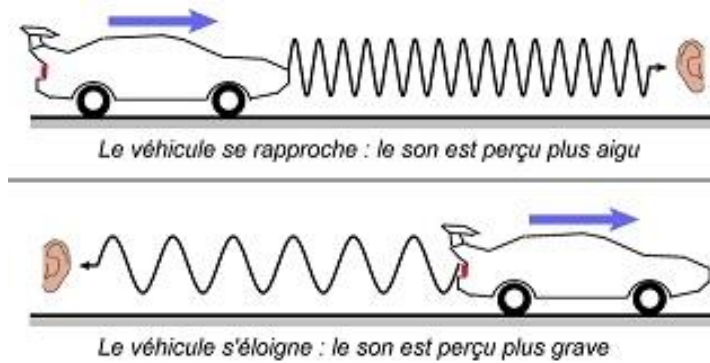


z	$\lambda_{\text{obs}} (\text{C}^{3+})$, Angström Flèche rouge
0,446	2240
0,539	2385
0,267	1965

... et en rajoutant **L'EFFET DOPPLER**



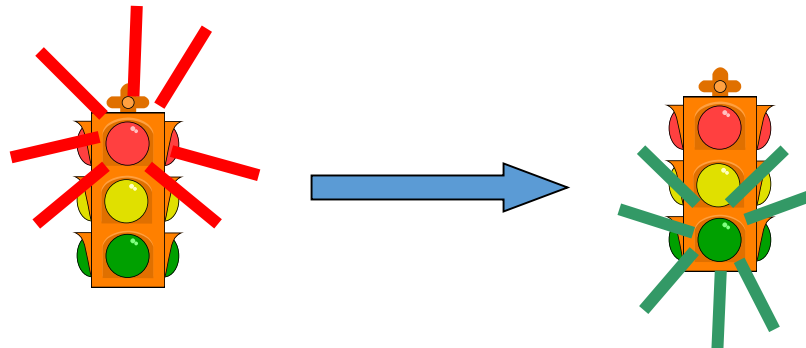
de l'effet Doppler – Fizeau...



sur les sons:

$$z = \lambda - \lambda_0 / \lambda_0$$

$$v = c \cdot (v - v_0 / v_0)$$



sur les couleurs:

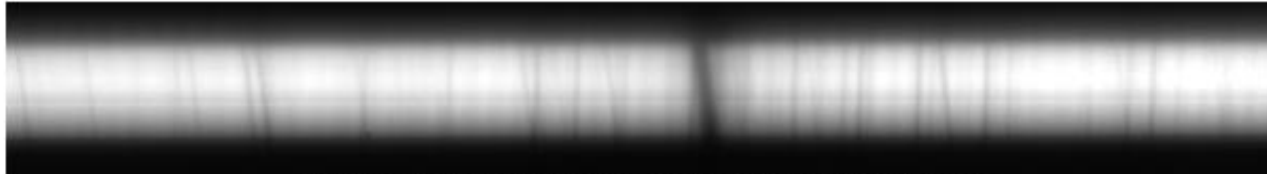


... à la loi de Hubble ($v = c \cdot z = H_0 \cdot d$) sur la fuite des galaxies



les intervalles sont conservés; les fréquences sont décalées

Vitesse de rotation des planètes



spectre de Jupiter obtenu en 5min de pose seulement

Certaines raies du spectre sont inclinées. Cela est provoqué par la rotation de la planète: le bord qui s'approche de nous voit son spectre décalé vers le bleu par rapport au centre de la planète, par effet Doppler-Fizeau avec un décalage proportionnel à la vitesse linéaire. Le bord qui s'éloigne de la même façon voit son spectre décalé vers le rouge. A noter les autres raies présentes dans le spectre mais bien verticales: ce sont les raies d'absorption de l'atmosphère terrestre (raies telluriques); il est normal qu'elle ne soient pas inclinées puisque l'atmosphère est fixe par rapport à nous.

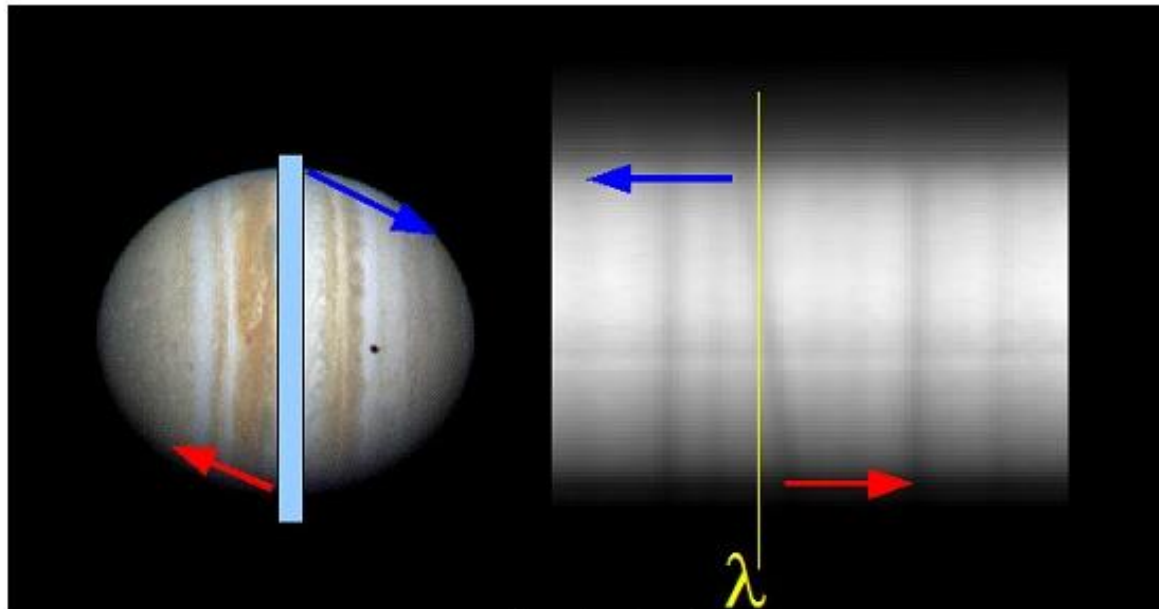
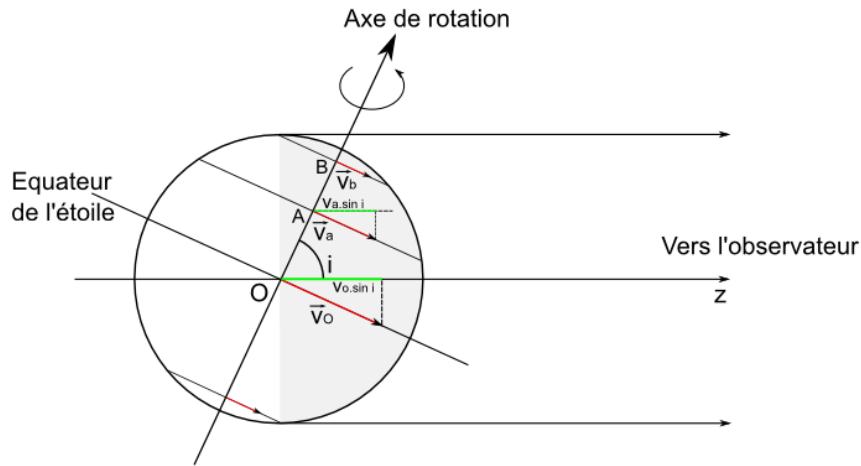


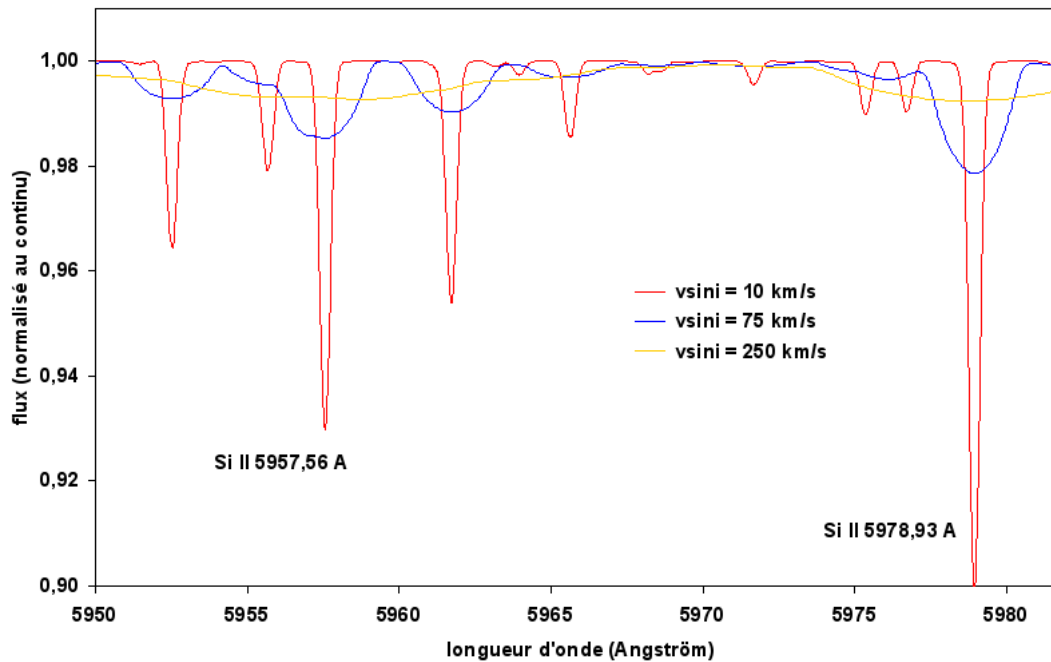
schéma de principe

Mesure de la vitesse de rotation d'une étoile



- rotation → élargissement des raies spectrales

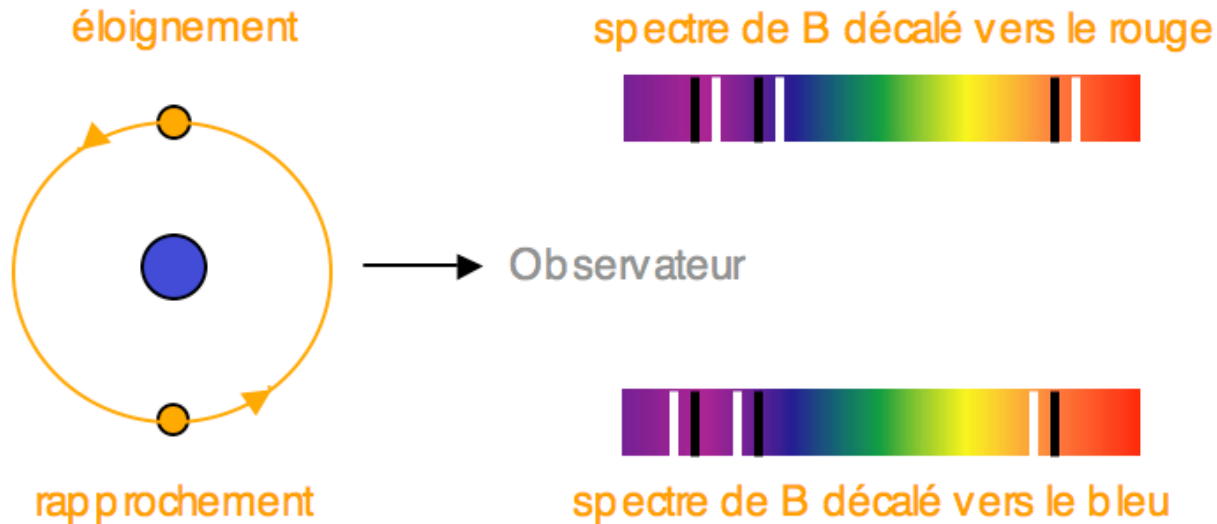
- si rotation rapide, l'élargissement nuit à la résolution



- la simulation permet de déterminer la projection de la vitesse sur l'axe de visée, mais pas i

Méthodes des vitesses radiales

Détection d'étoiles doubles



« binaire spectroscopique »

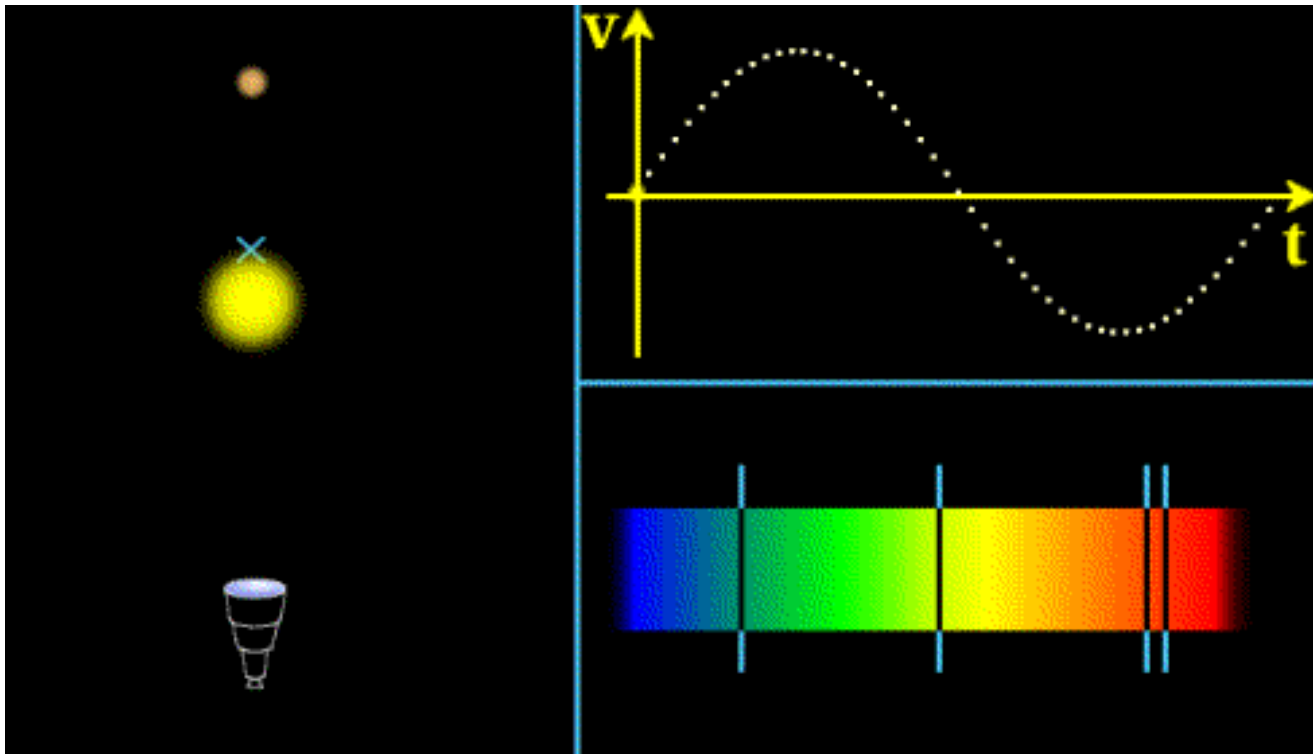
Ce principe est utilisé pour répertorier les nombreuses **étoiles doubles** du ciel (environ 50% des étoiles appartiennent à un système multiple).

Dans le cas d'un système étoile-planète le rapport des masses est très petit et l'amplitude des variations de la vitesse V est beaucoup plus faible (de l'ordre du m/s) que pour un système de deux étoiles (de l'ordre du km/s).

Méthodes des vitesses radiales

Détection d'exoplanètes

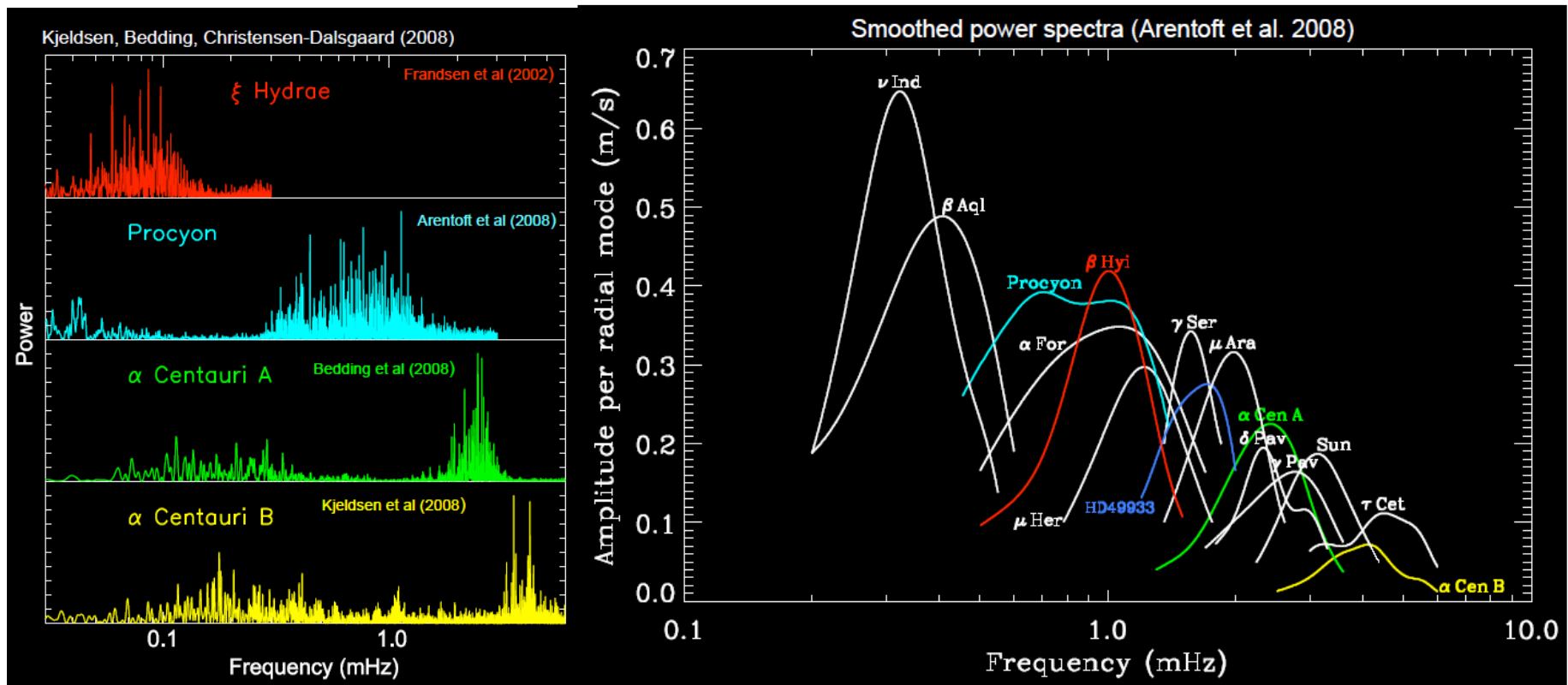
de très faibles oscillations périodiques de la longueur d'onde observée des raies, interprétées par l'effet Doppler, sont l'indice de la rotation de l'étoile autour du centre de masse d'un **système étoile-planète**.



Astérosismologie

très basses
fréquences

- oscillations de période 5 mn (1/300 Hz !!) de la photosphère solaire découvertes en 1962
car **décalage Doppler dans les raies de l'hydrogène solaire**
témoin d'une activité « sismique » au cœur du soleil
- depuis, précision affinée et extension à d'autres étoiles
étude des cycles du soleil, rotation de surface et interne, etc...



- depuis, précision affinée et extension à d'autres étoiles

ne pas se mélanger les pinceaux avec les vitesses...

avec le même effet Doppler:

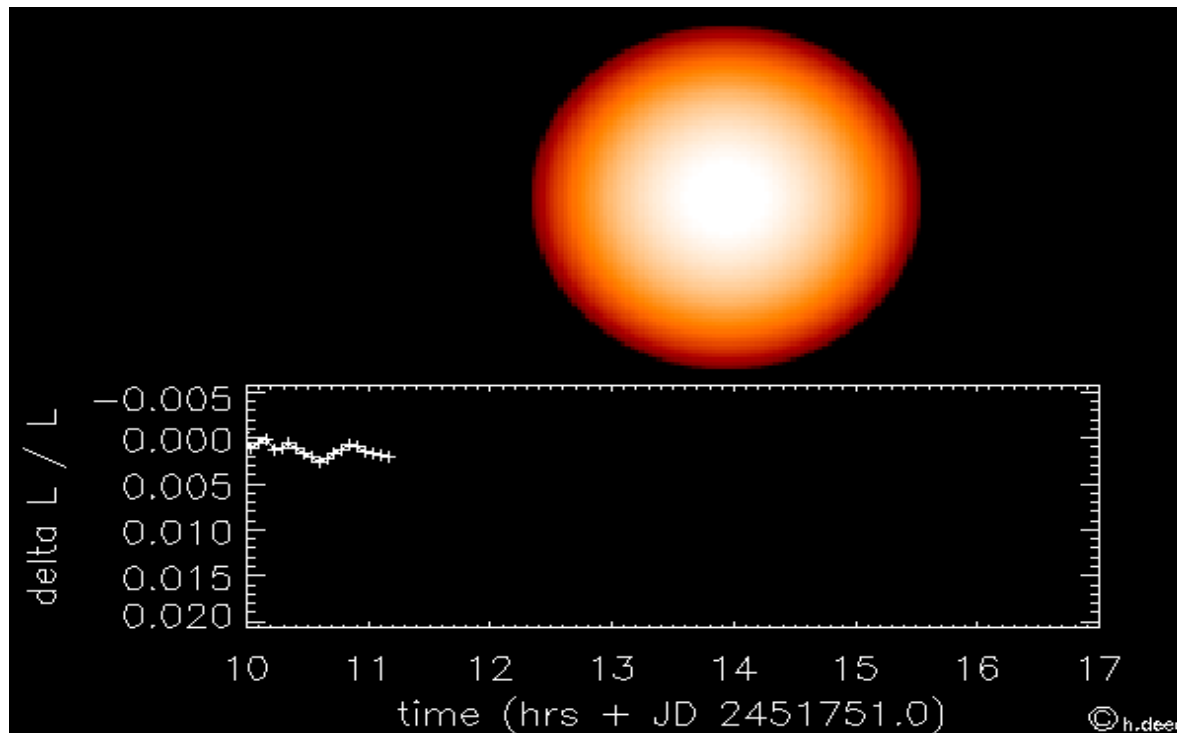
- **fuite des galaxies** (correction du CMB; décalage vers le bleu des galaxies proches)
 - **rotation des étoiles** élargissement des bandes spectrales
 - **systèmes binaires d'étoiles**
 - **exoplanète(s) autour d'une étoile**
- } oscillation des bandes spectrales
- **rotation des planètes** inclinaison des bandes spectrales
 - **modes de vibrations des étoiles** décalage périodique (5mn pour le soleil)

Cas des exoplanètes

Détection par la méthode des vitesses radiales (*méthode « spectro » si on veut ...*)

Détection astrométrique

Détection par profondeur du transit:



Atmosphères d'exoplanètes

Détection par profondeur du transit à différentes longueur d'ondes

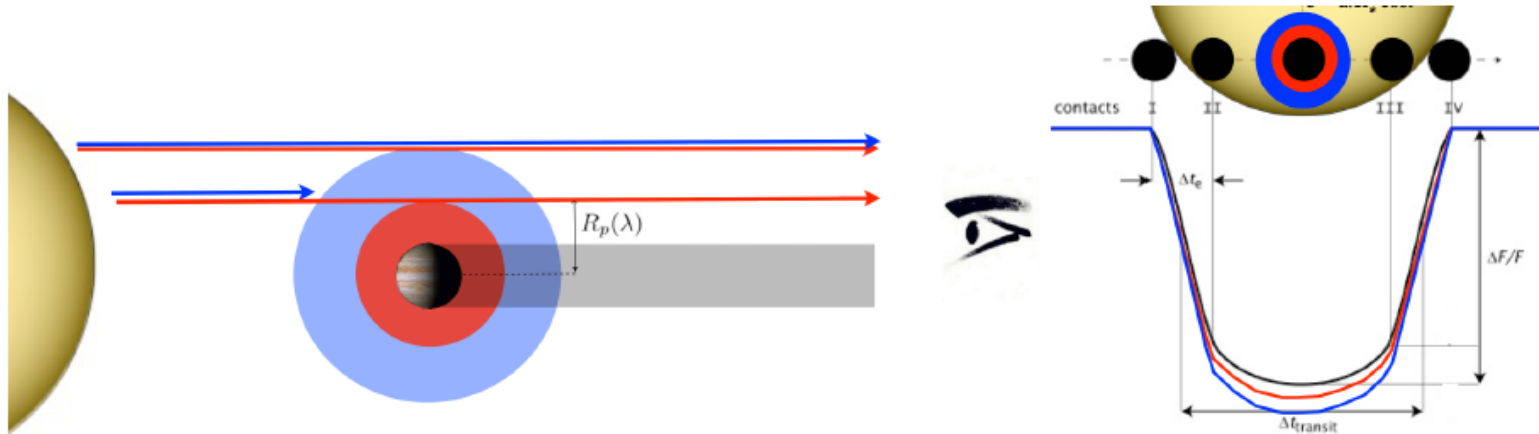
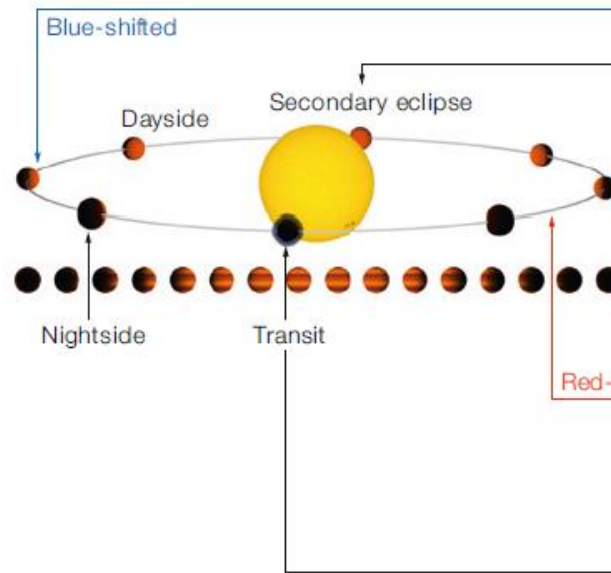


Figure 2.14 – Transit multi-couleur. La radiation stellaire traversant les limbes de l’atmosphère planétaire est transmise ou absorbée selon sa longueur d’onde. Dans cet exemple, la lumière bleue est absorbée sur une large extension de l’atmosphère par rapport à la lumière rouge. La profondeur du transit mesurée en longueur d’onde bleue, et donc le rayon planétaire, sont ainsi plus importants que ceux en rouge. Crédit : adapté de Ehrenreich (2007) et de J.-M. Desert, présentation Sagan Workshop 2012.

Atmosphères d'exoplanètes

Analyse par spectroscopie haute résolution

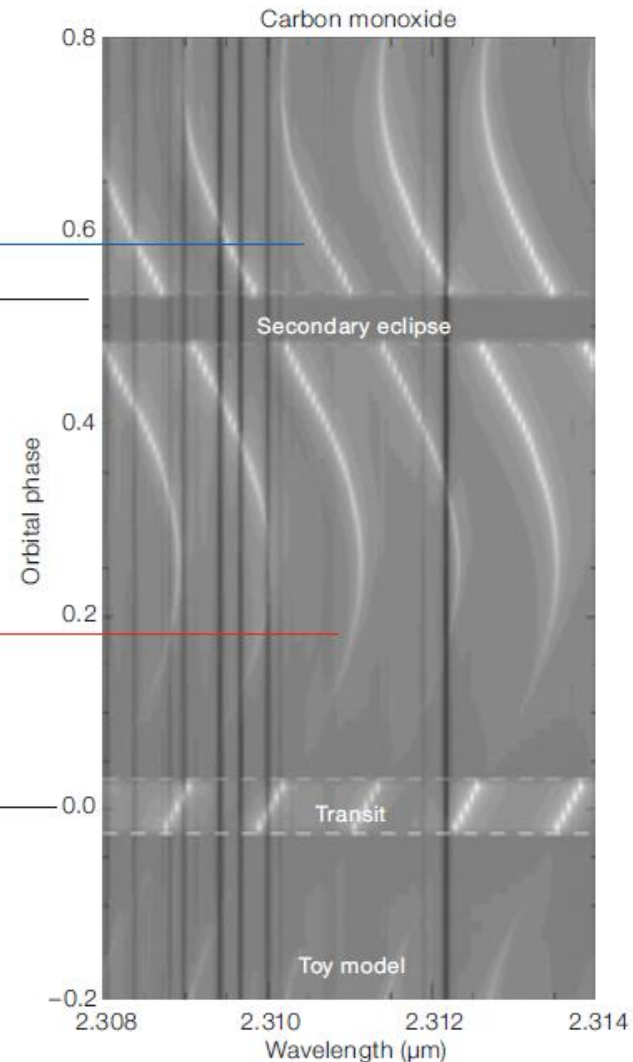
exemple du CO dans les « Jupiters chaudes » :



Schematic for detecting molecules in exoplanet atmospheres at high resolution. Each row in the righthand panel is a spectrum. The white lines trace out the radial velocity curve of individually resolved lines in the carbon monoxide molecular band of a toy model hot Jupiter atmosphere.

Throughout the orbit, the lines shift significantly in wavelength compared to the static features of the Earth's atmosphere (dark vertical lines), allowing them to be separated without destroying the planetary signal.

This technique works both **in transit, as starlight filters through the exoplanet atmosphere and adopts the spectral fingerprint of its molecular constituents,** and throughout the phase as thermal irradiation from the planet's dayside and nightside rotate into view, depicted at left.



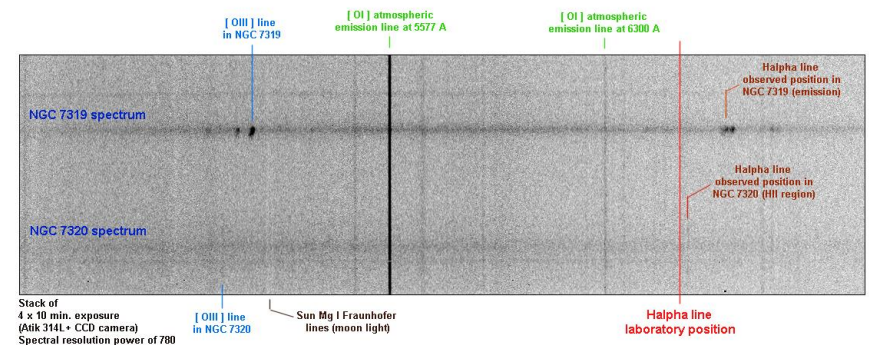
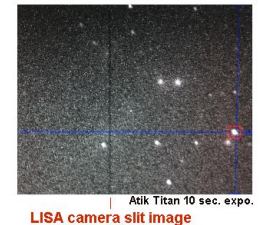
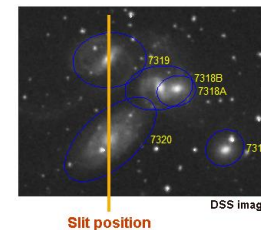
... et les astros amateurs dans tout ça ???

- le [spectro à 1€ du Pic du Midi](#)

- large gamme proposée par [Shelyak](#); entre autres:

- spectro pédagogique: visualisation de quelques spectres dans le visible; 99€
- Lhires: spectres du soleil (ou lampes) en haute résolution; 1300€
- Star Analyser; réseau de diffraction à mettre sur une CCD, webcam ou APN; basse résolution; 150€
- LISA: à utiliser avec télescope; 3500€
 - fente fine à mettre sur objet du ciel profond (autoguidage nécessaire)
 - décalages Doppler et méthode des vitesses radiales théoriquement accessibles

*dans le quintette de Stephan, 7319
et 7320 ne sont pas proches
(décalages Doppler différents)*



Spectres stellaires et musique des sphères

- transposition des fréquences de résonance des étoiles dans la zone des fréquences sonores

➔ composition musicale

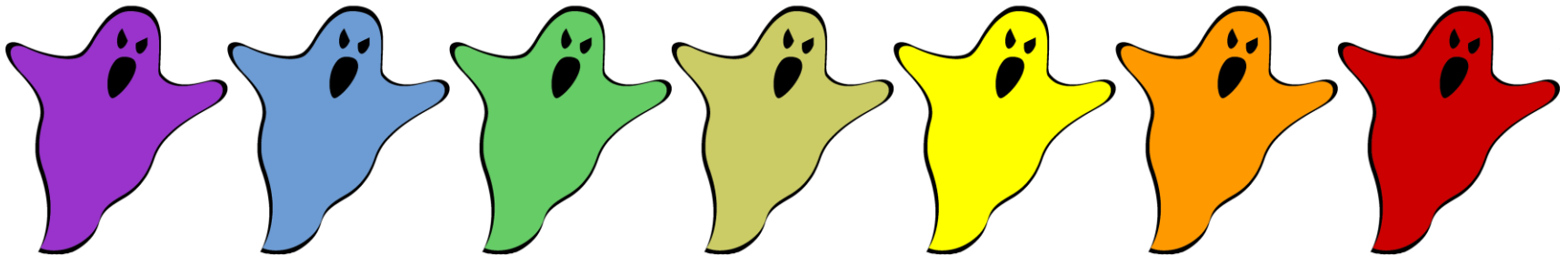
- CS Levine et Syvie Vauclair

http://www.cslevine.com/etoiles/youtube_musique.htm

- danse des spectres !!

FIN

« gardez la cadence, ménétriers d'enfer...



... ou je vous éteins tous !! »

Méphisto, ballet des follets, La Damnation de Faust de Berlioz

Bibliographie

interaction matière / rayonnement: cours complet	http://www.sprawls.org/ppmi2/INTERACT/
la résonance / difficultés sémantiques	http://www.radisma.info/document.php?id=746
dossier ens-lyon applications récentes	http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/dossiersthematiques/spectroscopie/
instruments spectro pour astros amateurs	http://www.shelyak.com/
revue méthodes spectrales en chimie	http://chemwiki.ucdavis.edu/Core/Analytical_Chemistry/Analytical_Chemistry_2.0/10_Spectroscopic_Methods
spectroscopie Jobin Yvon chimie	http://www.thespectroscopynet.eu/?Gateway_to_Spectroscopy
dossier spectro Shelyak	http://thizy.free.fr/shelyak/LhiresLite/DC0005C%20-%20Guide%20Utilisateur%20Lhires%20Lite%20-%20FR-EN.pdf
gamme spectros Shelyak pour amateurs	http://www.shelyak.com/
nature ondulatoire de la lumière (vidéo)	https://www.youtube.com/watch?v=F6dZiuw1KUo
double fente de Young (vidéo)	https://www.youtube.com/watch?v=Pk6s2OIkzKQ
dossier spectro cahiers Clairault	http://acces.ens-lyon.fr/clea/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_122.pdf
classification et vie des étoiles (Power Point)	http://slideplayer.fr/slide/1695038/
classification spectrale et distances des étoiles	http://www.staff.science.uu.nl/~rutte101/rrweb/rjr-edu/exercises/assignments-spectral-lines/line-usage.pdf
spectroscopie stellaire (Power Point)	http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~theureau/TH.ACTU/Cours_L3_distances.pdf
projet MUSE (spectro champ intégral)	http://muse.univ-lyon1.fr/spip.php?article99&lang=fr
atmosphère d'exoplanètes par spectro hte résolution	https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.154-dec13/messenger-no154-57-61.pdf
réseaux et ordres de diffraction	http://www.jp-petit.org/UFOSCIENCE/spectro/rapport_assises_gesto_ufo_science.htm
réseaux, CD, DVD, Blue Ray	http://gaelroux.perso.sfr.fr/TP_New/Physique/TP6-Correction_.pdf
montage diffraction avec un CD	http://phymain.unisciel.fr/pourquoi-un-disque-compact-est-il-irise/
spectro à 1€ en 10mn	http://pedagogie.ac-toulouse.fr/gappic/index.php/astronomie/le-spectroscope-a-cd