

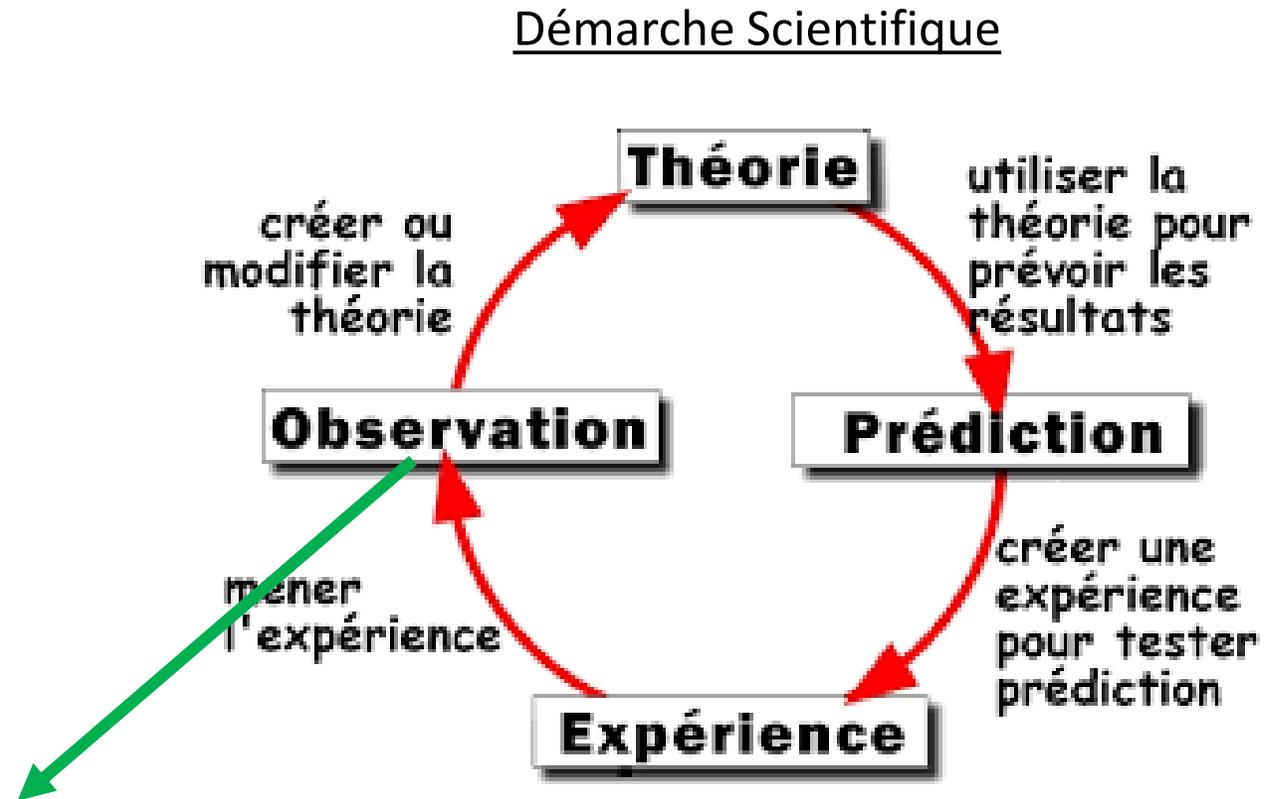
UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY — 2023-2024

Phys 137 : séance 8

Spectroscopie et brève histoire
de l'instrumentation spatiale

zelia.dionnet@universite-paris-saclay.fr (IAS)

Comment étudier les objets astrophysiques ?



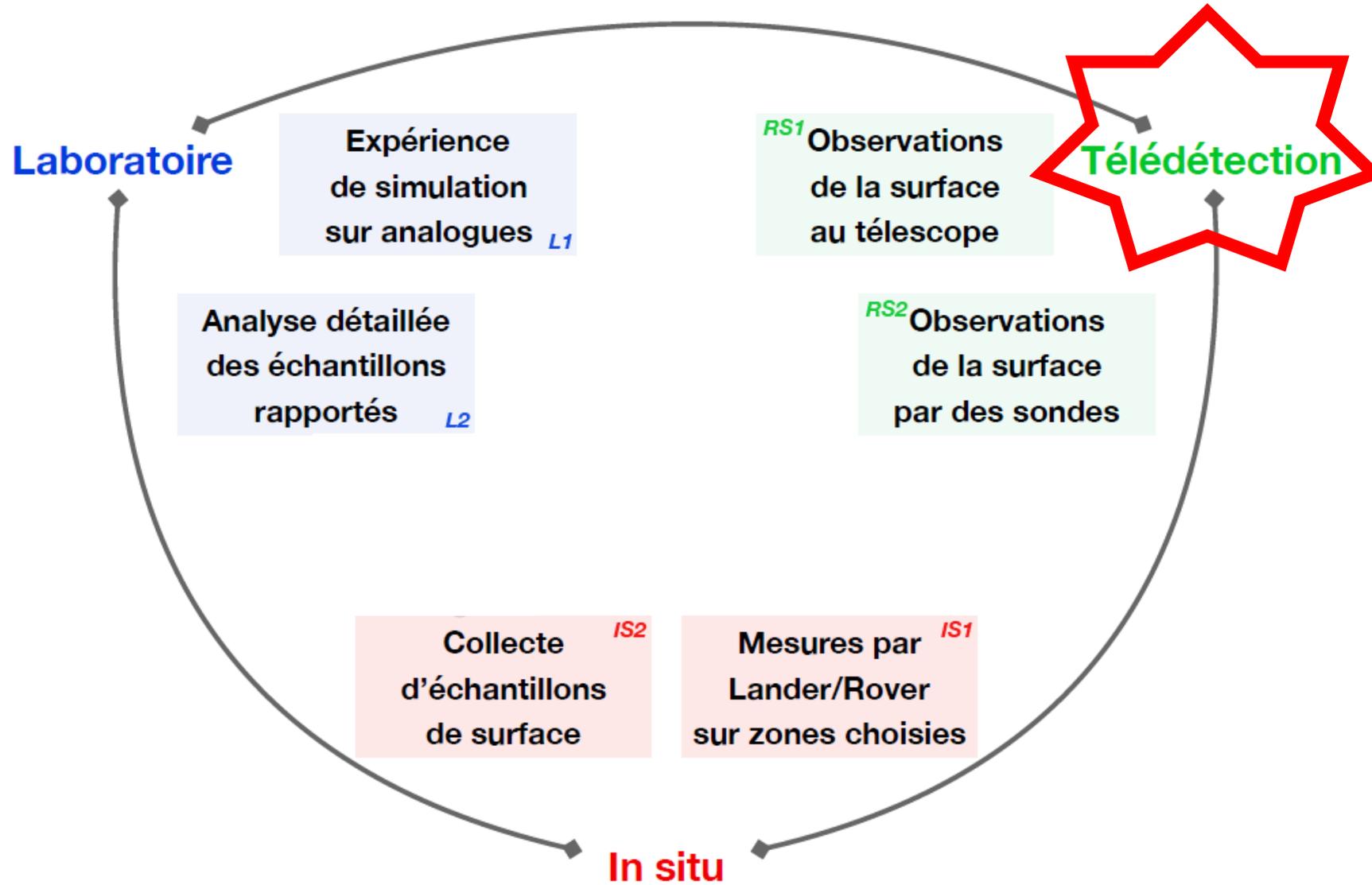
L'**observation** est essentielle dans toute démarche scientifique.

-> En astrophysique, on travaille sur des objets lointains (étoiles, astres ...) : l'observation est difficile

-> seul leur rayonnement parvient à nous. Les astronomes ont donc dû se résoudre à **faire parler la lumière**

= Naissance de la **Spectroscopie**

Comment étudier notre univers ?



Invention de la lunette astronomique

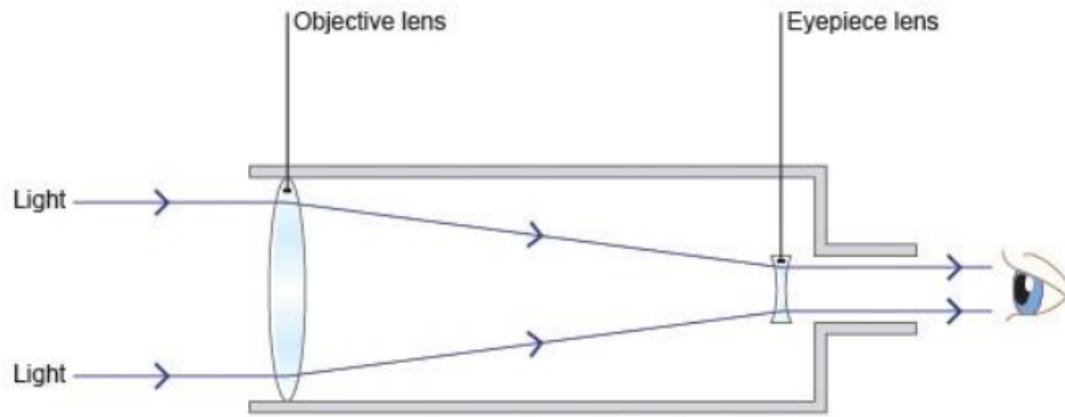
Johann Lippershey (1608) mais invention la plus célèbre : Galilée (1609), lentille CV (objectif) et lentille DV (oculaire)

Nombreuses découvertes : cratères de la Lune, taches solaires, satellites de Jupiter, recensement d'étoiles...

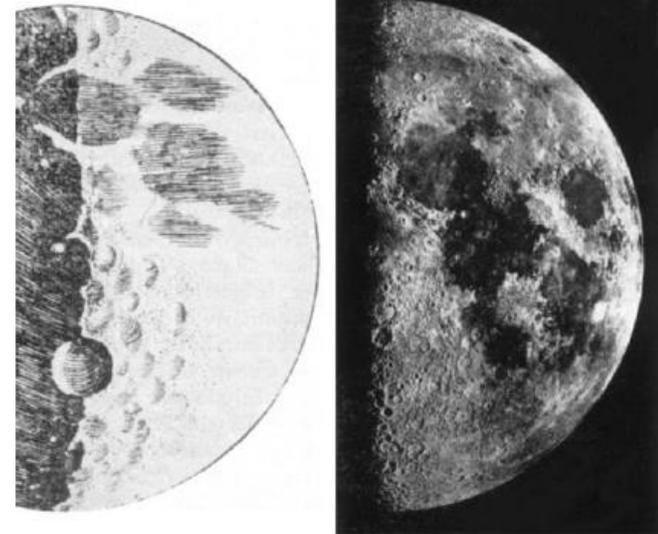
Défaut : image floue : **aberration chromatique**



Lunette astronomique de Galilée à l'Istituto e Museo di Storia della Scienza (Florence).



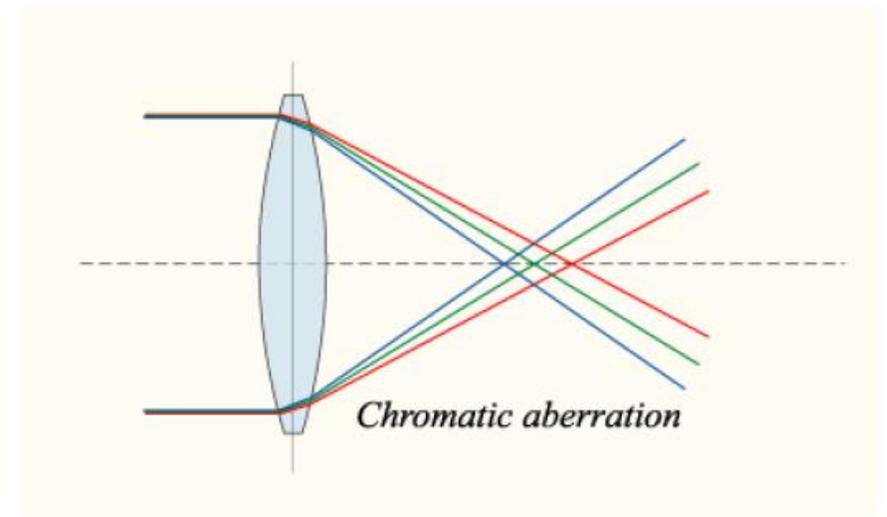
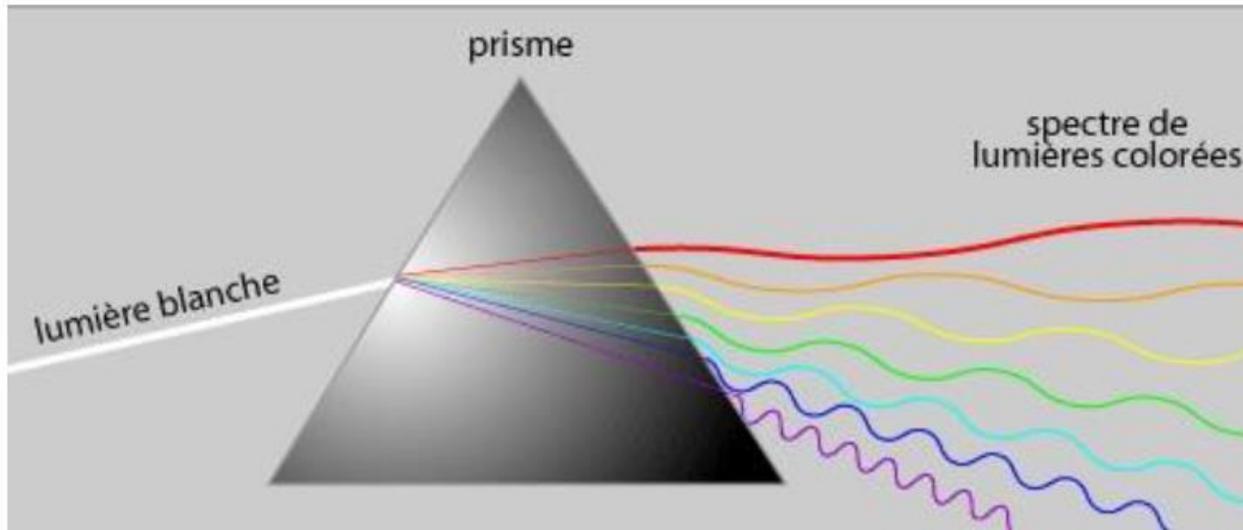
Principe de fonctionnement de la lunette de Galilée



Dessin de la Lune par Galilée et photo de la même vue

Le problème de l'aberration chromatique

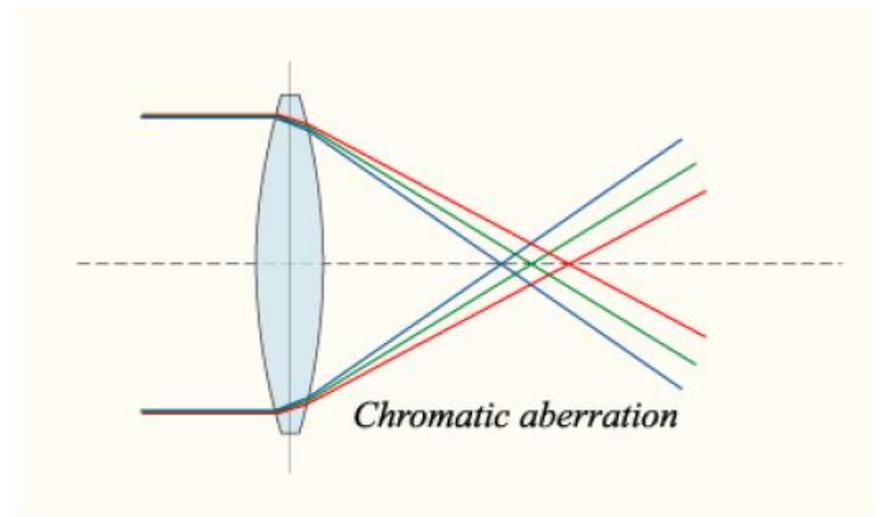
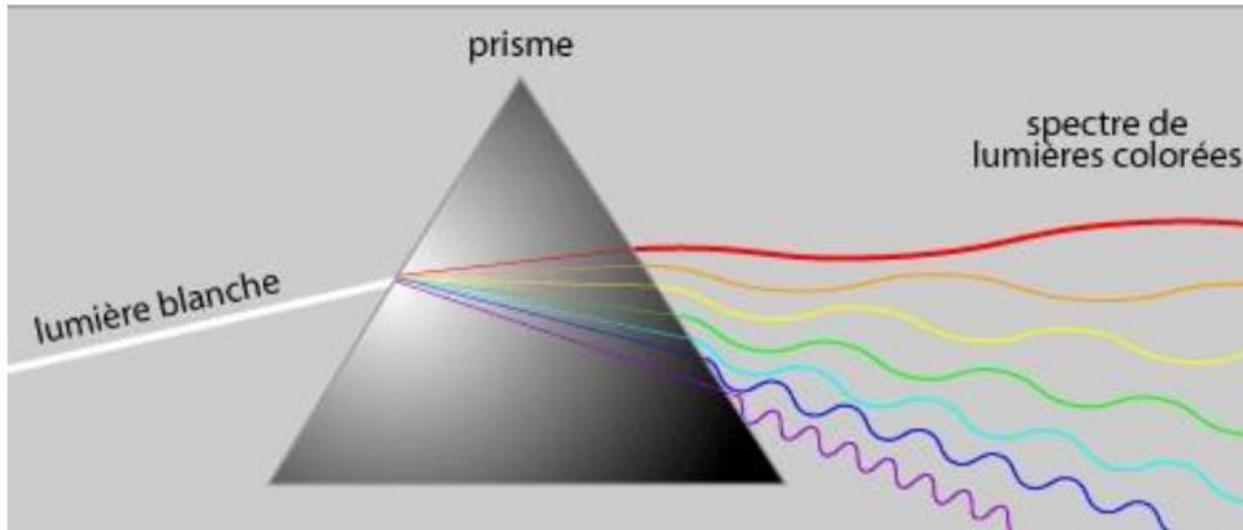
Dispersion de la lumière par le verre d'une lentille (comme un prisme en verre).  Image floue
Les rayons de longueur d'onde différentes ne sont pas focalisés au même point.



Comment résoudre ce problème ? Améliorer les observations ?

Le problème de l'aberration chromatique

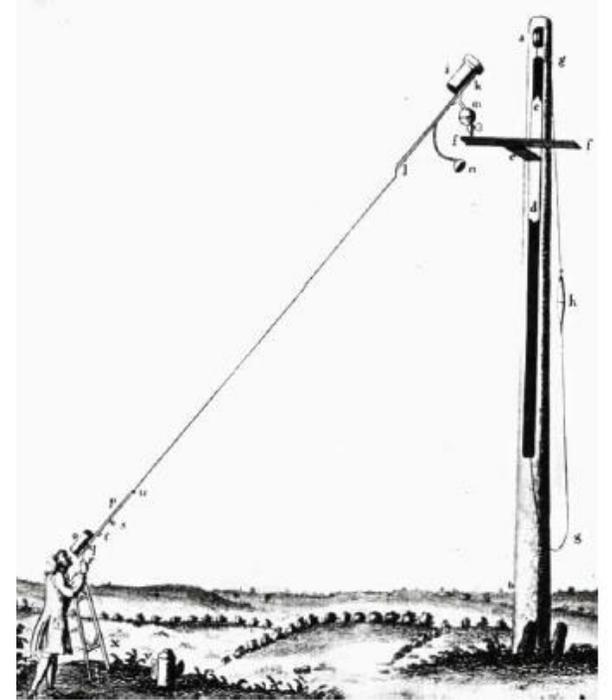
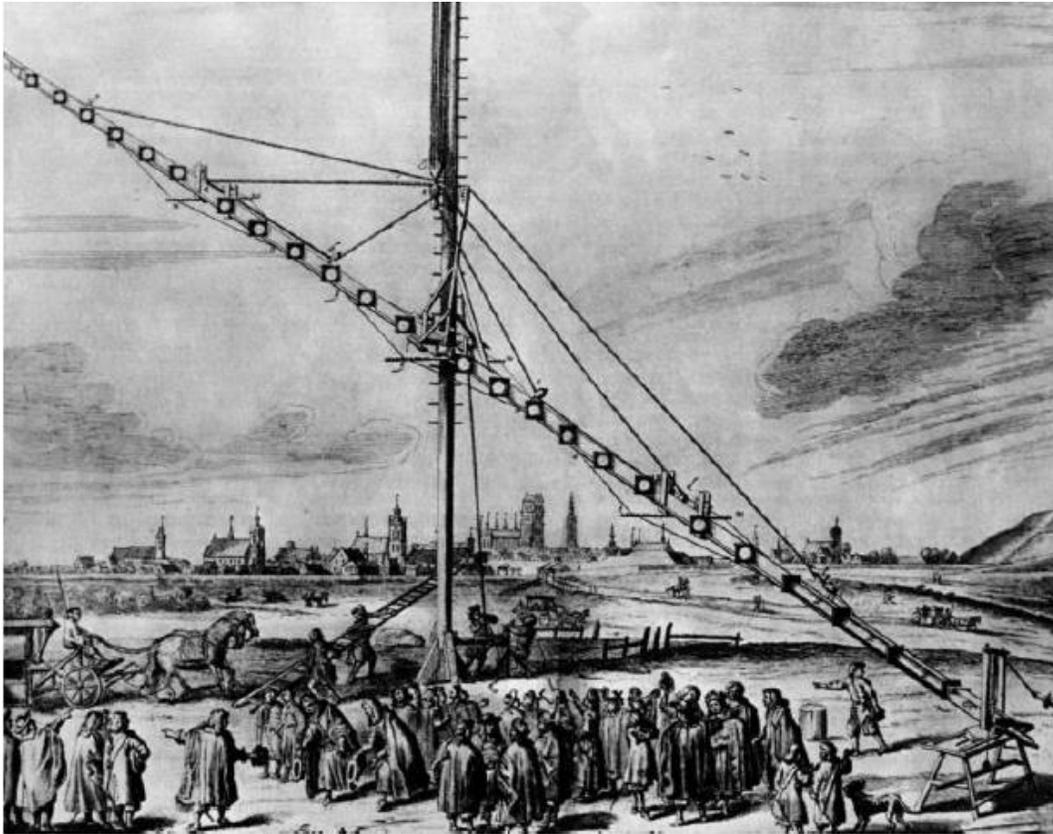
Dispersion de la lumière par le verre d'une lentille (comme un prisme en verre).  Image floue
Les rayons de longueur d'onde différentes ne sont pas focalisés au même point.



Diminution aberration chromatique : diminution de la courbure des lentilles → augmentation de la longueur focale.

Des lunettes de plus en plus grandes

1655 : Christian Huygens fait construire une lunette de 37 m de long. Découverte des anneaux de Saturne et de Titan, détails à la surface de Mars.



1641 : lunette d'Hevelius. 49 m de long.

Des lunettes de plus en plus grandes

Plus grande lunette jamais construite : lunette de l'exposition universelle de 1900 à Paris.

Lentille à l'objectif : diamètre de 1,25m
longueur focale : 57 m

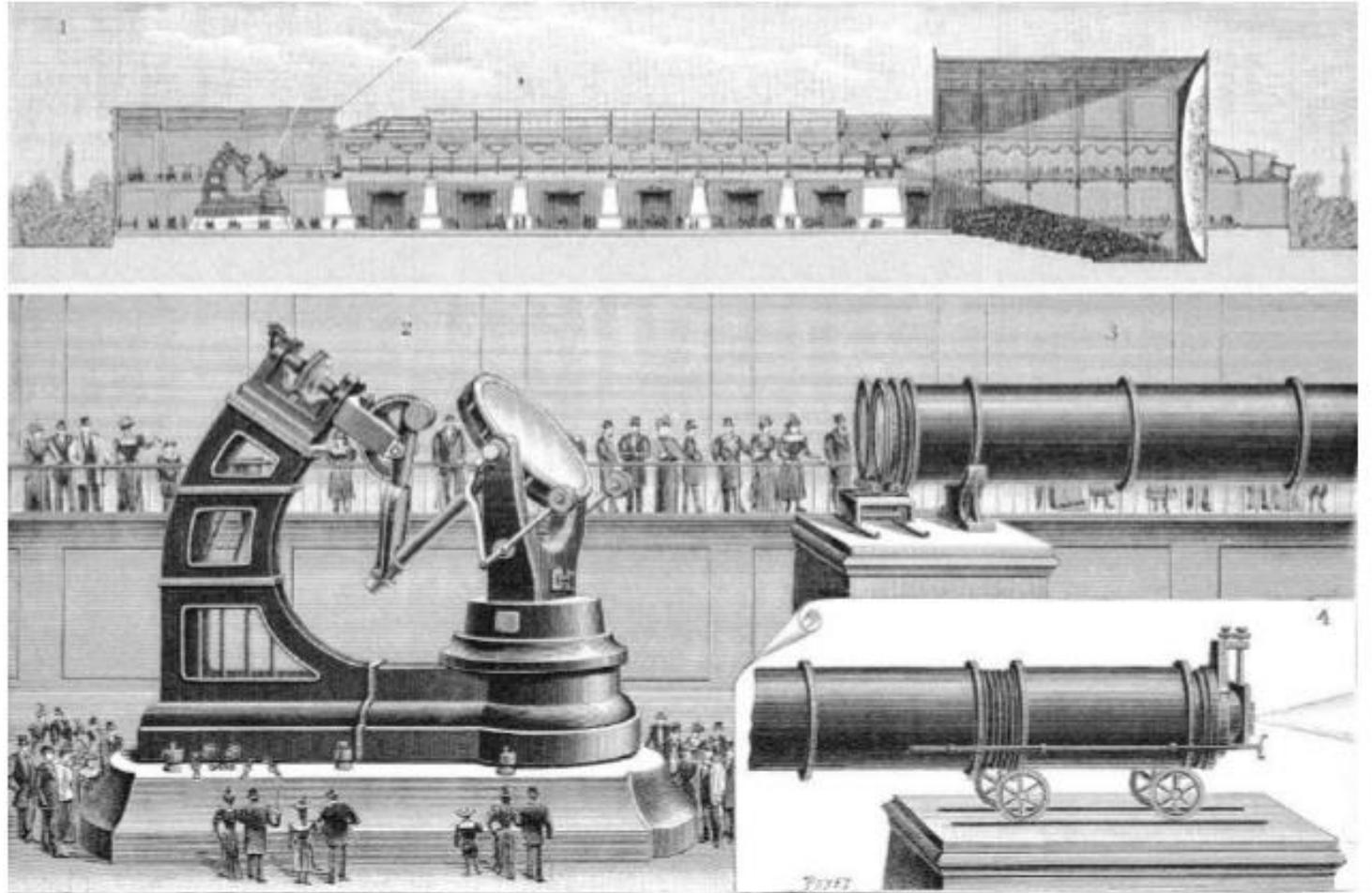


Fig. 3. — Détails de la grande lunette. — 1. Vue d'ensemble. — 2. Le sidérostat. — 3. La lunette. — 4. L'oculaire.

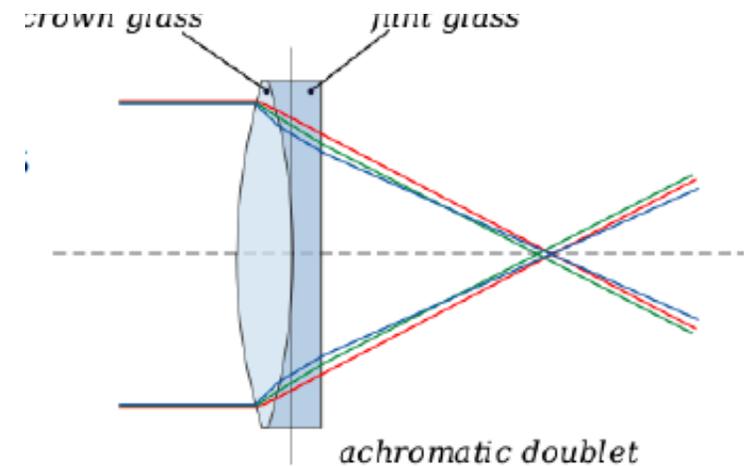
Des lunettes de plus en plus grandes

Construction de lunettes plus grandes que celle de l'exposition universelle : impossible à cause de la gravité (Le centre des lentilles s'affaisse...)

Autre problème : construire des lentilles sans défauts internes

Correction de l'aberration chromatique : impossible selon certains scientifiques (dont Newton)

Premières **lentilles achromatiques** inventées par John Dollond en 1729. Permet de réduire l'aberration chromatique mais ne la supprime pas.



Aujourd'hui : lunettes abandonnées au profit des télescopes pour l'observation des objets lointains.

Mais outils toujours utilisés par les astronomes amateurs pour l'observation du système solaire et des nébuleuses les plus brillantes !

L'invention du télescope

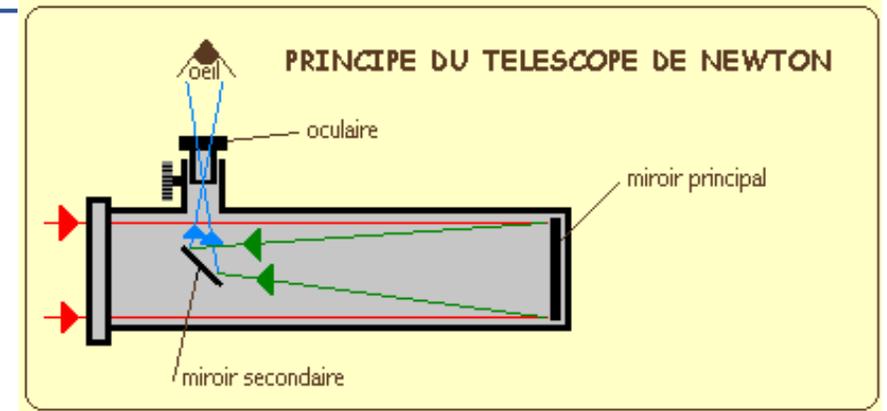
Principe : la lunette utilise la **réfraction** de la lumière par des lentilles, le télescope utilise la **réflexion** par des miroirs.

1663 : James Gregory décrit le principe du télescope dans son ouvrage *Optica Promota*.

1666 : Isaac Newton construit le premier télescope.

Miroir sphérique d'un diamètre de 33 mm. Deuxième petit miroir plan permettant de renvoyer la lumière vers l'objectif.

1672 : Laurent Cassegrain développe un autre type de télescope : miroir primaire troué au centre et miroir secondaire renvoie la lumière derrière le télescope



Le télescope de Newton

L'invention du télescope

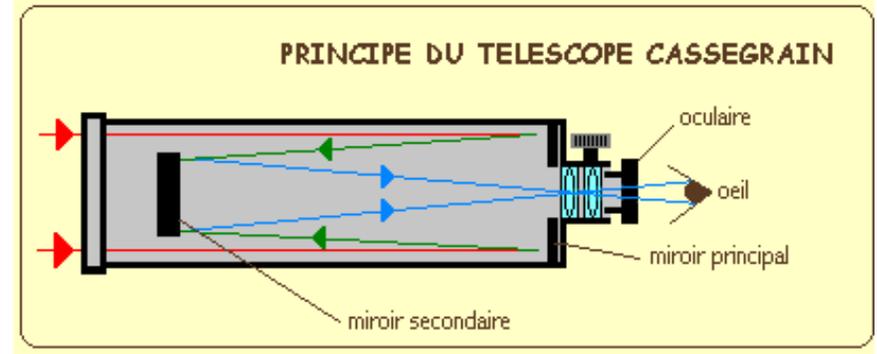
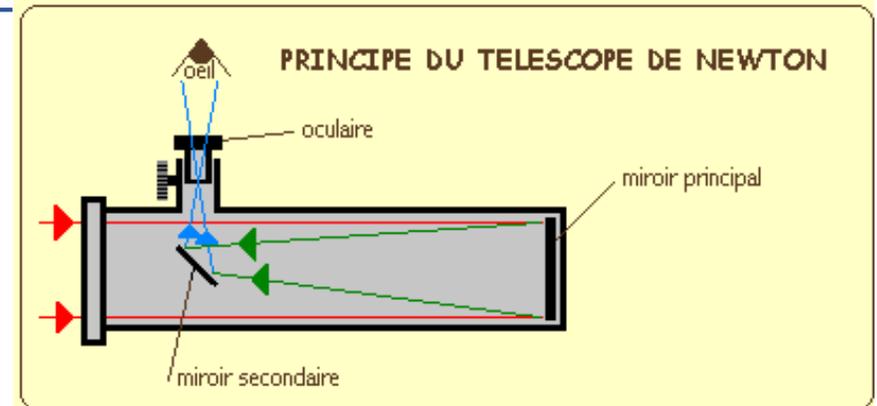
Principe : la lunette utilise la **réfraction** de la lumière par des lentilles, le télescope utilise la **réflexion** par des miroirs.

1663 : James Gregory décrit le principe du télescope dans son ouvrage *Optica Promota*.

1666 : Isaac Newton construit le premier télescope.

Miroir sphérique d'un diamètre de 33 mm. Deuxième petit miroir plan permettant de renvoyer la lumière vers l'objectif.

1672 : Laurent Cassegrain développe un autre type de télescope : miroir primaire troué au centre et miroir secondaire renvoie la lumière derrière le télescope



Les grands télescopes

1856 : nouvelle technique, fine couche transparente d'argent sur miroir en verre (meilleure réflectivité, renouvelable)

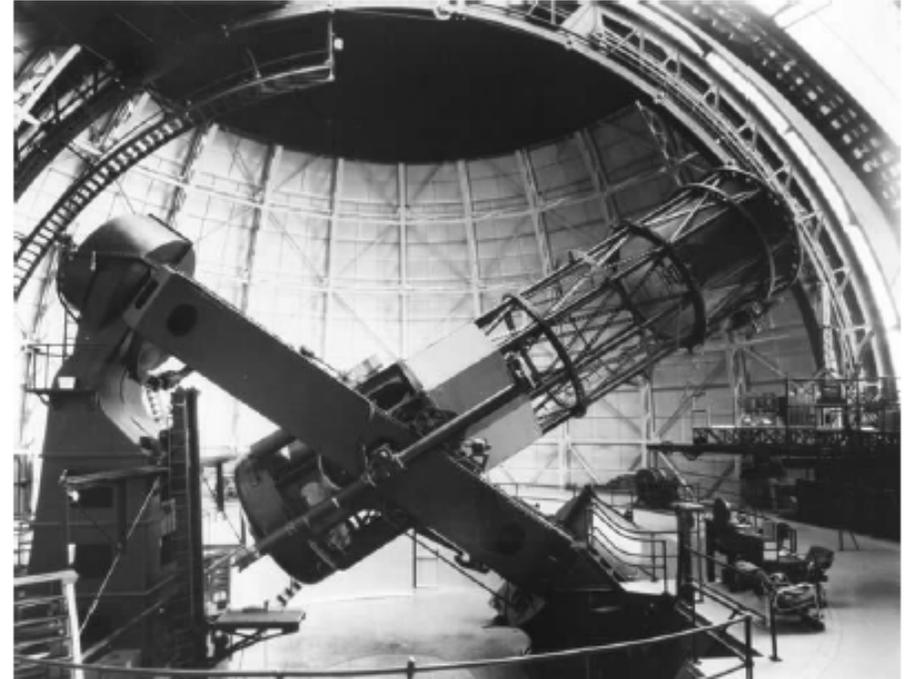
Début de XXe siècle : importance de la **qualité des sites d'observation**, observatoires construits en altitude.

Observatoire du Mont Wilson (1917) : miroir de 2.5 m de diamètre. Célèbre pour les travaux de Hubble.

1932 : couche d'argent remplacée par couche d'aluminium

Miroirs en verre atteignent leur limites (Mont Palomar (5m de diamètre), BTA-6 (6m de diamètre)). Miroirs plus grands se déforment sous leur propre poids.

-> **segmentation ou optique active**

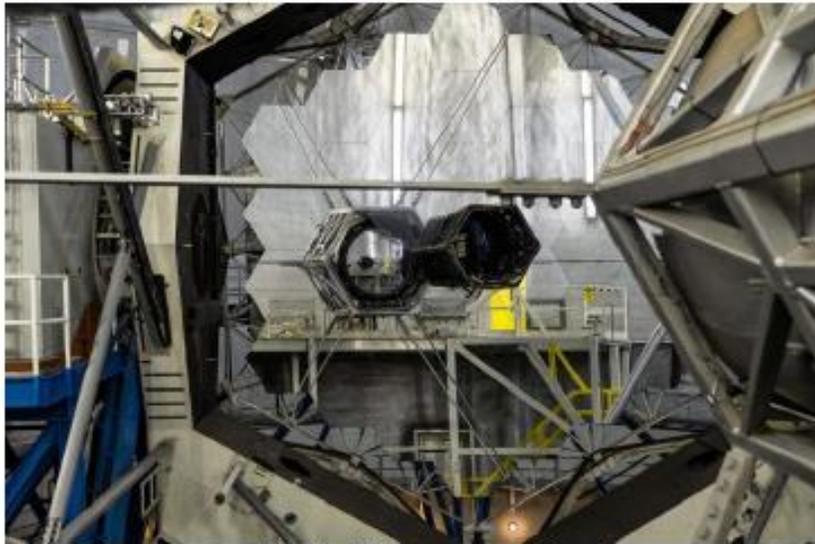


L'observatoire du Mont Wilson

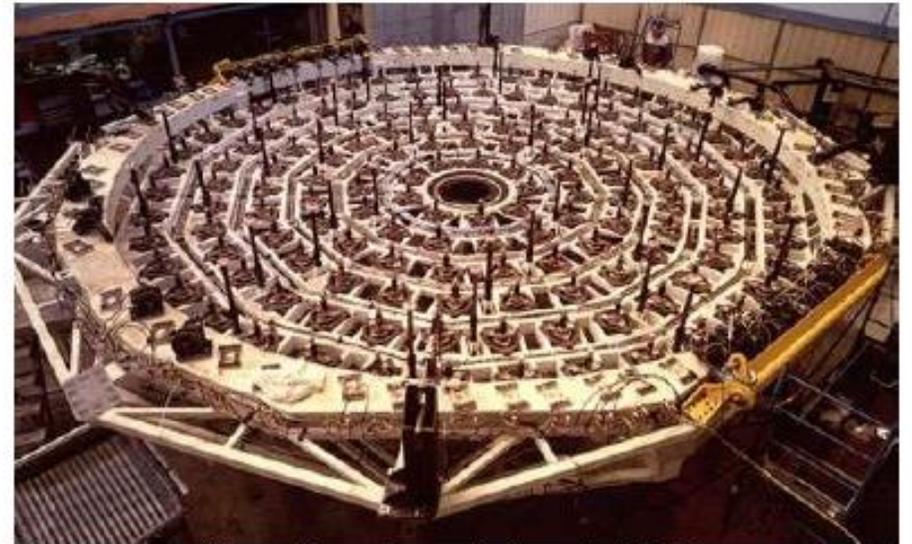
Les techniques actuelles

segmentation : juxtaposition de plusieurs petits miroirs (ex : miroir du télescope Keck, 36 segments de 1.8 m pour un diamètre total de 10 m environ)

optique active : miroir monolithique souple posé sur des vérins qui corrigent les déformations (ex : miroirs du VLT, 8m de diamètre)

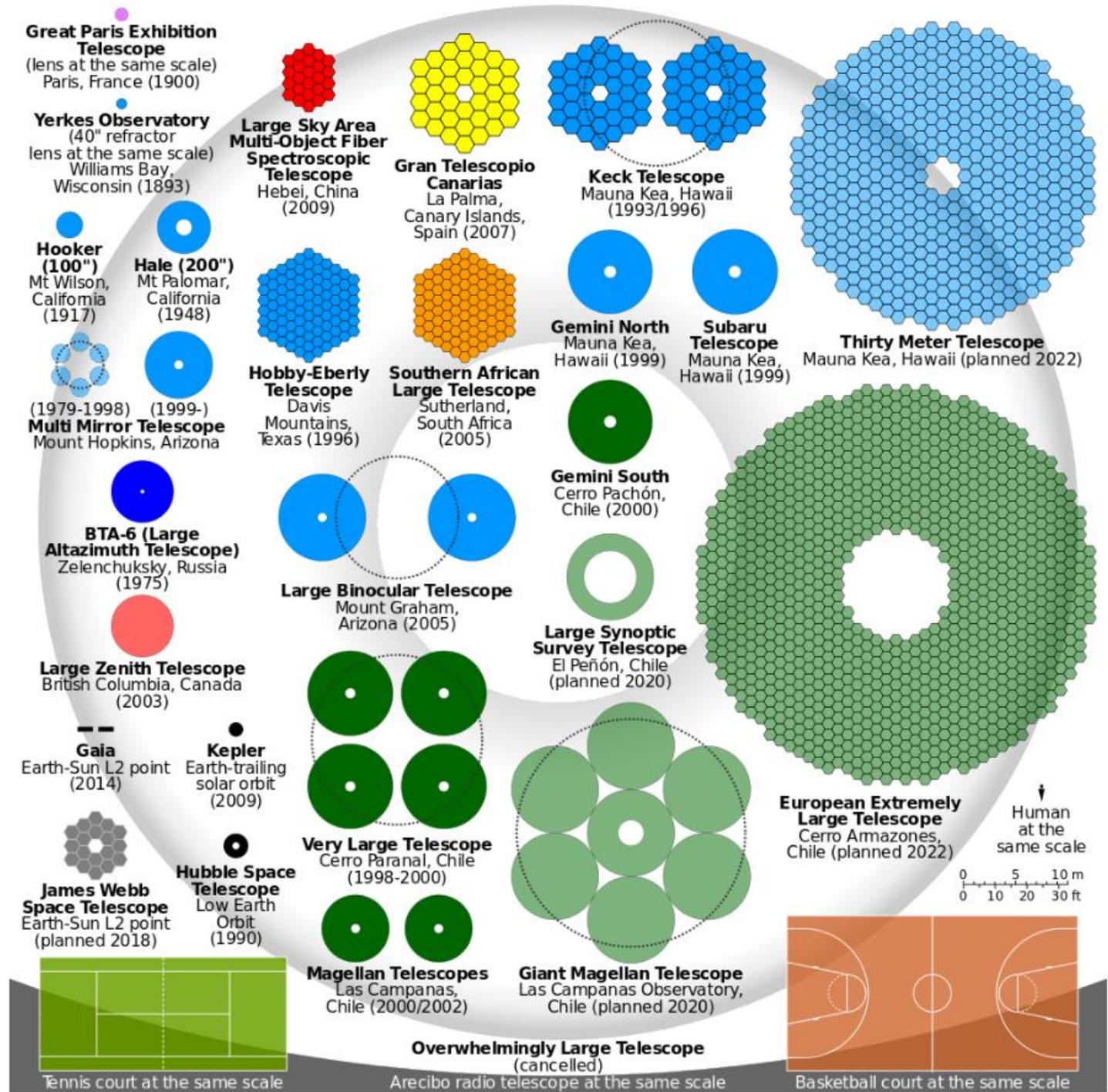


Miroir segmenté du télescope Keck



Surface arrière d'un des miroirs du VLT

Augmentation de la taille des télescopes

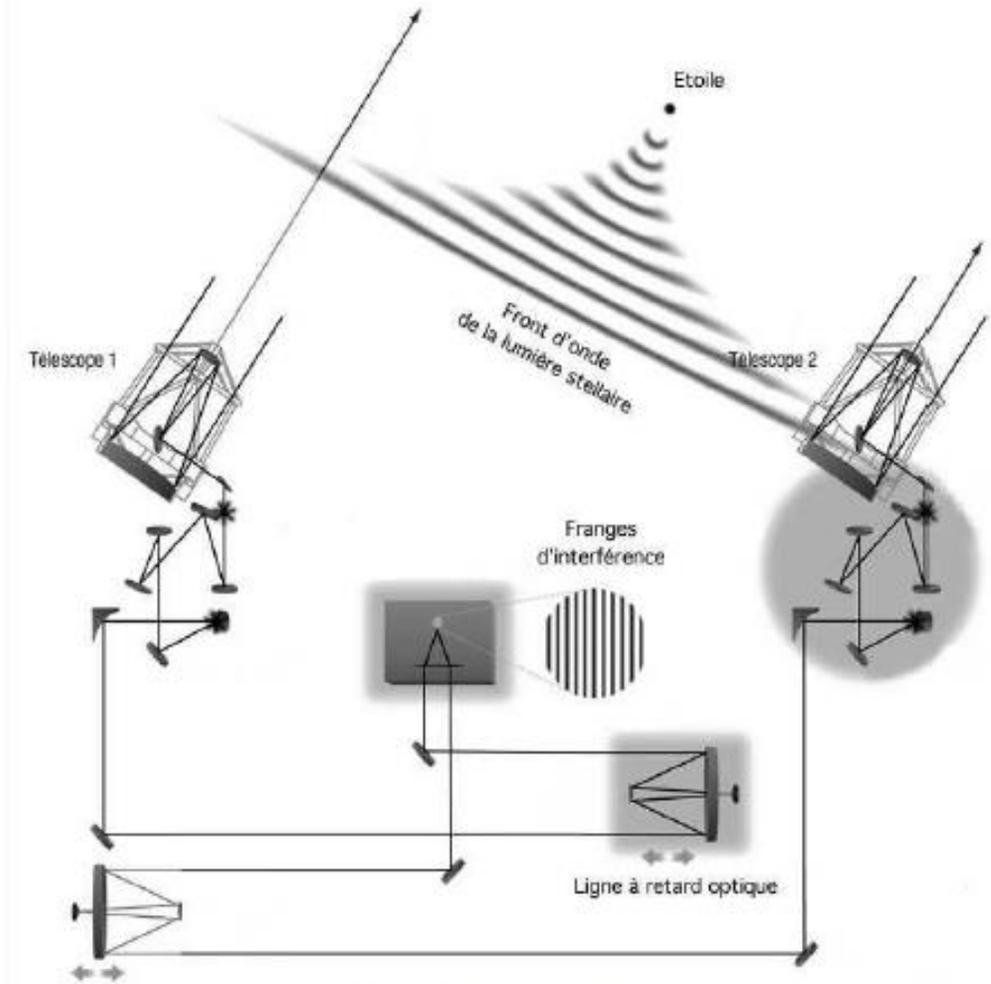


Les techniques actuelles

interférométrie : technique permettant d'augmenter la résolution des télescopes. Plusieurs télescopes sont reliés entre eux pour former un télescope virtuel géant. Diamètre du télescope virtuel = distance séparant les différents télescopes.

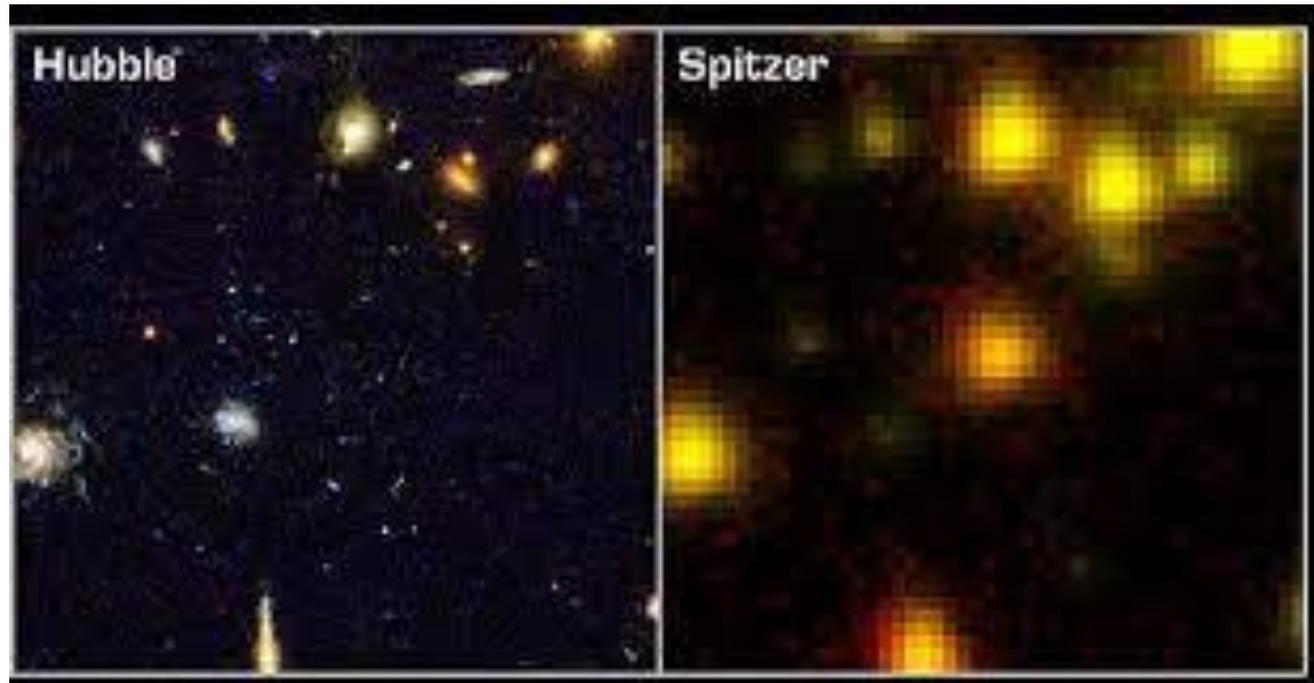


Miroir virtuel créé avec les télescopes secondaires du VLT



Principe de l'interférométrie

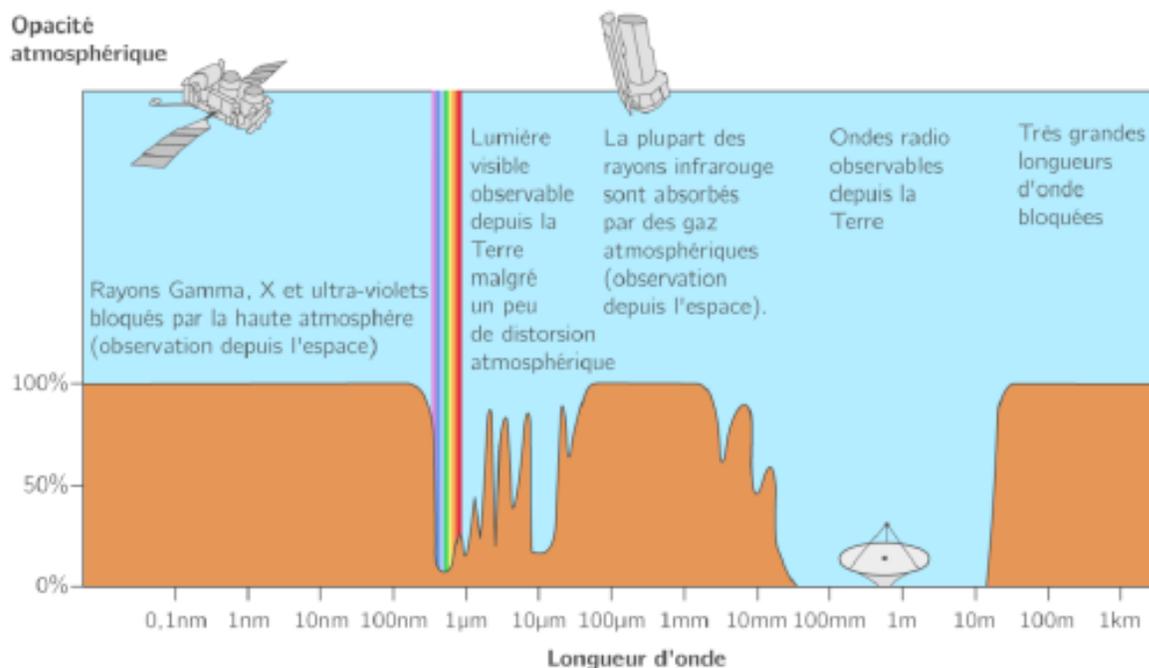
Au fait, c'est quoi la résolution ?



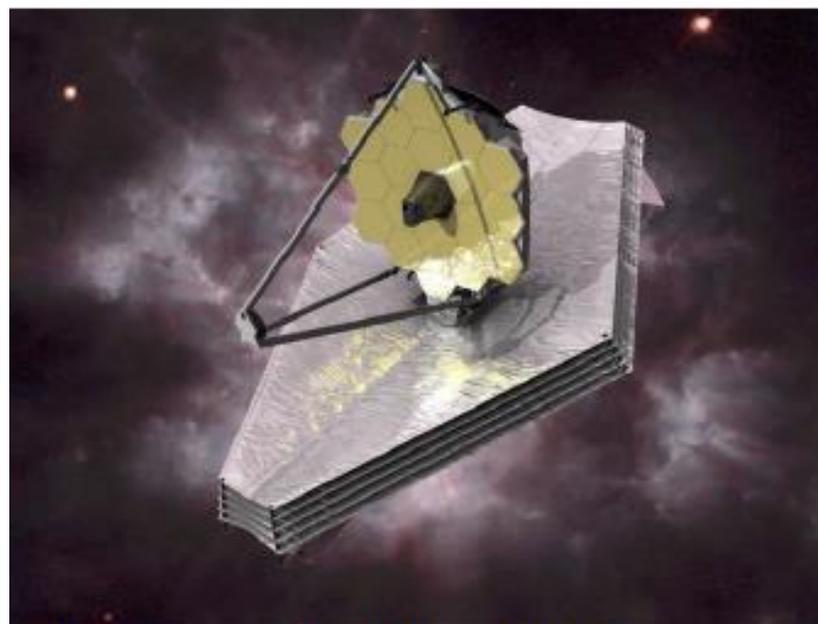
Les télescopes spatiaux

atmosphère terrestre : absorbe certains rayonnements électromagnétiques (Rayons gamma, X, UV, ...), nécessité de construire des télescopes spatiaux pour observer ces longueurs d'ondes !

Contraintes : miroirs plus petits que sur Terre, coût, ...



Télescope spatial Hubble



Télescope spatial James Webb

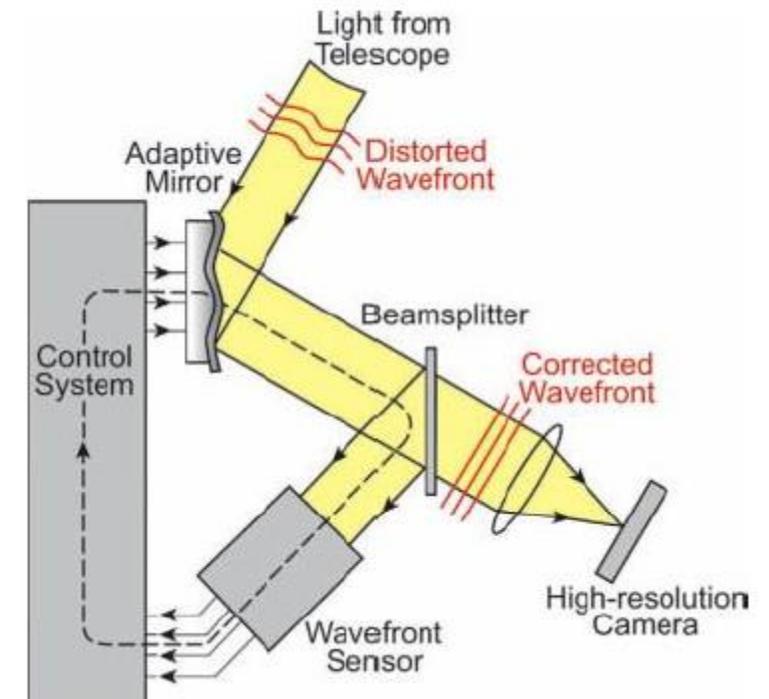
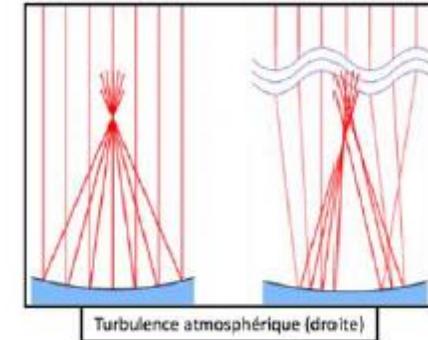
L'optique adaptative : s'affranchir de l'effet de l'atmosphère

Turbulences atmosphériques dégradent la résolution des grands télescopes. **Front d'onde** perturbé : le miroir ne réfléchit pas tous les rayons vers le même point focal, image floue.

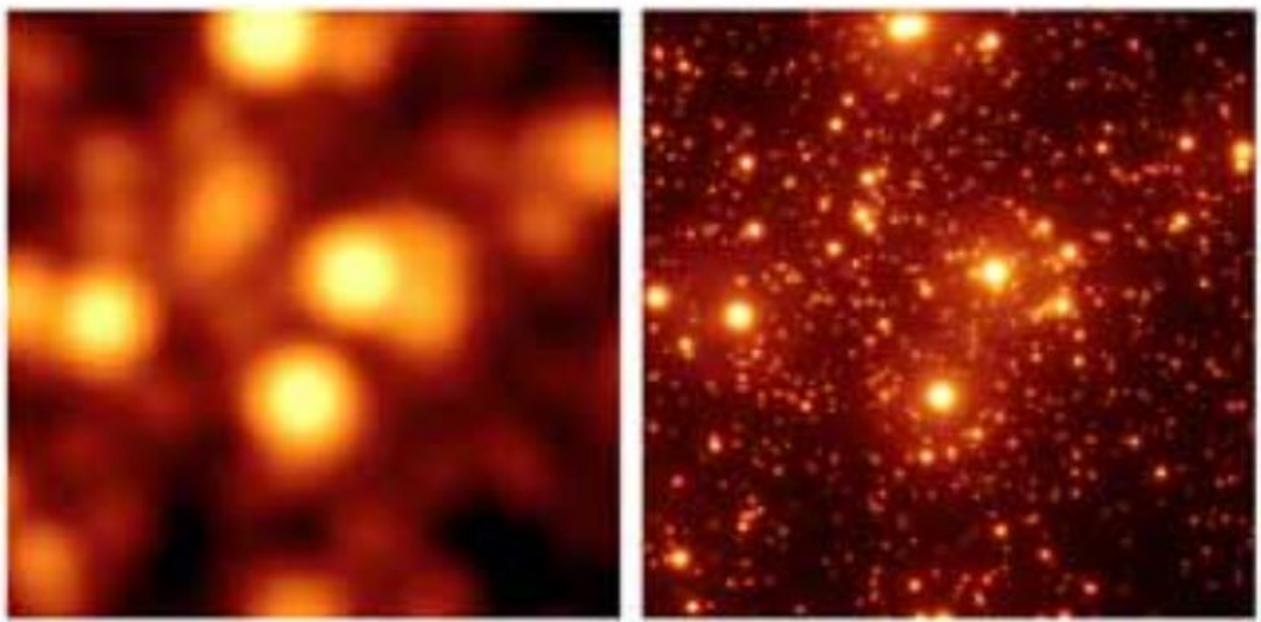
Correction possible par l'**optique adaptative** : analyse du front d'onde perturbé et déformation du miroir pour compenser la distorsion du front d'onde.



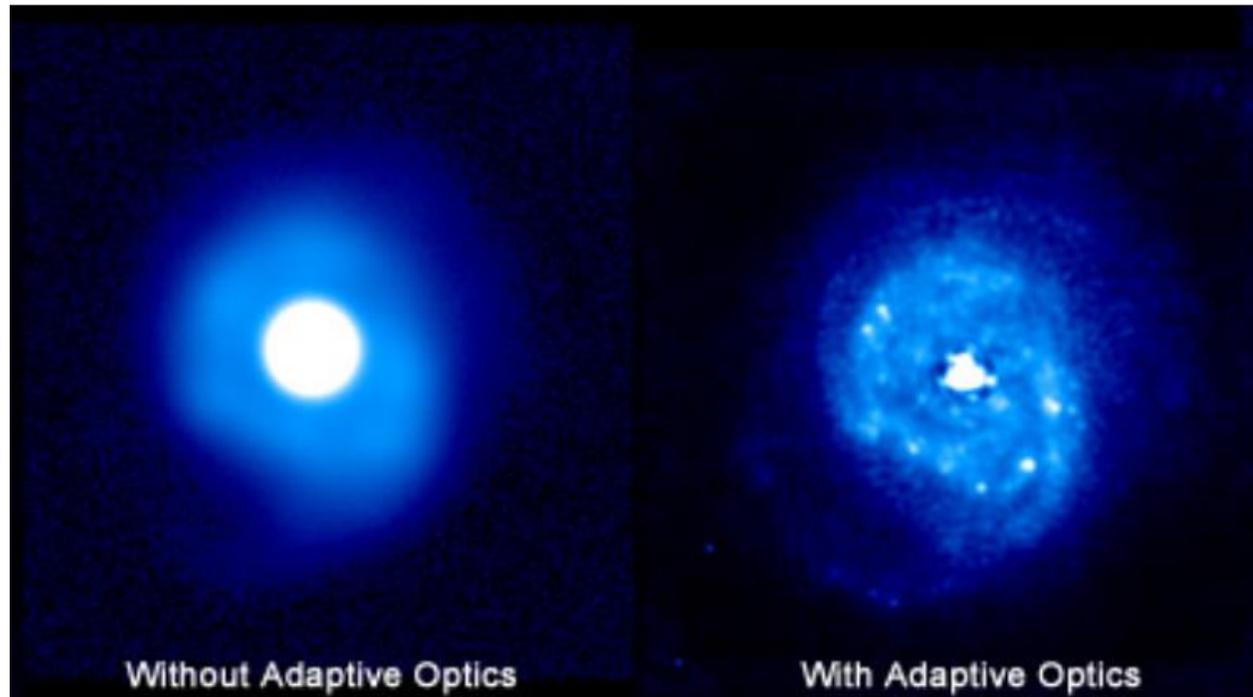
Neptune avec et sans optique adaptative



- Adaptive optics:



The Galactic center in the near-IR



Without Adaptive Optics

With Adaptive Optics

Mais au fait c'est quoi physiquement la lumière qu'on observe depuis tt ce temps ?

Qu'est ce la lumière ?

- Définition ?
- Un seul type de lumière ?
- Qui émet de la lumière en astro ?

Qu'est ce la lumière ?

- Définition ?

La matière, et donc la **lumière**, est à la fois une **onde** et une **particule transportée par des photons**.

- Un seul type de lumière ?

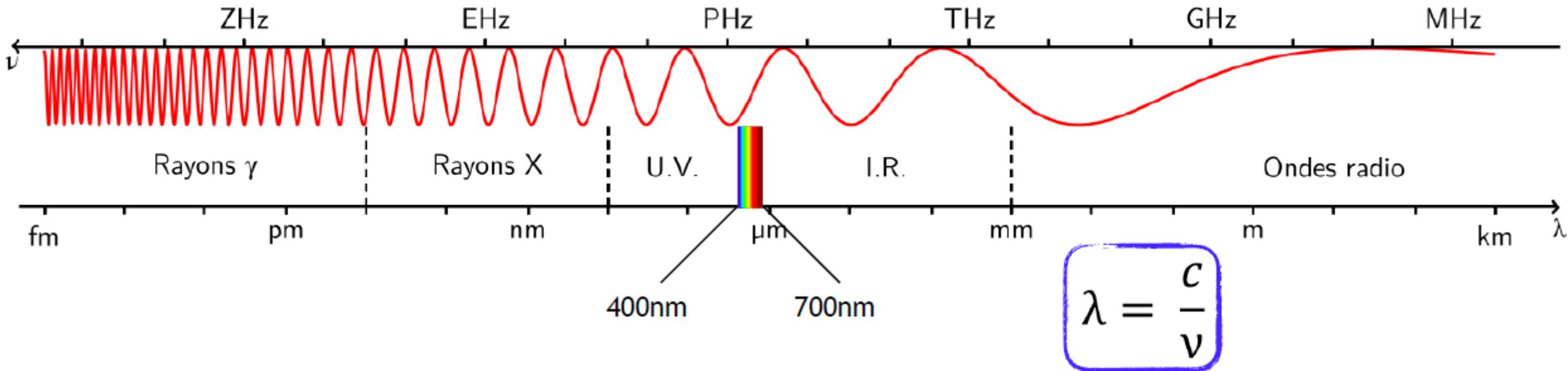
- Qui émet de la lumière en astro ?

Qu'est ce la lumière ?

- Définition ?

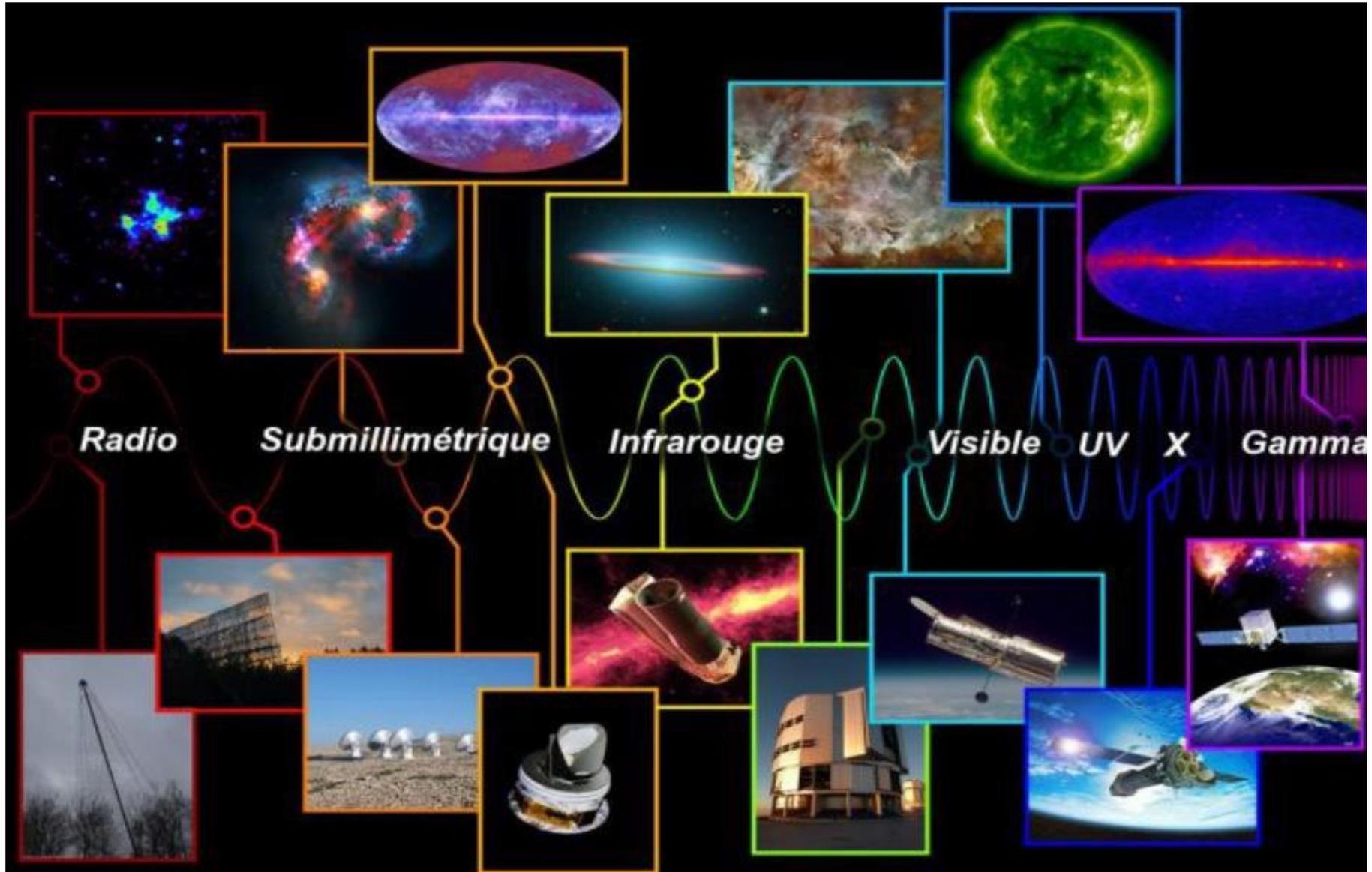
La matière, et donc la **lumière**, est à la fois une **onde** et une **particule transportée par des photons**.

- Un seul type de lumière ?

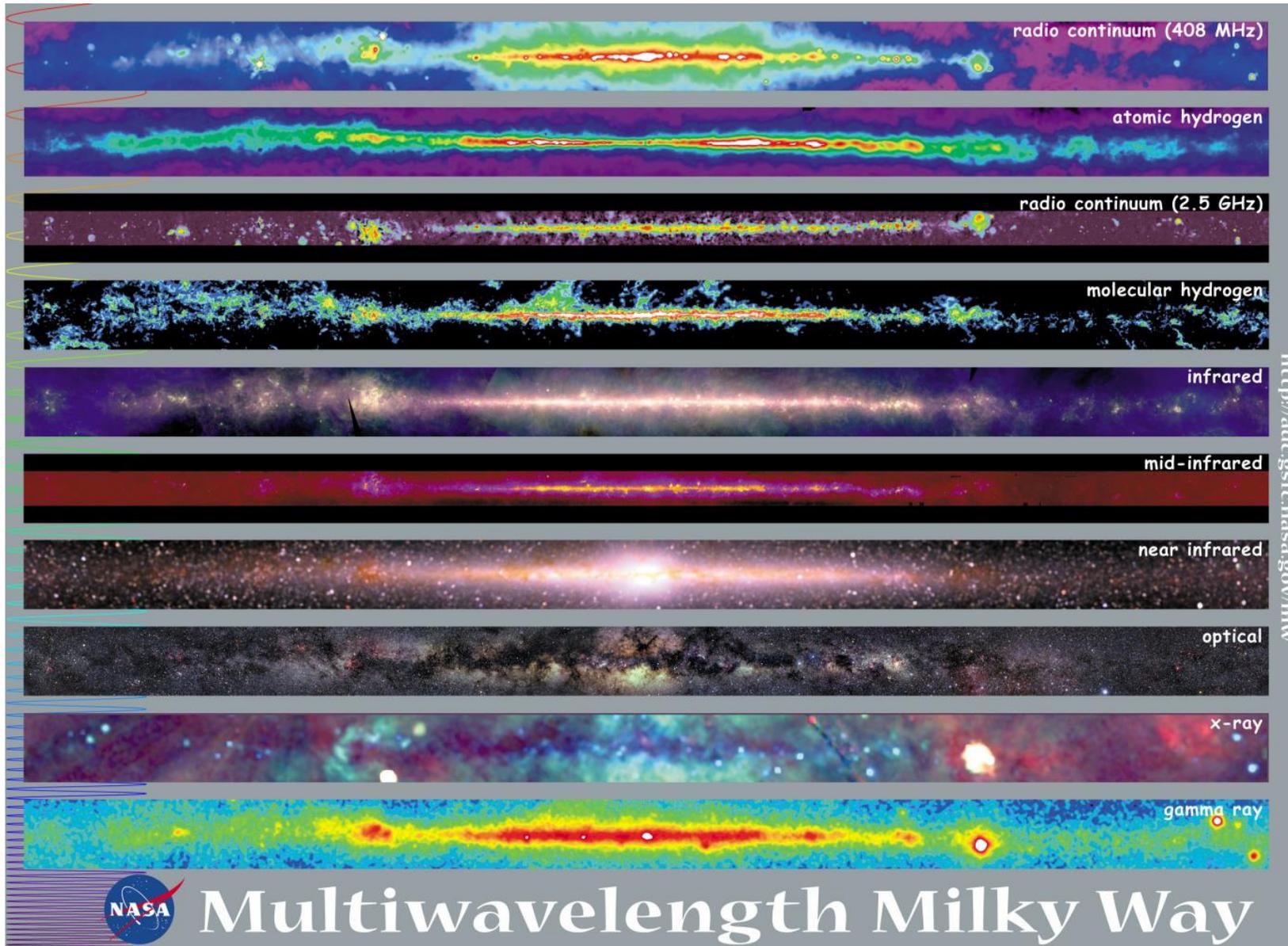


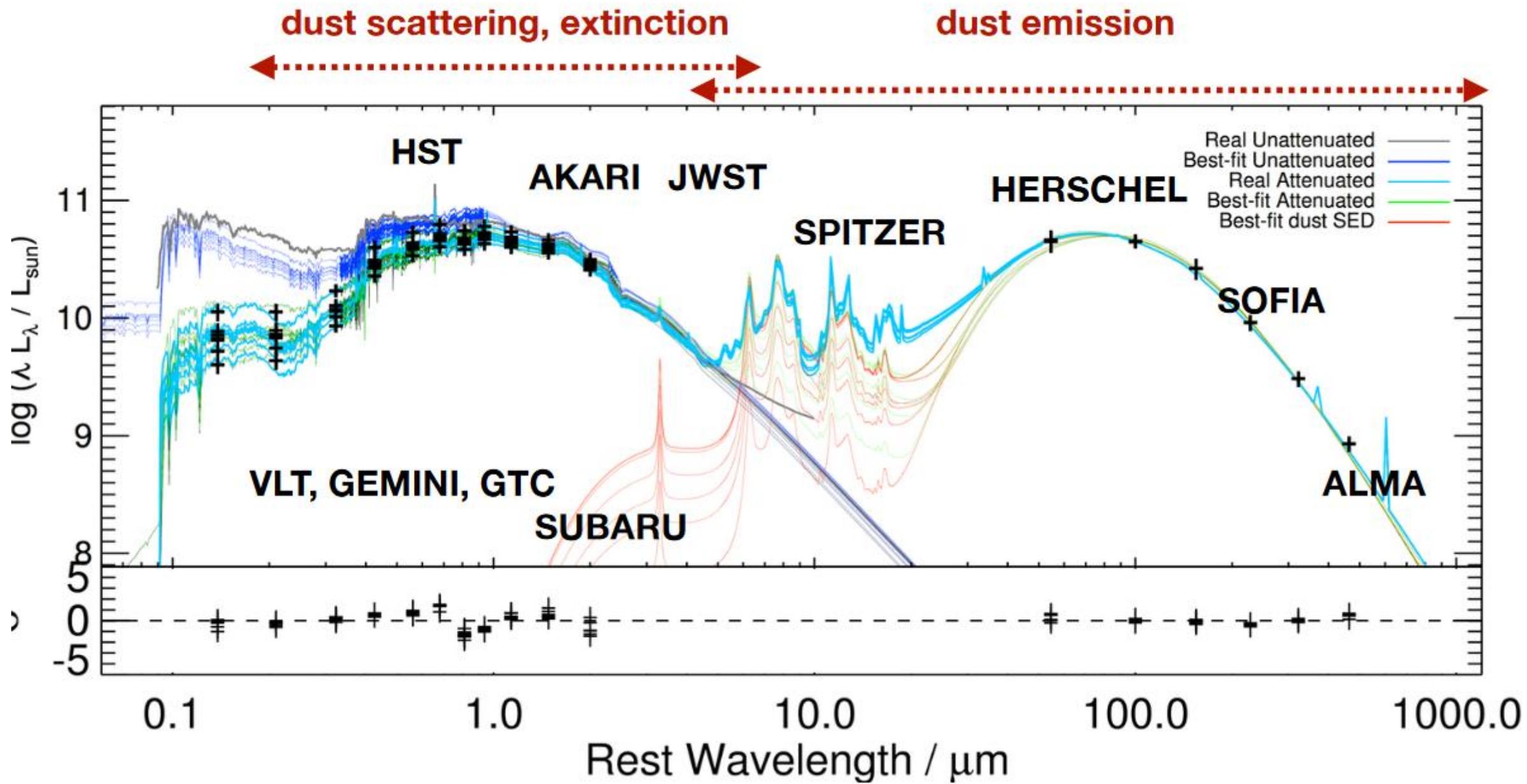
-> jusqu'au milieu du 20ème siècle, uniquement le domaine **visible** utilisé en astrophysique.

Mesure de la lumière en astrophysique



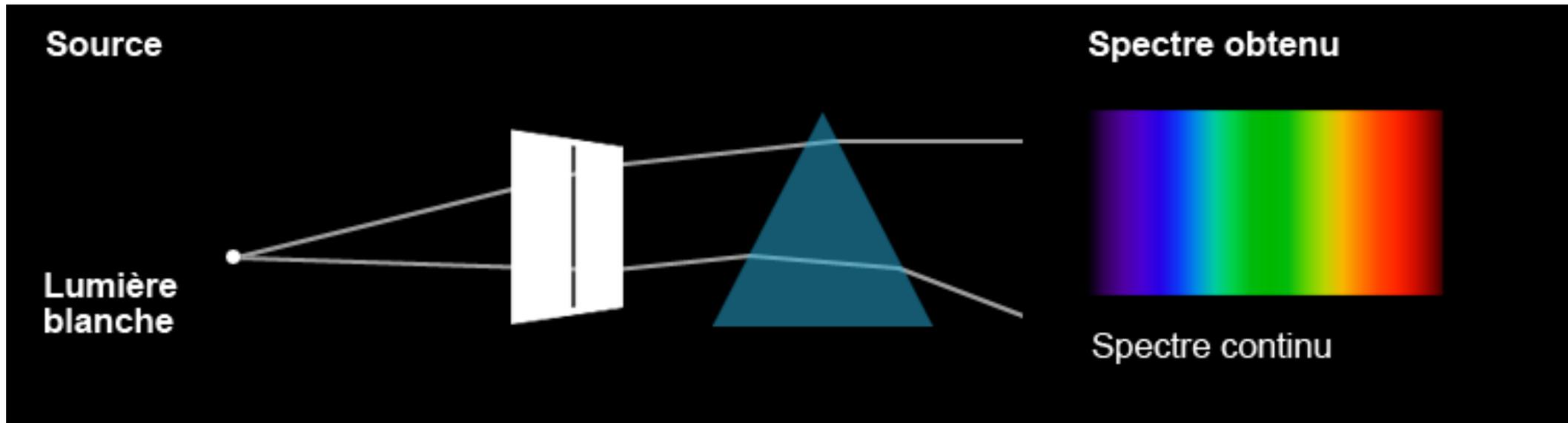
La voie lactée à différentes longueurs d'ondes





Naissance de la spectroscopie

Spectroscopie = étude du spectre



Utilisation de spectre ou de réseaux pour diffracter la lumière et étudier sa décomposition en différentes longueur d'ondes.

Plusieurs types de rayonnement en astrophysique

Comprendre les processus physiques d'**émission** de la lumière permet d'obtenir des informations sur les propriétés de l'objet émetteur.

Univers = grande diversité d'objets, mais heureusement, nombre relativement limité de mécanismes d'émission du rayonnement

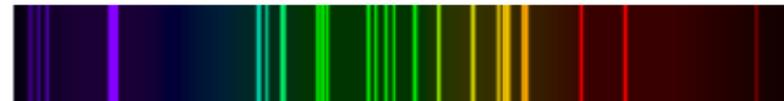
émission = processus qui aboutit à la création d'un photon par de la matière

On divise les processus d'émission en 2 catégories :

- L'émission **continue** (dans une large gamme spectrale)
=> le corps noir, aussi appelée émission **thermique**



- L'émission **monochromatique** (à une fréquence précise et fréquences proches)
=> émission **non thermique**



Plusieurs types de rayonnement en astrophysique

Comprendre les processus physiques d'**émission** de la lumière permet d'obtenir des informations sur les propriétés de l'objet émetteur.

Univers = grande diversité d'objets, mais heureusement, nombre relativement limité de mécanismes d'émission du rayonnement

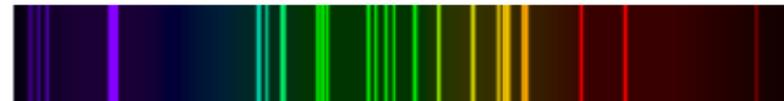
émission = processus qui aboutit à la création d'un photon par de la matière

On divise les processus d'émission en 2 catégories :

- L'émission **continue** (dans une large gamme spectrale)
=> le corps noir, aussi appelée émission **thermique**



- L'émission **monochromatique** (à une fréquence précise et fréquences proches)
=> émission **non thermique**



Le rayonnement du corps noir

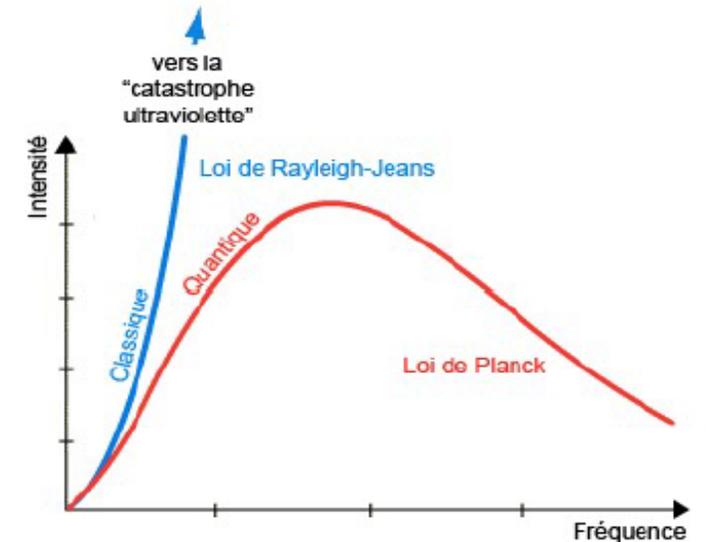
Le corps noir est un objet idéal qui absorberait parfaitement toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre.

Modèle classique de Rayleigh-Jeans: quand λ devient grand, la luminosité tend vers l'infini :
Problème de la catastrophe ultra-violette

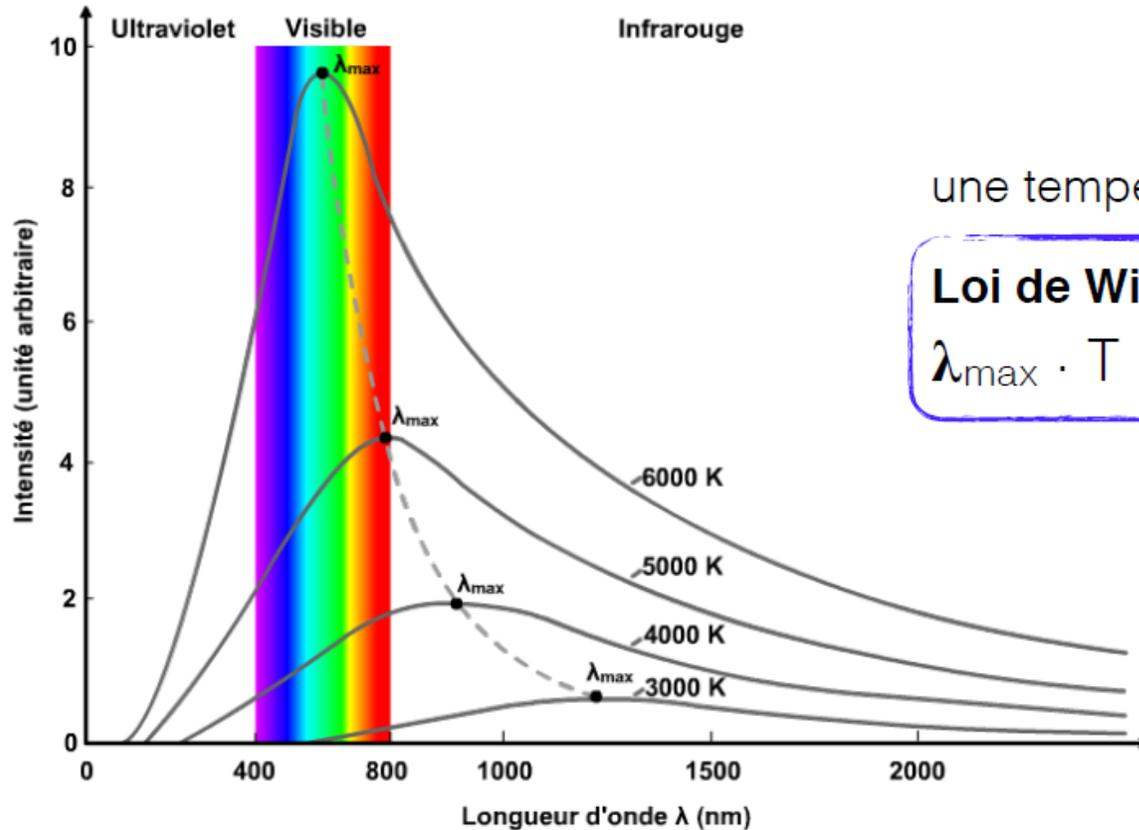
Planck introduit le concept que la lumière est émise par paquets d'énergie => les **quanta**.

Il parvient à trouver une formule décrivant le rayonnement de corps noir.

$$E = h\nu$$



Le rayonnement du corps noir



une température = une « couleur »

Loi de Wien :

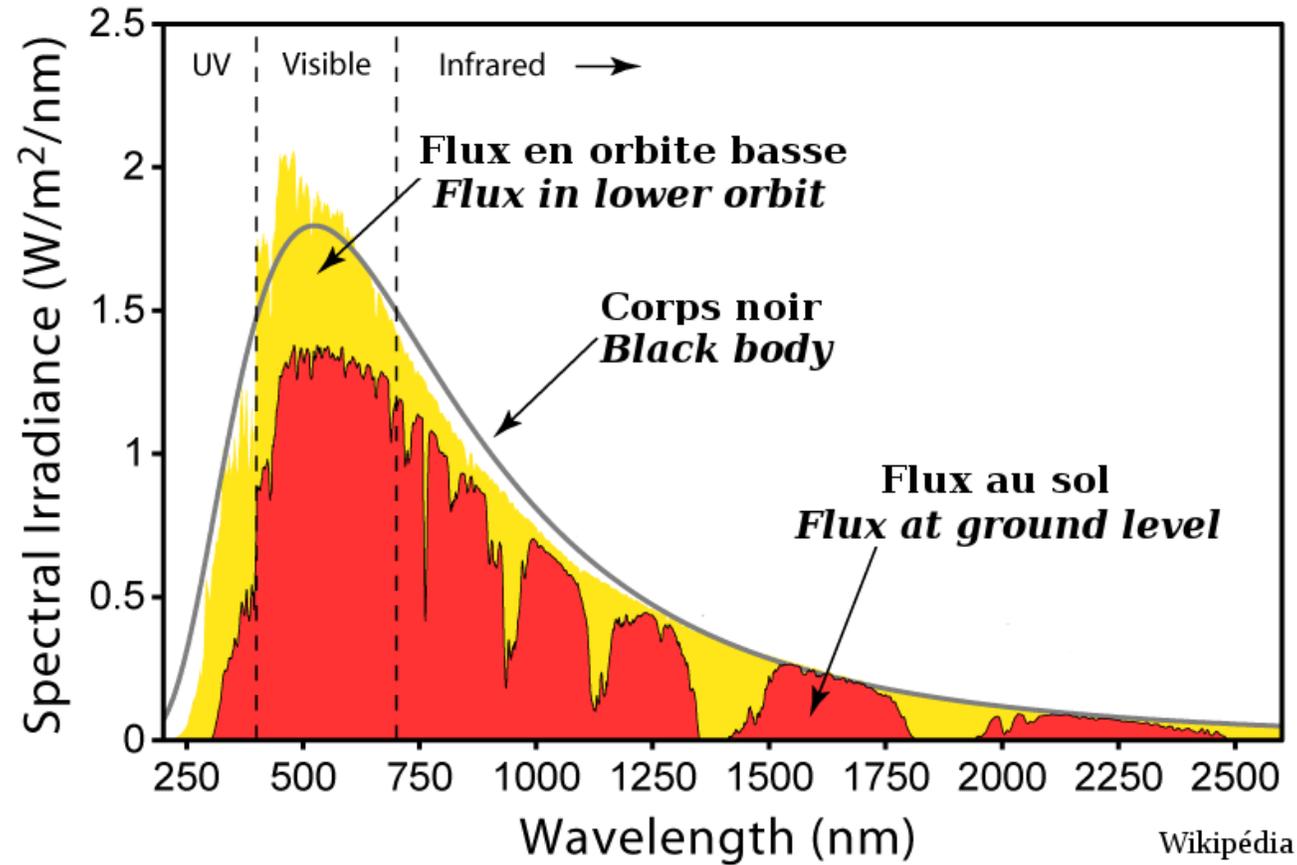
$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{Cste} = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ [K.m]}$$

Quelle puissance rayonne un corps noir de température T ?

Loi de Stefan : $P = \sigma \cdot T^4 \cdot S \text{ [W]}$

S la surface du corps noir

σ la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$



Sur le graphique ci-dessus, on a représenté le spectre solaire vu depuis le sol (courbe rouge) et le sommet de l'atmosphère (courbe jaune). Comment peut-on expliquer la différence entre ces deux courbes ?

- A Les détecteurs utilisés n'ont pas la même sensibilité.
- B L'absorption par l'atmosphère terrestre.
- C La pollution lumineuse.
- D L'émission des molécules dans l'atmosphère.

Première application : Étude de la température des étoiles

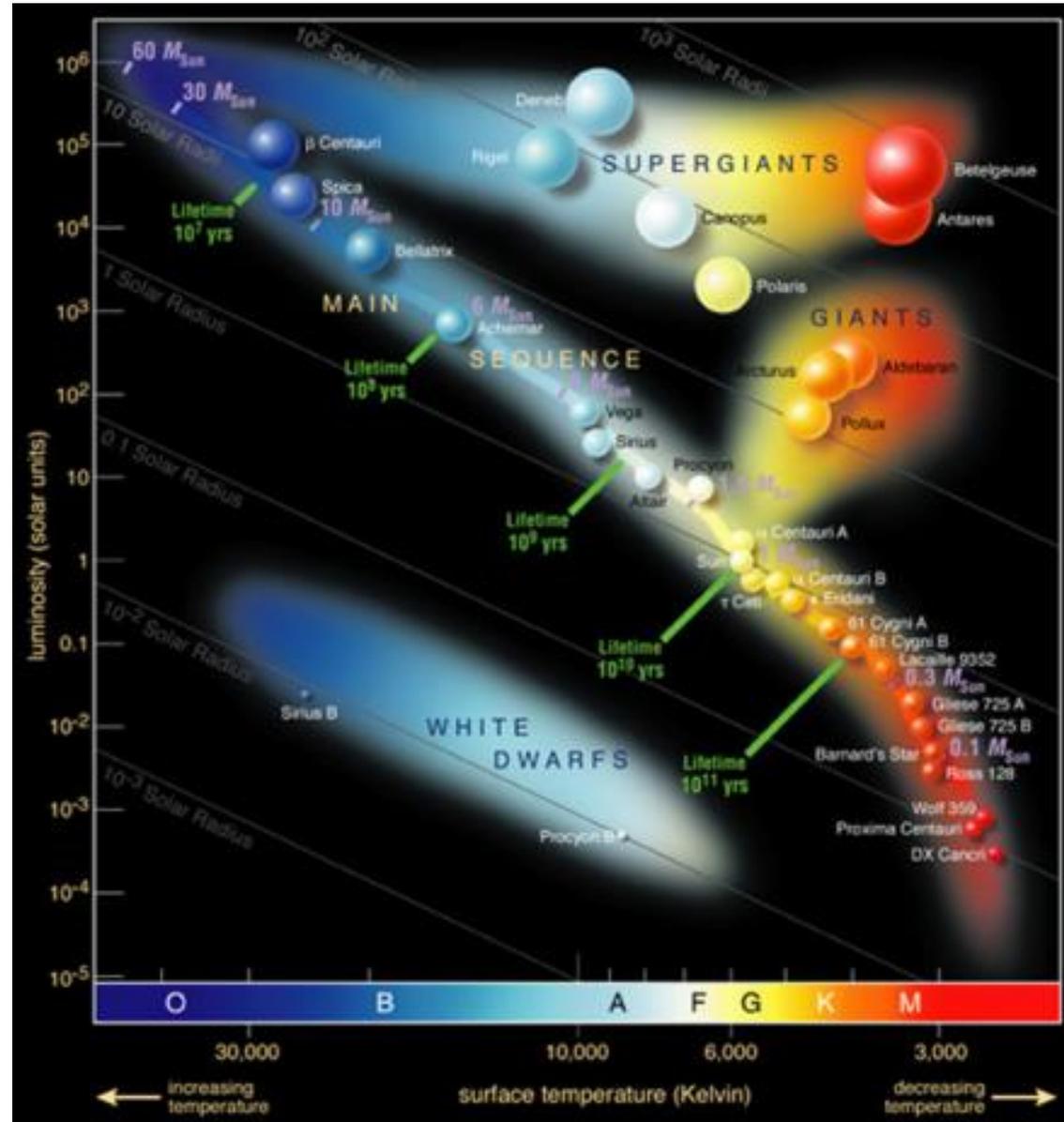
Mesure de la **luminosité** par photométrie (loi de Stefan une fois la distance connue)

En fct de :

mesure de la **température / couleur** d'une étoile grâce à leur spectre en utilisant la de Wien

-> permet une classification des étoiles : **Diagramme de Hertzsprung-Russell**

Voir dernière séance « vie et mort des étoiles »



Lien température – longueur d’onde

On augmente progressivement la température T d’un morceau de métal, et, pour chacune des températures, on mesure la longueur d’onde pour laquelle l’intensité lumineuse est maximale. On obtient les résultats suivants :

λ_{\max} (nm)	880	940	1010	1080	1170	1270	1400	1540	1730	1960
T (K)	3273	3073	2873	2673	2473	2273	2073	1873	1673	1473

En traçant la fonction $T = f(1 / \lambda_{\max})$, on trouve une relation linéaire.

Calculer la pente de la droite. Quelle est l’unité ?

Quelle relation reconnaissez-vous ? La transformer dans les unités S.I.

Lien température – longueur d’onde

On augmente progressivement la température T d’un morceau de métal, et, pour chacune des températures, on mesure la longueur d’onde pour laquelle l’intensité lumineuse est maximale. On obtient les résultats suivants :

λ_{\max} (nm)	880	940	1010	1080	1170	1270	1400	1540	1730	1960
T (K)	3273	3073	2873	2673	2473	2273	2073	1873	1673	1473

En traçant la fonction $T = f(1 / \lambda_{\max})$, on trouve une relation linéaire.

Calculer la pente de la droite. Quelle est l’unité ?

Quelle relation reconnaissez-vous ? La transformer dans les unités S.I.

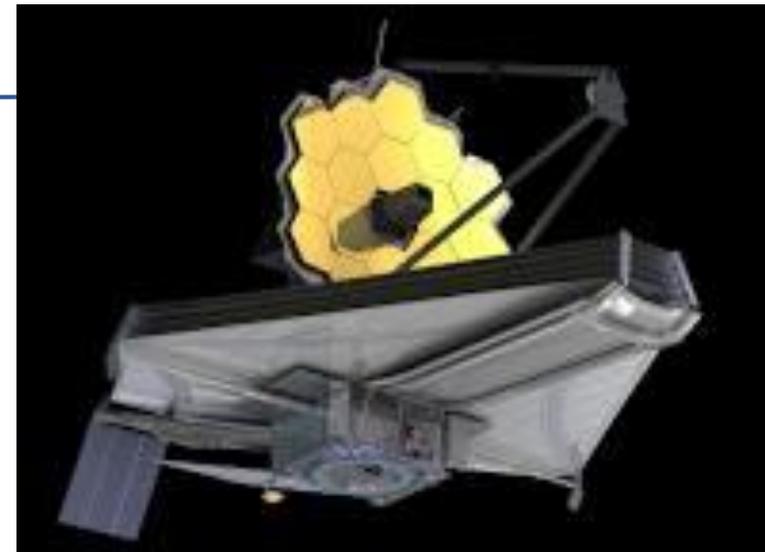
Comment calculer la pente ?

$$\text{pente} = (y_B - y_A) / (x_B - x_A) = 2,87 \cdot 10^6 \text{ K.nm}$$

Loi de Wien : $\lambda_{\max} \cdot T = \text{constante} = 2,87 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}$

⇒ Le métal se comporte aussi comme un corps noir

⇒ bcp de corps noir autour de nous :
Fond diffus cosmologique à 2.7K



Le JWST est le dernier grand télescope lancé en décembre 2021. Il a récemment pris des images infrarouges exceptionnelles permettant de mieux comprendre la formation des systèmes planétaires.

a) Expliquer la différence entre un télescope et une lunette. Citer une technique / méthode utilisée dans le cas de JWST pour améliorer les observations.

La première étoile que le JWST a observée est HD 84406. Le but de cette partie sera de caractériser cette étoile.

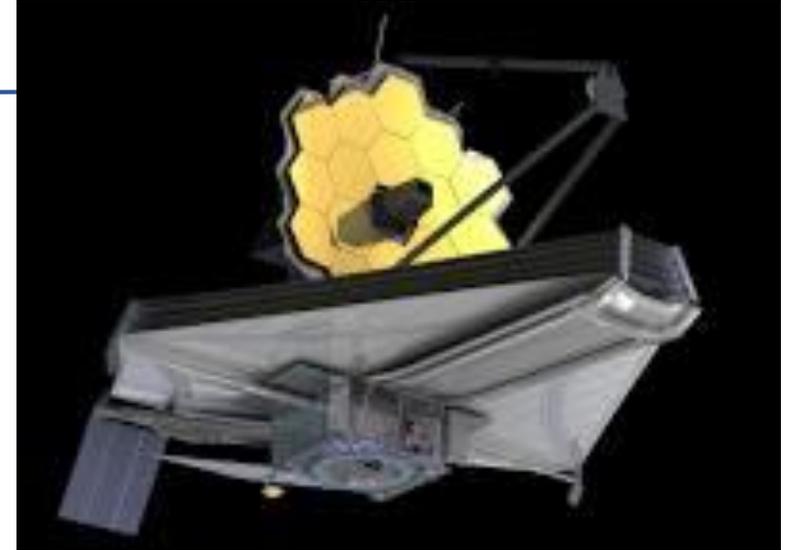
b) Quel type de rayonnement est émis par cette étoile ? Dessinez l'allure globale du spectre.

c) Son spectre atteint un maximum pour une longueur d'onde de 589 nm. De quelle couleur est cette étoile ? En utilisant la loi de Wien, estimer la température de cette étoile.

d) Quelle loi doit-on utiliser pour estimer la puissance rayonnée par cette étoile ?

Mesure du JWST

Le JWST est le dernier grand télescope lancé en décembre 2021. Il a récemment pris des images infrarouges exceptionnelles permettant de mieux comprendre la formation des systèmes planétaires.



a) Expliquer la différence entre un télescope et une lunette. Citer une technique / méthode utilisée dans le cas de JWST pour améliorer les observations.

Télescope = miroir

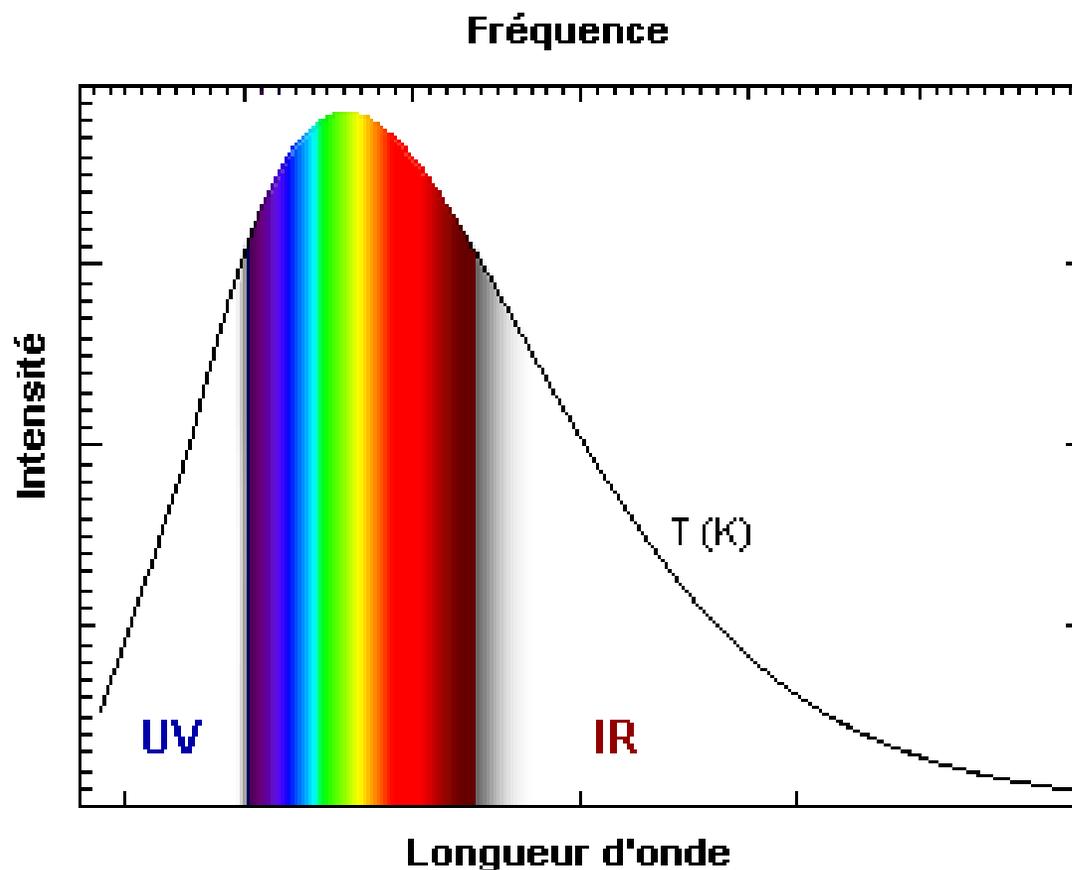
Lunette = lentille

Segmentation des miroirs

La première étoile que le JWST a observée est HD 84406. Le but de cette partie sera de caractériser cette étoile.

b) Quel type de rayonnement est émis par cette étoile ? Dessinez l'allure globale du spectre.

Spectre de corps noir



La première étoile que le JWST a observée est HD 84406. Le but de cette partie sera de caractériser cette étoile.

b) Quel type de rayonnement est émis par cette étoile ? Dessinez l'allure globale du spectre.

c) Son spectre atteint un maximum pour une longueur d'onde de 589 nm. De quelle couleur est cette étoile ? En utilisant la loi de Wien, estimer la température de cette étoile.

Etoile jaune

Loi de Wien :

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{Cste} = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ [K.m]}$$

$$T = 2.89 \cdot 10^{-3} / (589 \cdot 10^{-9}) = 4\,840 \text{ K} - \text{plus froid que le soleil (5\,800K)}$$

La première étoile que le JWST a observée est HD 84406. Le but de cette partie sera de caractériser cette étoile.

- b) Quel type de rayonnement est émis par cette étoile ? Dessinez l'allure globale du spectre.
- c) Son spectre atteint un maximum pour une longueur d'onde de 589 nm. De quelle couleur est cette étoile ? En utilisant la loi de Wien, estimer la température de cette étoile.
- d) Quelle loi doit-on utiliser pour estimer la puissance rayonnée par cette étoile ?

$$\text{Loi de Stefan : } P = \sigma \cdot T^4 \cdot S \text{ [W]}$$

S la surface du corps noir

σ la constante de Stefan-Boltzmann

Plusieurs types de rayonnement en astrophysique

Comprendre les processus physiques d'**émission** de la lumière permet d'obtenir des informations sur les propriétés de l'objet émetteur.

Univers = grande diversité d'objets, mais heureusement, nombre relativement limité de mécanismes d'émission du rayonnement

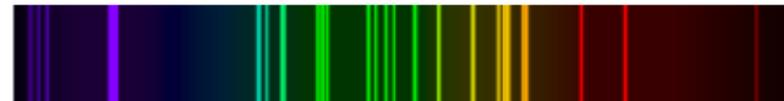
émission = processus qui aboutit à la création d'un photon par de la matière

On divise les processus d'émission en 2 catégories :

- L'émission **continue** (dans une large gamme spectrale)
=> le corps noir, aussi appelée émission **thermique**

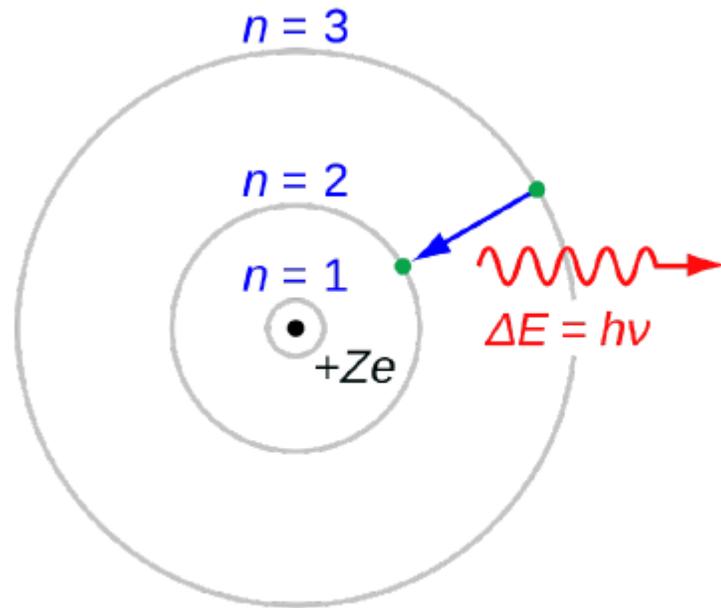


- L'émission **monochromatique** (à une fréquence précise et fréquences proches)
=> émission **non thermique**



L'émission non thermique

Le modèle de Bohr



Modèle planétaire :

noyau chargé '+' et électron chargé '-' gravitant autour

2 contraintes :

- Existence d'orbites stables (quantifiées)
- L'électron ne rayonne ou n'absorbe de l'énergie que lors d'un changement d'orbite

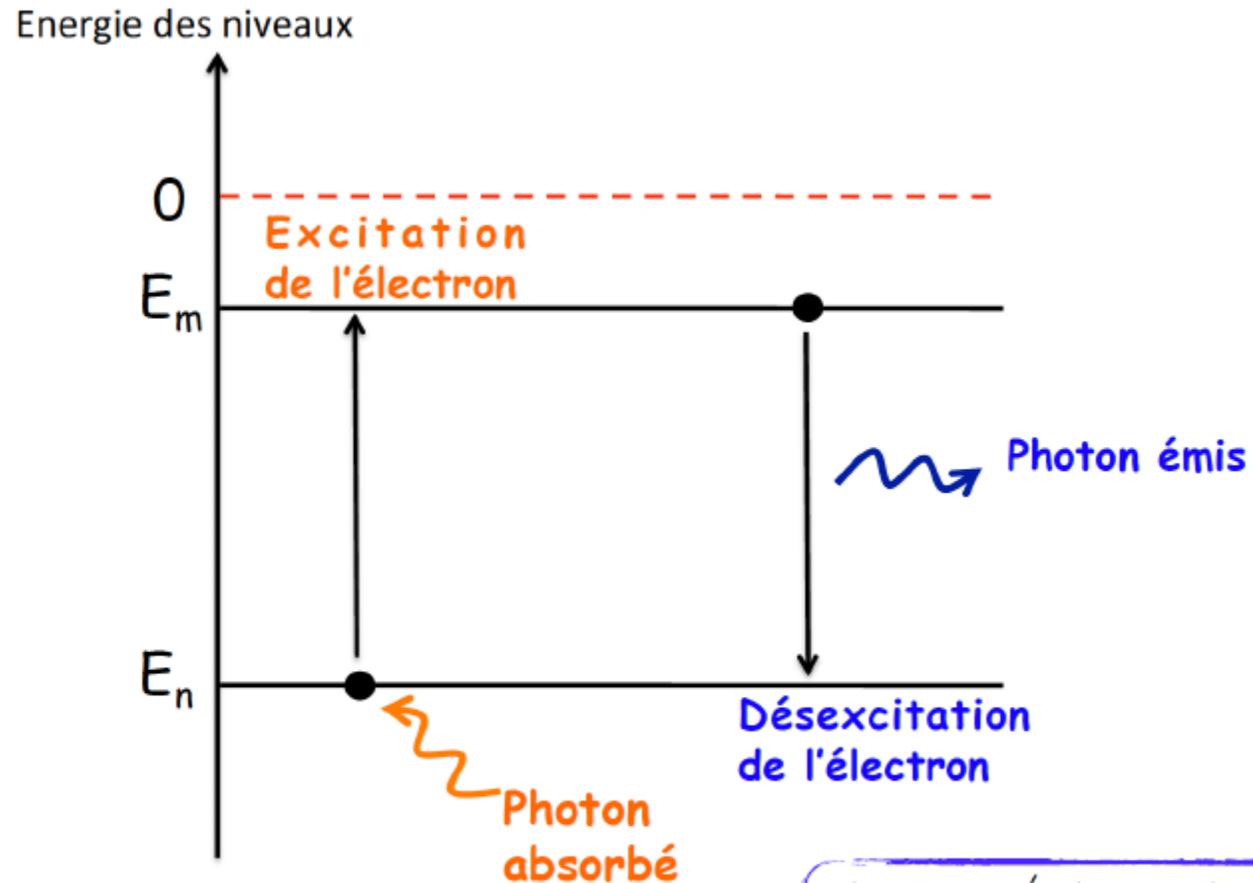
L'énergie du niveau 'n' est donnée par : $E_n = \frac{E_1}{n^2}$

Atome d'hydrogène

Niveau fondamental (plus basse énergie) : $E_1 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} = -13.6 \text{ eV}$

Énergie d'ionisation = énergie nécessaire pour arracher un électron : $E > 13,6 \text{ eV}$

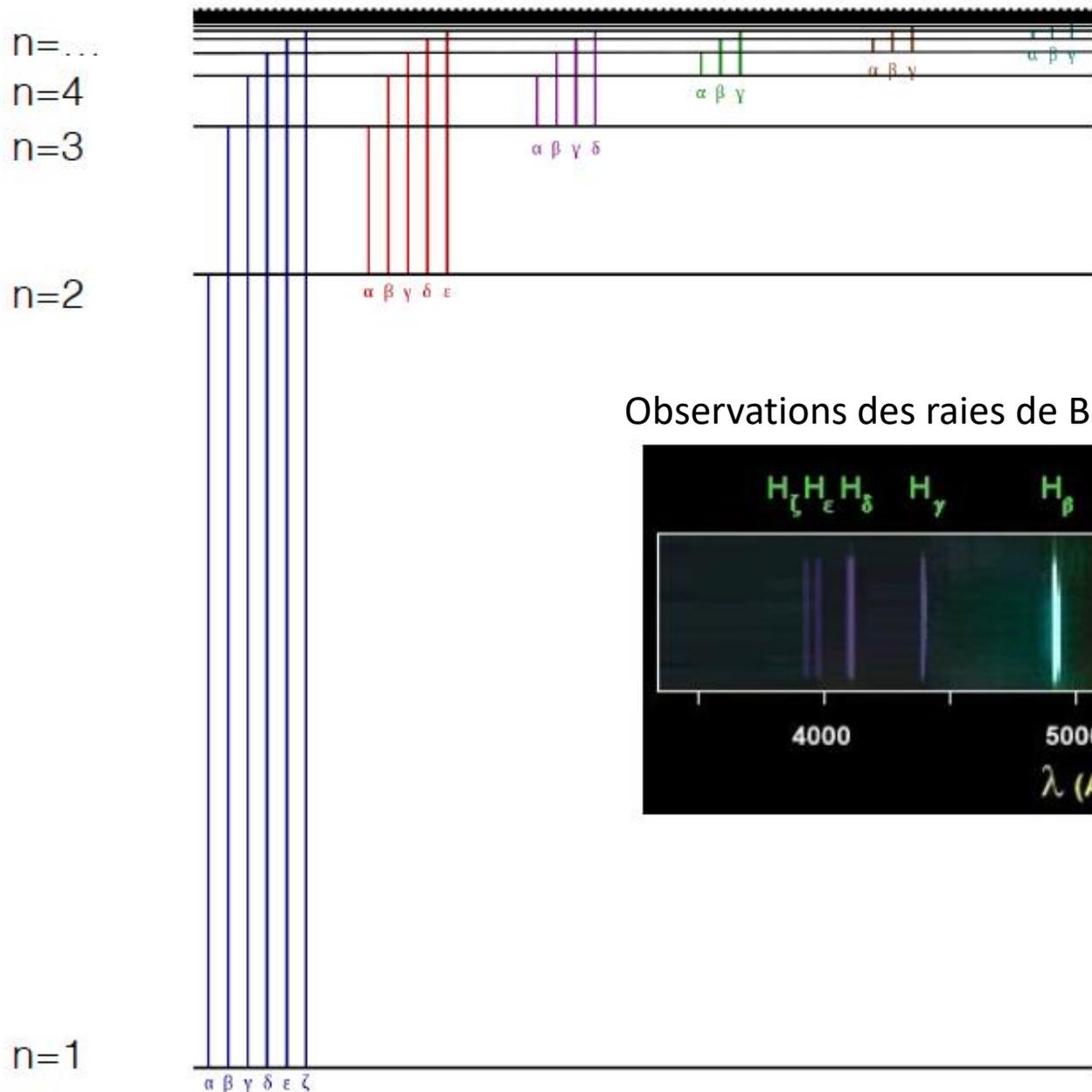
L'émission non thermique



$$\Delta E = |E_m - E_n| = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \Rightarrow$$

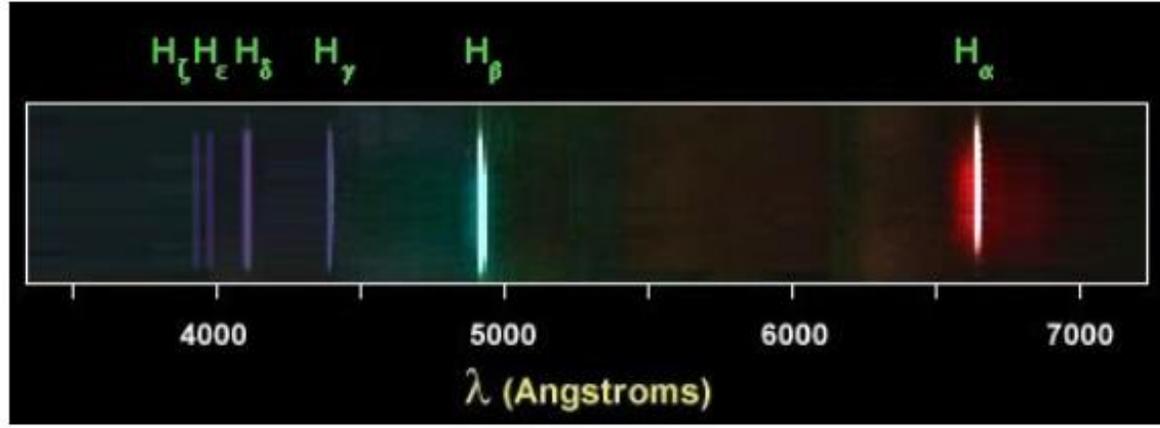
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Lyman (Ly) Balmer (H) Paschen Brackett (Br) Pfund Humphreys



Exemple des raies de l'hydrogène

Observations des raies de Balmer dans le domaine du visible



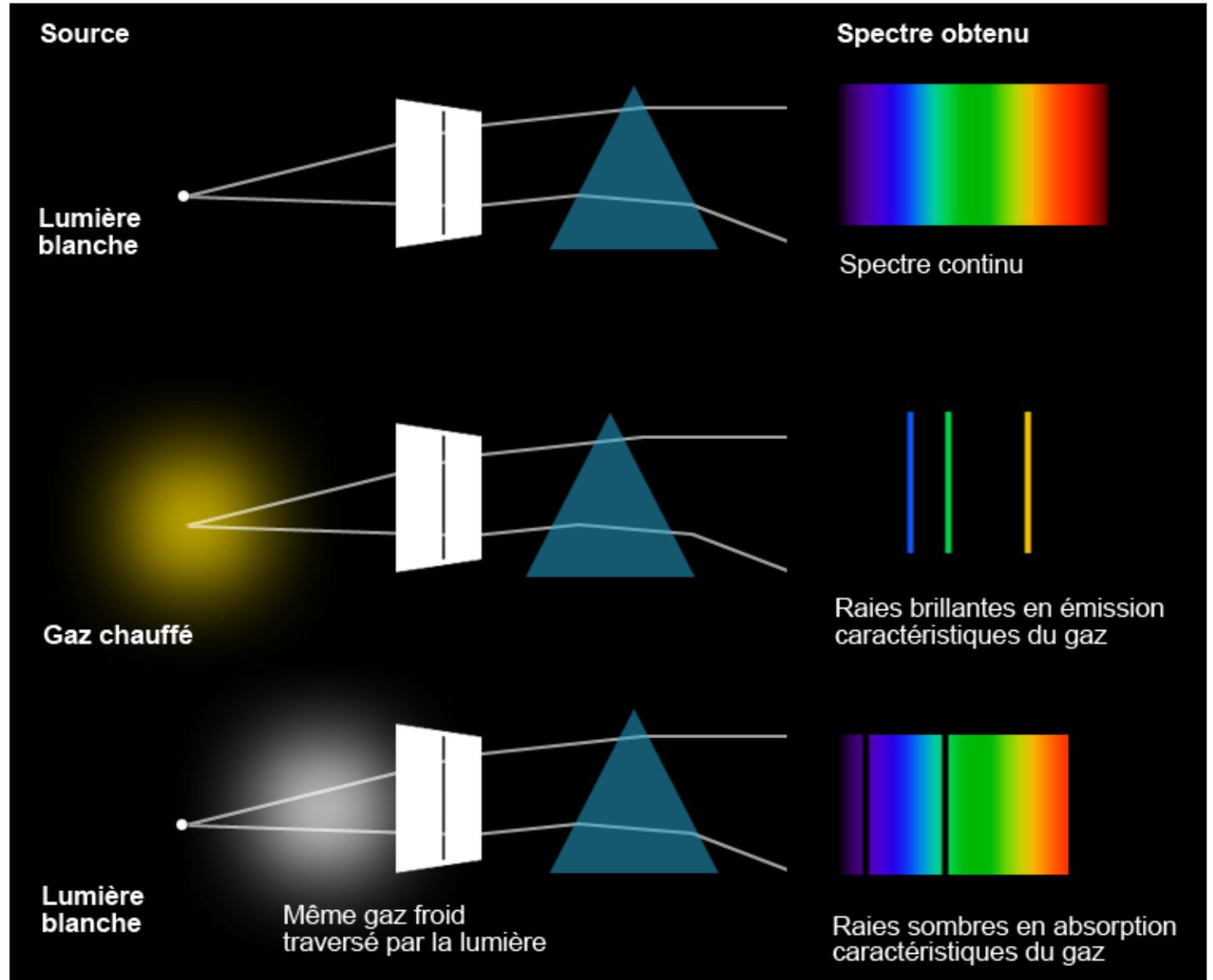
Deuxième application : Étude de la composition

Animation :

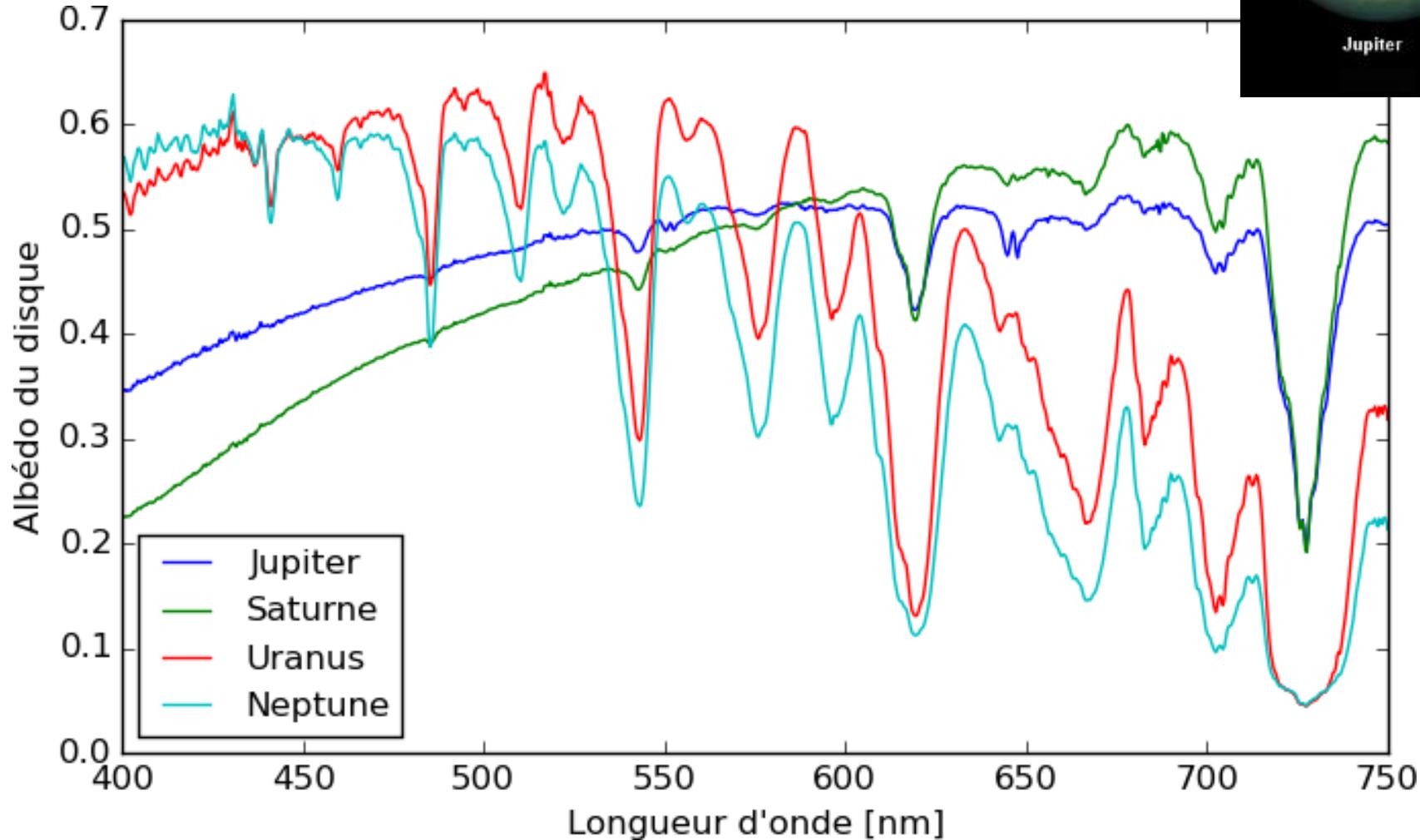
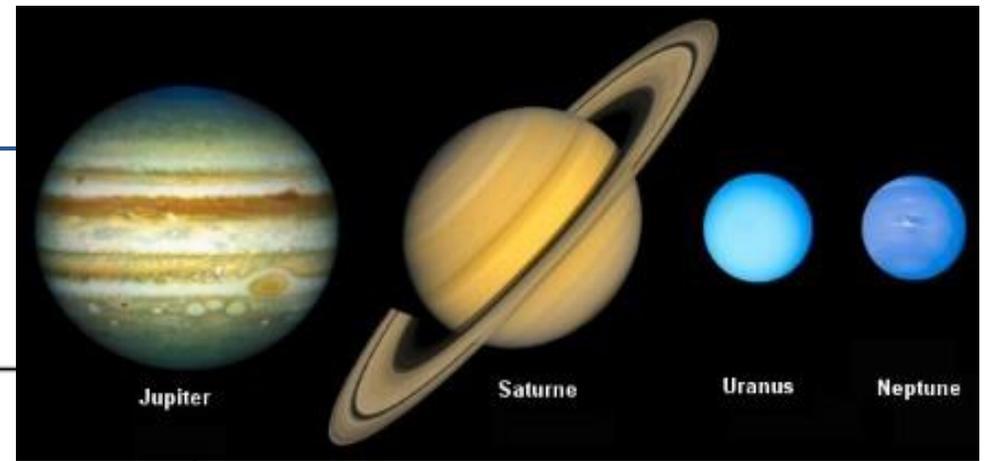
http://physique.ostralo.net/spectre_em_abs/

Lois de Kirchoff (1859) qui lient l'absorption et l'émission des raies

Les photons peuvent aussi être **absorbés** si ils croisent une molécule avec une énergie d'excitation égale à l'énergie du photon



Exemple des planètes géantes



L'albédo est la part des rayonnements solaires qui sont renvoyés

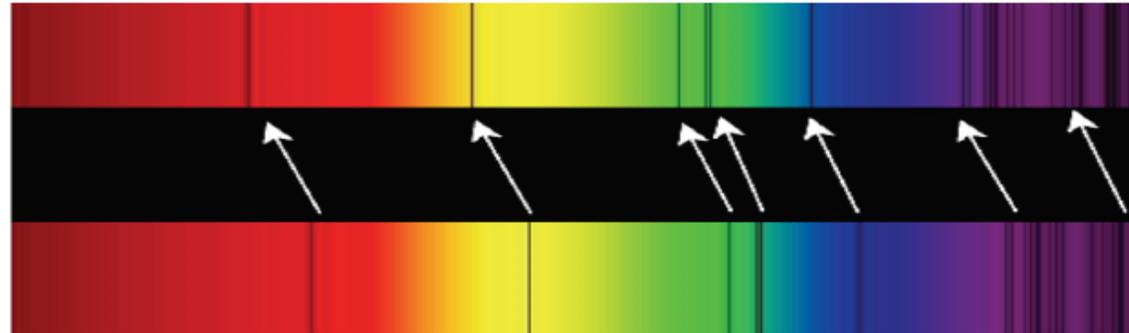
- faible albédo de Jupiter et Saturne dans le bleu
- fortes absorptions d'Uranus et Neptune dans le rouge (liées au méthane)

Modification des raies

Déplacement des raies => effet Doppler-Fizeau

Décalage de fréquence d'une onde EM entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre émetteur et récepteur varie au cours du temps.

$$\frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = -\frac{v_{em}}{c}$$



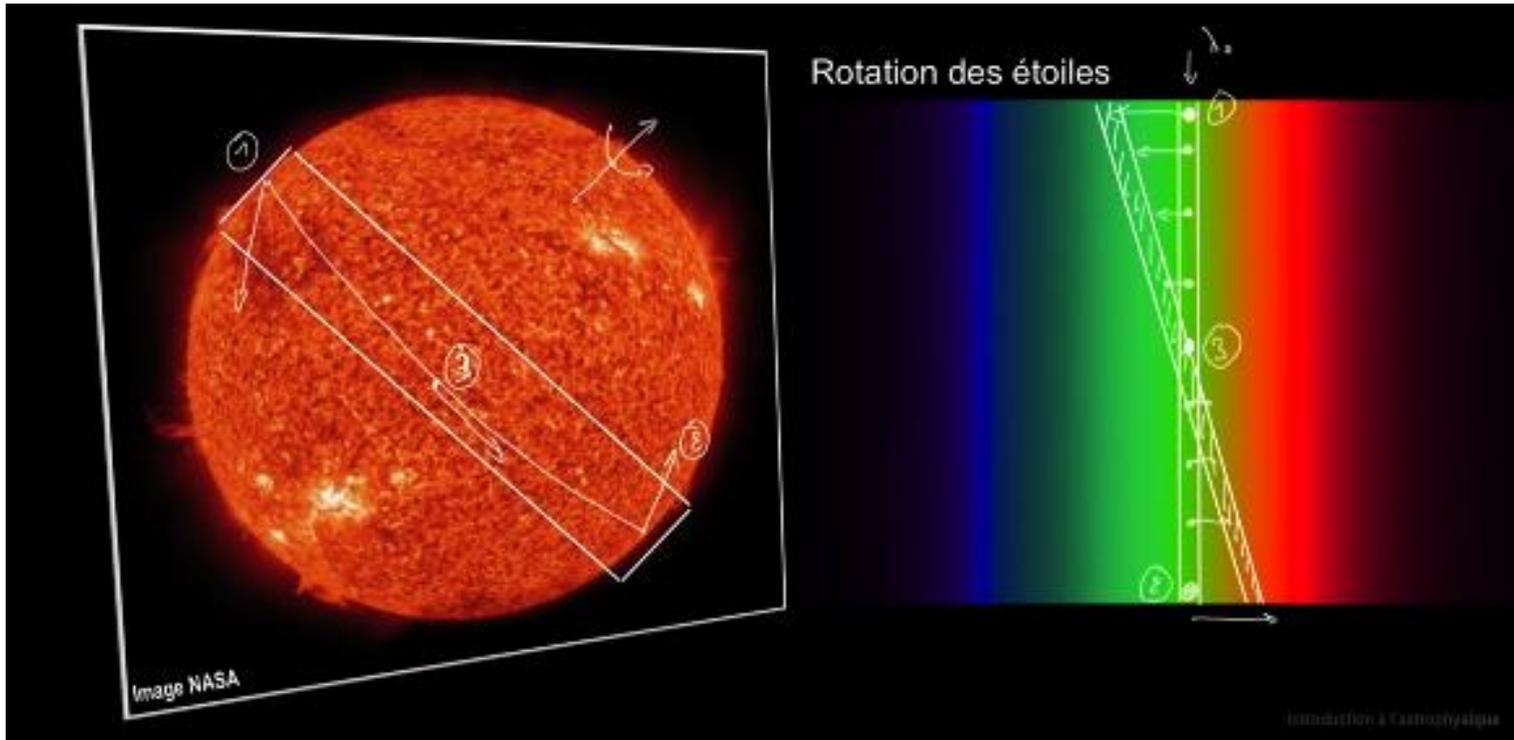
Élargissement des raies

=> **naturel** : on ne connaît pas la durée de vie d'un niveau excité (Heisenberg)

=> **Doppler** : l'agitation thermique provoque un mouvement désordonné

=> **collisionnel** : les collisions modifient les niveaux d'énergie

Utilisation de l'effet Doppler : mesure de la vitesse de rotation des astres



Mesure pris au niveau de l'équateur du soleil à travers une fente

Point 1 : vient vers nous
-> décalage vers le bleu

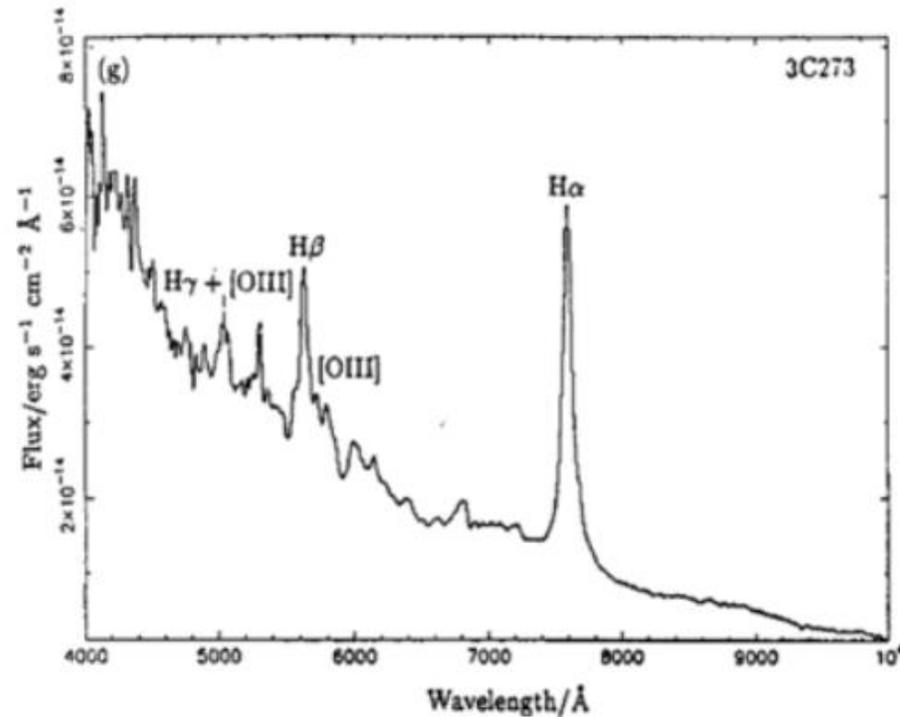
Point 2 : s'éloigne
-> décalage vers le rouge

Point 3 : pas de vitesse radiale
-> pas de décalage

Utilisation de l'effet Doppler : Mesure de la vitesse d'un quasar

Un quasar est un noyau actif de galaxie. Il est constitué d'un trou noir supermassif qui, contrairement à celui de la Voie Lactée, accrète beaucoup de matière. Cette activité confère au quasar une luminosité très importante (typiquement 10^{40} W) nous permettant de les détecter à des distances énormes. Le quasar 3C273, l'un des plus proches de la Terre, a été le premier à être identifié.

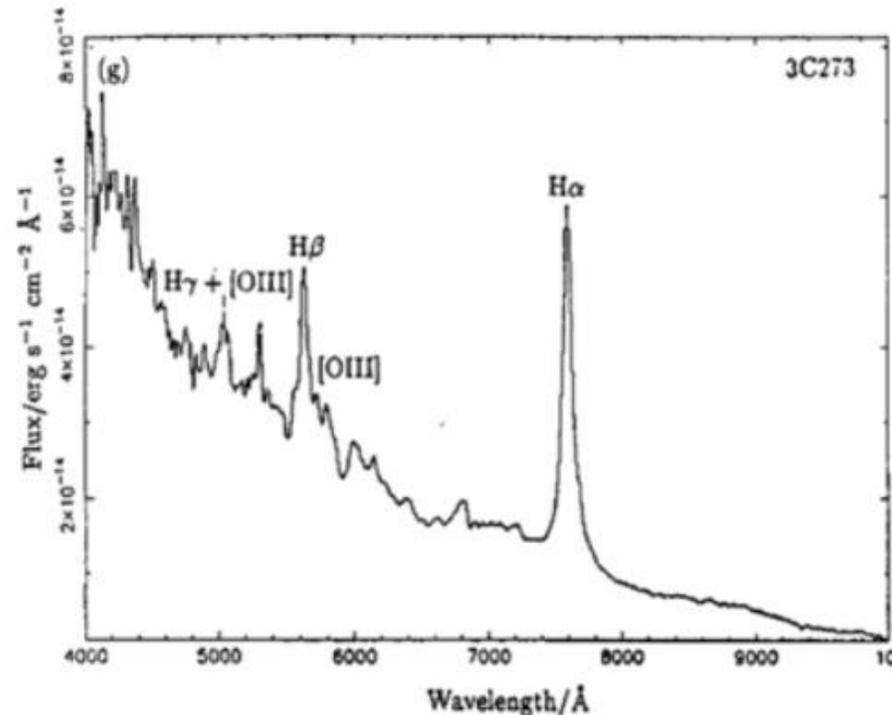
1. La figure suivante montre le spectre du quasar. De quel type de spectre s'agit-il ? Identifier les positions des raies H α et H β en 'nm'. Dans quel domaine spectral sont-elles situées ?



Utilisation de l'effet Doppler : Mesure de la vitesse d'un quasar

Un quasar est un noyau actif de galaxie. Il est constitué d'un trou noir supermassif qui, contrairement à celui de la Voie Lactée, accrète beaucoup de matière. Cette activité confère au quasar une luminosité très importante (typiquement 10^{40} W) nous permettant de les détecter à des distances énormes. Le quasar 3C273, l'un des plus proches de la Terre, a été le premier à être identifié.

1. La figure suivante montre le spectre du quasar. De quel type de spectre s'agit-il ? Identifier les positions des raies $H\alpha$ et $H\beta$ en 'nm'. Dans quel domaine spectral sont-elles situées ?



Il s'agit d'un spectre en émission dans le domaine Visible.

$$H\alpha = 760 \text{ nm}$$

$$H\beta = 565 \text{ nm}$$

Utilisation de l'effet Doppler : Mesure de la vitesse d'un quasar

2.1. Définissez ce que sont ces raies. Calculer leurs positions théoriques.

On rappelle pour cela la formule de Rydberg permettant de retrouver le spectre de l'atome d'Hydrogène :

$$\frac{1}{\lambda_{\text{vac}}} = R_{\text{H}} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \text{avec } R_{\text{H}} = 10,97 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1} \text{ et } n_1 < n_2 \text{ des entiers.}$$

Utilisation de l'effet Doppler : Mesure de la vitesse d'un quasar

2.1. Définissez ce que sont ces raies. Calculer leurs positions théoriques.

On rappelle pour cela la formule de Rydberg permettant de retrouver le spectre de l'atome d'Hydrogène :

$$\frac{1}{\lambda_{\text{vac}}} = R_{\text{H}} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \text{avec } R_{\text{H}} = 10,97 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1} \text{ et } n_1 < n_2 \text{ des entiers.}$$

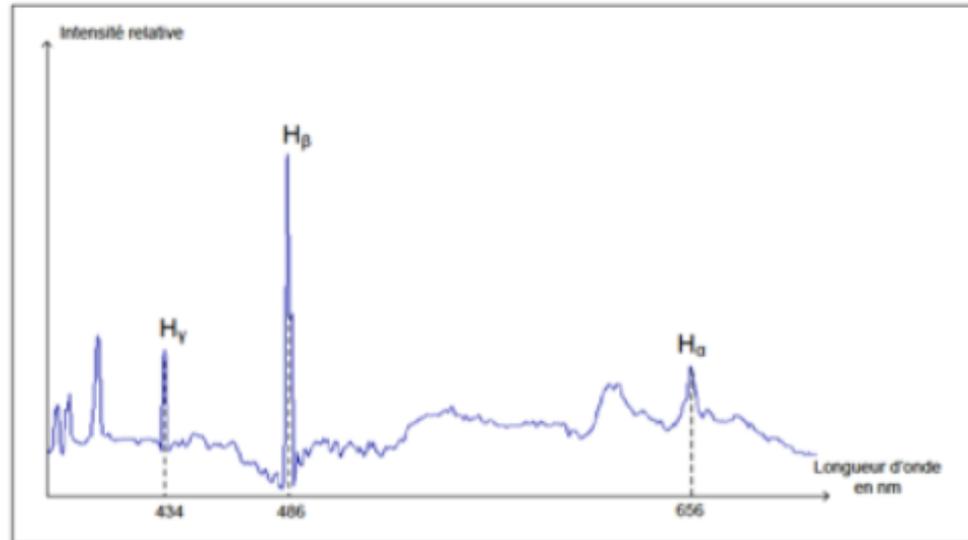
Ce sont les raies de Balmer issues de la transition électronique de l'atome H vers le niveau d'énergie $n = 2$

$$1 / \lambda_{\text{H}\alpha} = R_{\text{H}} (1 / 2^2 - 1/3^2) \text{ donc } \lambda_{\text{H}\alpha} = 656,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 / \lambda_{\text{H}\beta} = R_{\text{H}} (1 / 2^2 - 1/4^2) \text{ donc } \lambda_{\text{H}\beta} = 486,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Utilisation de l'effet Doppler : Mesure de la vitesse d'un quasar

2.2. Comparer vos valeurs au spectre mesuré en laboratoire ci-dessous :



On lit :

H α = 656 nm

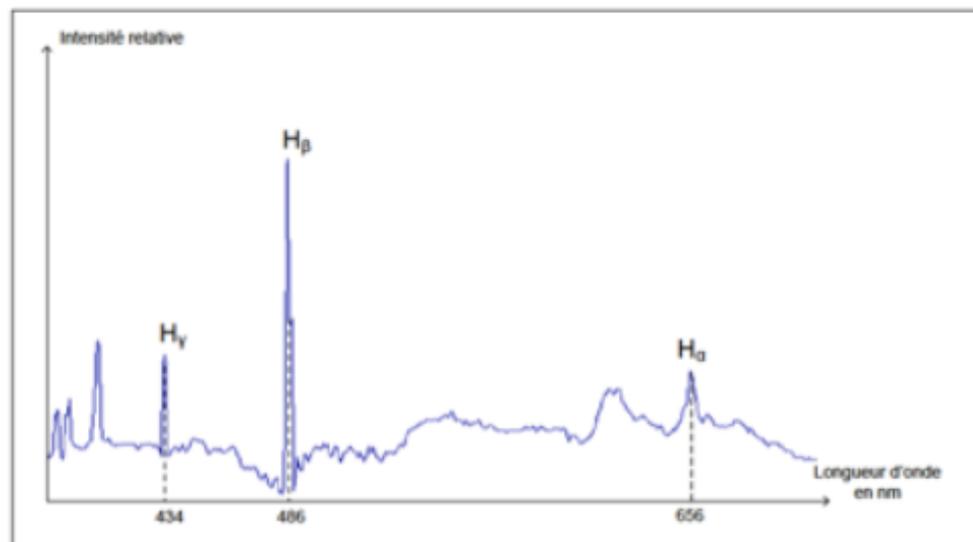
H β = 486 nm

3. Que pouvez-vous en conclure pour le spectre du quasar ?

4. En utilisant la formule de l'effet Doppler-Fizeau (changement de fréquence d'une onde lumineuse quand la source lumineuse est en mouvement par rapport à l'observateur), calculer la vitesse du quasar par rapport à la Terre : $\lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{em}} = 1 - (v / c)$ avec c la vitesse de la lumière.

Utilisation de l'effet Doppler : Mesure de la vitesse d'un quasar

2.2. Comparer vos valeurs au spectre mesuré en laboratoire ci-dessous :



Les bandes ne sont pas aux mêmes positions, elles se sont déplacées.

On lit :
 $H\alpha = 656 \text{ nm}$
 $H\beta = 486 \text{ nm}$

3. Que pouvez-vous en conclure pour le spectre du quasar ?

Le quasar est en mouvement par rapport à la Terre.

4. En utilisant la formule de l'effet Doppler-Fizeau (changement de fréquence d'une onde lumineuse quand la source lumineuse est en mouvement par rapport à l'observateur), calculer la vitesse du quasar par rapport à la Terre : $\lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{em}} = 1 - (v / c)$ avec c la vitesse de la lumière.

$$\text{La vitesse du quasar est } v_q = c * (\lambda_{\text{em}} - \lambda_{\text{obs}}) / \lambda_{\text{em}} = 48\,000 \text{ km.s}^{-1}$$

Utilisation de l'effet Doppler : calcul de la vitesse d'expansion de l'univers

Mesure de la vitesse des galaxies par effet doppler et de leur distance

Graphique de $V_{\text{galaxie}} = H_0 \cdot \text{distance}$

En déduire H_0

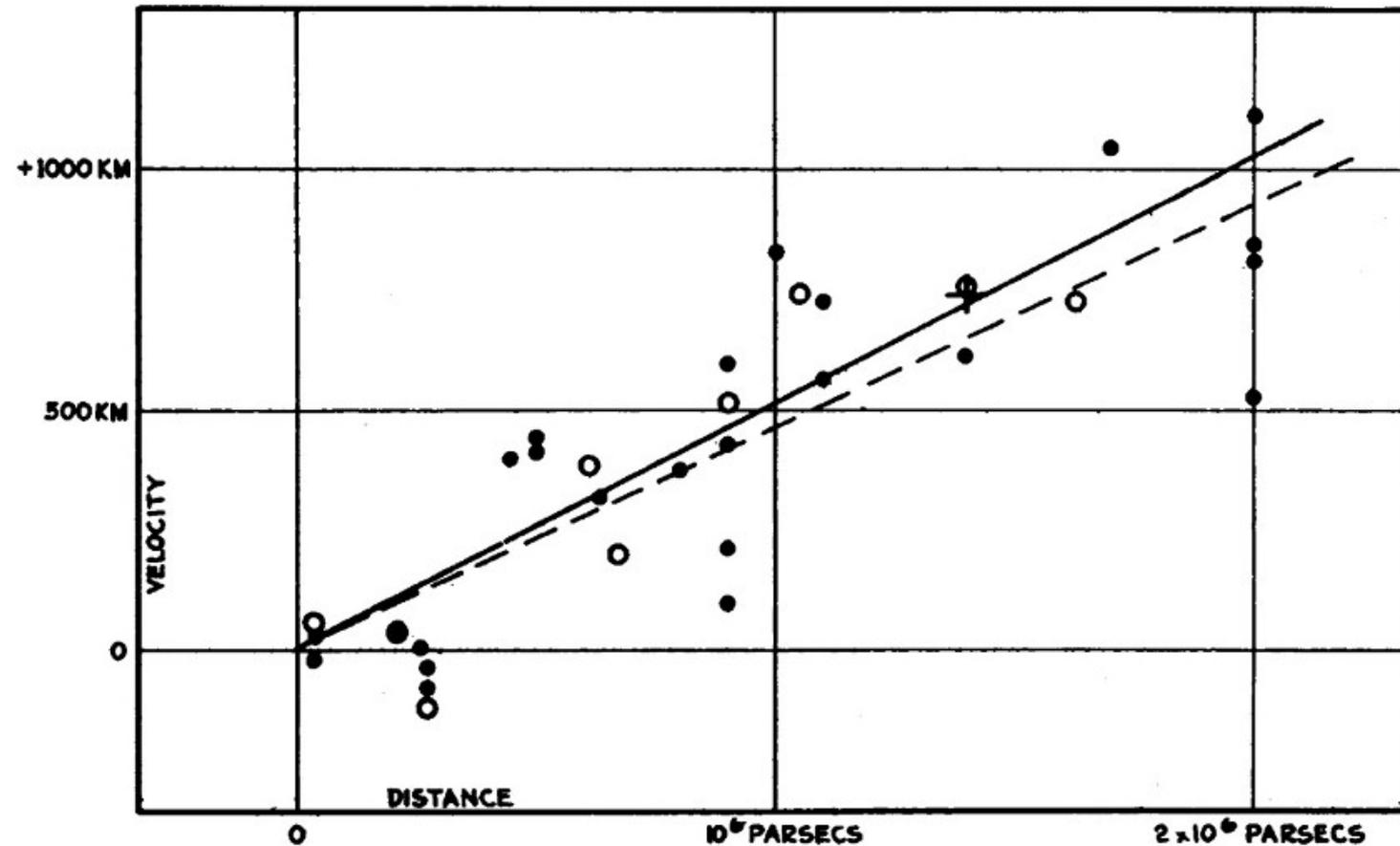


Image: Hubble E, PNAS 1929;15:168-173, 1929 by National Academy of Sciences Of the United States of America

Estimer la valeur de H_0 grâce à l'étude originale de Edwin Hubble à la fin des années 1920. (L'axe des vitesses est donné en km/s, l'axe des distances doit se lire 0, 10^6 et 2×10^6 pc).

Utilisation de l'effet Doppler : calcul de la vitesse d'expansion de l'univers

Mesure de la vitesse des galaxies par effet doppler et de leur distance

Graphique de $V_{\text{galaxie}} = H_0 \cdot \text{distance}$

En déduire H_0

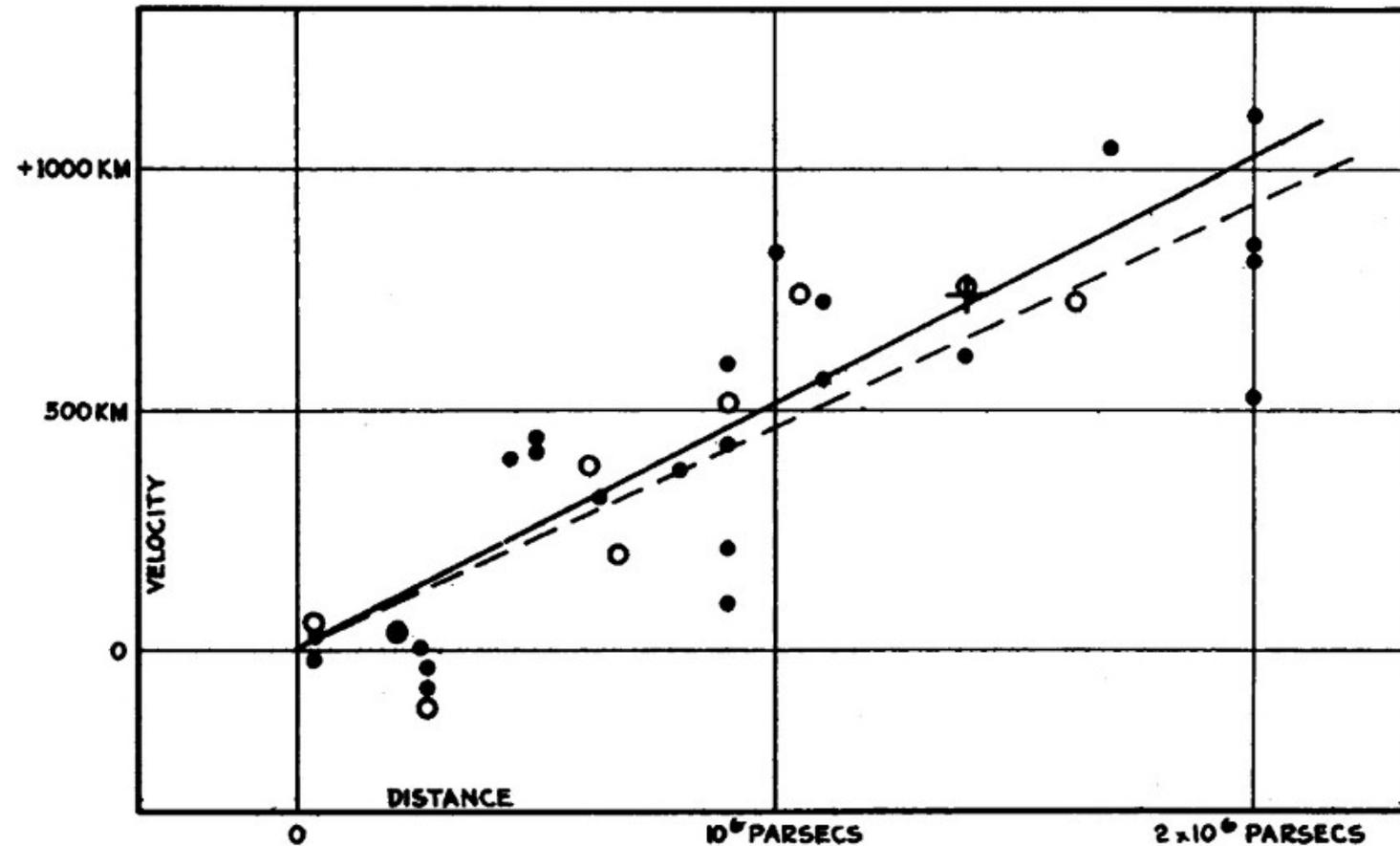


Image: Hubble E, PNAS 1929;15:168-173, 1929 by National Academy of Sciences Of the United States of America

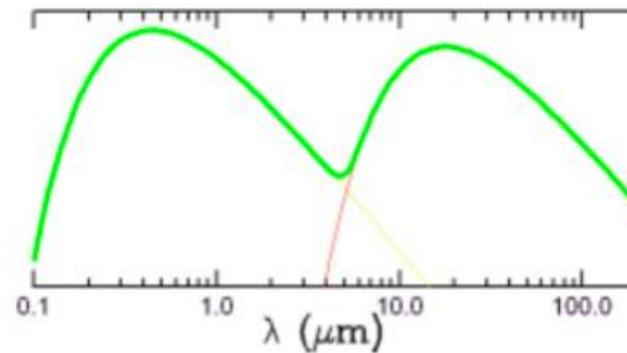
Estimer la valeur de H_0 grâce à l'étude originale de Edwin Hubble à la fin des années 1920. (L'axe des vitesses est donné en km/s, l'axe des distances doit se lire 0, 10^6 et 2×10^6 pc).

500 km/s/Mpc

Exercice 2

Exercice 2 [application] : Température d'une planète

1. La figure suivante schématise le spectre d'émission de la Terre vu depuis l'espace. Expliquer à quoi correspondent les deux « bosses ».



On lira :

$$\lambda_{\text{max1}} = 0,5 \mu\text{m}$$

$$\lambda_{\text{max2}} = 10 \mu\text{m}$$

On voit 2 spectres de corps noir !

Celui du Soleil réfléchi par la Terre,
et celui de l'émission thermique terrestre

Exercice 2

2.1. Les étoiles peuvent être assimilées, avec une très bonne précision, à des corps noirs. Déterminer la température de surface du Soleil.

2.2. À l'aide de la loi de Stefan, indiquer quelle est la puissance émise par le Soleil.

2.1 Il faut utiliser la Loi de Wien : $T_s = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 5780 \text{ K}$

2.2 La puissance est donnée par la Loi de Stefan :

$$\begin{aligned} P_s &= \sigma T_0^4 S_0 = \sigma T_0^4 \cdot 4\pi R_0^2 \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \times (5780)^4 \times 4\pi \times (6,96 \cdot 10^8 \cdot 10^3)^2 \\ &= 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W} \end{aligned}$$

Exercice 2

3.1. On se place à une distance D du Soleil. Quelle est la luminosité reçue du Soleil par unité de surface ?

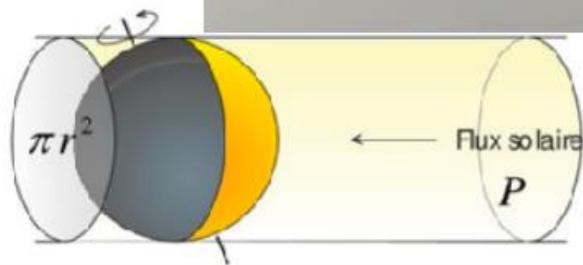
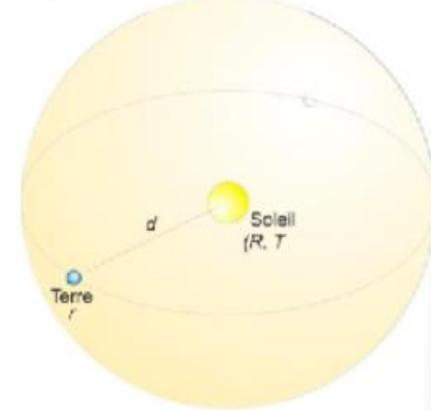
3.2. Vue depuis le Soleil, la Terre apparaît comme un disque de rayon R_T . Ainsi on néglige la courbure de la Terre et on suppose que c'est un disque plat. Quelle est la luminosité reçue sur la surface de la Terre ?

3.1 À la distance D , la luminosité par UdS est : $P_{s(D)} =$

$$\frac{P_s}{4\pi D^2}$$

3.2 La luminosité reçue par la Terre est :

$$\begin{aligned} L_T &= L_s (\text{UdS}) \times \pi R_T^2 = \frac{P_s}{4\pi (150 \cdot 10^6 \cdot 10^3)^2} \times \pi R_T^2 \\ &= \frac{3,85 \cdot 10^{26}}{4 \times (150 \cdot 10^3)^2} \times (6,37 \cdot 10^6)^2 \\ &= 1,74 \cdot 10^{17} \text{ W} \end{aligned}$$



Exercice 2

4. On définit l'albédo A d'un corps comme le rapport de la luminosité par unité de surface réfléchi sur la luminosité par unité de surface reçue : $A = L_r/L_i$. Quelle est alors l'expression de la puissance reçue par la planète ? (On ne demande pas d'application numérique.)

La Terre réfléchit une partie de la luminosité reçue à hauteur de $A=30\%$.

La puissance reçue effectivement est donc : $P_{in} = L_T \cdot (1 - A)$

5. En supposant que la Terre est un corps noir, exprimer la puissance émise par la Terre.

On utilise de nouveau la Loi de Stefan : $P_{out} = \sigma T_F^4 4\pi R_F^2$

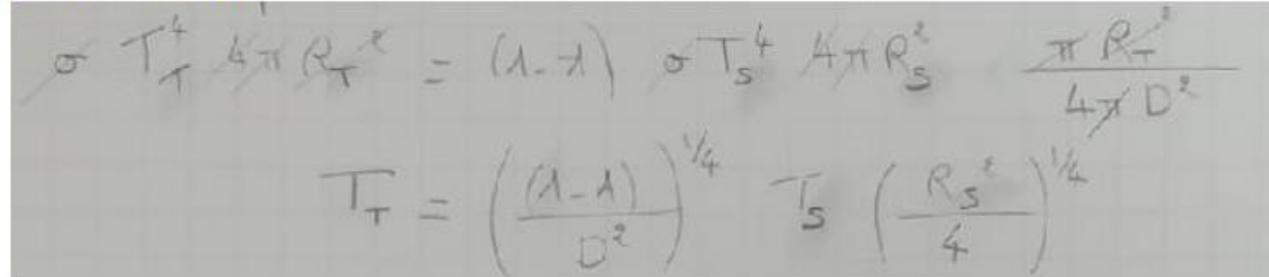
Exercice 2

6.1. La planète étant à l'équilibre thermique (Luminosité absorbée = Luminosité réémise), montrer que l'on a la relation suivante : $T_T = C * ((1-A) / D^2)^{1/4}$ où C est une constante à déterminer (valeur et unité) et D est exprimée en unité astronomique.

6.2. Faire l'application numérique. Comparer à la température observée de la Terre.

6.1 À l'équilibre, $P_{in} = P_{out}$

donc :



The image shows a handwritten derivation of the equilibrium temperature equation. It starts with the equation $\sigma T_T^4 4\pi R_T^2 = (1-A) \sigma T_S^4 4\pi R_S^2 \frac{\pi R_T^2}{4\pi D^2}$. The $4\pi R_T^2$ terms cancel out, leaving $T_T^4 = (1-A) T_S^4 \frac{R_S^2}{4D^2}$. Taking the fourth root of both sides yields the final equation: $T_T = \left(\frac{(1-A)}{D^2}\right)^{1/4} T_S \left(\frac{R_S^2}{4}\right)^{1/4}$.

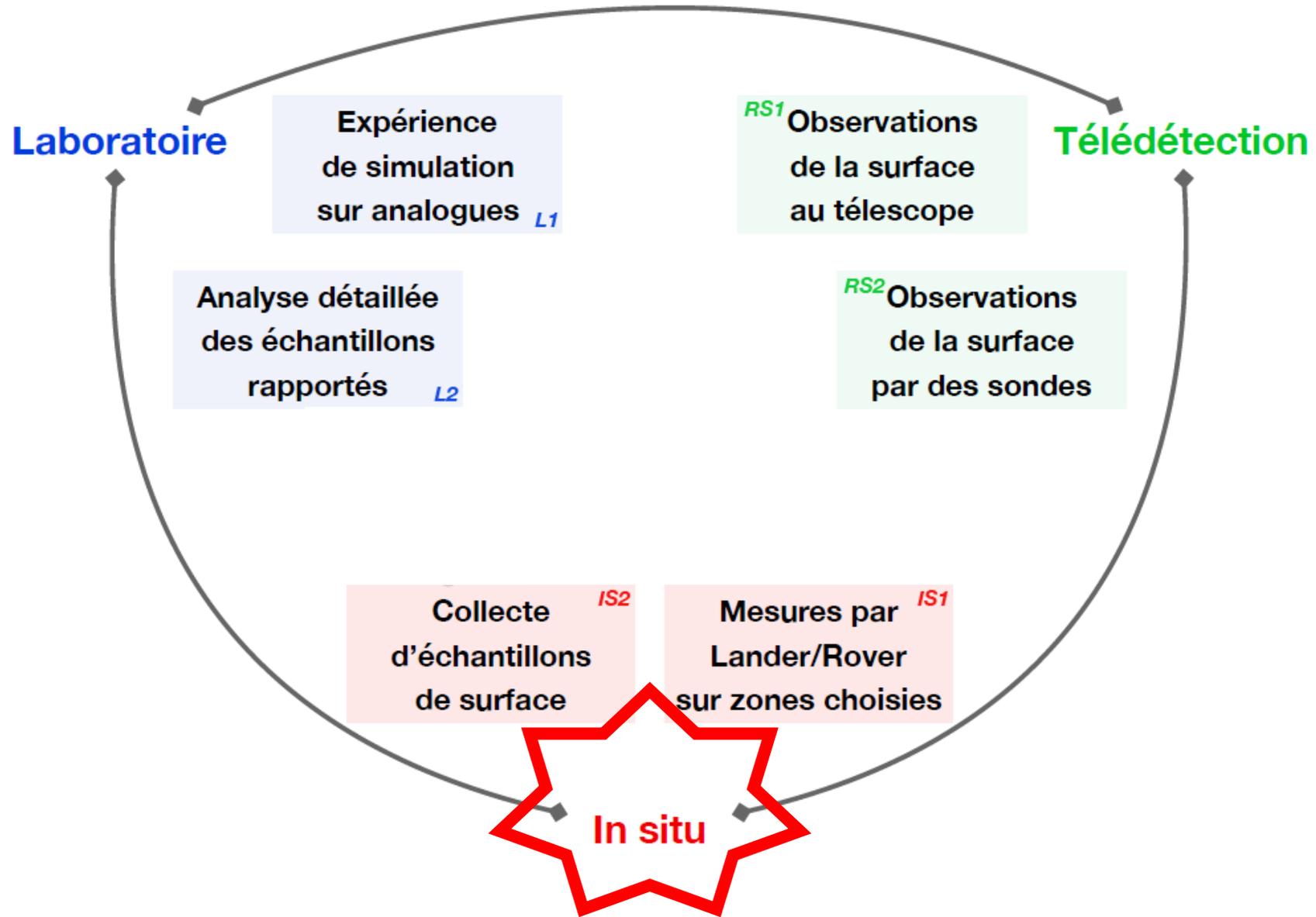
et la constante est : $c = T_S \left(\frac{R_S^2 (U.A.)}{4}\right)^{1/4} = 278,20 \text{ K m}^{1/2}$

6.2 Application Numérique : $T_{eqT} = 254,47^\circ\text{K} = -18^\circ\text{C}$

Or la Loi du Corps Noir (Wien) nous donne $T_T = 289^\circ\text{K} = 16^\circ\text{C} !!$

L'effet de serre réchauffe la planète...

D'autre manière d'étudier notre univers



Explorations de corps IN SITU

Intérêt

On accède à des détails beaucoup plus fins.

Certaines mesures sont impossibles depuis la Terre ou l'orbite terrestre !



credit : ESA/DLR/FU Berlin



credit : NASA/JPL-Caltech/MSSS

D'autre manière d'étudier notre univers

